

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA  
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ISAAC VINICIUS DOS SANTOS MORENO  
LEONARDO KLINGENFUS ANTUNES  
VINÍCIUS HENRIQUE BURIOLA**

**ANÁLISE DA QUALIDADE DA ENERGIA EM INSTALAÇÕES  
ELÉTRICAS ALIMENTADAS POR GRUPO GERADOR**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO 2**

**CURITIBA  
2016**

**ISAAC VINICIUS DOS SANTOS MORENO  
LEONARDO KLINGENFUS ANTUNES  
VINÍCIUS HENRIQUE BURIOLA**

**ANÁLISE DA QUALIDADE DA ENERGIA EM INSTALAÇÕES  
ELÉTRICAS ALIMENTADAS POR GRUPO GERADOR**

Trabalho de Conclusão de Curso da Graduação de Engenharia Elétrica, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), como requisito para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Joaquim Eloir Rocha.

**CURITIBA**

**2016**

Isaac Vinicius Dos Santos Moreno  
Leonardo Klingenfus Antunes  
Vinicius Henrique Buriola

## **ANÁLISE DA QUALIDADE DA ENERGIA EM INSTALAÇÕES ELÉTRICAS ALIMENTADAS POR GRUPO GERADOR**

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Eletricista, do curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 12 de Dezembro de 2016.

---

Prof. Dr. Emerson Rigoni  
Coordenador do Curso  
Engenharia Elétrica

---

Profa. Ma. Annemarlen Gehrke Castagna  
Responsável pelos Trabalhos de Conclusão de Curso  
de Engenharia Elétrica do DAELT

### **ORIENTAÇÃO**

---

Prof. Dr. Joaquim Eloir Rocha  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Orientador

### **BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Joaquim Eloir Rocha  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Prof. Esp. Antonio Ivan Bastos Sobrinho  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Prof. Dr. Luiz Erley Schafranski  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

A folha de aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradecemos a Deus, primeiramente, pois sem sua força não teríamos conseguido chegar até aqui e terminar nosso curso. Agradecemos a Ele também, por todas as coisas que aprendemos, e por ter nos ajudado a superar todas as dificuldades que encontramos em cada dia destes cinco anos de graduação.

À nossa família, pela confiança, motivação, paciência e amor incondicional, por terem feito o possível e o impossível para nos permitirem estudar, por respeitarem nossas decisões, e por sempre acreditarem em nós, nunca deixando que as dificuldades que tínhamos desmoronassem nossos sonhos.

Aos nossos amigos, pela força, pelas ótimas histórias vividas nas salas e corredores da UTFPR (o que ajudou a tornar a vida acadêmica muito mais divertida), e pela amizade incrível que criamos.

A todos os nossos professores, por nos ensinarem e terem a paciência conosco, tirando dúvidas e corrigindo erros muitas vezes triviais.

Ao nosso orientador Joaquim Eloir Rocha, pelo seu empenho, paciência e credibilidade.

Ao professor Antônio Ivan Bastos Sobrinho, por ter nos ajudado a melhorar o nosso conhecimento em língua portuguesa e por nos ajudar em nossa monografia.

À equipe da empresa GaeSan Engenharia, por ter nos emprestado o aparelho analisador de energia, que sem ele nossa monografia jamais sairia. E ao Supermercado Gasparin, por nos permitir instalar esse aparelho, e nos dar todo apoio que necessitávamos.

## RESUMO

MORENO, Isaac V. S.; ANTUNES, Leonardo K.; BURIOLA, Vinícius H. **Análise da qualidade da energia em instalações elétricas alimentadas por grupo gerador.** 2016. 101 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação – Curso de Engenharia Elétrica). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2016.

O presente trabalho tem como objetivo principal analisar a energia elétrica fornecida pela concessionária, e por grupos motores geradores responsáveis por alimentar instalações comerciais no horário de ponta da concessionária. Estudo referente a regulador de tensão, de velocidade, harmônicos e características de geradores serão abordados e usados para que seja possível entender as interferências na rede da concessionária e no gerador. Os dados serão obtidos através de amostra real, por meio da utilização de aparelho de medição durante a alimentação da planta pela concessionária, e pelo gerador, obtendo dados referentes às grandezas elétricas como frequência, variação de tensão, fator de potência e distorções harmônicas. Condições de operação, como cargas utilizadas, parâmetros e fatores que influenciam nestes parâmetros serão avaliados, a fim de verificar se os parâmetros apresentam a qualidade adequada. Com o uso de gráficos fornecidos pelo instrumento utilizado, a comparação dos dados foi realizada separadamente; porém, buscando relacionar a interferência entre eles, é fornecido ao final o parecer referente a utilização de grupos motores geradores.

Palavras chaves: análise, qualidade de energia, energia elétrica, concessionária, grupo gerador.

## ABSTRACT

MORENO, Isaac V. S.; ANTUNES, Leonardo K.; BURIOLA, Vinícius H. **Analysis of the quality of energy in electrical installations fed by generator set.** 2016. 101 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação – Curso de Engenharia Elétrica). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2016.

The main objective of this paper is to analyze the electric power supplied by the utility, and by generator groups responsible for feeding commercial facilities at the utility's peak hours. Study regarding voltage regulator, speed, harmonics and generator characteristics will be addressed and used so that it is possible to understand the interferences in the utility grid and of the generator. The data will be acquired through a real sample, through the use of metering equipment during the feeding of a commercial plant by the concessionaire, and by the generator, obtaining data referring to the electric quantities such as frequency, voltage variation, power factor and harmonic distortions. Operating conditions, with loads used, parameters and factors influencing these parameters will be evaluated, in order to verify if the parameters present the adequate quality. With the use of graphics provided by the equipment used, the comparison of the data was performed separately, however, seeking to relate the interference between them, providing at the end the opinion regarding the use of generator sets.

Key words: analysis, power quality, electricity, concessionaire, generator set.

## LISTA DE SÍMBOLOS E UNIDADES

Hz	hertz
$f_v$	frequência a vazio
$f_x$	frequência num ponto genérico
FD%	fator de desequilíbrio
$I_a$	corrente no induzido
$I_{RMS}$	valor RMS da corrente
$I_h$	corrente harmônica de ordem h
$I_n$	corrente harmônica de ordem n
$I_1$	corrente fundamental
$M_{res}$	momento binário resistente
$P_{mec}$	potência mecânica
$V_h$	tensão harmônica de ordem h
$V_1$	tensão fundamental
$\delta_{máx}$	ângulo máximo da potência
S	potência aparente
R	potência ativa
Q	potência reativa
D	potência de distorção harmônica
$\phi$	ângulo entre potência ativa e potência aparente

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CC	corrente contínua
COPEL	Companhia Paranaense de Energia
DHI	distorção harmônica individual
DHT	distorção harmônica total
FP	fator de potência
GMG	grupo motor-gerador
HP	horse power
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
PID	<i>Proportional Integral Derivate</i>
Prodist	Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional
PU	por unidade
QTA	quadro de transferência automática
RMS	<i>root mean square</i>
RPM	rotações por minuto
RTD's	<i>resistance temperature detector</i>
SD	<i>speed drop</i>
TC's	transformador de corrente
TP's	transformador de potencial
TDD	taxa de distorção de demanda total



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Partes integrantes do gerador.....	21
Figura 2 - Enfraquecimento dos dentes produzido por ranhuras na armadura girante. .....	22
Figura 3 - Esquema de excitação sem escovas.....	25
Figura 4 - Alimentação do regulador de tensão pela bobina auxiliar.....	26
Figura 5 - Alimentação do regulador de tensão pela excitatriz auxiliar. ....	27
Figura 6 - Alimentação do regulador de tensão sem excitatriz auxiliar .....	27
Figura 7 - Esquema de ligação do regulador de tensão sendo alimentado pela bobina auxiliar. ....	29
Figura 8 - Tempo de regulação de tensão .....	30
Figura 9 - Demonstração dos limites dados pelo estator e rotor. ....	33
Figura 10 - Curva de capacidade do gerador da UHE (Salto Caxias) da COPEL.....	34
Figura 11 – Exemplo de curva de capacidade.....	35
Figura 12 - Controle da frequência-potência ativa, feita através do regulador de velocidade convencional. ....	38
Figura 13 - Malha de controle de um grupo motor gerador. ....	43
Figura 14 - Curva característica das variações de velocidade do motor com governador digital, habilitado na função proporcional. ....	44
Figura 15 - Curva característica das variações de velocidade do motor com o uso do governador digital do tipo PID. ....	44
Figura 16 - Forma de onda distorcida. ....	45
Figura 17 - Espectro harmônico de amplitude da tensão. ....	54
Figura 18 - AEMC 8336 ligado ao quadro de transferência automática.....	64
Figura 19 – Gráfico da frequência (concessionária COPEL).....	70
Figura 20 – Gráfico da frequência (gerador). ....	70
Figura 21 – Variação de frequência (gerador).....	71
Figura 22 – Gráfico da tensão de linha (concessionária COPEL). ....	73
Figura 23 – Gráfico da tensão de linha (gerador).....	73
Figura 24 – Queda de tensão de linha registrada às 18 h 17 min. ....	74
Figura 25 - Queda de tensão de fase registrada às 18 h 17 min.....	74
Figura 26 – Gráfico da tensão de fase (concessionária COPEL). ....	75

Figura 27 – Gráfico da tensão de fase (gerador).....	76
Figura 28 – Elevação de tensão de fase (gerador). ....	76
Figura 29 – Queda nos valores de corrente (gerador). ....	77
Figura 30 – Gráfico da corrente de fase (concessionária COPEL).....	78
Figura 31 – Gráfico da corrente de fase (gerador). ....	78
Figura 32 - Queda da corrente no período de almoço.....	79
Figura 33 – Gráfico das potências ativa, reativa e aparente (concessionária). ....	80
Figura 34 – Gráfico das potências ativa, reativa e aparente (gerador).....	80
Figura 35 – Gráfico do fator de potência (concessionária COPEL).....	82
Figura 36 – Gráfico do fator de potência (gerador). ....	82
Figura 37 – Variação do fator de potência (gerador).....	83
Figura 38 – Gráfico do desequilíbrio de tensão de linha (concessionária COPEL). ...	85
Figura 39 – Gráfico do desequilíbrio de tensão de linha (gerador).....	85
Figura 40 – Gráfico da taxa de distorção harmônica da tensão de linha (concessionária). ....	86
Figura 41 – Gráfico da taxa de distorção harmônica da tensão de linha (gerador) ...	86
Figura 42 – Ligações internas do alternador WEG GTA252AI49. ....	88
Figura 43 – Gráfico da taxa de distorção harmônica da tensão de fase (concessionária). ....	90
Figura 44 – Gráfico da taxa de distorção harmônica da tensão de fase (gerador)....	91
Figura 45 – Gráfico da taxa de distorção harmônica da corrente de fase (concessionária). ....	92
Figura 46 – Gráfico da taxa de distorção harmônica da corrente de fase (gerador). 92	
Figura 47 – Variação do THD de corrente (gerador). ....	94
Figura 48 – Distorção harmônica de corrente de 3ª ordem (gerador). ....	95
Figura 49 – Distorção harmônica de corrente de 5ª ordem (gerador). ....	95
Figura 50 – Distorção harmônica de corrente de 7ª ordem (gerador). ....	96

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Levantamento de cargas do supermercado. ....	65
Tabela 2 – Limite de distorção harmônica de corrente para 120 V a 69 kV. ....	68
Tabela 3 – Análise de parâmetros durante variação da figura 21. ....	72
Tabela 4 – Parâmetros antes e depois da queda de corrente.....	77
Tabela 5 – Parâmetros durante variação da figura 37. ....	84
Tabela 6 – Valores médios e máximos para as distorções harmônicas de corrente e TDD (concessionária).....	93
Tabela 7 – Valores médios e máximos para as distorções harmônicas de corrente e TDD (gerador). ....	93

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>14</b>
1.1 TEMA.....	14
1.1.1 Delimitação do tema.....	15
1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS .....	16
1.3 OBJETIVOS.....	17
1.3.1 Objetivo geral .....	17
1.3.2 Objetivos específicos.....	17
1.4 JUSTIFICATIVA.....	18
1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS .....	18
1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO .....	19
<b>2 REVISÃO TEÓRICA.....</b>	<b>20</b>
2.1 INTRODUÇÃO A MÁQUINAS E GERADORES SÍNCRONOS.....	20
2.1.1 Características construtivas.....	20
2.1.2 Tipos de excitação do campo .....	23
2.1.2.1 Gerador com excitação por escovas .....	24
2.1.2.2 Gerador com excitação sem escovas (brushless) .....	24
2.1.3 Regulação de tensão.....	28
2.1.3.1 Tempo de regulação da tensão.....	29
2.1.4 Curva de Capabilidade .....	30
2.1.4.1 Limite térmico do estator .....	31
2.1.4.2 Limite térmico do rotor .....	32
2.1.4.3 Limite de potência mecânica .....	33
2.1.4.4 Limite de estabilidade .....	33
2.1.5 Gerador em conjunto com banco de capacitores .....	34
2.2 REGULAÇÃO DE VELOCIDADE .....	36
2.2.1 Regulação de velocidade em geradores diesel .....	38
2.2.1.1 Governadores mecânicos.....	39
2.2.1.2 Governadores hidráulicos.....	40
2.2.1.3 Governadores eletrônicos.....	40
2.2.1.4 Governadores digitais.....	42

2.2.2	Características de regulação .....	43
2.3	HARMÔNICOS .....	45
2.3.1	Definição de harmônicos .....	45
2.3.2	Características dos harmônicos .....	46
2.3.2.1	Ordem dos harmônicos .....	46
2.3.2.2	Paridade dos harmônicos .....	47
2.3.2.3	Sequência dos harmônicos .....	47
2.3.3	Causas dos harmônicos .....	48
2.3.4	Efeitos dos harmônicos .....	49
2.3.4.1	Efeitos dos harmônicos em motores e geradores .....	49
2.3.4.2	Efeitos dos harmônicos em transformadores .....	50
2.3.4.3	Efeitos dos harmônicos em condutores.....	50
2.3.4.4	Efeitos dos harmônicos em bancos de capacitores.....	51
2.3.5	Indicadores de qualidade harmônica.....	52
2.3.5.1	Distorção harmônica individual.....	52
2.3.5.2	Distorção harmônica total .....	53
2.3.5.3	Taxa de distorção de demanda total.....	53
2.3.5.4	Espectro harmônico.....	54
2.3.6	Fator de potência.....	55
2.3.7	Fontes harmônicas típicas em instalações comerciais .....	55
2.3.8	Fontes harmônicas típicas em instalações industriais .....	56
2.4	VARIAÇÃO DE TENSÃO.....	57
2.4.1	Definição de variação de tensão .....	57
2.4.2	Causas da variação de tensão .....	58
2.4.3	Efeitos da variação de tensão .....	58
2.4.4	Variação de longa duração.....	59
2.4.5	Interrupção .....	59
2.4.6	Variação de frequência.....	60
2.4.7	Desequilíbrio de tensão .....	60
2.5	NORMAS E RECOMENDAÇÕES .....	61
2.5.1	Prodinst - Módulo 8.....	61
2.5.2	IEEE-519 .....	61
2.5.3	IEEE-112 .....	62

<b>3 OBJETO DE ESTUDO .....</b>	<b>63</b>
3.1 FONTE DE ESTUDO .....	63
3.2 CARACTERÍSTICAS DA INSTALAÇÃO.....	64
3.3 LIMITES ESTABELECIDOS POR NORMA .....	66
3.3.1 Prodist - Módulo 8.....	66
3.3.2 IEEE-519 .....	67
3.3.3 IEEE-112 .....	69
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>70</b>
4.1 PARÂMETRO - FREQUÊNCIA.....	70
4.1.1 Exemplo de análise de variação de frequência .....	71
4.2 PARÂMETRO - TENSÃO DE LINHA.....	72
4.3 PARÂMETRO - TENSÃO DE FASE .....	75
4.3.1 Exemplo de análise de elevação de tensão .....	76
4.4 PARÂMETRO - CORRENTE DE FASE.....	78
4.5 PARÂMETRO – POTÊNCIA .....	79
4.6 PARÂMETRO – FATOR DE POTÊNCIA.....	82
4.6.1 Exemplo de análise de variação de fator de potência .....	83
4.7 PARÂMETRO – DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO.....	84
4.8 PARÂMETRO – TAXA DE DISTORÇÃO HARMÔNICA (TENSÃO DE LINHA) .	86
4.8.1 Comparação entre o DHT da concessionária e do gerador.....	87
4.9 PARÂMETRO – TAXA DE DISTORÇÃO HARMÔNICA (TENSÃO DE FASE)...	90
4.10 PARÂMETRO – TAXA DE DISTORÇÃO HARMÔNICA (CORRENTE DE FASE.).....	91
4.10.1 Exemplo de análise de variação de distorção harmônica de corrente.....	94
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>97</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>99</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 TEMA

O consumo de energia elétrica no Brasil ao longo dos últimos anos, vem mantendo um crescimento desde 1990, excluindo-se a época do racionamento de 2001, e a atual conjuntura econômica que se encontra o país. Este aumento do consumo, que, em média, quase dobrou nesse período, vem sendo uma consequência do crescimento no número de domicílios, do setor agropecuário, e do setor industrial, com o emprego de novas tecnologias disponibilizadas. Prova disso é o crescimento constante de aproximadamente 4,4% ao ano, no período de 2001 a 2011. (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2014)

O uso da energia elétrica no setor industrial, comercial, e agrário, pode representar uma grande parcela do custo de produção, principalmente para empresas com alta demanda de potência. Um fator que contribui para os altos gastos com energia elétrica é a utilização da mesma em horários de ponta. Horário de ponta é um período definido por uma concessionária de energia elétrica, de três horas seguidas, entre 17 h e 21 h, em que o consumo de energia elétrica tende a ser o mais elevado no dia. (COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA, 2014)

Indústrias e comércios que possuem processos de produção ou serviços que não podem ser interrompidos, ou em que a interrupção signifique um prejuízo maior que os gastos com o uso de energia elétrica durante o horário de ponta, muitas vezes recorrem à utilização de grupos motores geradores durante esse horário. Grandes centros comerciais que mantêm suas atividades durante o horário de ponta, também utilizam grupos motores geradores para reduzir os gastos com energia elétrica.

No ano de 2015, com o aumento na tarifa da energia elétrica determinado pela ANEEL desde o dia dois de março, e o momento de instabilidade econômica e a crise hídrica vivida pelo Brasil, ocorreu uma expansão no comércio de venda e locação de geradores no país. As duas maiores empresas fabricantes de geradores diesel no Brasil registraram grande expansão nas vendas e consultas. Por exemplo,

a americana *Cummins Power Generation*, obteve um aumento de 20% nas vendas em comparação com o ano de 2013, e um aumento de 40% nas consultas em comparação com o ano de 2014. Esse mercado deve continuar crescendo devido à portaria 414/2015, publicada no dia onze de março de 2015 pelo Ministério de Minas e Energia, que permite a grandes consumidores, como shoppings centers e supermercados, a venda de capacidade de geração temporária de energia para distribuidoras. (ASSOCIAÇÃO..., 2015)

O crescente aumento de consumo de cargas não lineares, como inversores de frequência, lâmpadas com reatores eletrônicos, e computadores, é um fator que deve ser levado em consideração pelo consumidor, quando for utilizar um grupo motor gerador em seu horário de ponta. Cargas não lineares geram distorção na forma de onda da corrente, e, conseqüente, distorção na forma de onda da tensão. Essas distorções podem causar mau funcionamento em aparelhos elétricos. Outros problemas podem existir na instalação, como desequilíbrio das cargas. Estes defeitos na maioria das vezes não são sentidos pelos consumidores quando alimentados pela concessionária, mas quando alimentados pelo seu gerador em horário de ponta, percebem que a qualidade de energia pode não ser satisfatória. Isto se deve a possibilidade de um gerador instalado não ser adequado à carga.

Essa diferença de qualidade na energia fornecida ao consumidor é prejudicial, pois danificará seus aparelhos diminuindo sua vida útil, ou, no pior caso, causando a inutilização dos mesmos. Portanto, assim como o médico necessita de uma pesquisa (consulta) preliminar para diagnosticar uma doença em um paciente, o responsável técnico deve fazer uma pesquisa (estudo) para diagnosticar as causas de um problema relativo à qualidade da energia elétrica. (DECKMANN e POMILIO, 2010)

### 1.1.1 *Delimitação do tema*

O principal enfoque deste estudo, foi a qualidade de energia elétrica apresentada pelos grupos geradores síncronos-motor diesel, estritamente nos horários de ponta, para consumidores cativos da concessionária, já que



consumidores do mercado livre não possui a diferenciação de tarifa e horário. O estudo limitou-se ao âmbito de uma planta comercial, cujo gerador opera no modo 'prime'.

A pesquisa não adentrou em todos os aspectos de qualidade de energia e parâmetros dos geradores - como partida de motores - dando enfoque a parâmetros específicos, como frequência, desequilíbrio de tensões, distorção harmônica, regulação de tensão, e controle de corrente. Devido às limitações do aparelho analisador de energia, não foram abordados parâmetros de qualidade de energia de curta duração como: variações de tensão de curta duração, ruídos, transitórios, e surtos de tensão.

## 1.2 PROBLEMAS E PREMISAS

Quando o fornecimento da energia elétrica é instável, ou as regras de tarifação encarecem o consumo de energia no horário de ponta, o uso de grupos motores geradores torna-se necessário. No entanto, um gerador síncrono, para alimentação isolada, é de pequena potência em relação à energia disponível pela concessionária. Assim, por motivo de escala, esse aparelho é mais sensível ao comportamento das cargas elétricas.

Realizou-se, neste trabalho, uma análise do comportamento das grandezas elétricas fornecidas por geradores síncronos, e verificou-se a qualidade da energia. Analisou-se também, se os indicadores possuíam valores adequados, com o intuito de verificar se as cargas elétricas não eram afetadas em sua vida útil.

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 *Objetivo geral*

Analisar, em uma planta elétrica comercial, a qualidade da energia elétrica fornecida por grupos geradores.

### 1.3.2 *Objetivos específicos*

O projeto teve os seguintes objetivos específicos:

- a) revisar artigos técnicos e manuais para o entendimento do tema;
- b) estudar como o controle da frequência (regulador de velocidade) atua sobre a máquina motriz do gerador síncrono, para manter a frequência em valores aceitáveis;
- c) estudar como o controle da corrente de excitação permite a regulação da tensão de saída do gerador, e o impacto na potência reativa produzida;
- d) abordar os efeitos da poluição harmônica em uma instalação elétrica, e avaliar a diferença quando a instalação é alimentada pela concessionária, e quando é alimentada por um grupo motor gerador;
- e) levantar o inventário das cargas mais importantes presentes na instalação elétrica escolhida, alimentadas pelo gerador síncrono;
- f) registrar o comportamento das grandezas elétricas dos geradores síncronos, através de analisadores de energia, em uma planta comercial;
- g) registrar e analisar o perfil da tensão da planta comercial, quando alimentada pela concessionária, em comparação com a alimentação pelo gerador síncrono;
- h) registrar e analisar o comportamento da frequência do sistema, quando alimentado pelo grupo motor gerador;

i) registrar o desequilíbrio nas tensões da planta comercial quando alimentada pela concessionária, em comparação com a alimentação pelo gerador síncrono;

j) observar se a regulação da tensão proporcionada pelo controle do gerador síncrono, melhora a regulação da tensão da instalação, quando comparado com a alimentação pela concessionária.

#### 1.4 JUSTIFICATIVA

Com o aumento mundial da demanda de potência elétrica nos últimos anos, e a dependência da energia elétrica tendendo a aumentar, a importância de analisar parâmetros que nos dê uma noção exata da qualidade que está sendo entregue ao consumidor, é cada vez maior.

O presente estudo pode ajudar indústrias e comércios que usam, ou pretendem utilizar geradores, a analisar a qualidade de energia fornecida pelo gerador, assim como identificar e evitar consequências em suas plantas, devido a alguma variação dos parâmetros aqui relatados, podendo evitar prejuízos.

A pesquisa ainda poderá contribuir com a sociedade acadêmica, apresentando conhecimentos mais profundos sobre o uso de geradores e seus efeitos, e ainda mostrar-lhes os distúrbios elétricos que podem aparecer, assim como a sua causa.

#### 1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O projeto teve início com a obtenção de uma base em referências bibliográficas confiáveis, como revistas científicas, internet, artigos, normas nacionais e internacionais, gerando uma base de dados consolidada sobre os principais assuntos relacionados ao tema: gerador síncrono e qualidade de energia.

Em conjunto com a busca de conhecimento sobre a área, realizou-se uma análise em uma planta comercial, para estudo da qualidade de energia com o uso de instrumentos eletrônicos, e para coletar e armazenar dados de parâmetros elétricos da energia fornecida pelo gerador e concessionária.

Com a análise das medições dos parâmetros obtidos, como por exemplo tensão, frequência, e taxa de harmônicos, e a associação com o referencial teórico assimilado, foi possível relatar e afirmar algumas considerações finais para a conclusão do projeto desejado.

## 1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho escrito é formado por cinco capítulos. O primeiro capítulo apresenta uma introdução geral sobre o tema proposto, assim como delimita-lo, relatando o problema. Também são abordados os objetivos geral e específico da pesquisa, a justificativa, assim como o método de pesquisa utilizado para o desenvolvimento desse projeto.

As referências bibliográficas sobre qualidade de energia, grupos geradores síncronos, cargas não lineares, reguladores de tensão, são abordadas no segundo capítulo.

No terceiro capítulo é dado enfoque ao desenvolvimento do projeto e a realização dos trabalhos práticos, com o uso de um analisador de energia eletrônico, que mediu os parâmetros desejados.

No quarto capítulo, tendo como base as pesquisas realizadas ao longo do tempo, os dados obtidos através das medições efetuadas, e todo conhecimento no desenvolvimento do projeto, foi realizada a análise desses dados obtidos.

No último capítulo são apresentadas as considerações finais do trabalho, evidenciando a conclusão obtida com o presente estudo.

## 2 REVISÃO TEÓRICA

### 2.1 INTRODUÇÃO A MÁQUINAS E GERADORES SÍNCRONOS

Assim como as máquinas de indução ou de corrente contínua, as máquinas síncronas podem funcionar como motor ou gerador. Atualmente, devido às suas características construtivas e ao seu custo maior, as máquinas síncronas possuem maior aplicação na área de geração, estando presente na maioria das grandes centrais elétricas, ou então em pequenas centrais, tendo como matriz um gerador diesel, convertendo a energia mecânica em elétrica.

#### 2.1.1 *Características construtivas*

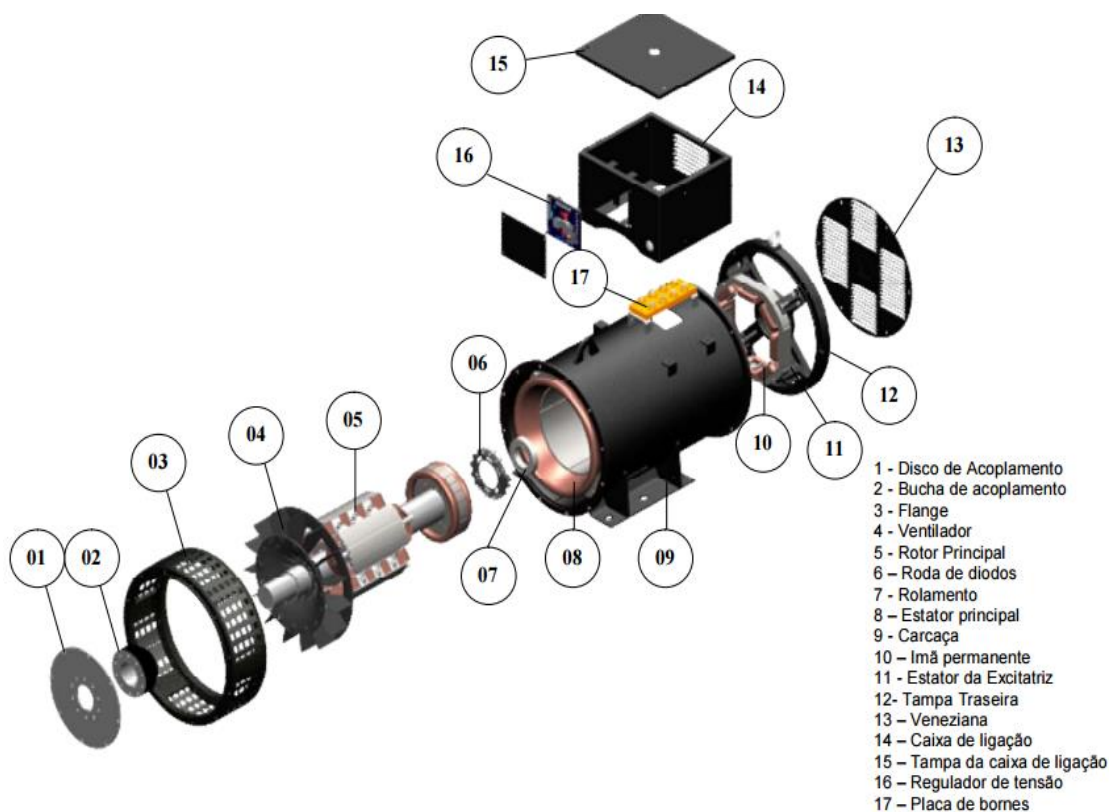
De maneira geral, os geradores apresentam vários componentes, como é possível verificar na figura 1. Porém, são constituídos principalmente pelo estator, pelo rotor, e pelo enrolamento e sistema de excitação, cuja importância nos geradores síncronos é evidente.

**Estator:** parte fixa da máquina que contém um núcleo de ferro ranhurado, onde estão dispostas as bobinas dos enrolamentos da armadura, sendo que o núcleo é a parte magneticamente ativa, envolvida pela carcaça metálica, que serve como proteção mecânica e troca de calor.

**Enrolamentos:** temos dois enrolamentos - o enrolamento de campo, denominado enrolamento de excitação em polos salientes no rotor, que é responsável pela produção do campo magnético de excitação que está no rotor, e o enrolamento de armadura localizado no estator, que gera esta tensão induzida.

**Rotor:** também formado por chapas laminadas, assim como o estator; podem ser de dois tipos: rotor de polos salientes ou de polos lisos. O tipo de polos não interfere no funcionamento, persistindo o mesmo princípio, mudando apenas a forma construtiva, sendo polos salientes para baixas velocidades, e polos lisos para

altas velocidades. Independentemente dessa forma construtiva, os pólos precisam ser alimentados com corrente contínua para criar o campo principal, induzindo tensão no enrolamento estático da armadura.



**Figura 1 - Partes integrantes do gerador**  
 Fonte: WEG, 2016

Neste trabalho, vamos abordar as máquinas CA, e estas apresentam a armadura estacionária e o campo girante, e veremos que apresentam vantagens devido a isso.

- Aumento de resistência dos dentes da armadura.

A armadura sendo girante ou estacionária, pode ter os dentes sofrendo impactos durante a construção ou operação. Quando se trata de uma armadura girante, temos as ranhuras mais profundas, e, assim, os dentes se tornam mais estreitos, e, portanto, fracos. A fim de se evitar mais danos, procura-se ter dentes mais robustos; assim, torna-se vantajoso usar armadura estacionária, já que os dentes da armadura se tornam mais largos e fortes, tornando a máquina mais

robusta. Notamos que em ambos os casos que a base da ranhura é mais estreita que o topo (KOSOW, 1982)

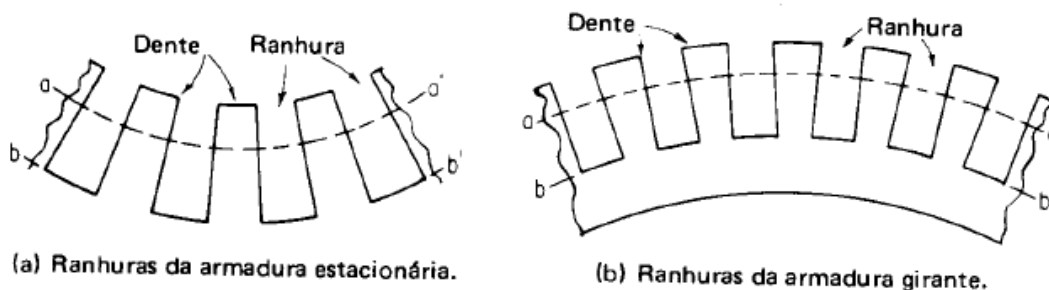


Figura 2 - Enfraquecimento dos dentes produzido por ranhuras na armadura girante.

Fonte: KOSOW (1982)

- Redução da reatância da armadura.

As ranhuras mencionadas no item anterior são importantes, pois são através deles que passam o fluxo mútuo no entreferro criado pela força magneto motriz. Além das vantagens que as ranhuras podem trazer, já mencionadas, uma ranhura de mesma espessura com a presença de armadura estacionária, apresenta uma relutância reduzida ao fluxo. (KOSOW, 1982)

- Isolamento melhorado.

Devido ao peso, tamanho, e a quantidade de isolamento utilizado para isolar um membro rotativo, é mais crítico, menos vantajoso, e difícil, se comparado com um membro estacionário. (KOSOW, 1982)

- Vantagens construtivas.

Em uma estrutura estacionária rígida, torna-se mais fácil a construção das bobinas e interligações entre as fases, e em uma carcaça mais rígida, a fixação do enrolamento da armadura é melhorada. (KOSOW, 1982)

- Número de anéis coletores isolados.

Problemas como o de isolar do eixo os anéis coletores, assim como espaçar os anéis coletores de modo a evitar-se o faiscamento entre eles, são comumente encontrados em armaduras girantes, ao contrário de uma armadura estacionária, na

qual a tensão de fase é isolada facilmente, sendo necessários somente dois anéis coletores para excitar o enrolamento de campo a uma tensão abaixo de 390 V. (KOSOW, 1982)

- Rotor com peso e inércia reduzidos.

Kosow (1982) afirma que o peso e a inércia são diminuídos, pois se sabe que o peso de cobre e isolamento necessário em um enrolamento de campo girante é muito menor; assim, a construção de rotores torna-se mais fácil quando usado enrolamento de campo como elemento.

- Vantagens na ventilação.

É sabido que grande parte do calor produzido está relacionada com o enrolamento de armadura, e o ferro que este é cercado. Este calor gerado pode ser diminuído quando usamos a armadura estacionária, pois é possível ter ductos maiores para uma ventilação forçada pelo meio do ar, ou outra forma de resfriamento. Esta possibilidade deve-se ao fato de serem poucas as limitações dadas pelo núcleo do estator e seu tamanho.

### 2.1.2 Tipos de excitação do campo

O sistema de excitação é importante, pois é a fonte responsável por fornecer a corrente que alimenta o enrolamento de campo (do rotor). A função dos sistemas de excitação é estabelecer o fluxo para gerar a tensão do gerador síncrono. Assim, em consequência, é responsável também pelo fator de potência e pela magnitude da corrente gerada.

A alimentação do enrolamento de campo pode ocorrer por meio de anéis coletores, comutador, escovas, ou sem escovas, estes últimos denominados de sistema de excitação *brushless*. (PINHEIRO,2007)



### 2.1.2.1 Gerador com excitação por escovas

Neste modelo, o enrolamento do rotor é alimentado por correntes CC através de comutador com segmentos em cobre, e assim a tensão de saída para as cargas é retirada do estator.

Esta excitatriz que alimenta este campo do rotor é chamada de excitatriz estática. A tensão de saída do gerador é mantida dentro dos limites nominais do gerador, com o regulador de tensão atuando, verificando e acionando a excitatriz estática quando necessário.

Vantagens: recuperação de tensão com tempo de resposta menor.

Desvantagens: devido às escovas, possui manutenção periódica no conjunto delas e porta escovas, além de não ser aconselhável o uso em cargas sensíveis, assim como, devido ao faiscamento das escovas, é proibido seu uso em áreas classificadas com risco de explosão.

### 2.1.2.2 Gerador com excitação sem escovas (brushless)

Neste tipo de modelo, a potência para excitação do gerador é obtida através de um gerador trifásico de pólos fixos e ponte retificadora rotativa (feito por tiristores ou diodos). A tensão de saída do gerador permanece constante pelo controle do regulador de tensão. O regulador verifica a tensão de saída e alimenta o campo do excitador com a corrente necessária para gerar a tensão alternada, que depois de retificada pela ponte retificadora rotativa, alimenta o campo do gerador. (BAGI, 2016)

No início do processo (escorvamento), o gerador é acionado na rotação nominal. As partes de ferro do gerador retém certo nível de indução remanescente, mesmo quando a corrente de excitação é nula. A tensão gerada, apenas pela indução remanescente, normalmente é superior a 5 V, suficiente para sensibilizar a excitatriz do gerador. (BAGI, 2016)

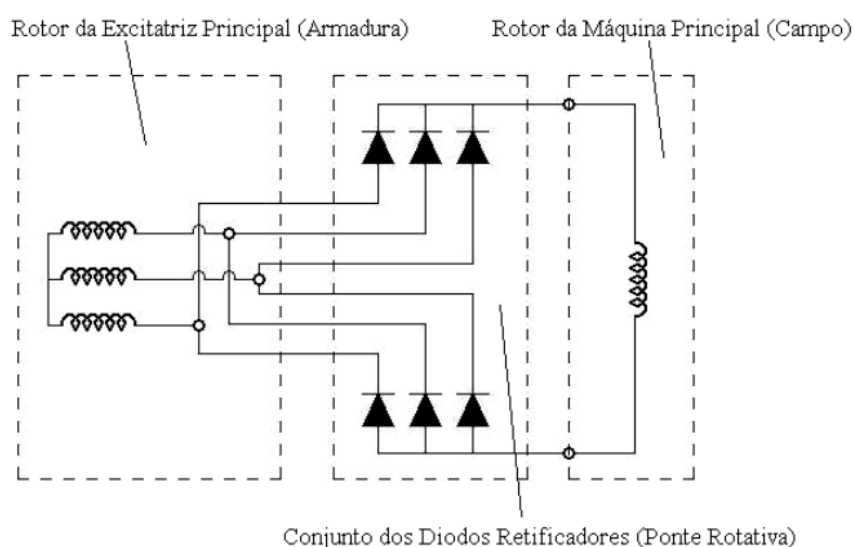
O excitador fornece a potência de excitação e o regulador de tensão (eletrônico) apenas executa o controle do gerador, para manter a tensão nos terminais constante para qualquer nível de carga e fator de potência. (BAGI, 2016)

Esse tipo de modelo (brushless), dispensa o uso de escovas, porta-escovas, ou qualquer outro sistema mecânico de contato, pois a interação entre campo e armadura do gerador e excitador é feito pelo campo magnético. (BAGI, 2016)

Vantagens: não utilizam escovas e porta-escovas, não intruduz interferencias geradas pelo mau contato, introduz menor interferencia devido ao chaveamento do tiristor do regulador comparado com o tiristor da excitatriz, requer manutenção reduzida (solicitando cuidados apenas na lubrificação dos enrolamentos), e admite com facilidade o controle manual. (BAGI, 2016)

Desvantagens: esse modelo possui um tempo de resposta mais lento (devido ao campo do excitador); a detecção de defeitos deste modelo é mais trabalhosa e é cerca de 10 % mais cara. (BAGI, 2016)

Na figura 3 temos o esquema citado do gerador sem escovas (*brushless*).



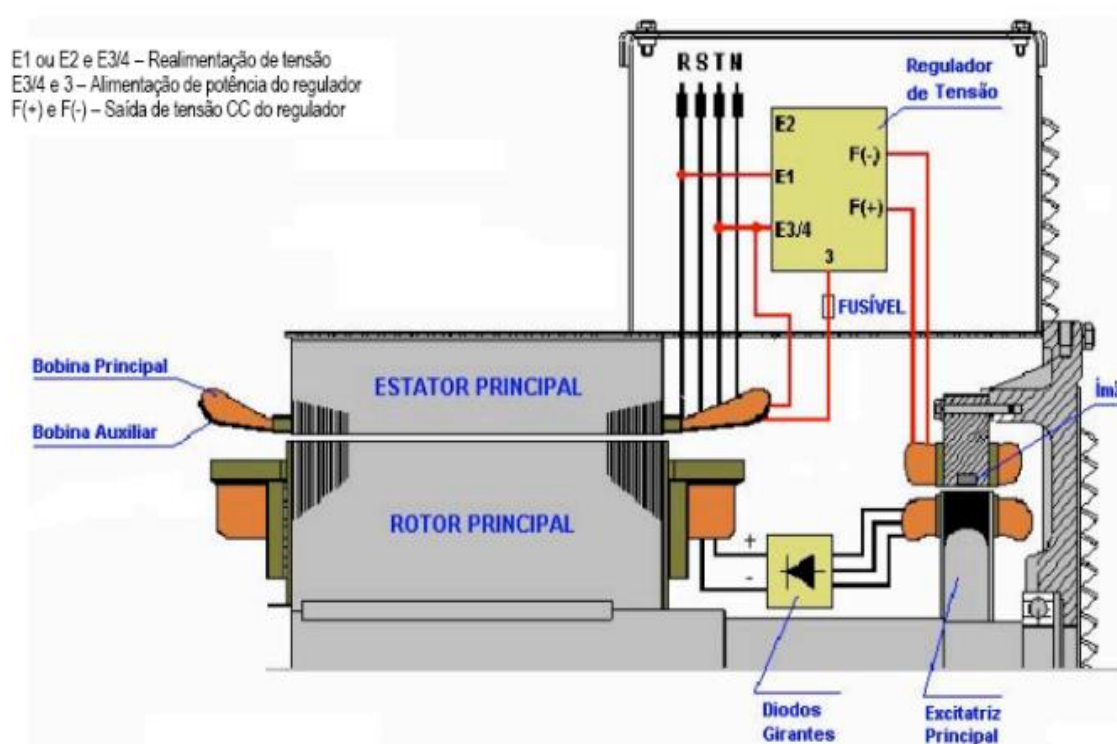
**Figura 3 - Esquema de excitação sem escovas**  
**Fonte: PINHEIRO, 2007**

Nos geradores do tipo brushless, o que define o tipo de excitação é a maneira da qual provém a potência para a excitação, ou seja, a alimentação do regulador de tensão. Esta excitação pode vir de três formas:

- alimentação através de bobina auxiliar;
- alimentação através de excitatriz a ímãs permanentes;
- alimentação sem excitatriz auxiliar pelo próprio enrolamento da armadura, através de tapes ou via TP's.

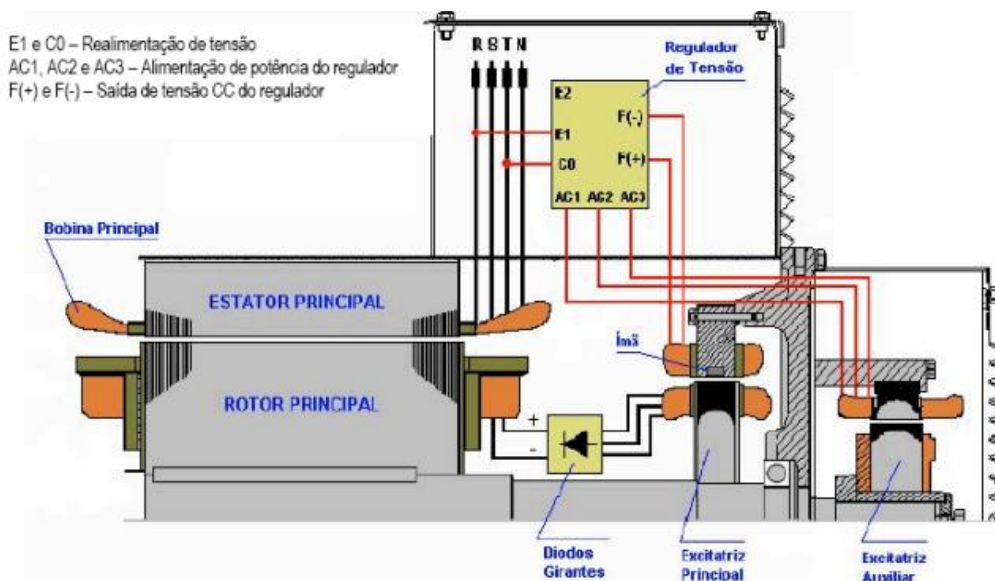
Alimentação com bobina auxiliar: alojado em algumas ranhuras do estator principal, este conjunto auxiliar de bobinas funciona como fonte de potência independente para o regulador de tensão, que recebe esta tensão alternada, retifica, e regula, alimentando o campo da excitatriz principal. (PINHEIRO,2007)

Na figura 4, temos a representação desse modelo.



**Figura 4 - Alimentação do regulador de tensão pela bobina auxiliar.**  
 Fonte: WEG, 2016

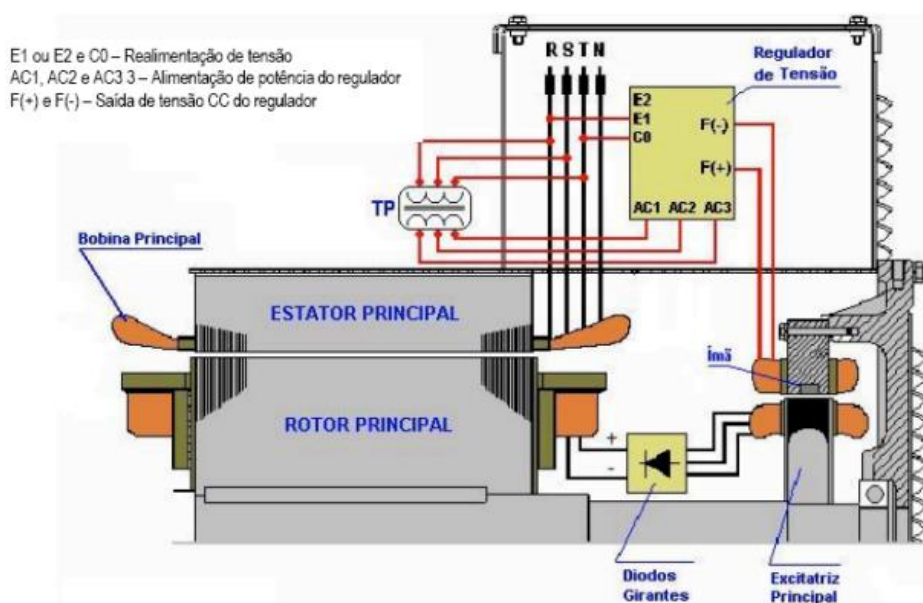
Alimentação através de excitatriz a ímãs permanentes: o funcionamento permanece o mesmo, porém com esta excitatriz auxiliar que alimenta o regulador de tensão. Na figura 5 temos a representação.



**Figura 5 - Alimentação do regulador de tensão pela excitatriz auxiliar.**  
Fonte: WEG, 2016

Alimentação sem excitatriz auxiliar: a alimentação acontece pelo próprio enrolamento de armadura da máquina através de tapes (em baixa tensão), ou TP's (em alta tensão), ou então a própria energia da rede quando disponível. De forma clara, o regulador de tensão é alimentado pela própria tensão de saída do gerador, porém usa-se um transformador para adequar à tensão de entrada do regulador e um circuito retificador a diodos girantes. (PINHEIRO, 2007)

Na figura 6, temos a representação.



**Figura 6 - Alimentação do regulador de tensão sem excitatriz auxiliar**  
Fonte: WEG, 2016

### 2.1.3 Regulação de tensão

A regulação de tensão pode ser definida como a variação percentual da tensão nos terminais do gerador com a variação da carga, com corrente de carga zero até a máxima, mantendo a velocidade e a excitação do campo constantes. Assim temos a equação 1 a seguir:

$$RT(\%) = (V_{\text{sem carga}} - V_{\text{com carga}}) / V_{\text{sem carga}} \quad (1)$$

Quando a tensão de saída não é constante, ocorrem variações de tensão, e assim tornam-se necessários aparelhos automáticos de regulação de tensão para regular estas variações de tensão na saída, através do aumento da corrente de campo. (PINHEIRO, 2007)

O regulador de tensão é eletrônico e automático. Possui a função de supervisionar a tensão de saída do gerador e mantê-la constante, através do ajuste da excitatriz, para que esta aumente ou diminua a corrente de excitação, de modo que a tensão gerada e a potência reativa variem de forma desejada, para qualquer solicitação de carga. O regulador retifica a tensão trifásica que o alimenta proveniente de uma das formas de excitação citadas anteriormente. Esta tensão retificada é levada até o enrolamento de campo da excitatriz principal. (PEREIRA, 2016)

É possível ver um esquema de ligação de um regulador alimentado por bobina auxiliar na figura 7.

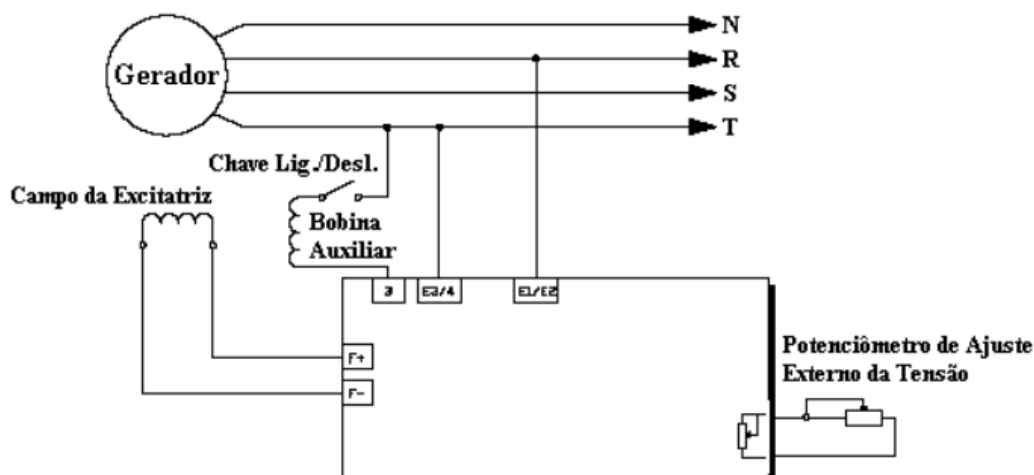


Figura 7 - Esquema de ligação do regulador de tensão sendo alimentado pela bobina auxiliar.  
Fonte: PINHEIRO, 2007

### 2.1.3.1 Tempo de regulação da tensão

Podemos entender como tempo de regulação, ou então o tempo de resposta, como o tempo desde o início da ocorrência da variação de tensão até o momento em que a tensão volta ao intervalo de tolerância estacionária e permanece na mesma.

Na figura 8 a seguir, temos o tempo de resposta da regulação da tensão entre os geradores com escovas e sem escovas. Observa-se que realmente os geradores brushless, possuem o tempo de resposta mais lento, porém, controladores de velocidade digitais para motores diesel compensam essa desvantagem, e devido a isso, os geradores brushless são mais populares. (PIVETA, 2010)

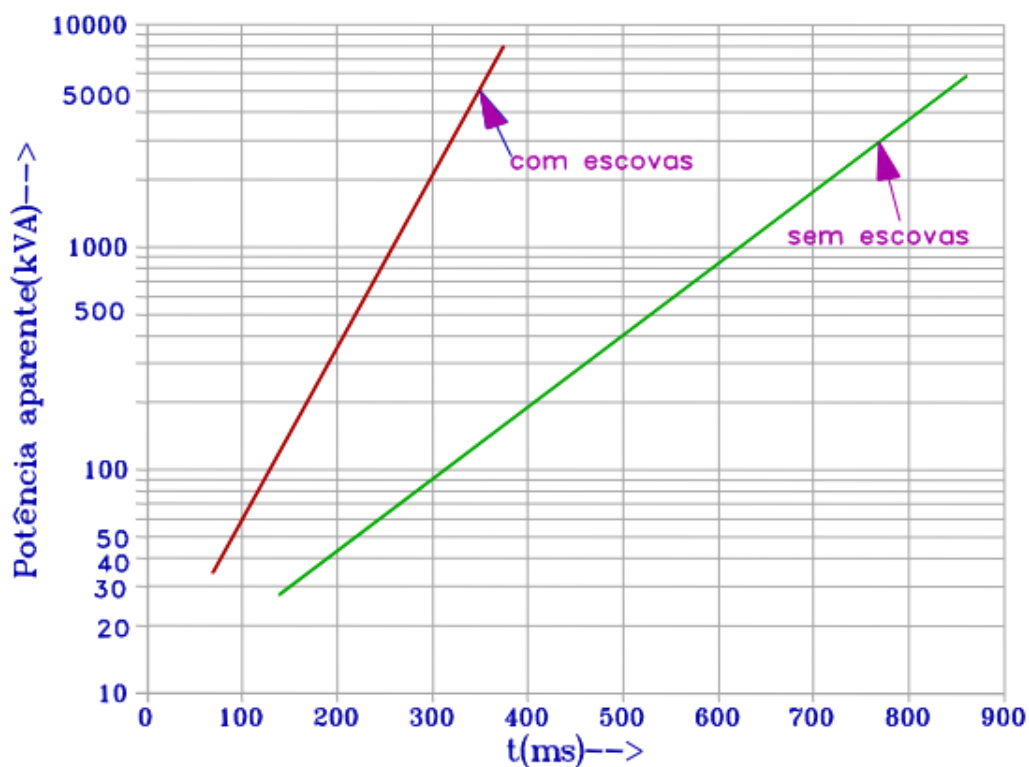


Figura 8 - Tempo de regulação de tensão  
Fonte: WEG, 2016

#### 2.1.4 Curva de Capabilidade

A operação de máquinas síncronas, sendo neste caso como um gerador, é limitada por alguns fatores que interferem diretamente na vida útil e no funcionamento do gerador. Um exemplo são as perdas decorrentes do carregamento da máquina, ou também conhecidas como perdas no ferro e cobre ( $I^2R$ , histerese, e correntes parasitas). Elas se manifestam através da elevação da temperatura, podendo causar degradações e/ou diminuindo a vida útil do isolamento. (SILVEIRA, 2011)

Estes limites já são pré-estabelecidos no projeto da máquina, com cada máquina possuindo limites diferentes, e sendo demonstrados através de um gráfico, chamado 'curva de capacidade' ou capacidade.

A curva de capacidade consiste em um meio de representar os limites operacionais do gerador, demonstrando como o gerador pode ser operado, com fornecimento de potência ativa e reativa, e verificar se estes limites estão sendo

respeitados. É um método gráfico no qual temos um diagrama formado por dois eixos: um eixo representando a potência ativa da máquina, e outro eixo a potência reativa, sendo geralmente expressas em p.u. da potência aparente nominal do gerador. O eixo que representa a potência reativa é dividido em dois trechos, devido ao gerador operar com fatores de potência indutivos e capacitivos, trecho chamado sobre-excitação, quando opera com fator de potência capacitivo, e trecho sub-excitação, operando com fatores de potência indutivos. (BENEDITO, 2016)

Como são vários fatores limitantes para a máquina, temos que a curva da capacidade é formada através de um conjunto de curvas que representam estes fatores. Em resumo os fatores que limitam o campo de operação do gerador são:

- limite térmico do estator.
- limite térmico do rotor.
- limite de potência mecânica.
- limite de estabilidade.
- limite de excitação mínima.

#### 2.1.4.1 Limite térmico do estator

Trata-se curva da corrente no estator que indica a elevação da temperatura do enrolamento estático através das perdas Joule (ou ôhmicas) presentes no circuito da armadura, causada pela existência da passagem da corrente de armadura na resistência de armadura ( $R_a$ ). Perdas calculadas por:

$$P = R_a \times I^2 \quad (2)$$

Os geradores geralmente são equipados com RTD's (*resistance temperature detector*), que detectam a elevação da temperatura, e avisam o operador que o limite foi atingido. Gráficamente temos um arco de círculo centrado na origem, e raio proporcional à potência aparente nominal (S). (BENEDITO, 2016)



### 2.1.4.2 Limite térmico do rotor

Curva que retrata a limitação de perdas no cobre devido também a elevação da temperatura no enrolamento do rotor. Estas perdas são diretamente proporcionais ao quadrado da corrente de excitação (ou de campo); assim, este limite é controlado normalmente pela corrente de excitação. As perdas são dadas por:

$$P = R_f \times I_f^2 \quad (3)$$

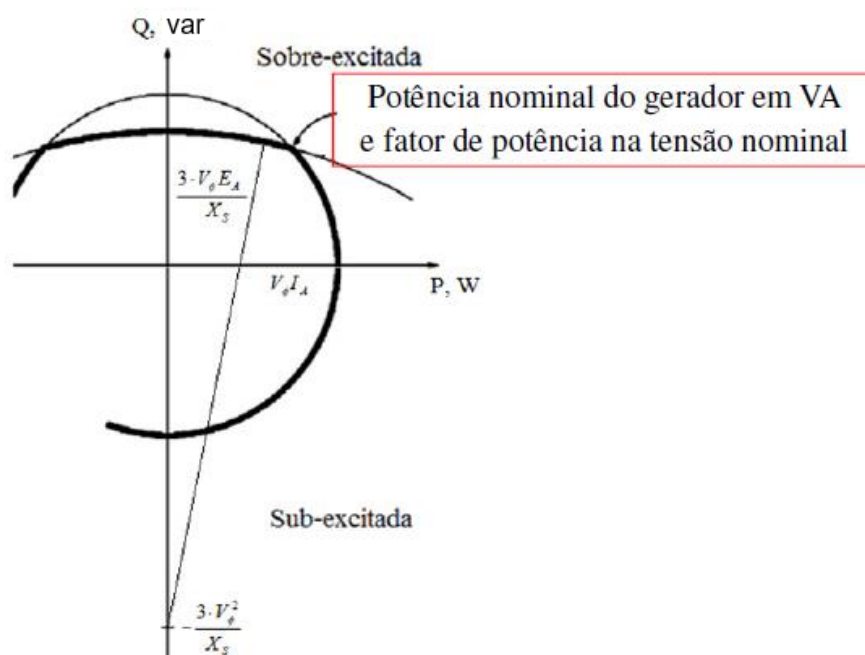
Este limite, em termos de curva de capacidade, é representado por um arco de círculo, o qual terá centro e raio dado pelas equações abaixo e representado na figura 9:

Centro:

$$P = 0 \quad Q = -\frac{3 \cdot V \phi^2}{X_s} \quad (4)$$

Raio:

$$r = \frac{3 \cdot V \phi \cdot E_a}{X_s} \quad (5)$$



**Figura 9 - Demonstração dos limites dados pelo estator e rotor.**  
**Fonte: BENEDITO, 2016.**

#### 2.1.4.3 Limite de potência mecânica

Limitação imposta pela potência máxima mecânica através do eixo, que o gerador pode receber da turbina. Este limite é dado por um valor máximo de potência ativa gerada pela máquina, podendo ser mais ou menos restritivo que o limite imposto pelo aquecimento da armadura. (RAGNEV, 2005)

Graficamente, dado por uma reta paralela ao eixo da potência reativa, indicando a potência ativa máxima, encontrada pela energia mecânica no eixo, descontando as perdas, ou seja, teremos a energia elétrica fornecida ao sistema.

#### 2.1.4.4 Limite de estabilidade

É a limitação da potência do gerador em função do ângulo de potência ( $\delta_{\text{máx}}$ ), geralmente menor que  $90^\circ$ ; quando se torna maior que  $90^\circ$ , a fim de obter uma potência maior que a potência máxima, ou devido a uma falha, irá ocorrer na

verdade perda da potência fornecida, e a máquina se torna instável, e ocorre a perda do sincronismo.

Abaixo, na figura 10, temos a curva de capacidade de um gerador, com todos os limites e suas curvas que foram citados.

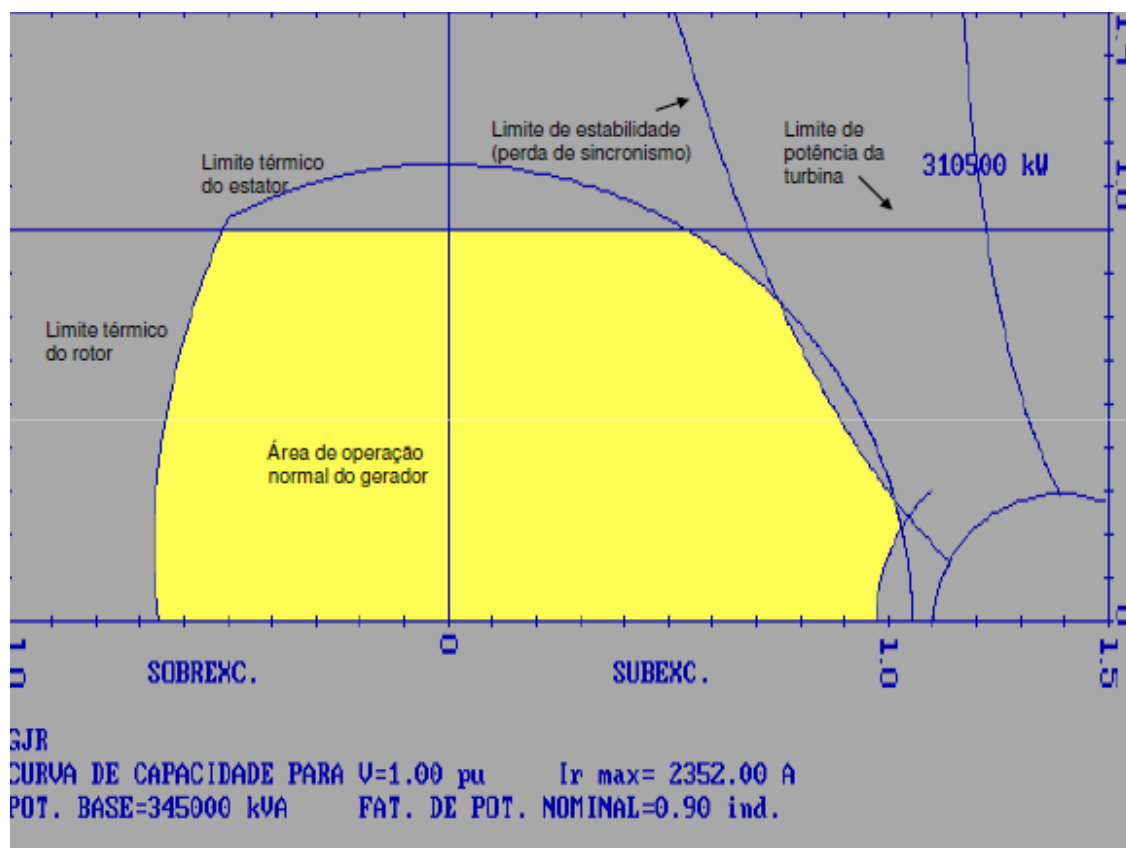
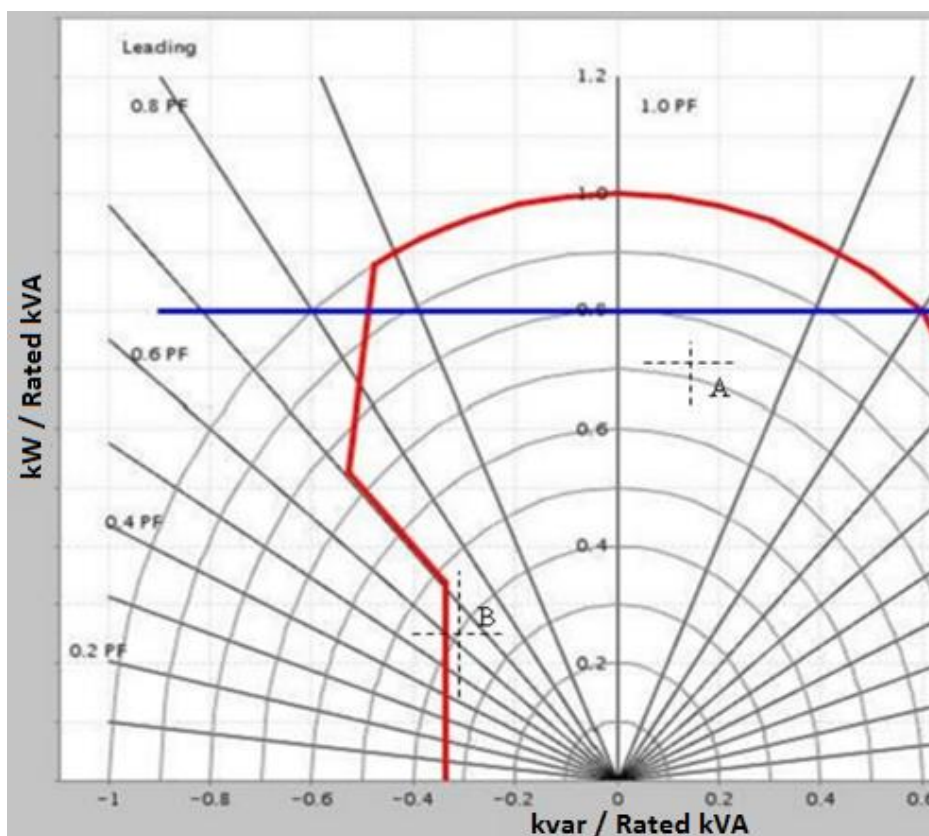


Figura 10 - Curva de capacidade do gerador da UHE (Salto Caxias) da COPEL.  
Fonte: BENEDITO, 2016.

### 2.1.5 Gerador em conjunto com banco de capacitores

Os geradores, quando utilizados, dependem da energia reativa consumida (indutiva) ou fornecida (capacitiva) pela carga, interferindo nas características de operação. (STAROSTA, 2011)

Na figura 11, temos a curva de capacidade de um gerador. É possível ver o regime de operação normal do gerador limitado pelas curvas azul e vermelha.



**Figura 11 – Exemplo de curva de capacidade**  
**Fonte: STAROSTA, 2011.**

Temos no gráfico representado dois pontos: 'A' e 'B'; a diferença entre os pontos é que no ponto B foi diminuída em 60% a carga normal, mantendo o fator de potência e a mesma quantidade de reativo injetado, ou seja, sem que o banco de capacitor acompanhe esta variação, pela própria inércia e pelo seu tempo de resposta.

Conforme Starosta (2011) afirma, esta segunda situação é considerada o limite de operação do gerador, pois caso a carga diminua mais de 60% dos valores originais, sem que aconteça o acompanhamento por parte do banco de capacitor, o gerador será desligado pelo seu sistema de excitação. Portanto, caso o sistema de compensação não tenha velocidade para acompanhar a variação da carga, o banco deve ser desligado quando o gerador é ligado, pois pode não atender os limites estabelecidos pela curva mostrada acima.

## 2.2 REGULAÇÃO DE VELOCIDADE

Quando uma carga é ligada ao gerador, inicialmente em vazio, com tensão e velocidade nominal, a corrente no estator  $I_a$ , dá lugar a um binário resistente  $M_{res}$ , no eixo da máquina síncrona. Este tem sentido oposto ao do movimento, pelo que tende a desacelerar o rotor.

Dado que a frequência é proporcional à velocidade do rotor, a mesma irá baixar. Este efeito é corrigido aumentando o binário motor da máquina primária. Ao aumento do binário motor corresponde um aumento da potência mecânica.

A proporcionalidade entre frequência e velocidade citada é descrita pela equação 6.

$$N_m = \frac{120 \times f}{P} \quad (6)$$

sendo:

$N_m$ : é velocidade mecânica da máquina síncrona em rpm;

$f$ : é a frequência elétrica dado em Hz;

$P$ : é o número de pólos.

A equação acima é uma igualdade empírica, pois foi determinada em diversas observações e experiências de profissionais da área, onde conseguiu relacionar a velocidade do campo girante da máquina síncrona com sua velocidade mecânica, relacionada com o número de pólos magnéticos.

Foi notado que o campo elétrico girante percorre uma volta a cada ciclo, na mesma velocidade da frequência elétrica que está submetido, mas a sua velocidade mecânica variava em relação ao número de pólos elétricos da máquina, o que acabou determinando a seguinte igualdade:

$$N_m = \frac{2 \times N_s}{P} \quad (7)$$

Onde:

$N_m$ : é velocidade mecânica da máquina síncrona, neste caso, em Hz;

$N_s$ : é velocidade do campo elétrico girante em Hz;

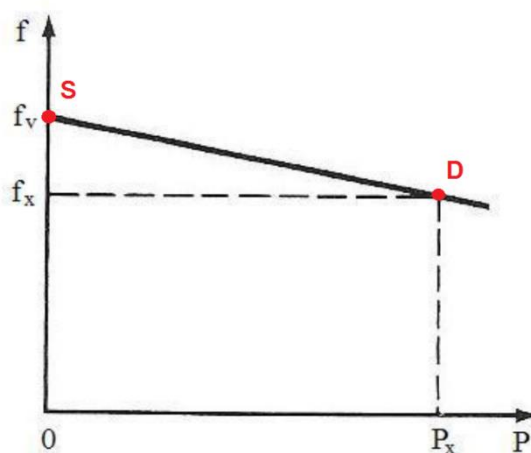
$P$ : é o número de pólos.

Pela dificuldade em analisar e compreender a velocidade mecânica da máquina síncrona em Hz, transformaram as unidades para determinar essa velocidade em rpm, e como a velocidade do campo girante é a própria frequência que a máquina síncrona está submetida, substituiu  $N_s$  por  $f$  na equação, chegando na equação 6 citada através do equacionamento abaixo.

$$N_m = \frac{2 \times N_s}{P} = \frac{2 \times 60 \times f}{P} = \frac{120 \times f}{P} \quad (8)$$

Em termos energéticos, a potência ativa fornecida pelo gerador, igual à potência ativa requerida pela carga, é assegurada pela máquina primária que aumenta o binário mecânico, desenvolvido para compensar o aumento do binário resistente,  $M_{res}$ . Esta aspiração é, na prática, assegurada por reguladores de velocidade. Regulando a velocidade é possível controlar a potência mecânica  $P_{mec}$  que é necessária para compensar o binário resistente  $M_{res}$ . (ALMEIDA e CATALÃO, 2016)

Os reguladores de velocidade atuam de modo a manter a velocidade do aparelho, praticamente constante e linear, independente da potência requerida do gerador. Na verdade, os reguladores de velocidade não fixam o valor da velocidade: estes permitem um pequeno decréscimo da velocidade do aparelho à medida que aumenta a potência fornecida, como se observa na figura 12. (ALMEIDA e CATALÃO, 2016)



**Figura 12 - Controle da frequência-potência ativa, feita através do regulador de velocidade convencional.**

Fonte: ALMEIDA e CATALÃO, 2016.

O declive da reta 'SD' é de aproximadamente 2 a 4 % podendo ser determinada pela equação abaixo:

$$SD = (f_v - f_x) * f_x^{-1} * 100 \% \quad (9)$$

A frequência  $f_v$ , representa o valor da grandeza em vazio;  $f_x$  é a frequência num ponto genérico x. Os reguladores de velocidade, através de um *set point*, permitem ajustar a frequência  $f_v$ . (ALMEIDA e CATALÃO, 2016)

### 2.2.1 Regulação de velocidade em geradores diesel

A rotação de trabalho do motor diesel depende da quantidade de combustível injetada, e da carga aplicada à árvore de manivelas (potência fornecida à máquina acionada). Também é necessário limitar a rotação máxima de trabalho do motor, em função da velocidade média do pistão, que não deve induzir esforços que superem os limites de resistência dos materiais, bem como da velocidade de abertura e fechamento das válvulas de admissão e escapamento, que a partir de determinados valores de rotação do motor, começam a produzir efeitos indesejáveis. Nas altas velocidades começa a haver dificuldade no enchimento dos cilindros,

devido ao aumento das perdas de carga e a inércia da massa de ar, fazendo cair o rendimento volumétrico.

Como a quantidade de combustível injetada é dosada pela bomba injetora, por meio da variação de débito controlada pelo mecanismo de aceleração, limita-se a quantidade máxima de combustível que pode ser injetada. Dependendo do tipo de motor, essa limitação é feita por um batente do acelerador, que não permite acelerar o motor além daquele ponto. O mecanismo de aceleração, por si só, não é capaz de controlar a rotação do motor quando ela tende a cair com o aumento da carga, ou a aumentar com a redução da mesma carga. É necessário então outro mecanismo que assegure o controle da dosagem de combustível em função das solicitações da carga. Na maioria dos motores, este mecanismo é constituído por um conjunto de contrapesos girantes, que, por ação da força centrífuga, atua no mecanismo de aceleração de modo a permitir o suprimento de combustível sem variações bruscas, e respondendo de forma suave às solicitações da carga. Conhecidos como reguladores ou governadores de rotações, são utilizados em todos os motores Diesel, e, dependendo da aplicação, têm características distintas e bem definidas. No caso específico dos motores para grupos Diesel-geradores, a regulação da velocidade é um item particularmente crítico, uma vez que a frequência da tensão gerada no alternador necessita ser mantida constante, ou seja, o motor Diesel deve operar em rotação constante, independente das solicitações da carga. Isto significa que a cada aparelho elétrico que se liga ou desliga, o governador deve corrigir a quantidade de combustível injetada, sem permitir variações de rotação, o que é quase impossível, dado o tempo necessário para que as correções se efetivem. (PEREIRA, 2016)

Para solucionar o problema, existem quatro tipos básicos de governadores, que são: mecânico, hidráulico, eletrônico e digital.

#### 2.2.1.1 Governadores mecânicos

Os governadores mecânicos controlam o fornecimento de combustível ao motor, com base na detecção mecânica da rotação do motor através de



contrapesos, molas, articulações, ou mecanismos similares, sempre que a rotação se afasta do valor regulado, geralmente 1800 rpm. Possuem um tempo de resposta considerado longo, e permitem oscilações em torno do valor regulado. Dependendo da carga que for aplicada bruscamente, poderão ocorrer quedas acentuadas na velocidade de rotação, e, na recuperação, poderão ultrapassar o valor regulado para, em seguida, efetuar nova correção de menor grau. (PEREIRA, 2016)

Segundo Mello (2009), este tipo de sistema geralmente é o mais barato e adequado para aplicações onde o corte de frequência não é um problema para as cargas alimentadas; além disso, Pereira afirma que estes governadores possuem precisão de regulação em torno de 3 %, podendo chegar até 1,5 %.

#### 2.2.1.2 Governadores hidráulicos

Os governadores hidráulicos possuem maior precisão que os governadores mecânicos, pois podem ser acionados pelo motor diesel independentemente da bomba injetora, e atuam sobre a alavanca de aceleração da bomba, exercendo uma função semelhante à do pedal acelerador de automóveis. São constituídos por um sistema de contrapesos girantes, tendo uma função de sensores de rotação, e uma pequena bomba hidráulica para produzir a pressão de óleo necessária ao acionamento. As variações de rotação “sentidas” pelos contrapesos são transformadas em vazão e pressão de óleo, para alimentar um pequeno cilindro ligado à haste de aceleração da bomba. Por serem caros e necessitarem de um arranjo especial para montagem no motor, são pouco utilizados. (PEREIRA, 2016)

#### 2.2.1.3 Governadores eletrônicos

Os governadores eletrônicos são usados em aplicações onde é exigido o governo isócrono (queda zero), ou onde são especificados instrumentos de sincronização ativa e paralelismo. A rotação do motor normalmente é detectada por um sensor eletromagnético, e o fornecimento de combustível para o motor é

controlado por solenoides acionados por circuitos eletrônicos. Estes circuitos, sejam controladores autocontidos, ou parte do microprocessador controlador do grupo gerador, utilizam algoritmos sofisticados para manter o controle preciso da rotação e, conseqüentemente, da frequência. Com os governadores eletrônicos, a retomada de passos de carga transiente dos grupos geradores é mais rápida do que com os governadores mecânicos. Os governadores eletrônicos devem sempre ser utilizados quando as cargas incluírem aparelhos de fonte de alimentação ininterrupta. Motores modernos, especialmente motores diesel com sistemas eletrônicos de injeção de combustível, são os únicos disponíveis com sistemas eletrônicos de governo. Os requisitos de demanda ou regulação para atingir o aumento da eficiência do combustível, baixas emissões de escape e outras vantagens, requerem o controle preciso oferecido por estes sistemas. (MELLO, 2009)

Os três elementos básicos que constituem um governador eletrônico são:

1. *pick-up* magnético, que exerce a função de sensor de rotação;
2. regulador eletrônico, unidade de controle, e;
3. atuador.

A construção pode variar, conforme o fabricante, mas todos funcionam segundo os mesmos princípios. O *pick-up* magnético é uma bobina enrolada sobre um núcleo ferromagnético e instalada na carcaça do volante, com a proximidade adequada dos dentes da cremalheira. Com o motor em funcionamento, cada dente da cremalheira, ao passar próximo ao *pick-up* magnético, induz um pulso de corrente elétrica que é captado pelo regulador. A quantidade de pulsos por segundo (frequência) é comparada, pelo regulador, com o valor padrão ajustado. Se houver diferença, o regulador altera o fluxo de corrente enviada para o atuador, que efetua as correções do débito de combustível, para mais ou para menos, conforme a necessidade. Há atuadores que trabalham ligados à haste de aceleração da bomba injetora, como nos governadores hidráulicos e outros que são instalados no interior da bomba e atuam diretamente sobre o fluxo de combustível. (PEREIRA, 2016)

#### 2.2.1.4 Governadores digitais

Os governadores digitais utilizados atualmente, embora possam oferecer o recurso de comunicação via porta serial e funções de controle PID (sigla em inglês para *proportional integral derivate*, que em português seria: proporcional integral derivativo), dependem de um atuador analógico para comandar as correções de rotação do motor, o que, em termos de resultados, torna-os iguais aos governadores eletrônicos analógicos. (PEREIRA, 2016)

Nos grupos geradores, assim como em outras aplicações, a variação de rotação é função da variação da carga, e o tempo de correção também é proporcional à intensidade da mesma variação. Por exemplo, em automóveis subindo uma ladeira, o motorista aciona o pedal do acelerador para manter a rotação e vencer a subida. Nos grupos geradores, quem aciona o acelerador é o governador de rotações. (PEREIRA, 2016)

Os governadores são ditos isócronos quando asseguram rotação constante entre vazio e plena carga, corrigindo no menor tempo possível as variações de rotações. Por mais isócronos que possam ser não podem corrigir instantaneamente as variações de rotação do motor, devido à inércia natural do sistema. É necessário, primeiro, constatar que houve uma variação de rotação para, em seguida, efetuar a correção. (PEREIRA, 2016)

O tempo de resposta é ajustado até um limite mínimo, a partir do qual o funcionamento do motor se torna instável, por excesso de sensibilidade. Neste ponto, é necessário retroceder um pouco até que a rotação se estabilize. Uma vez obtido o melhor tempo de resposta, a quantidade de rotação que pode variar dentro deste tempo depende da solicitação da carga. Uma grande variação brusca na carga induz uma variação proporcional da rotação. Além da sensibilidade, é necessário ajustar o valor máximo que se pode permitir do aumento ou de queda de rotação, entre vazio e plena carga, que nem sempre pode ser nula. Esta variação é conhecida como “droop”, e é necessária, especialmente, para grupos geradores que operam em paralelo (mais de um grupo Diesel-gerador alimentando a mesma carga). (PEREIRA, 2016)

Todos os governadores de rotação, atualmente, ajustam a quantidade de combustível por meios mecânicos. Utiliza-se sempre um dispositivo atuador, que nos governadores eletrônicos é acionado eletricamente, para fazer variar a quantidade de combustível injetada e corrigir a rotação para o valor nominal. (PEREIRA, 2016)

### 2.2.2 Características de regulação

A dificuldade de manter constante a velocidade do motor é a mesma para quaisquer sistemas submetidos a um controle para correção. No grupo motor gerador, teríamos como entrada deste sistema, o combustível diesel; o sistema a ser controlado seria formado pela bomba injetora e o motor diesel; a saída seria a rotação do motor ou a velocidade dada em rpm, e o controle da saída seria feito pelo governador acoplado. A figura 13 exemplifica essa malha de controle.

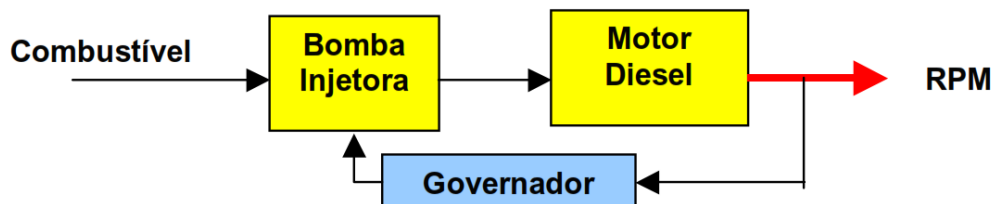


Figura 13 - Malha de controle de um grupo motor gerador.  
Fonte: PEREIRA, 2016

Utilizando os governadores digitais, habilitados na função proporcional, as correções das variações da velocidade do motor acontecem semelhantemente à curva da figura 14.

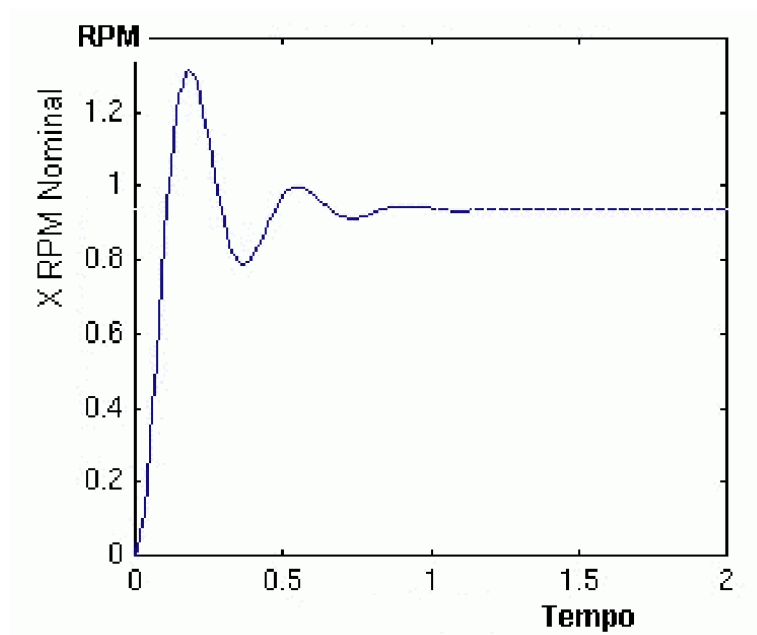


Figura 14 - Curva característica das variações de velocidade do motor com governador digital, habilitado na função proporcional.

Fonte: PEREIRA, 2016.

No entanto, utilizando os governadores digitais do tipo PID, as correções das variações da velocidade do motor acontecem semelhantemente à curva da figura 15.

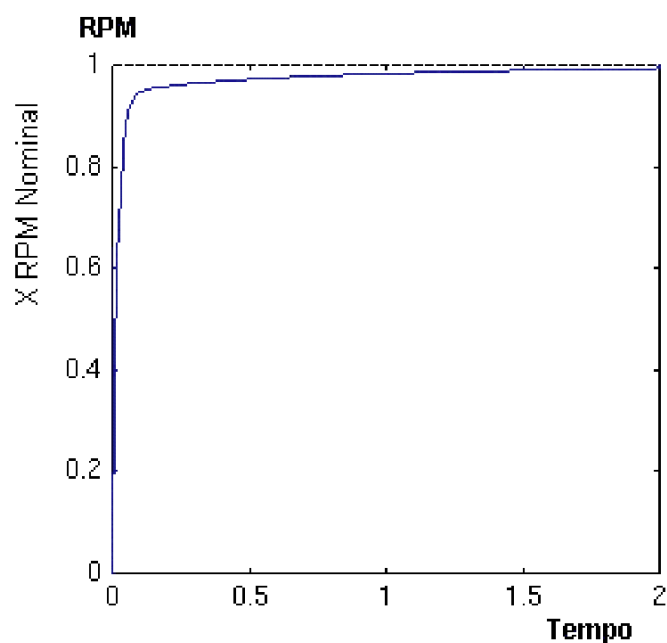


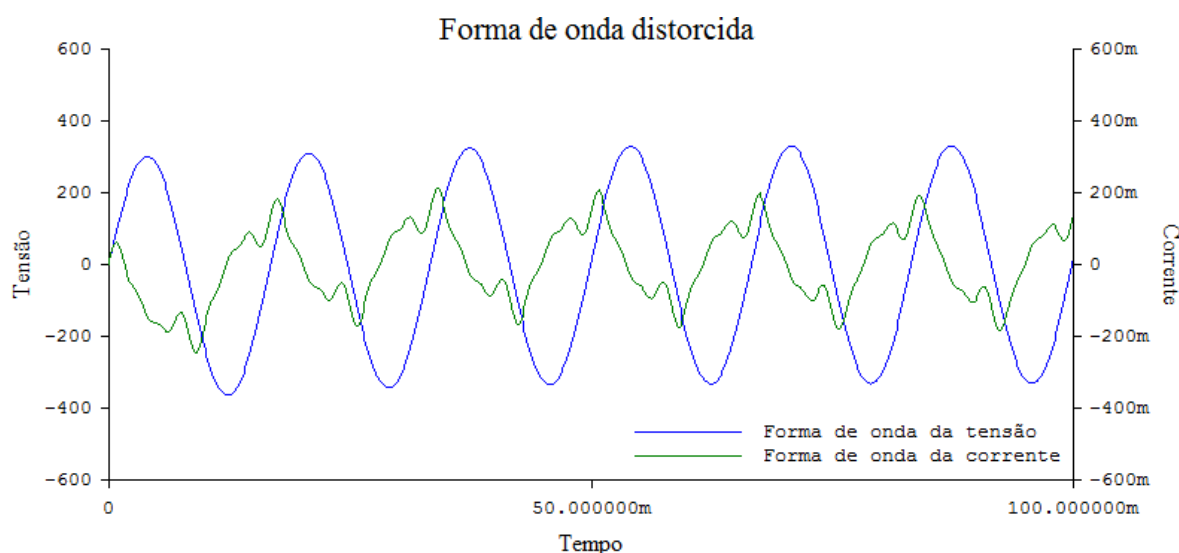
Figura 15 - Curva característica das variações de velocidade do motor com o uso do governador digital do tipo PID.

Fonte: PEREIRA, 2016.

## 2.3 HARMÔNICOS

### 2.3.1 Definição de harmônicos

As tensões e correntes presentes em uma instalação elétrica não possuem formas de onda perfeitamente senoidais. Essas formas de onda possuem distorções, as quais podem possuir diversas causas. Na figura 16 existem duas formas de onda: a forma de onda de tensão que apresenta quase nenhuma distorção, e a forma de onda de corrente que possui distorções harmônicas da 3ª, 5ª e 7ª ordem.



**Figura 16 - Forma de onda distorcida.**  
Fonte: própria.

Essa forma de onda distorcida pode ser analisada como um conjunto de sinais, com frequências e amplitudes distintas somadas. Subdivide-se o sinal estudado em diversas componentes. A maior parte dessas componentes apresenta frequências múltiplas inteiras da frequência do sinal fundamental (no Brasil considera-se a forma de onda fundamental uma função senoidal perfeita que possui frequência igual a 60 Hz). A essas componentes que possuem frequências múltiplas inteiras da frequência do sinal fundamental, dá-se o nome de harmônicos. Vale lembrar que os componentes harmônicos não constituem todos os componentes

responsáveis pela distorção presente na forma de onda estudada, como é o caso dos inter harmônicos, que são distorções na forma de onda de tensão e corrente com valores que não são múltiplos inteiros da componente fundamental. (ARRILAGA, 2003)

A análise dos componentes harmônicos presentes em um sinal distorcido pode ser realizada através da transformada de Fourier.

Em 1822 J. B. J. Fourier postulou que qualquer função contínua e periódica em um intervalo T pode ser representada pela soma de uma componente contínua, de um componente senoidal fundamental, e uma série de componentes senoidais de maior ordem (harmônicos), com frequências que são múltiplas inteiras da frequência da componente fundamental. (ARRILAGA, 2003, p. 17)

É importante entender que o conceito de componentes harmônicos é simplesmente uma abstração matemática, com a finalidade de facilitar a análise de sinais que apresentam distorções. Em uma instalação elétrica não existem correntes harmônicas circulando pela instalação, e sim uma corrente que apresenta forma de onda distorcida que pode ser analisada através deste artifício matemático.

### 2.3.2 Características dos harmônicos

#### 2.3.2.1 Ordem dos harmônicos

Cada componente harmônico presente em uma forma de onda distorcida possui uma frequência que é múltipla inteira da frequência fundamental. Dividindo a frequência do componente harmônico pela frequência fundamental obtém-se a ordem do harmônico, que será igual a um número inteiro. Assim, diz-se que um componente harmônico de 300 Hz, trabalhando com uma frequência fundamental de 60 Hz, é um harmônico de 5ª ordem.

### 2.3.2.2 Paridade dos harmônicos

Cada componente harmônico pode possuir ordem par ou ímpar. Devido a uma propriedade das séries de Fourier, quando uma função periódica apresentar o semi-ciclo positivo idêntico ao semi-ciclo negativo, a forma de onda distorcida apresentará apenas componentes harmônicos ímpares. A presença de componentes harmônicos pares surge com a utilização de retificadores de meia onda e alguns fornos a arco. (DUGAN, 2004)

### 2.3.2.3 Sequência dos harmônicos

Cada componente harmônico de um sistema trifásico balanceado possui uma sequência, ou seja, um sentido de giro das fases em relação ao sentido de giro da componente fundamental. As sequências podem ser positivas, negativas ou nulas. Componentes de sequência positiva apresentam a mesma sequência de fase em relação ao componente fundamental; componentes de sequência negativa apresentam sequência de fase contrária em relação ao componente fundamental, e componentes de sequência nula não apresentam defasagem. (STEVENSON, 1986)

Para se obter a sequência de um harmônico, deve-se multiplicar a ordem do harmônico pela sequência de fases do componente fundamental. Por exemplo: um harmônico de 3ª ordem apresentará sequência nula, pois como é mostrada abaixo, a multiplicação da sequência de fases do componente fundamental por três, resultará em componentes em fase.

$$3 \times (0^\circ, -120^\circ, 120^\circ) = (0^\circ, -360^\circ, 360^\circ) = (0^\circ, 0^\circ, 0^\circ) \quad (10)$$

A presença de componentes harmônicas de 3ª ordem em uma instalação elétrica que possui neutro, significa que pode haver correntes elevadas circulando pelo neutro. Isso ocorre, pois as correntes harmônicas de 3ª ordem de cada fase somar-se-ão no neutro.



### 2.3.3 Causas dos harmônicos

A distorção harmônica é gerada como um efeito da presença de cargas não lineares nas instalações elétricas.

Diz-se que uma carga é linear quando, ao ser aplicada uma tensão senoidal sobre a carga, a corrente que circulará através dela possuirá uma forma de onda similar à forma de onda da tensão; ou seja, haverá uma relação linear entre essas duas formas de onda. Por consequência, uma carga é dita não linear quando a corrente que circula através desta carga não é similar à forma de onda da tensão sobre ela aplicada.

Alguns exemplos de cargas não lineares são: lâmpadas fluorescentes, fontes chaveadas, fornos a arco, variadores de velocidade, pontes retificadoras, etc.

Atualmente as principais fontes geradoras de distorção harmônica são aparelhos eletrônicos, que utilizam fontes chaveadas em seus circuitos. O uso destes aparelhos em ambiente industrial aumentou na década de 1980, devido à instalação de sistemas de automação, com a finalidade de aumentar a produtividade e a qualidade dos produtos, e diminuir o custo de produção. (MARTINHO, 2013)

Antes do surgimento das fontes chaveadas, as principais fontes causadoras de distorção na forma de onda da tensão eram fornos a arco, lâmpadas fluorescentes em grandes quantidades, e ainda distorções produzidas por máquinas elétricas e transformadores, devido às correntes de magnetização. (ARRILAGA, 2003)

Deve ficar claro que o uso de fontes chaveadas trouxe aos aparelhos modernos, maior eficiência, e permitiu a automação de sistemas de produção. O surgimento de componentes harmônicos é uma adversidade que ganhou mais importância com o uso dessa tecnologia; porém, ela pode ser controlada, mantendo a eficiência desses aparelhos eletrônicos, e garantindo uma qualidade de energia elétrica satisfatória na instalação.

### 2.3.4 Efeitos dos harmônicos

Os componentes harmônicos podem causar diversos efeitos negativos nos aparelhos de uma instalação elétrica, principalmente em capacitores, transformadores e motores. Essas componentes causarão perdas adicionais e sobreaquecimento, além de causar interferência em aparelhos de telecomunicação e erros em instrumentos de medição. (DUGAN, 2004)

A presença de distorção harmônica em uma instalação elétrica ainda pode causar uma queda na eficiência da geração, transmissão, e utilização da energia elétrica. Além disso, a isolação dos condutores terá sua vida útil reduzida, e aparelhos da instalação poderão apresentar mau funcionamento. (ARRILAGA, 2003)

#### 2.3.4.1 Efeitos dos harmônicos em motores e geradores

Em motores e geradores os componentes harmônicos irão gerar maiores perdas por efeito Joule, devido ao aumento das perdas no ferro e no cobre.

As perdas no ferro resultam das correntes de Foucault, e pelo efeito da histerese. As correntes de Foucault são correntes induzidas no núcleo, e em outros componentes do gerador devido ao campo magnético, que tendem a aumentar com o aumento da frequência. E o efeito da histerese pode ser definido como a potência consumida para magnetizar o núcleo e variar o campo magnético, conforme a variação da corrente. Na presença de componentes harmônicos, a variação do campo magnético irá ocorrer mais rapidamente devido às altas frequências desses componentes.

As perdas no cobre são devidas a passagem de corrente através da resistência dos enrolamentos. Na presença de componentes harmônicos, o valor RMS da corrente aumenta, e junto, as perdas no cobre. Outro efeito que contribui com as perdas no cobre é o efeito pelicular. O efeito pelicular é a tendência da corrente se aglomerar na superfície do condutor ao se elevar a frequência. Uma

dada corrente fluindo através de uma área menor pode ser interpretado como um aumento na resistência, aumentando as perdas por efeito Joule.

A presença de componentes harmônicos na instalação elétrica ainda pode resultar em um aumento do ruído audível produzido pelos motores e geradores.

Em geradores que apresentam reatância interna elevada, a presença de componentes harmônicos pode significar instabilidade na regulação de tensão. Isso se deve a queda de tensão elevada na reatância do gerador.

#### 2.3.4.2 Efeitos dos harmônicos em transformadores

Assim como em motores e geradores, os componentes harmônicos irão gerar nos transformadores maiores perdas por efeito Joule devido ao aumento das perdas no ferro e no cobre.

A presença de componentes harmônicos é uma sobrecarga para o transformador, e irá diminuir a vida útil desse.

Outro efeito da presença de componentes harmônicos é o aumento da dispersão do campo magnético do transformador, que deveria fluir através do núcleo. Isso ocorre, pois a reatância de dispersão do transformador é diretamente proporcional à frequência da corrente que circula através dela.

#### 2.3.4.3 Efeitos dos harmônicos em condutores

A presença de componentes harmônicos na instalação elétrica resultará em maiores perdas por efeito Joule nos condutores. Isso se deve ao aumento do valor RMS da corrente, e ao efeito pelicular. A corrente distorcida também gerará maiores quedas de tensão sobre os condutores.

Componentes harmônicos de terceira ordem e seus múltiplos ímpares em circuitos trifásicos com neutro, irão se somar no condutor neutro, podendo causar um sobreaquecimento nesse condutor e danificá-lo.

#### 2.3.4.4 Efeitos dos harmônicos em bancos de capacitores

Os componentes harmônicos presentes em uma instalação elétrica tenderão a circular através do banco de capacitores, pois a reatância capacitiva do banco é inversamente proporcional à frequência da corrente. Isso gerará uma sobrecarga no banco de capacitores e reduzirá sua vida útil.

Em instalações elétricas que possuem bancos de capacitores instalados, pode ocorrer um fenômeno conhecido como ressonância. O fenômeno de ressonância pode ser definido como uma condição determinada pela frequência, em um circuito que possua capacitâncias e indutâncias em que as tensões e as correntes tendem a se manter em valores muito elevados. (DUGAN, 2004)

Como as reatâncias indutiva e capacitiva dependem da frequência da corrente, a ressonância pode não ocorrer para correntes que possuam a frequência fundamental, mas podem ocorrer para os componentes harmônicos que possuem frequências elevadas.

A ressonância pode ser definida como paralela ou série. A ressonância paralela pode ocorrer de diversas maneiras. Uma das maneiras mais simples de ocorrer ressonância paralela, é quando o banco de capacitores é instalado no mesmo barramento em que está instalada a carga não linear. A ressonância paralela será para os componentes harmônicos uma impedância elevada. Como as fontes de componentes harmônicos podem ser definidas como fontes de corrente, haverá então um aumento na tensão e na corrente dos componentes harmônicos. (ARRILAGA, 2003)

A ressonância série ocorrerá quando o conjunto transformador mais capacitor, tornar-se um caminho de baixa impedância para correntes harmônicas geradas em barramentos vizinhos. (DUGAN, 2004)

Ressonância é uma condição em um circuito RLC no qual as reatâncias capacitiva e indutiva são iguais em módulo, resultando, portanto, em uma impedância puramente resistiva (ALEXANDER e SADIKU, 2013, p. 561).

Quando houver ressonância haverá sobrecarga no capacitor, podendo causar degradação do isolamento, e até danificar permanentemente o banco de capacitores.

### 2.3.5 Indicadores de qualidade harmônica

#### 2.3.5.1 Distorção harmônica individual

Dado um sinal de corrente ou tensão que possui distorção harmônica, e conhecendo o valor eficaz de uma componente harmônica, pode-se calcular a “distorção harmônica individual”. A equação a seguir é a fórmula para o cálculo da distorção harmônica individual de corrente em percentual:

$$DHI_i\% = I_h / I_1 \times 100, \quad (11)$$

$I_h$  é o valor eficaz da corrente harmônica de ordem  $h$ , e  $I_1$  é o valor eficaz da corrente de ordem fundamental.

A equação seguinte é a fórmula para o cálculo da distorção harmônica individual de tensão em percentual:

$$DHI_v\% = V_h / V_1 \times 100, \quad (12)$$

$V_h$  é o valor eficaz da tensão harmônica de ordem  $h$ , e  $V_1$  é o valor eficaz da tensão de ordem fundamental.

### 2.3.5.2 Distorção harmônica total

Dado um sinal de corrente ou tensão que possua distorção harmônica, e conhecendo o valor eficaz de cada componente harmônica considerada, pode-se calcular a distorção harmônica total. A equação abaixo é a fórmula para o cálculo da “distorção harmônica total” de corrente, em percentual:

$$DHT_i\% = \sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots + I_n^2} / I_1 \times 100, \quad (13)$$

$I_2, I_3, I_4, \dots, I_n$  são os valores eficazes de cada componente harmônica da corrente, e  $I_1$  é o valor eficaz da corrente de ordem fundamental.

A equação a seguir é a fórmula para o cálculo da distorção harmônica total de tensão em percentual:

$$DHT_v\% = \sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots + V_n^2} / V_1 \times 100, \quad (14)$$

$V_2, V_3, V_4, \dots, V_n$  são os valores eficazes de cada componente harmônica da tensão, e  $V_1$  é o valor eficaz da tensão de ordem fundamental.

### 2.3.5.3 Taxa de distorção de demanda total

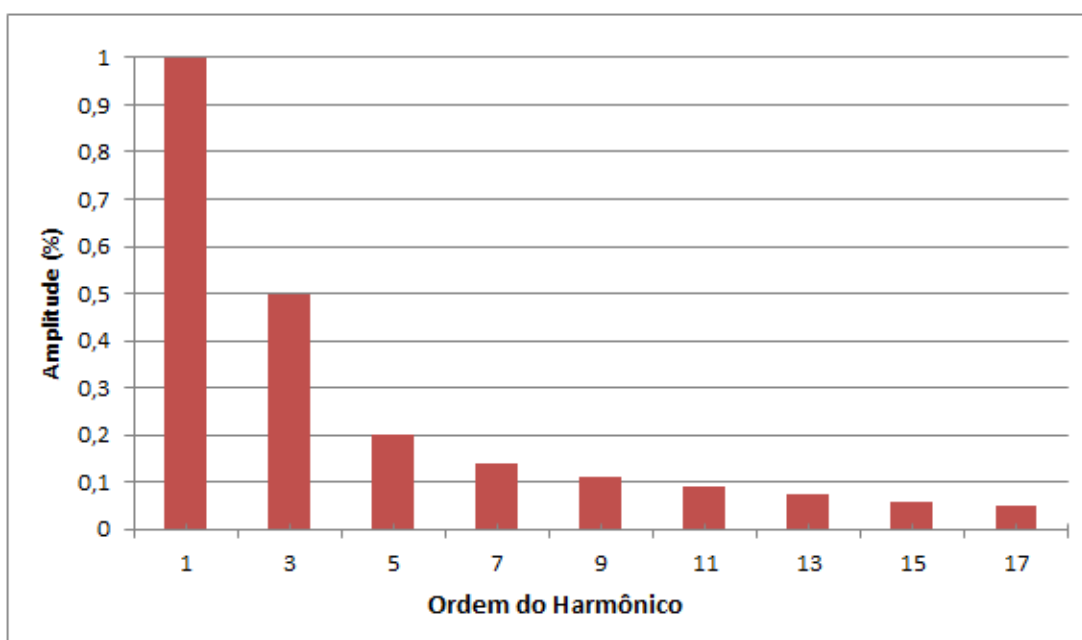
Em instalações elétricas onde a corrente é baixa, o uso do índice DHT pode levar a conclusões erradas. Essas correntes podem apresentar uma distorção harmônica total alta, porém a magnitude dessas correntes harmônicas pode ser baixa (DUGAN, 2004). Para uma melhor análise utiliza-se a “taxa de distorção de demanda total” como indicador de qualidade harmônica. Esse indicador utiliza a corrente de pico demandada pela carga como referência. A equação 13 é a fórmula para o cálculo da taxa de distorção de demanda total:

$$TDD = \sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots + I_n^2} / I_L, \quad (15)$$

$I_2, I_3, I_4, \dots, I_n$  são os valores eficazes de cada componente harmônica da corrente, e  $I_L$  é o valor médio das correntes de pico máximas demandadas pela carga, em um determinado intervalo de tempo, normalmente 12 meses. Se a instalação elétrica ainda está em fase de projeto, o valor de  $I_L$  será o valor de pico máximo da corrente demandada esperada para a instalação (DUGAN, 2004).

#### 2.3.5.4 Espectro harmônico

É a representação gráfica que mostra a amplitude de cada componente harmônica. O valor da amplitude é normalmente dado em porcentagem do valor da amplitude do sinal fundamental. Na figura 17 pode-se observar um exemplo de espectro harmônico até o harmônico de 17ª ordem.



**Figura 17 - Espectro harmônico de amplitude da tensão.**

Fonte: própria.

### 2.3.6 Fator de potência

Em instalações elétricas que possuem componentes harmônicos, o fator de potência não será mais somente uma relação entre potência ativa e potência reativa. Haverá agora uma parcela devido à distorção harmônica chamada de “potência de distorção harmônica”. (MARTINHO, 2013) A potência aparente será calculada através da equação abaixo:

$$S = \sqrt{P + Q + D}, \quad (16)$$

S é a potência aparente, P é a potência ativa, Q é a potência reativa, e D é a potência de distorção harmônica.

O fator de potência será calculado através da seguinte equação:

$$FP = \cos(\phi) / \sqrt{1 + DHT_i^2}, \quad (17)$$

FP é o fator de potência,  $\phi$  é o ângulo entre a potência ativa e a potência aparente, e  $DHT_i$  é a distorção harmônica total da corrente.

### 2.3.7 Fontes harmônicas típicas em instalações comerciais

Instalações comerciais normalmente apresentam uma grande quantidade de cargas não lineares, que produzem harmônicos de baixa magnitude. Nessas instalações é comum encontrar uma grande quantidade de lâmpadas fluorescentes com reatores eletrônicos, reguladores de velocidade para sistemas de aquecimento, ventilação e ar-condicionado, e outros aparelhos eletrônicos que utilizam fontes chaveadas. (DUGAN, 2004)

Em uma instalação elétrica comercial, as fontes chaveadas monofásicas são as cargas não lineares mais importantes em termos de produção de conteúdo



harmônico. Atualmente, utilizam-se fontes chaveadas monofásicas em diversos aparelhos eletrônicos, como computadores, impressoras, reatores eletrônicos, carregadores de baterias, e outros aparelhos eletrônicos que necessitam de retificadores ou inversores. Essas fontes apresentam peso leve, tamanho reduzido, alta eficiência, e toleram variações significativas na tensão de entrada. (DUGAN, 2004)

Uma característica importante dessas fontes é a produção de alto conteúdo harmônico de 3ª ordem. As correntes harmônicas de terceira ordem se acumulam no neutro de sistemas trifásicos, sobrecarregando o condutor. Isso pode representar um problema em instalações elétricas mais antigas, onde o condutor neutro não foi dimensionado para suportar essas correntes harmônicas. (DUGAN, 2004)

Dentre as fontes chaveadas monofásicas em instalações comerciais, destacam-se os reatores eletrônicos de lâmpadas fluorescentes. Em grandes edifícios comerciais, as lâmpadas fluorescentes correspondem a uma grande parcela da carga instalada. Essas lâmpadas apresentam bons índices de luminosidade, e representam uma economia em comparação com as lâmpadas incandescentes. Assim, essas lâmpadas, quando utilizadas em grande número, irão injetar alto conteúdo harmônico na instalação elétrica.

Outra carga não linear que deve ser levada em consideração em uma instalação comercial são os variadores de velocidade. Variadores de velocidade convertem uma tensão alternada em uma tensão variável com frequência variável, possibilitando o controle da velocidade do motor. Esses variadores podem ser utilizados em motores de elevadores, e em sistemas de ventilação, aquecimento e ar-condicionado, por exemplo. (DUGAN, 2004)

### *2.3.8 Fontes harmônicas típicas em instalações industriais*

Instalações industriais podem apresentar cargas não lineares que produzem conteúdos harmônicos significativos. As cargas não lineares em instalações industriais podem representar uma grande parcela da carga total instalada,

causando distorções elevadas na forma de onda da corrente, e, assim, causar distorções significativas na forma de onda da tensão (DUGAN, 2004).

Nessas instalações é comum o uso de bancos de capacitores para correção de fator de potência. Isso pode aumentar o efeito dos componentes harmônicos devido a um possível efeito de ressonância.

Entre as cargas geradoras de distorção harmônica em instalações industriais, destacam-se os conversores trifásicos. Diferentemente dos conversores monofásicos, os conversores trifásicos não geram componentes harmônicos de terceira ordem e seus múltiplos ímpares. Apesar disso, os conversores trifásicos podem produzir conteúdo harmônico significativo na instalação.

Os conversores trifásicos são encontrados em instalações industriais, em reguladores de velocidade para motores de corrente contínua e de corrente alternada, e inversores de frequência para alimentar motores de corrente alternada. Uma característica importante dessas cargas é que a produção de conteúdo harmônico varia significativamente conforme a velocidade e o torque do motor. (DUGAN, 2004)

Outras fontes geradoras de distorção harmônica em instalações industriais são fornos a arco, equipamentos de solda, transformadores e motores que operam acima do ponto de saturação do núcleo.

## 2.4 VARIAÇÃO DE TENSÃO

### 2.4.1 *Definição de variação de tensão*

A variação de tensão pode ser definida como sendo qualquer alteração do valor nominal da tensão, sendo possível variar para mais ou para menos. As variações de tensão são associadas ao período de tempo em que ela ocorre, e podem ser classificadas em variação de tensão de curta duração (ocorre entre meio ciclo de onda e um minuto) e variação de tensão de longa duração (ocorre para um período maior do que um minuto). (MARTINHO, 2013)

#### *2.4.2 Causas da variação de tensão*

As principais causas da variação de tensão são faltas ocasionadas na rede de alimentação, chaveamento de cargas de elevada potência, e chaveamento de bancos de capacitores, podendo gerar uma redução ou um aumento do valor nominal da tensão. No chaveamento de cargas de elevada potência, a energia demandada para esta carga pode ser muito grande, causando uma redução nos valores de tensão. Quando um banco de capacitores é desenergizado, os capacitores irão se descarregar e, durante este período, haverá um aumento nos valores de tensão da instalação. (MARTINHO, 2013)

#### *2.4.3 Efeitos da variação de tensão*

As variações de tensão em uma instalação elétrica podem causar a interrupção do funcionamento de aparelhos, o que significa, em uma instalação industrial, uma interrupção na produção, resultando prejuízos. Além disso, os efeitos das variações de tensão em aparelhos eletrônicos são diversos, podendo causar a desprogramação de microprocessadores e controladores lógicos programáveis, desenergização de bobinas de relés auxiliares, variação de velocidade de motores, falhas de comutação, atuação de dispositivos de proteção, etc. (MARTINHO, 2013)

Consumidores de todos os setores (residencial, comercial e industrial), começaram a se preocupar com os efeitos das variações de tensão, na medida em que foram sendo acrescentadas cargas eletrônicas sensíveis a esses distúrbios, como computadores e sistemas de automação. Uma preocupação maior surge por parte dos consumidores industriais que possuem sua produção baseada em um sistema automatizado, e que depende de uma estabilidade dos parâmetros de qualidade de energia elétrica. (DUGAN, 2004)

#### 2.4.4 *Variação de longa duração*

São variações nos valores de tensão, para mais ou para menos, com duração maior que um minuto. Para valores de tensão que ultrapassam em 10% do valor nominal da tensão dá-se o nome de sobretensão. Para valores de tensão inferiores a 90% do valor nominal da tensão dá-se o nome de subtensão. Essas variações podem ocorrer devido a falhas em transformadores, conexões erradas em tapes de transformadores, variações na impedância da rede devido a variações de temperatura e fator de potência, além dos motivos já apresentados nas seções anteriores. (MARTINHO, 2013)

#### 2.4.5 *Interrupção*

Caracteriza-se uma interrupção quando os valores de tensão são menores que 10% do valor da tensão nominal. A interrupção pode ter um intervalo de duração de alguns ciclos de onda até vários minutos. As interrupções podem ser causadas por falhas no sistema de distribuição, ou pelo acionamento da proteção da instalação. Sejam as interrupções de longa ou curta duração, elas podem causar a parada de máquinas, perda de dados, e mau funcionamento de aparelhos. (MARTINHO, 2013)

As interrupções temporárias podem ser efeito de um curto-circuito causado por galhos de árvores que se encostam à rede elétrica de distribuição, ou efeito de descargas atmosféricas atingindo o sistema elétrico. Uma causa para as interrupções permanentes é a queda de um poste da rede de distribuição.

#### 2.4.6 *Variação de frequência*

É qualquer alteração no valor da frequência da tensão, que no Brasil é igual a 60 Hz. No Brasil, a regulamentação permite uma variação de no máximo 0,5 Hz em relação à frequência nominal. (AGÊNCIA..., 2016, p.31). Porém, a fiscalização se torna mais complicada para instalações que utilizam sistemas de geração própria. As variações de frequência têm origem no sistema de geração, e por uma falha nos controladores de velocidade dos geradores. (MARTINHO, 2013)

#### 2.4.7 *Desequilíbrio de tensão*

Caracteriza-se desequilíbrio de tensão, quando em um sistema trifásico há diferenças nos valores de tensão entre as fases. A causa do desequilíbrio de tensão em uma instalação elétrica é a inserção de cargas monofásicas mal distribuídas, gerando quedas de tensão diferentes para cada fase (MARTINHO, 2013). Outra causa para o desequilíbrio de tensão, é a diferença nos parâmetros de linhas de transmissão de uma fase para a outra. Ao longo de uma linha de transmissão, as capacitâncias intrínsecas entre os condutores de cada fase não serão iguais. Esse problema normalmente é solucionado através da transposição das fases.

O desequilíbrio de tensão pode ser compreendido também através da teoria das componentes simétricas. Essa teoria trata um sistema desequilibrado como uma composição de vários sistemas equilibrados. O conjunto de sistemas equilibrados é formado por três componentes: componente de sequência positiva, componente de sequência negativa e componente de sequência nula. Em um sistema equilibrado, a única componente existente é a componente de sequência positiva. A componente de sequência negativa possui sequência de fase inversa a da componente de sequência positiva. A presença de componentes de sequência negativa de tensão em uma instalação elétrica (desequilíbrio de tensão), irá submeter condutores, motores e outros aparelhos elétricos a maiores esforços elétricos, gerando maiores perdas por efeito joule nos condutores, atuação da proteção da instalação, e mau

funcionamento de motores de indução e máquinas síncronas. Em máquinas síncronas, a componente de sequência negativa atuará como um freio magnético, fazendo com que a máquina aqueça, já que terá de fazer um esforço maior para cumprir a mesma função. (MARTINHO, 2013)

## 2.5 NORMAS E RECOMENDAÇÕES

### 2.5.1 *Prodist - Módulo 8*

Os “procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional” (Prodist), é uma norma elaborada pela Aneel, com o objetivo de padronizar as atividades técnicas dos sistemas de distribuição de energia elétrica no Brasil.

O módulo oito do “Prodist” trata dos procedimentos relacionados à qualidade de energia elétrica, como: tensão em regime permanente, fator de potência, harmônicos, desequilíbrio de tensão, flutuação de tensão, variação de tensão de curta duração, e variação de frequência.

### 2.5.2 *IEEE-519*

A IEEE-519 é uma recomendação do Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE), sobre o controle de harmônicos no ponto de conexão comum. O ponto de conexão comum é definido como o ponto pertencente à instalação elétrica da concessionária que está mais próximo de uma determinada carga. Em instalações que compartilham um transformador, o ponto de conexão comum será o secundário desse transformador. Já em instalações que possuem transformadores próprios, o ponto de conexão comum será o primário do transformador. (INSTITUTO..., 2014, p. 4)

Essa recomendação trata da medição do conteúdo harmônico, dos limites recomendados de distorção da tensão e da corrente, e expõe as principais cargas geradoras de harmônicos em uma instalação elétrica.

Para o estabelecimento do limite da distorção da corrente, a IEEE-519 utiliza como parâmetro a razão entre a máxima corrente de curto-circuito no ponto de conexão comum, e a máxima corrente de carga da instalação, considerando que a instalação elétrica esteja com condições de operação normais.

Para a utilização correta da IEEE-519, devem-se desconsiderar os 5% maiores valores medidos, tanto para DHT de tensão como de corrente. Isso se deve, pois essa recomendação trabalha com o 95º percentil, ou seja, os 95% menores valores medidos. Para correntes de curta duração (menores que três segundos), deve-se usar o 99º percentil.

### 2.5.3 IEEE-112

A IEEE-112 também é uma recomendação do Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos, que trata as instruções para conduzir testes em motores e geradores. Um dos objetivos dessa recomendação é auxiliar no cálculo da eficiência da máquina elétrica. Para o cálculo da eficiência deve-se levar em consideração parâmetros elétricos, como forma de onda da tensão, desequilíbrio de tensão e frequência. A norma também avalia quais valores para essas grandezas são aceitáveis.

### 3 OBJETO DE ESTUDO

#### 3.1 FONTE DE ESTUDO

Para uma análise completa do comportamento da rede da concessionária, do gerador, e dos parâmetros a serem analisados, foi preciso considerar toda a instalação elétrica que está ligada ao GMG, bem como todos os tipos de cargas ligados a ele.

Como já citado anteriormente, com o intuito de observar os parâmetros de frequência, distorção harmônica, desequilíbrio de tensão, e variações de tensão de longa duração, foi realizada uma análise de energia em uma unidade da rede Supermercado Gasparim, a qual compreende medições efetuadas no quadro de transferência automático do supermercado. Este gerador fornece energia no horário de ponta da concessionária.

A metodologia de medição adotada foi pré-determinada através do aparelho de medição utilizado da AEMC Instruments, modelo 8336. Realizou-se a integralização das grandezas elétricas num intervalo de um segundo. O instrumento foi programado para realizar a coleta dos dados durante a alimentação pela concessionária, no período compreendido entre 10 h 37 min 59 s, e 17 h 37 min 44 s do dia 14/10/2016, e, posteriormente, a coleta de dados foi efetuada quando o gerador era responsável pela alimentação no período entre 17 h 48 min 26 s, e 20 h 50 min 49 s do mesmo dia.

O motivo da realização de duas coletas separadas, e não uma única contendo os dois períodos, foi devido à dificuldade de acesso ao ponto de medição no QTA (figura 18), para fixação dos TC's no ponto de carga, inviabilizando a realização da análise dessa forma. Por isso foi necessário a conexão dos TC's de medição primeiramente do lado da rede antes de entrar o grupo gerador, e refazer a conexão colocando os TC's do lado do gerador.

Outro ponto a ser destacado é o fato de o QTA ser aberto, sendo o gerador então acionado por um controlador microprocessado, e a transferência é realizada por uma interrupção momentânea do fornecimento de energia.





Figura 18 - AEMC 8336 ligado ao quadro de transferência automática.  
Fonte: Própria

### 3.2 CARACTERÍSTICAS DA INSTALAÇÃO

O supermercado analisado possui um transformador que o alimenta com potência de 225 kVA, com tensão primária de operação em 13,2 kV em triângulo, e secundária 220 V/ 127 V em estrela com neutro aterrado, utilizando tape de 13,2 kV, e apresenta uma impedância de 3,41 %.

Para o horário de ponta é utilizado um gerador trifásico para alimentação do comércio, o qual possui os seguintes dados:

- potência nominal: 360 kVA;
- frequência: 60 Hz;
- tensão nominal: 220/127 V;
- rotação: 1800 rpm;
- fator de potência: 0,8;
- corrente nominal: 945 A;
- regime funcional: stand by;
- reatância subtransitória: 11,49%.
- excitação: *brushless* com bobina auxiliar

O gerador da instalação está especificado para uso em regime *stand by*, ou seja, somente ser usado em caso de emergência, não podendo ser utilizado em regime *prime*, como vem sendo utilizado.

Conforme a fabricante do gerador, SMDO Maquigeral, e a ISO-8528, quando um gerador que foi especificado em modo *stand by*, opera no modo *prime*, a potência nominal dele de fábrica deve ser reduzida em 10%, e, em modo contínuo, a potência de saída média fornecida ao longo deste período não deve exceder em 70% da potência no modo *prime*. Sendo assim, o gerador do supermercado possui uma potência nominal de aproximadamente 324 kVA. Este gerador é responsável por todas as cargas do supermercado, no qual as principais cargas são motores trifásicos, fornos industriais, e iluminação. A partida destes motores com potência igual ou inferior a 4 HP, serão feitas com chave de partida direta, e os de potência superior a 4 HP terão partida com inversor de frequência.

O gerador utiliza um regulador de tensão modelo GRT7, que possui como base de funcionamento o uso de tiristores e potenciômetros. O regulador de tensão possui tempo de resposta de 8 a 500 ms.

**Tabela 1 – Levantamento de cargas do supermercado.**

Quant.	Descrição da Carga	P (W)	F.P	S (VA)	T. P(W)	T. Q(kvar)	T. S (VA)
2	Compressores (refrigeração)	4.290	0,85	5.047	8.580	7.293	10.094
3	Compressores (refrigeração)	5.770	0,85	6.788	17.310	14.714	20.365
6	Forno (Padaria e Salgaderia)	18.700	1,00	18.700	112.200		112.200
1	Forno (Confeitaria)	31.650	1,00	31.650	31.650		31.650
2	Fritadeiras	4.500	1,00	4.500	9.000		9.000
1	Batedeiras	2.200	0,88	2.500	2.200	1.936	2.500
1	Batedeiras	1.700	0,85	2.000	1.700	1.445	2.000
2	Batedeiras	2.600	0,84	3.100	5.200	4.368	6.200
4	Ar condicionados(18000 BTU)	5.600	0,90	6.222	22.400	20.160	24.889
6	Freezers	400	0,90	444	2.400	2.160	2.667
8	Geladeiras (Bebidas)	310	0,90	344	2.480	2.232	2.756
3	Geladeiras (Bebidas)	700	0,90	778	2.100	1.890	2.333
3	Expositor Açougue	922	0,90	1.024	2.766	2.489	3.073
1	Expositor	960	0,90	1.067	960	864	1.067
1	Expositor	1.100	0,90	1.222	1.100	990	1.222
2	Expositor	1.500	0,90	1.667	3.000	2.700	3.333
2	Chuveiros	5.500	1,00	5.500	11.000		11.000
60	Lâmpadas tubulares LED	18	0,50	36	1.080	540	2.160
10	Lâmpadas LED bulbo (Depósito)	10	0,50	20	100	50	200
48	Lâmpadas tubulares LED	9	0,95	9	432	410	455
160	Lâmpadas fluorescentes T5	54	0,95	57	8.640	8.208	9.095
<b>Total</b>					246.298	72.449	256.733

Fonte: Própria.

As principais cargas não lineares dessa instalação são os inversores de frequência, responsáveis pelo controle dos compressores do sistema de refrigeração. Essa carga é a principal responsável pelas correntes harmônicas de 5ª e 7ª ordem. Existem também os reatores eletrônicos utilizados na iluminação: essa é a principal carga responsável pelas correntes harmônicas de 3ª ordem. Os fornos elétricos, que constituem a maior parcela da carga total da instalação, podem ser considerados como cargas puramente resistivas. A instalação não apresenta banco de capacitores para correção de fator de potência.

### 3.3 LIMITES ESTABELECIDOS POR NORMA

#### 3.3.1 *Prodinst - Módulo 8*

Essa norma é aplicada com a finalidade de observar a qualidade da energia entregue pelas distribuidoras aos consumidores. No estudo de caso presente, essa norma foi utilizada como parâmetro de comparação entre os dois momentos avaliados: quando a concessionária estava alimentando o supermercado, e quando o gerador estava operando. Como o analisador de energia foi instalado no QTA, em tensão 220/127 V, esse estudo utilizou como referência, os limites recomendados por essa norma para valores de tensão inferiores a 1 kV.

Segundo o Prodinst módulo oito, a tensão será considerada adequada quando ela se encontrar na faixa de valores de 201 a 231 V (fase-fase) e 116 a 133 V (fase-neutro).

Os valores de fator de potência para ambos os casos devem estar entre 0,92 e 1,0 indutivo, ou 1,0 e 0,92 capacitivo.

O valor do fator de potência, no Brasil, foi alterado de 0,85 para 0,92 indutivo ou capacitivo, pelo extinto DNAEE (Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica), atualmente com a denominação de ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), através do Decreto Nº 479 de 20 de março de 1992. O objetivo desta alteração foi para reduzir os baixos valores de fator de potência do sistema interligado nacional, pois estes baixos valores podem sobrecarregar as subestações, as linhas de transmissão e

distribuição, prejudicando a estabilidade e as condições de aproveitamento dos sistemas elétricos, trazendo inconvenientes diversos, como: perdas na rede, quedas de tensão e subutilização da capacidade instalada. (Adaptado WEG, 2016)

Os valores de frequência para ambos os casos devem se manter entre 59,9 Hz, e 60,1 Hz, em regime permanente. Caso o valor da frequência saia da faixa de 59,5 Hz e 60,5 Hz, ela deverá ser normalizada num prazo de 30 s após sair desta faixa.

O Prodist, como visto estabelece limites para valores de tensão, porém não estabelece um valor máximo para o desequilíbrio de tensão em baixa tensão, quando alimentado pela concessionária.

### 3.3.2 IEEE-519

No presente estudo, esta recomendação foi utilizada para comparar os valores de distorção harmônica entre concessionária e gerador. Como o analisador de energia foi instalado na baixa tensão, este estudo utilizou como valores de referência os limites recomendados pela IEEE-519 para tensões inferiores a 1 kV.

Segundo a IEEE-519, o DHT de tensão não deve exceder o valor de 8% para os dois cenários avaliados. Vale lembrar que esses limites se aplicam ao 95º percentil, ou seja, os 95% menores valores obtidos na medição.

Neste estudo foram avaliadas as correntes harmônicas de 3ª, 5ª e 7ª ordem, pois as demais correntes harmônicas, pares, ou de ordem superior a 7ª, não apresentaram valores significativos. Para a avaliação dos valores de correntes harmônicas, a IEEE-519 apresenta a tabela 2 com os valores limites para cada ordem harmônica.

$I_{cc}$  é a corrente de curto circuito no ponto de conexão comum, que nesse estudo foi considerada como a corrente de curto circuito no secundário do transformador, e na saída do gerador;  $I_L$  é a corrente de pico máxima demandada, e TDD é a taxa de distorção de demanda total, discutida no capítulo anterior.

Tabela 2 – Limite de distorção harmônica de corrente para 120 V a 69 kV.

Corrente harmônica máxima em porcentagem de $I_L$		
Ordem harmônica individual		
$I_{cc}/I_L$	$3 \leq h \leq 11$	TDD
< 20	4%	5%
20 < 50	7%	8%
50 < 100	10%	12%
100 < 1000	12%	15%
> 1000	15%	20%

Fonte: IEEE Standard 519-2014 (IEEE).

Assim, calculamos a razão entre  $I_{cc}$  e  $I_L$  para os dois cenários avaliados. O valor escolhido de  $I_L$  foi o maior valor de corrente RMS medido nos períodos. Para o período em que a concessionária alimentava o supermercado,  $I_L$  é igual a 457,7 A. Para o período em que o gerador operava,  $I_L$  é igual a 308,8 A. Os valores utilizados diferem entre os dois cenários, pois a carga é diferente para cada uma das situações analisadas. As correntes de curto circuito foram calculadas utilizando a impedância do transformador, e a reatância subtransitória do gerador (reatância no momento inicial do curto circuito), ambos em p.u. Utilizaram-se como valores de base, os valores nominais de potência e tensão do transformador e do gerador.

$$I_{cc} = I_{pu} \times I_b = \frac{1}{Z_{pu}} \times \frac{S_b}{\sqrt{3} \times V_b}, \quad (18)$$

$$I_{cc (concessionária)} = \frac{1}{0,0341} \times \frac{225000}{\sqrt{3} \times 220} = 17315 \text{ A}$$

$$I_{cc (gerador)} = \frac{1}{0,1149} \times \frac{350000}{\sqrt{3} \times 440} = 3995 \text{ A}$$

Assim, obtemos que a razão  $I_{cc}/I_L$  para o período da concessionária é igual a 37,83, e, para o período de operação do gerador, é igual a 12,94. Assim, utilizando a tabela 2, estabelecemos que a máxima distorção harmônica de corrente nos períodos em que a concessionária alimentou o supermercado, e quando o gerador

esteve operando são, respectivamente 7% e 4% para cada ordem harmônica, e o TDD não deve ser superior a 8% e 5%.

### 3.3.3 *IEEE-112*

A recomendação IEEE-112 foi utilizada neste estudo com o intuito de analisar o desequilíbrio de tensão no momento em que o gerador esteve alimentado o supermercado. Segundo essa recomendação, esse valor não deve ultrapassar o valor de 0,5%. O cálculo de desequilíbrio de tensão é realizado comparando os três valores de tensão, seja para as tensões de fase ou para as tensões de linha. Calcula-se a média entre as três tensões. Multiplica-se por 100 o maior desvio de tensão em relação à média, e divide-se esse valor pela média das três tensões.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 PARÂMETRO - FREQUÊNCIA

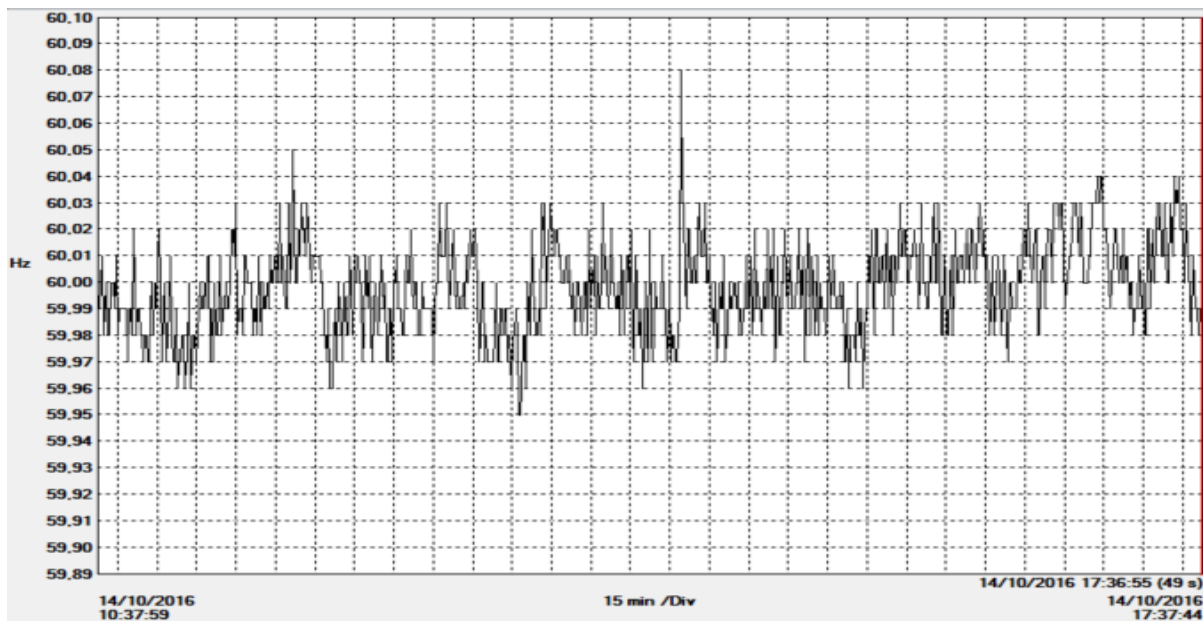


Figura 19 – Gráfico da frequência (concessionária COPEL).  
Fonte: Programa computacional PowerPad III (AEMC)

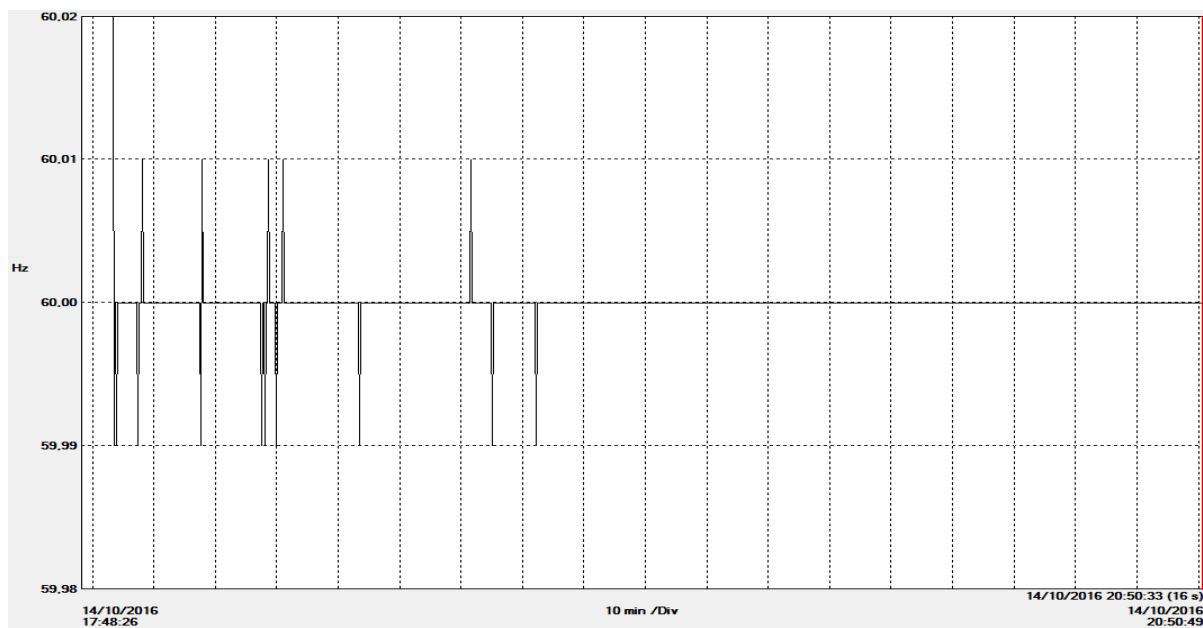


Figura 20 – Gráfico da frequência (gerador).  
Fonte: Programa computacional PowerPad III (AEMC).

A medição da grandeza elétrica frequência, encontra-se em conformidade com os parâmetros estabelecidos pelo Prodist (módulo 8) da ANEEL, sendo os parâmetros de frequência em regime permanente  $59,9 \text{ Hz} \leq \text{valor medido} \leq 60,1 \text{ Hz}$ .

Nas figuras 19 e 20, percebe-se uma diferença na variação da frequência, sendo que na concessionária esta é maior, pois a frequência é a mesma do sistema nacional, sendo controlada pelo regulador de velocidade nas centrais geradoras, e afetada por todas as cargas conectadas ao sistema. No gerador, a frequência irá variar somente com a carga conectada ao mesmo, que por possuir um regulador de velocidade, atua com um controle mais rápido.

#### 4.1.1 Exemplo de análise de variação de frequência

Nesta seção foi analisado o período de tempo entre 19 h 23 min 30 s e 19 h 24 min 41 s. Durante este intervalo podemos perceber uma variação nos valores de frequência, como pode ser visto na figura 21.

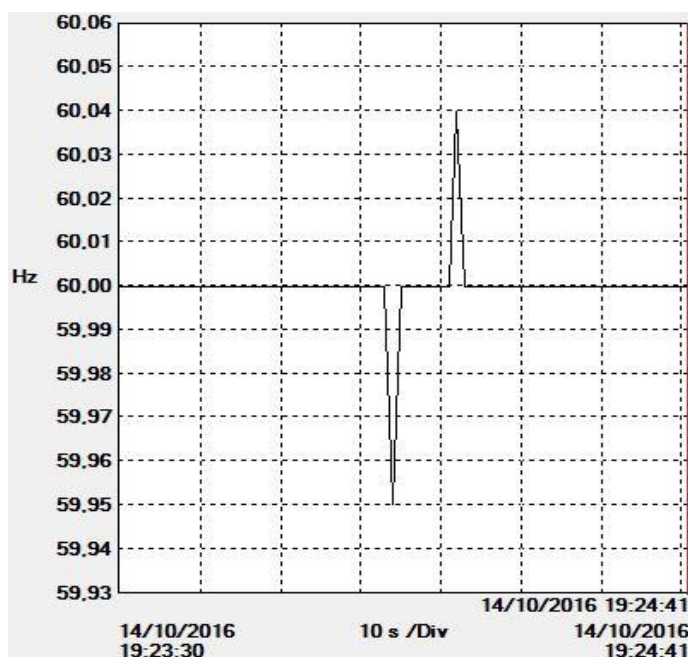


Figura 21 – Variação de frequência (gerador).  
Fonte: Programa computacional PowerPad III (AEMC).



Analisando três pontos referentes a esta variação, sendo um antes, um durante, e outro depois da variação, observa-se que a tensão e a frequência oscilam quando uma carga entra (percebido pelo aumento da potência e corrente registrada depois) e logo após retornam aos valores nominais de operação.

Neste retorno, percebemos que houve a atuação do regulador de tensão que ao perceber a queda de tensão, através do ajuste da excitatriz, aumenta a corrente de excitação (campo), ajustando a tensão de saída novamente para o valor nominal mantendo-a constante.

Do mesmo modo, o regulador de velocidade atua ao perceber a variação da frequência, que é diretamente proporcional a velocidade, como foi citado na equação 6. Através da regulação da velocidade, o regulador de velocidade controla a potência mecânica fornecida, ajustando a frequência.

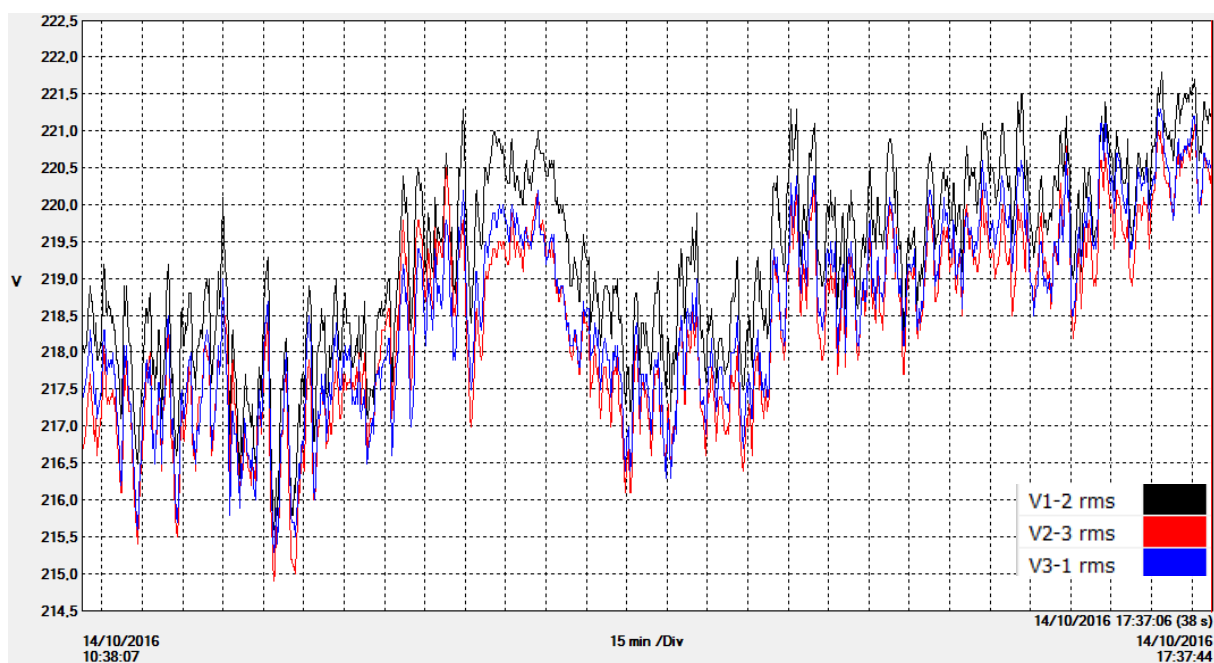
**Tabela 3 – Análise de parâmetros durante variação da figura 21.**

		<b>Antes</b>	<b>Durante</b>	<b>Depois</b>
	<b>Horário</b>	<b>19 h 24 min 01 s</b>	<b>19 h 24 min 04 s</b>	<b>19 h 24 min 07 s</b>
<b>Corrente</b>	A 1 rms	188,9 A	203,2 A	235,4 A
	A 2 rms	185 A	199,9 A	232,2 A
	A 3 rms	217,1 A	231,2 A	262,8 A
<b>Tensão</b>	V 1-N rms	127,5 V	127,2 V	127,4 V
	V 2-N rms	126,9 V	126,7 V	126,8 V
	V 3-N rms	126,5 V	126,2 V	126,4 V
<b>Frequência</b>	F	60 Hz	59,95 Hz	60 Hz
<b>Potência Ativa</b>	PT	72.572 W	77.633 W	90.695 W

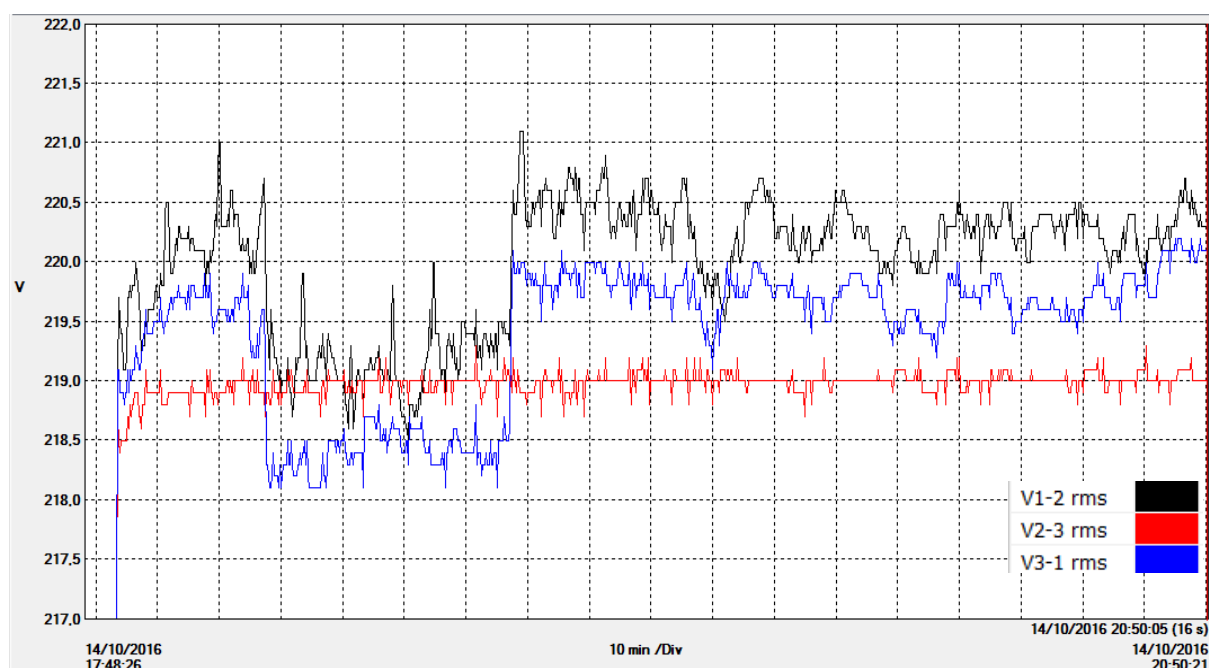
Fonte: Própria.

#### 4.2 PARÂMETRO - TENSÃO DE LINHA

A medição da grandeza elétrica tensão de linha encontra-se adequada, tanto para a concessionária COPEL quanto para o gerador diesel, segundo a tabela 4 do Anexo I do PRODIST (módulo 8) da ANEEL, sendo a faixa de valores adequados, para a tensão nominal de 220 V entre 201 V e 231 V.



**Figura 22 – Gráfico da tensão de linha (concessionária COPEL).**  
 Fonte: Programa computacional PowerPad III (AEMC).



**Figura 23 – Gráfico da tensão de linha (gerador).**  
 Fonte: Programa computacional PowerPad III (AEMC).

Analisando a figura 23 podemos perceber uma queda de tensão nas tensões de linha 1-2 e 3-1, ficando evidenciado este fato nas figuras 24 e 25.

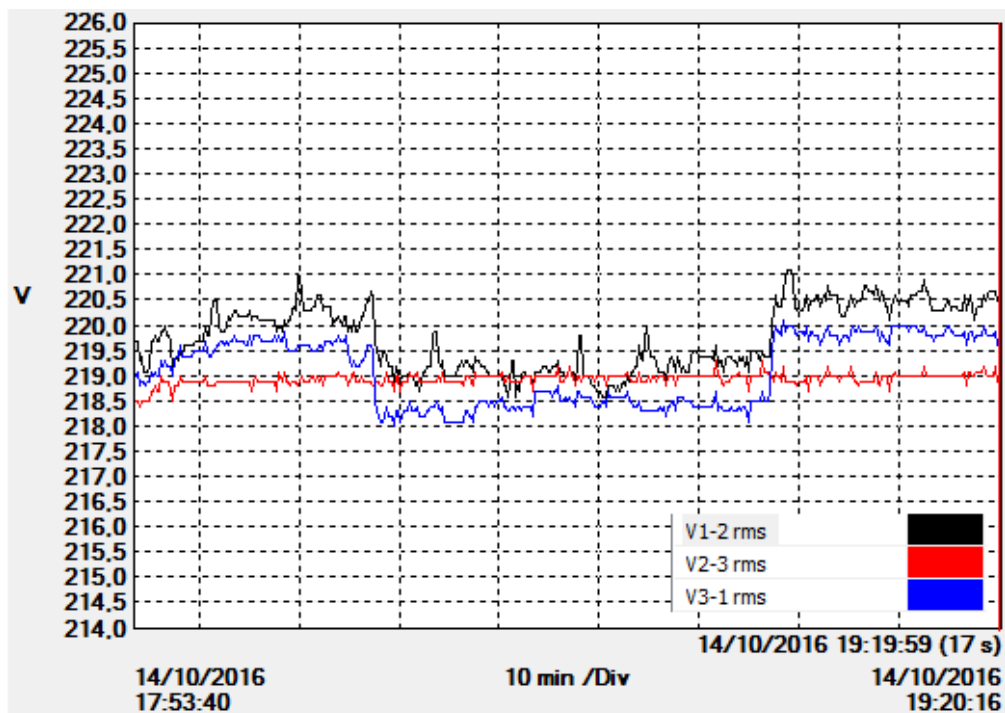


Figura 24 – Queda de tensão de linha registrada às 18 h 17 min.  
Fonte: Programa computacional PowerPad III (AEMC).

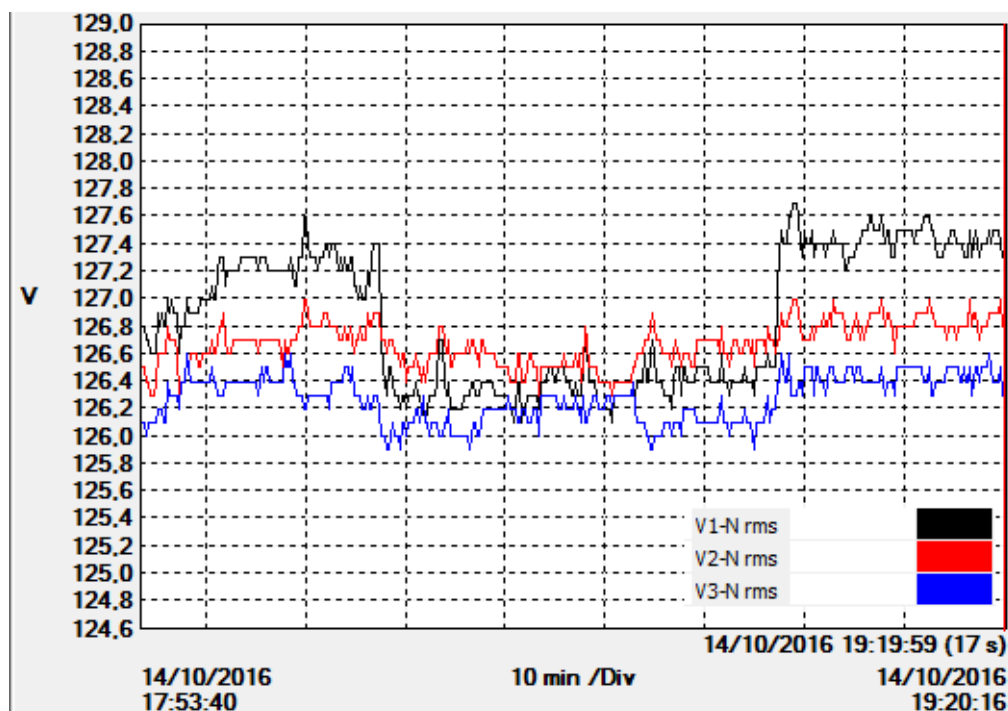


Figura 25 - Queda de tensão de fase registrada às 18 h 17 min.  
Fonte: Programa computacional PowerPad III (AEMC).

Essas quedas de tensões de linha são provocadas pela queda de tensão da fase 1, como observa-se na figura 25. Devido a isso, a tensão das fases 2-3 não

acompanha as variações das fases 1-2 e 3-1. Uma suposição para esse fato é que existe uma carga significativa ligada na fase 1, que quando ligada, requer uma corrente tal que provoca as quedas de tensão observadas.

#### 4.3 PARÂMETRO - TENSÃO DE FASE

A medição da grandeza elétrica tensão de fase encontra-se adequada, tanto para a concessionária COPEL quanto para o gerador diesel, segundo a tabela 4 do Anexo I do Prodist (módulo 8) da ANEEL, sendo a faixa de valores adequados para a tensão nominal de 127 V, entre 116 V e 133 V.

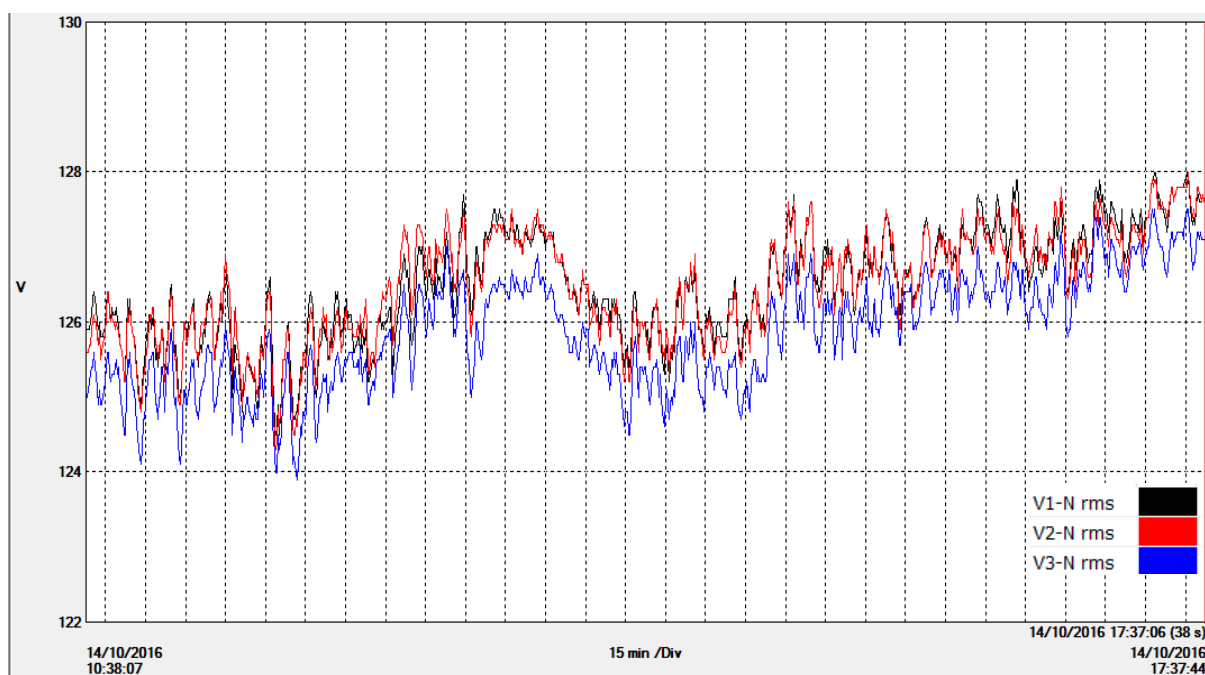
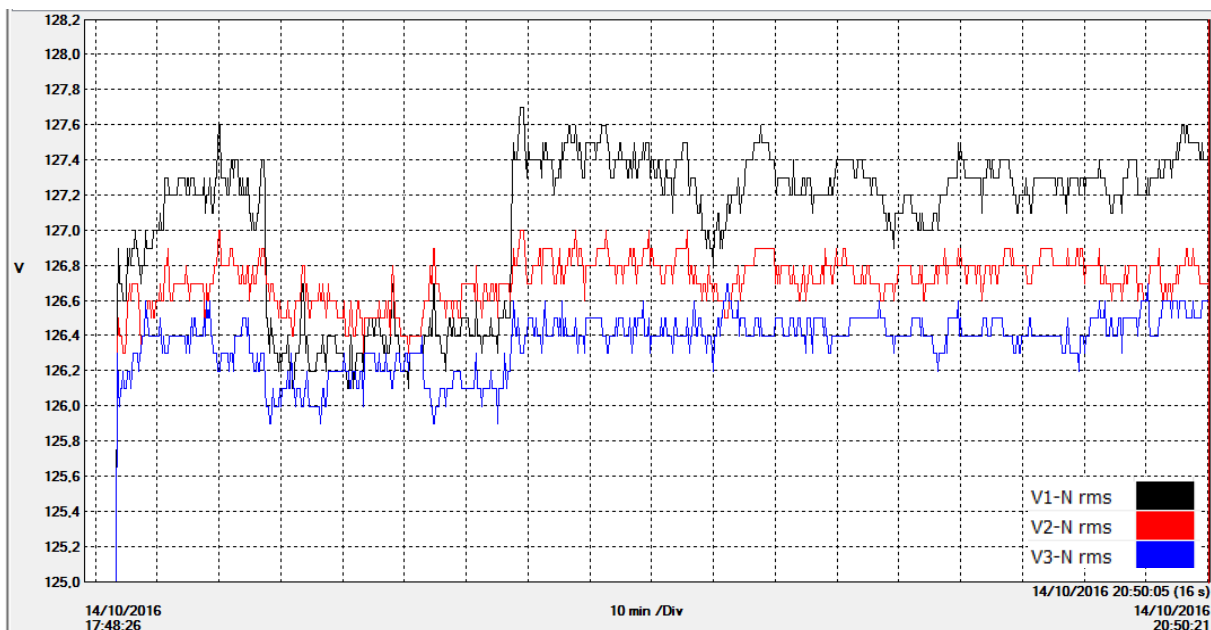


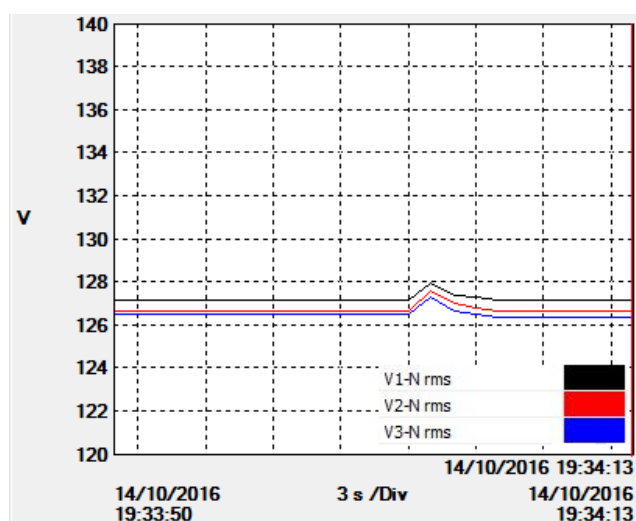
Figura 26 – Gráfico da tensão de fase (concessionária COPEL).  
Fonte: Programa computacional PowerPad III (AEMC).



**Figura 27 – Gráfico da tensão de fase (gerador).**  
 Fonte: Programa computacional PowerPad III (AEMC).

#### 4.3.1 Exemplo de análise de elevação de tensão

Nesta seção será analisado o período de tempo entre 19 h 33 min 50 s e 19 h 34 min 13 s. Durante este intervalo podemos perceber uma variação nos valores de tensão de fase, caracterizando uma elevação de tensão, como pode ser visto na figura 28.



**Figura 28 – Elevação de tensão de fase (gerador).**  
 Fonte: Programa computacional PowerPad III (AEMC).

Neste intervalo de tempo, podemos perceber uma queda nos valores de corrente, conforme a figura 29, indicando que a elevação de tensão é causada pelo desligamento de alguma carga.

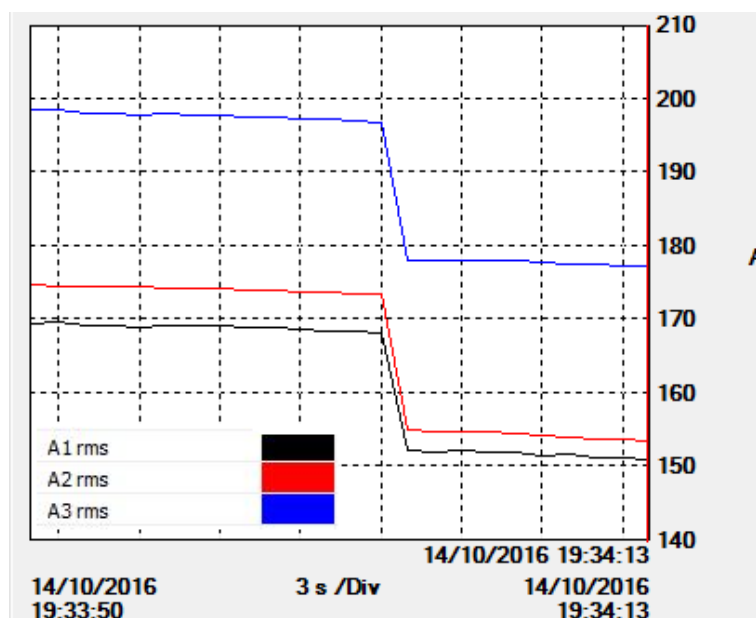


Figura 29 – Queda nos valores de corrente (gerador).  
Fonte: Programa computacional PowerPad III (AEMC).

Podemos confirmar esse evento através dos valores encontrados para a potência consumida neste instante, conforme tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetros antes e depois da queda de corrente.

		Antes	Durante	Depois
	Horário	19 h 34 min 03 s	19 h 34 min 04 s	19 h 34 min 05 s
<b>Corrente</b>	A 1 rms	168,2 A	152,3 A	151,8 A
	A 2 rms	173,5 A	155,0 A	154,8 A
	A 3 rms	196,8 A	200,5 A	183,0 A
<b>Tensão</b>	V 1-N rms	127,2 V	128,0 V	127,4 V
	V 2-N rms	126,7 V	127,6 V	127,0 V
	V 3-N rms	126,5 V	127,3 V	126,7 V
<b>Potência Ativa</b>	PT	66.277 W	60.712 W	60.402 W
<b>Potência Reativa</b>	QT	16.394 var	12.197 var	11.899 var

Fonte: Própria

#### 4.4 PARÂMETRO - CORRENTE DE FASE

Observa-se nas figuras 30 e 31 que a corrente no período da concessionária é em média maior que a corrente durante o funcionamento do gerador. Podemos concluir que a carga durante o período do gerador é menor do que quando se utiliza a concessionária.

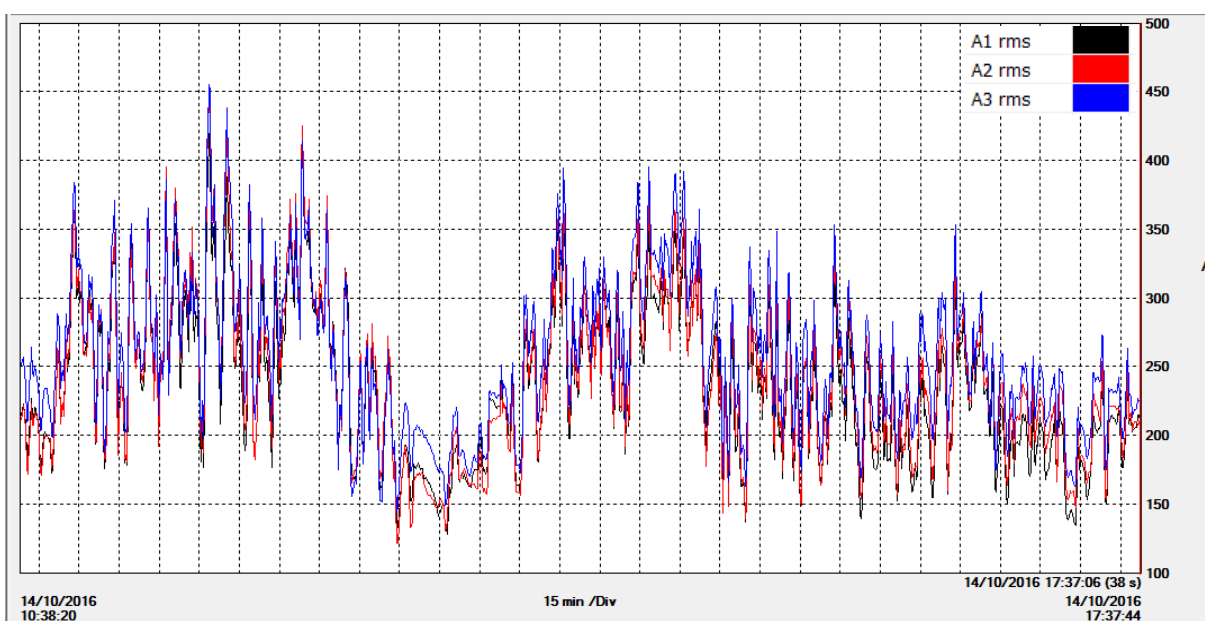


Figura 30 – Gráfico da corrente de fase (concessionária COPEL).  
Fonte: Programa computacional PowerPad III (AEMC).

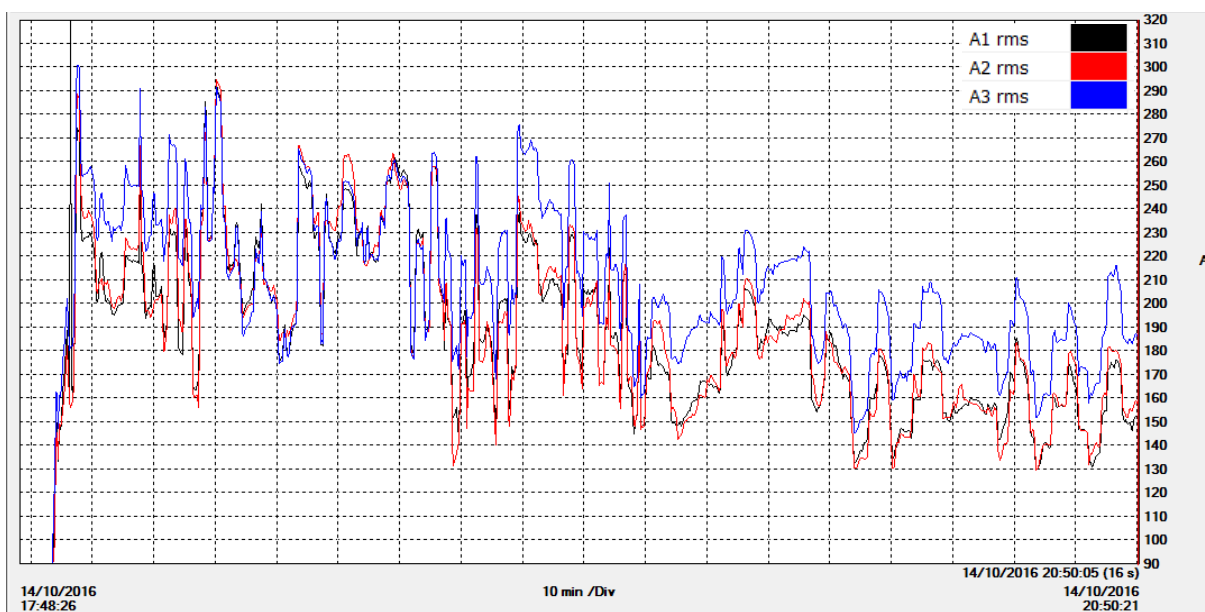


Figura 31 – Gráfico da corrente de fase (gerador).  
Fonte: Programa computacional PowerPad III (AEMC).

Podemos perceber uma queda nos valores de corrente no período das 11 h 30 min às 14 h 0 min, evidenciado na figura 32.

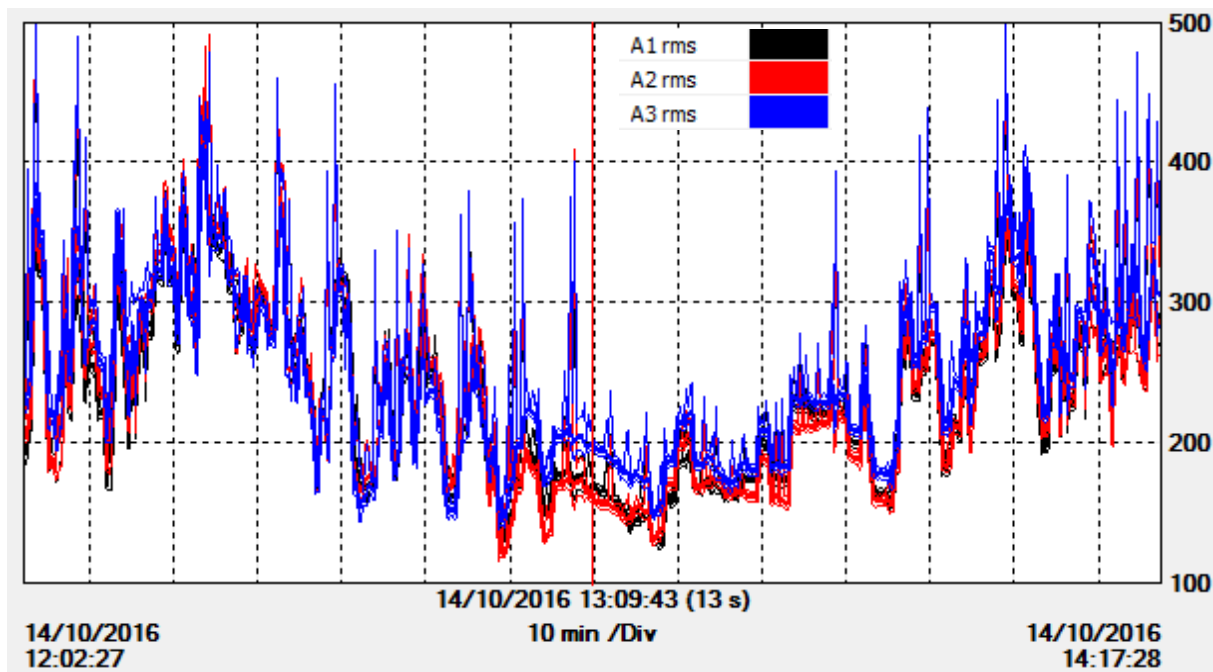


Figura 32 - Queda da corrente no período de almoço.  
Fonte: Programa computacional PowerPad III (AEMC).

Neste período foi constatado que os funcionários se encontravam em período de almoço; portanto, alguns dos principais aparelhos elétricos foram desligados ocasionando o ocorrido.

#### 4.5 PARÂMETRO – POTÊNCIA

Nas figuras 33 e 34 estão os gráficos da potência ativa e reativa consumida durante a alimentação pela concessionária e pelo gerador.

Por esses gráficos é possível analisar o comportamento das cargas no supermercado ao longo do dia. Na parte da manhã, percebe-se que a potência tem um aumento, sendo este o período de maior consumo de potência, chegando a 164 kW. É no período da manhã que a procura por alimentos se intensifica, e as maiores cargas como os fornos da padaria, salgaderia e confeitaria estão em uso.



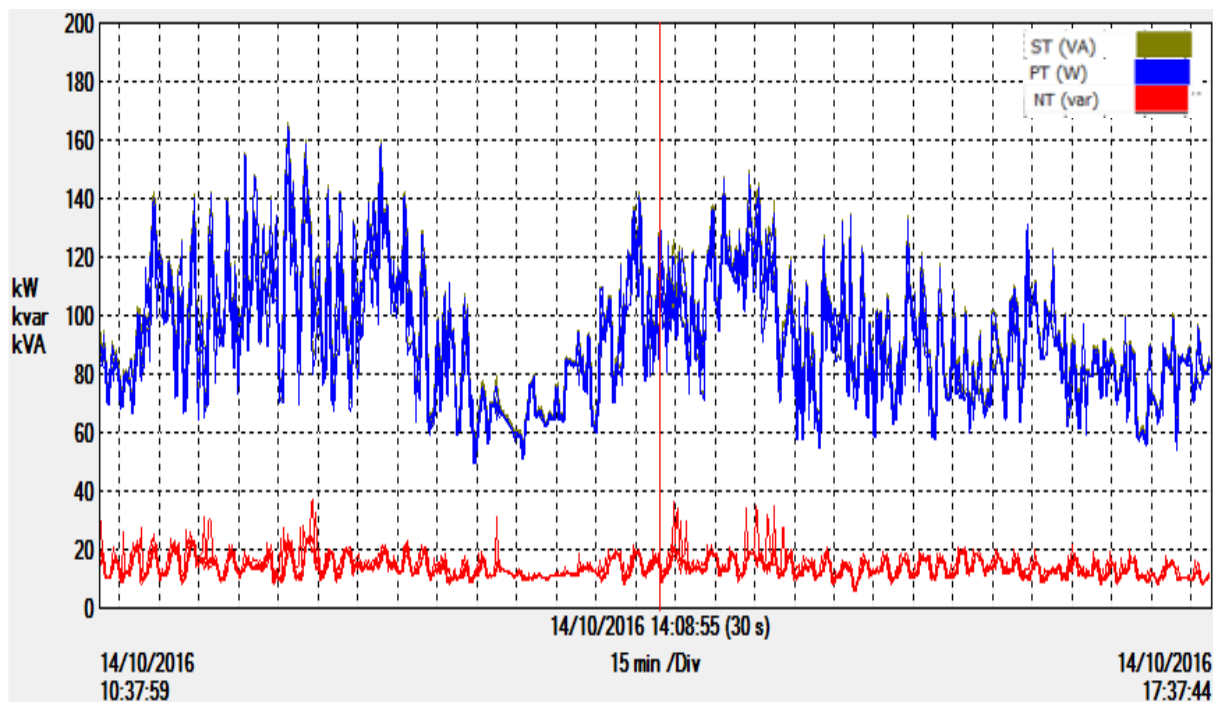


Figura 33 – Gráfico das potências ativa, reativa e aparente (concessionária).  
Fonte: Programa computacional PowerPad III (AEMC).

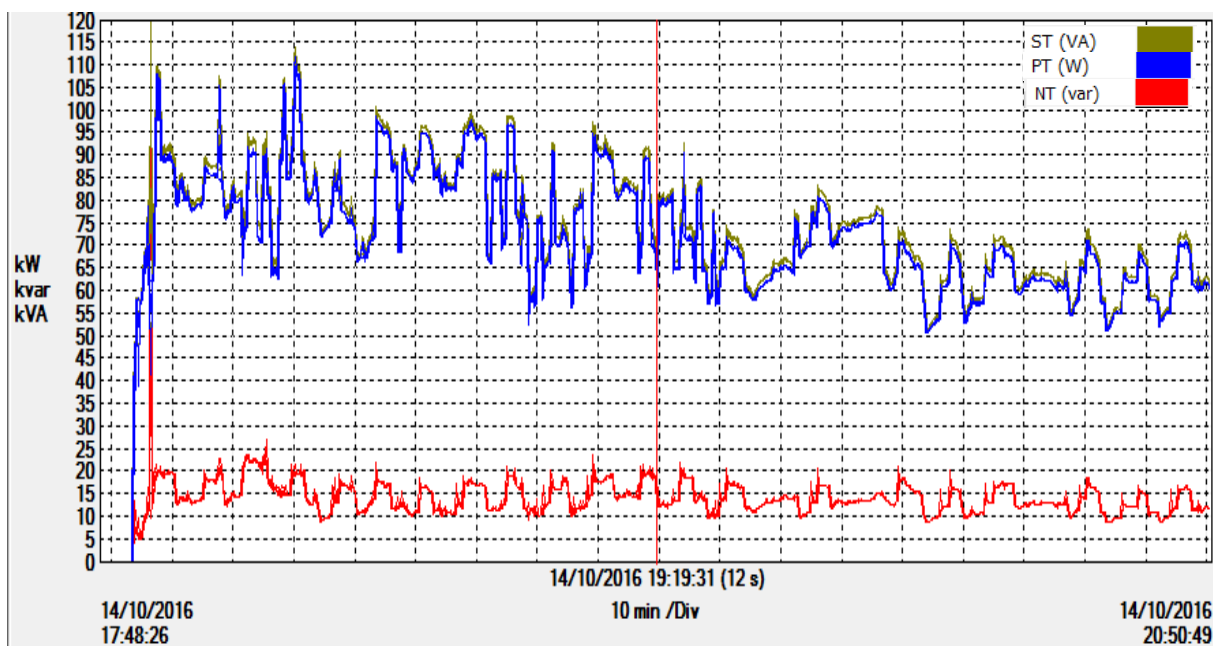


Figura 34 – Gráfico das potências ativa, reativa e aparente (gerador).  
Fonte: Programa computacional PowerPad III (AEMC).

Após este período é verificado uma queda significativa, que assim como já foi citado anteriormente na análise da corrente, ocorre provavelmente devido ao horário de almoço.

Ao longo do dia, há uma variação no valor da potência, porém em valores médios, a potência foi diminuindo. A partir da metade da tarde, por volta das 16 h, esta diminuição começou a ficar mais evidente. Essa diminuição no consumo continua no período de operação do gerador.

Em teoria isto ocorre devido ao fato de que, na parte da tarde, a maior parte dos alimentos fabricados, fritos e assados no estabelecimento, já estão prontos, não havendo a necessidade de todos os fornos estarem ligados. Apesar de a queda ser menor, ela também ocorre com a potência reativa. Em teoria, pela diminuição da temperatura no final do dia, os compressores de refrigeração não precisam estar todos em operação, e entram em operação menos vezes, permanecendo ligados durante um período menor. A queda não chega a ser tão significativa, pois, outras cargas reativas como geladeiras e freezers permanecem ligadas 24 h. Esta diminuição tende até às 21 h, horário no qual ocorre o fechamento do estabelecimento.

No período alimentado pelo gerador, a maior potência consumida registrada chegou a 111,8 kW, valor menor do que o registrado na concessionária. Comparando o valor médio da potência nos dois cenários, podemos perceber que a potência manteve uma média de 91,41 kW no período de alimentação pela concessionária, enquanto que com o gerador o valor médio foi igual a 70,76 kW, ou seja, no período com o gerador a instalação utilizou em média 22% menos carga.

#### 4.6 PARÂMETRO – FATOR DE POTÊNCIA

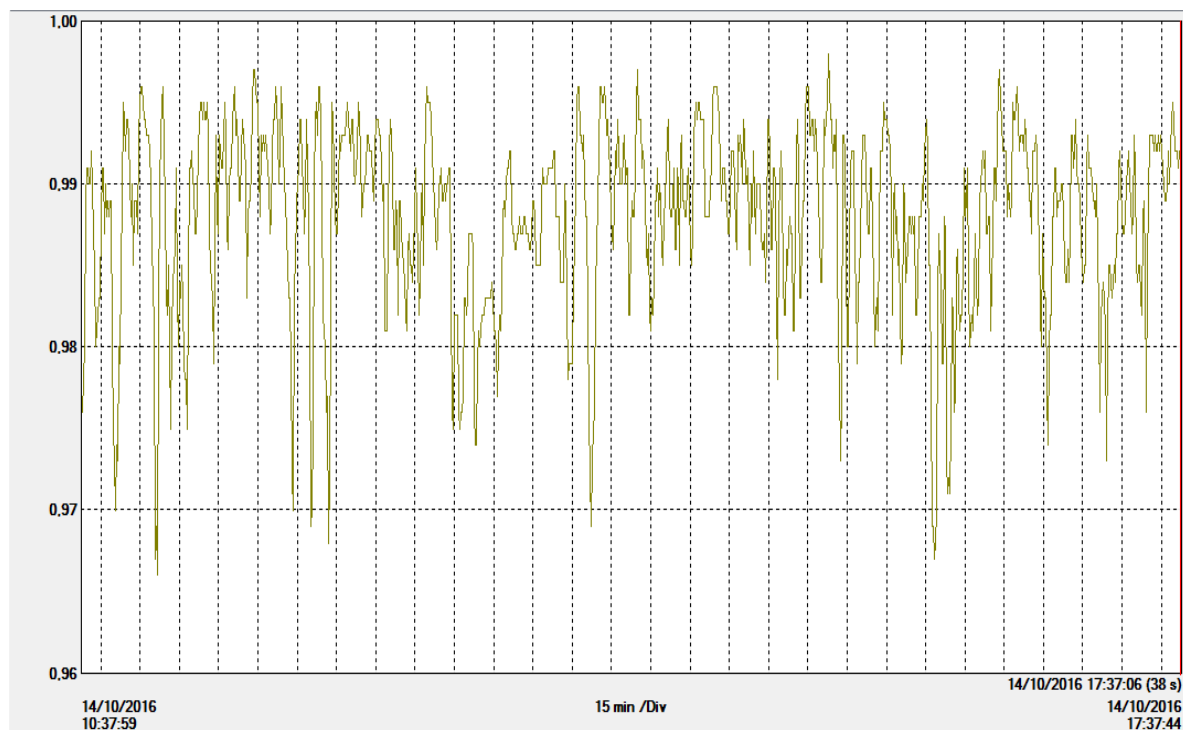


Figura 35 – Gráfico do fator de potência (concessionária COPEL).  
Fonte: Programa computacional PowerPad III (AEMC).

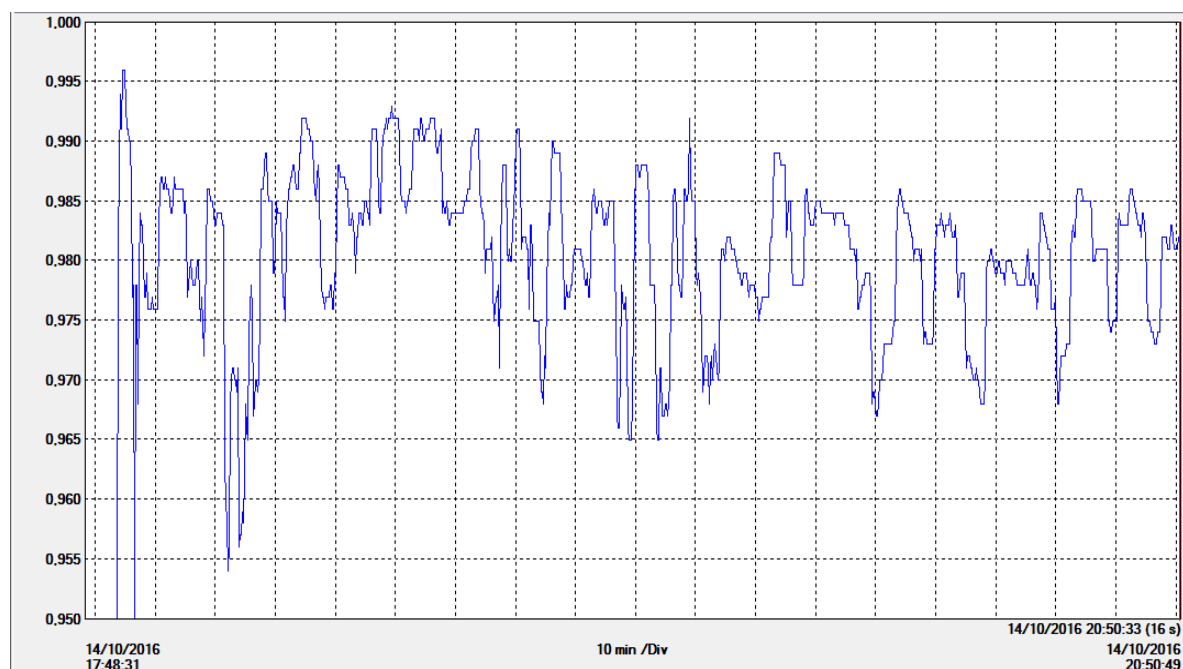


Figura 36 – Gráfico do fator de potência (gerador).  
Fonte: Programa computacional PowerPad III (AEMC).

A medição da grandeza elétrica fator de potência encontra-se adequada, tanto para a concessionária COPEL quanto para o gerador diesel, como visto nas figuras 35 e 36, e dentro do valor regulamentado pelo Prodist (módulo 8) da ANEEL, estando a faixa de valores adequados, acima de 0,92 capacitivo ou indutivo, sendo das 6 h da manhã às 24 h o fator de potência deve ser no mínimo 0,92 para a energia e demanda de potência reativa indutiva fornecida, e das 24h até as 6h no mínimo 0,92 para energia e demanda de potência reativa capacitiva recebida.

#### 4.6.1 Exemplo de análise de variação de fator de potência

Nesta seção será analisado o período de tempo entre 18 h 09 min 22 s, e 18 h 13 min 07 s. Durante este intervalo podemos perceber uma variação nos valores de fator de potência, como pode ser visto na figura 37 abaixo.



Figura 37 – Variação do fator de potência (gerador).  
Fonte: Programa computacional PowerPad III (AEMC).

Tabela 5 – Parâmetros durante variação da figura 37.

		Antes	Durante	Depois
	Horário / Sigla	18 h 11 min 28 s	18 h 12 min 17 s	18 h 12 min 39 s
Fator de Potência	FP	0,983	0,953	0,971
Potência Ativa	PT	80.695 W	74.181 W	90.325 W
Potência Reativa	QT	15.004 var	23.638 var	22.357 var

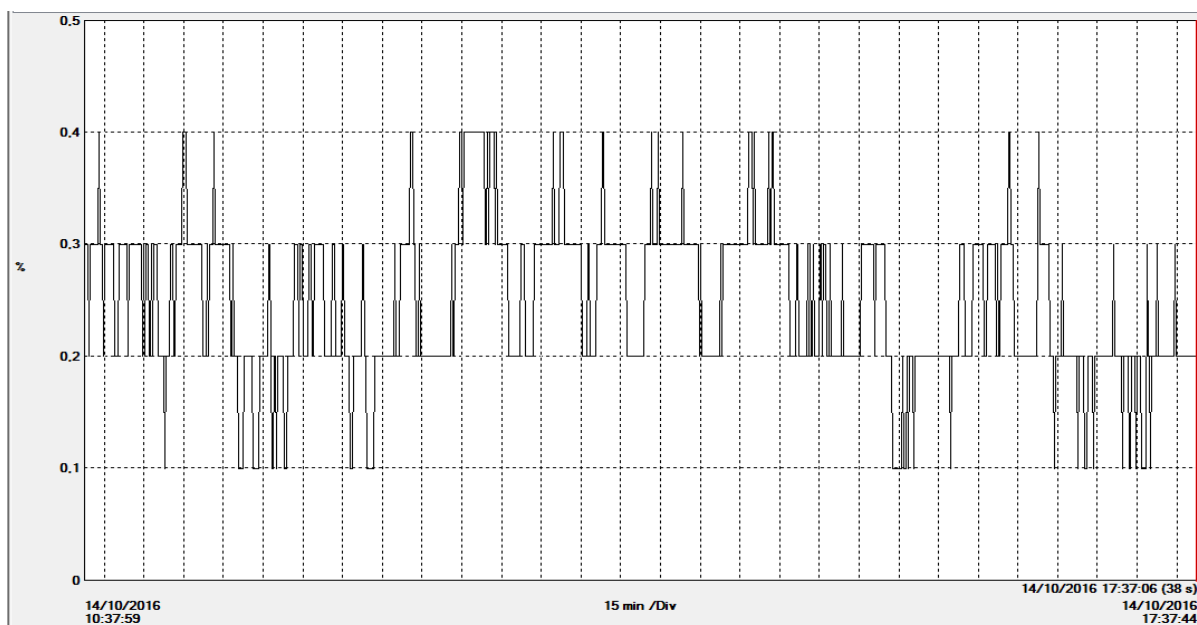
Fonte: Própria.

Pela tabela 5, o momento que ocorreu a queda do fator de potência foi acompanhado por uma elevação brusca da potência reativa da instalação de mais de 50% em relação ao momento anterior. Uma suposição para este aumento é a entrada de compressores de refrigeração, já que são as cargas reativas mais significativas presentes. Ao mesmo tempo, outras cargas mais resistivas foram desligadas, pelo fato da potência ativa diminuir, e isto, em conjunto com a entrada dos compressores, intensificou a queda do fator de potência.

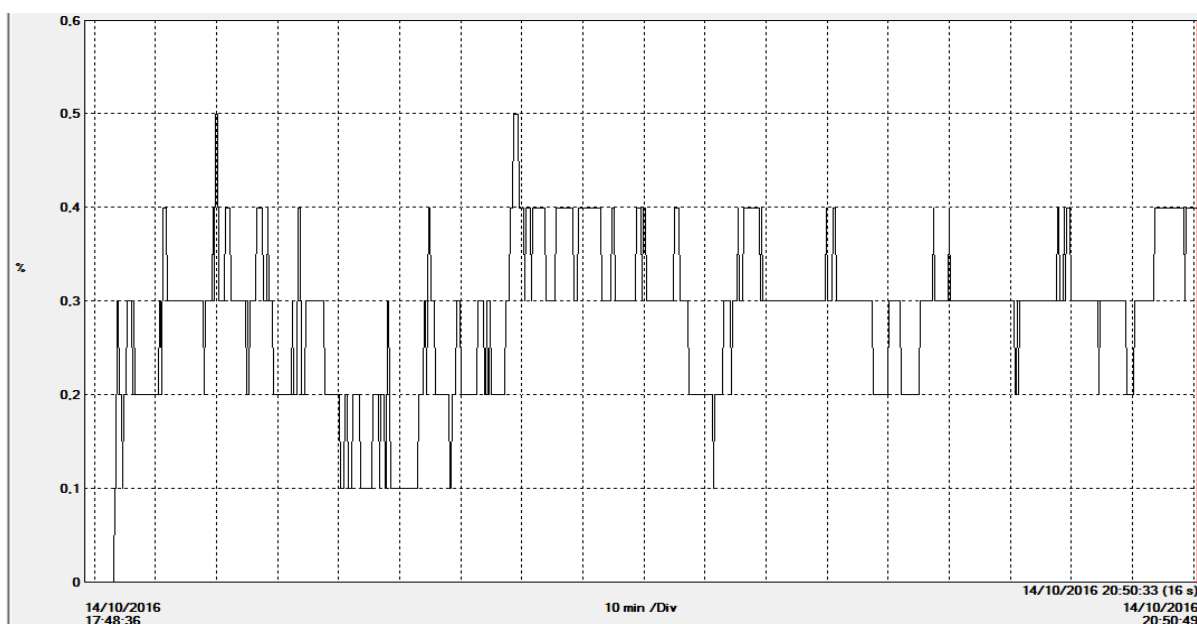
Posteriormente foi observado que o fator de potência aumentou, devido à entrada de uma carga resistiva grande, provavelmente um forno (devido ao valor da potência), porém, a potência reativa não diminuiu consideravelmente, não sendo possível afirmar se foi a saída dos compressores.

#### 4.7 PARÂMETRO – DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO

Para realizar a abordagem sobre os dados de desequilíbrio de tensão a seguir, foi utilizada a norma IEEE 112 quando se utiliza o gerador. Como o Prodist não estabelece limites para o desequilíbrio em baixa tensão, apenas comparou-se os resultados obtidos nas duas situações.



**Figura 38 – Gráfico do desequilíbrio de tensão de linha (concessionária COPEL).**  
**Fonte: Programa computacional PowerPad III (AEMC).**



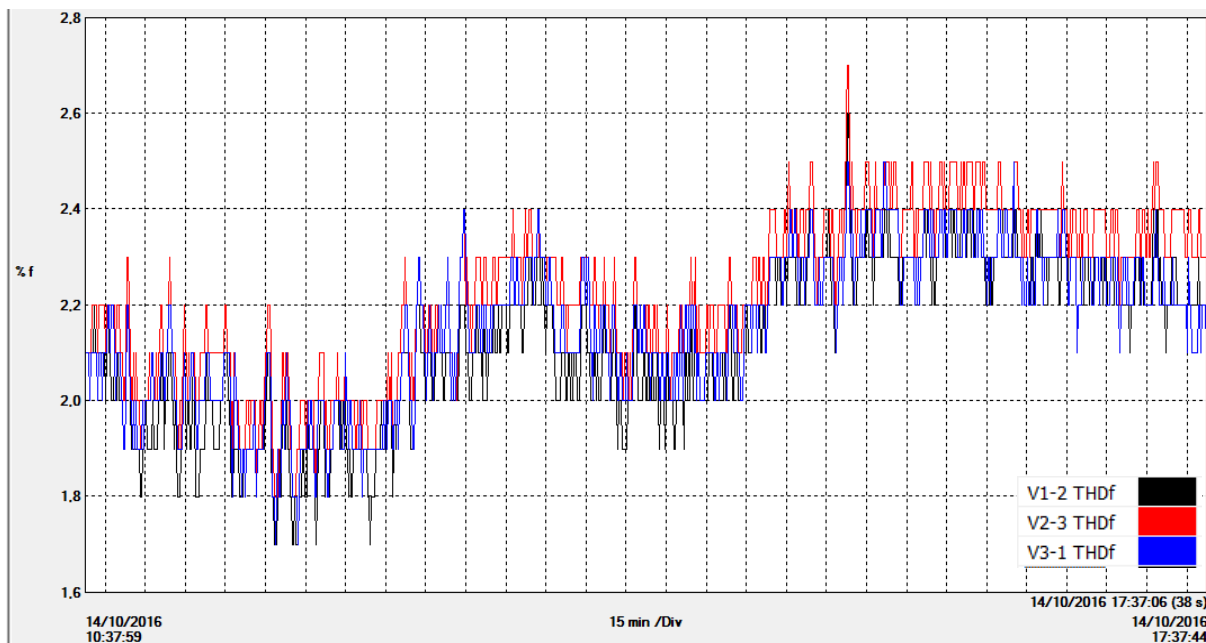
**Figura 39 – Gráfico do desequilíbrio de tensão de linha (gerador).**  
**Fonte: Programa computacional PowerPad III (AEMC).**

O analisador de energia utilizado (PowerPad III, AEMC), usa como base a norma IEEE 112 para seus registros.

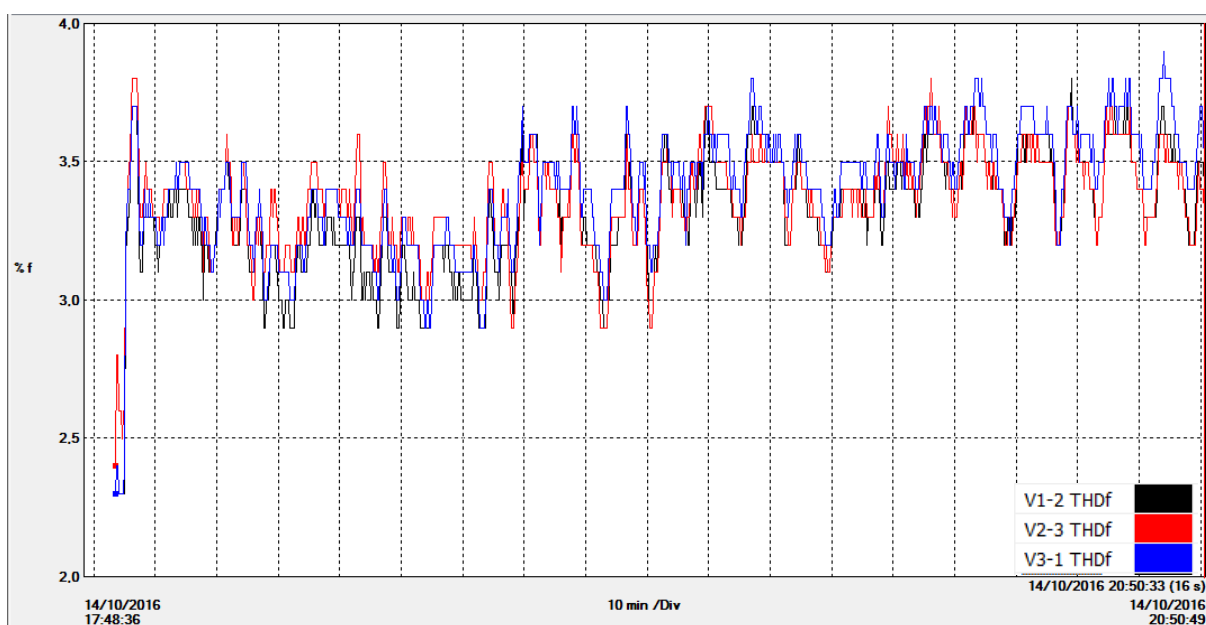
Os valores encontrados quando utilizado o gerador na figura 39, encontram-se até 0,5 %, valor recomendado pelo IEEE. Comparando com a situação da concessionária, podemos perceber que os valores também não ultrapassam os 5%.

#### 4.8 PARÂMETRO – TAXA DE DISTORÇÃO HARMÔNICA (TENSÃO DE LINHA)

A medição da grandeza elétrica (distorção harmônica total – tensão de linha) encontra-se em conformidade com os parâmetros estabelecidos pela IEEE-519, estando abaixo de 8% nos dois cenários avaliados.



**Figura 40 – Gráfico da taxa de distorção harmônica da tensão de linha (concessionária).**  
 Fonte: Programa computacional PowerPad III (AEMC).



**Figura 41 – Gráfico da taxa de distorção harmônica da tensão de linha (gerador)**  
 Fonte: Programa computacional PowerPad III (AEMC).

#### 4.8.1 Comparação entre o DHT da concessionária e do gerador

Como podemos perceber, analisando as figuras 40 e 41, a distorção harmônica total de tensão é menor no período em que a concessionária está alimentando o supermercado. O valor médio para esse período é igual a 2,2%, enquanto que no período em que o gerador alimenta o supermercado, o valor médio é igual a 3,4%. Como os valores de tensão nos dois períodos são muito próximos, podemos afirmar que o DHT de tensão no período em que o gerador está alimentando o supermercado, é 1,57 vezes maior que quando o supermercado está ligado à concessionária.

Como a medição foi realizada no QTA, antes da carga, sabemos que a distorção harmônica de tensão se deve à passagem de correntes harmônicas pelas impedâncias da fonte. Logo, para poder compreender os resultados obtidos, precisamos analisar esses dois fatores: correntes harmônicas (DHT de corrente) e a impedância das duas fontes.

A impedância do transformador, segundo dados de projeto, é 3,41%. Utilizando a tensão no secundário de 220 V como tensão de base, e a potência de 225 kVA como potência de base, podemos calcular a impedância do transformador em ohms vista pelo lado de baixa tensão.

$$Z_b = \frac{V_b^2}{S_b} = \frac{220^2}{225000} = 0,215, \quad (19)$$

$$Z_r = Z_b \times Z_{pu} = 0,215 \times 0,0341 = 0,007335 \Omega, \quad (20)$$

$Z_b$  é a impedância base, e  $Z_r$  a impedância em ohms, visto pelo secundário do transformador.

A reatância subtransitória do gerador, segundo dados, é 11,49%, quando a tensão de base é igual a 440 V e a potência base é igual a 350 kVA. Logo as reatâncias de base e em ohms são:



$$X_b = \frac{V_b^2}{S_b} = \frac{440^2}{350000} = 0,553, \quad (21)$$

$$X_r = X_b \times X_{pu} = 0,553 \times 0,1149 = 0,06355 \, \Omega, \quad (22)$$

$X_b$  é a reatância base, e  $X_r$  a reatância em ohms.

Porém, o gerador não está ligado para operar a 440 V, e sim a 220 V. Logo temos que consultar o catálogo do alternador para obter o esquema das ligações internas. A figura 42 mostra as ligações internas do alternador para operação em 440 V e em 220 V.

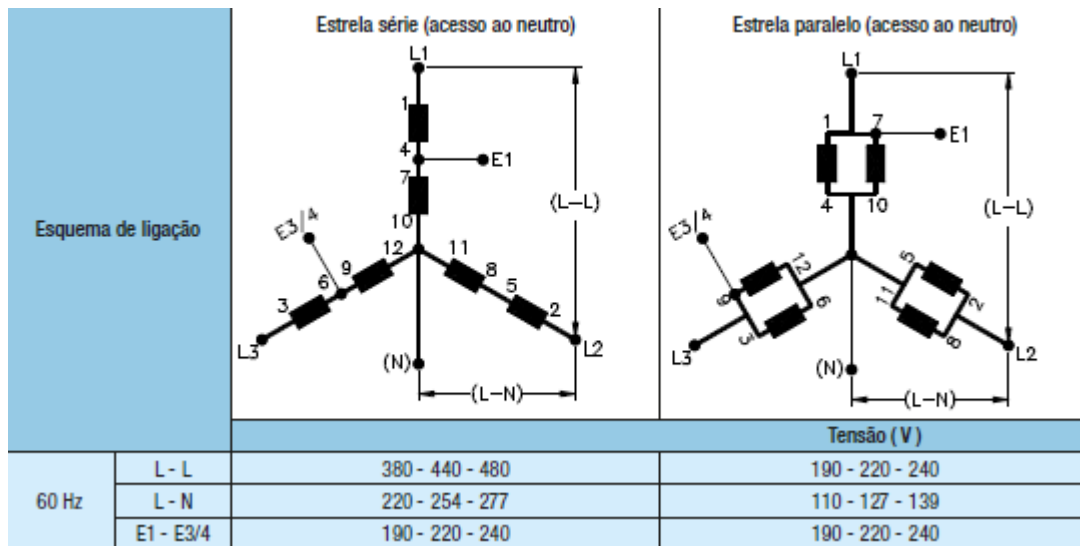


Figura 42 – Ligações internas do alternador WEG GTA252AI49.  
Fonte: Catálogo WEG Linha G i Plus (WEG).

Para encontrar a reatância entre fases quando o gerador está ligado para operar em 220 V, primeiro calculamos a reatância de cada um dos seis elementos de circuito mostrados. Assumindo que o circuito seja balanceado, podemos afirmar que a reatância entre fase e neutro é três vezes menor que a reatância entre fases.

$$X_{Y(440\text{ V})} = \frac{X_{\Delta(440\text{ V})}}{3} = \frac{0,06355}{3} = 0,02118 \, \Omega, \quad (23)$$

Como a reatância fase-neutro é composta por duas reatâncias em série, e assumindo que as duas possuam o mesmo valor, podemos dizer que a reatância de cada um dos elementos de circuito é igual a:

$$X_{elemento} = \frac{X_Y}{2} = \frac{0,02118}{2} = 0,0106 \Omega, \quad (24)$$

Observando a figura 42, podemos perceber que na ligação em 220 V, as reatâncias fase-neutro são compostas por dois elementos de circuito em paralelo; logo:

$$X_{Y(220V)} = \frac{X_{elemento}}{2} = \frac{0,0106}{2} = 0,00529 \Omega, \quad (25)$$

Assim, a reatância entre fases será igual a:

$$X_{\Delta(220V)} = 3 \times 0,00529 = 0,01589 \Omega, \quad (26)$$

Comparando as reatâncias entre fases do transformador com a do gerador, podemos perceber que a reatância do gerador é 2,16 vezes maior que do transformador. Se a corrente RMS da rede fosse igual a corrente RMS do gerador, essa seria a razão esperada dos DHT's.

Os valores médios de DHT de corrente quando a concessionária alimenta o supermercado, e quando o gerador está operando, são, respectivamente, 11,13% e 10,86%. Apesar de serem valores próximos, esses valores são relativos à corrente RMS, e como podemos perceber pelos gráficos de corrente, a corrente RMS, em média, é menor quando o gerador está operando. Os valores médios de corrente para esses dois momentos, concessionária e gerador, são respectivamente, 251 A e 198,8 A. Assim, podemos analisar as correntes harmônicas em ampères.

$$I_h = I_{RMS} \times DHT_I, \quad (27)$$

As correntes harmônicas para os dois momentos, concessionária e gerador, são respectivamente, 27,94 A e 21,59 A. Podemos afirmar que a corrente harmônica no período de funcionamento do gerador é 0,77 vezes o valor da corrente harmônica no período de alimentação pela concessionária.

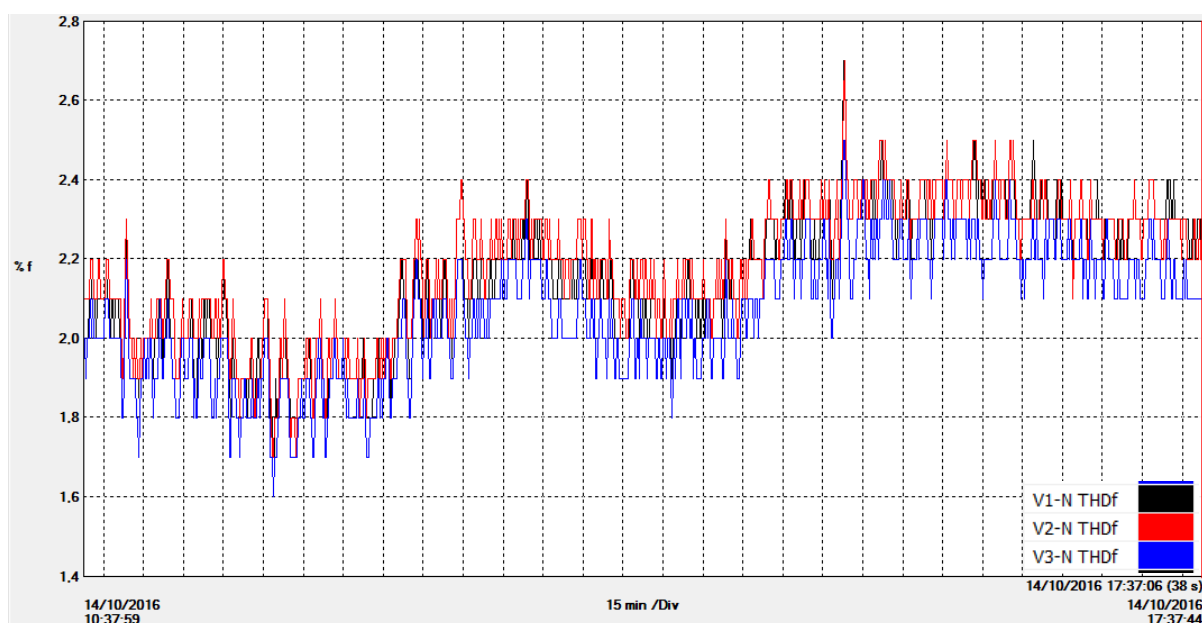
Levando em consideração as diferenças nas impedâncias internas e nas correntes RMS e harmônica, chegamos ao seguinte resultado:

$$DHT_V(\text{Gerador}) = 2,16 \times 0,77 \times DHT_V(\text{Concessionária}), \quad (28)$$

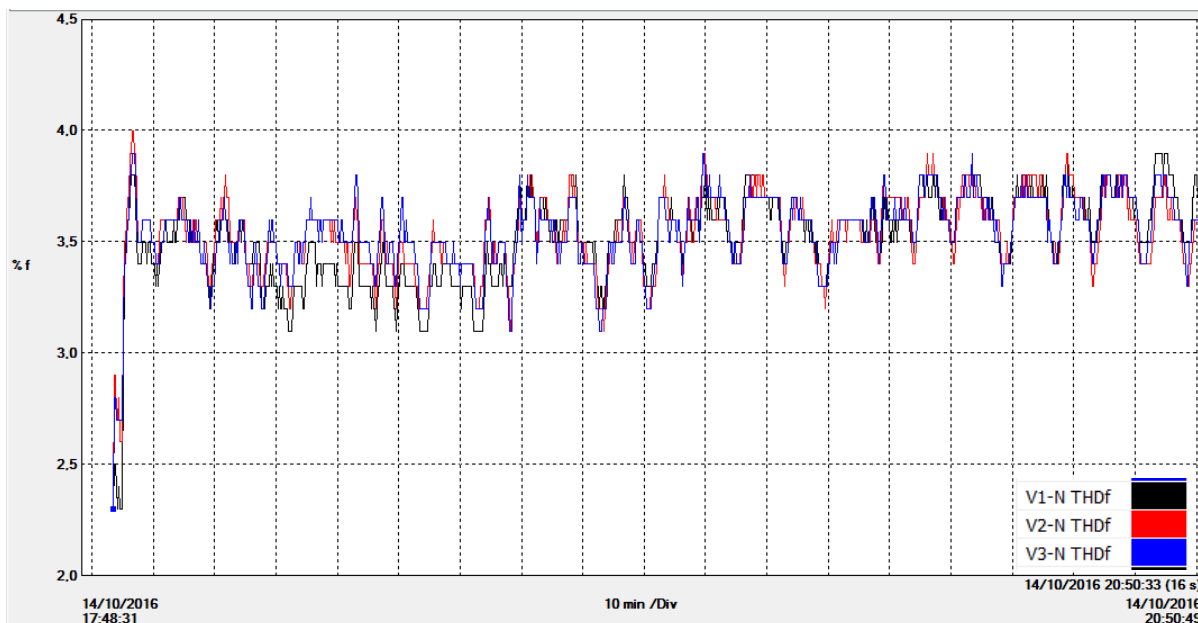
$$DHT_V(\text{Gerador}) = 1,66 \times DHT_V(\text{Concessionária}), \quad (29)$$

Ou seja, a queda de tensão, devido as correntes harmônicas, no gerador, deveria ser 1,66 vezes maior que a queda de tensão na rede. Esse resultado está próximo do resultado obtido, que é igual a 1,57 vezes maior no período de operação do gerador.

#### 4.9 PARÂMETRO – TAXA DE DISTORÇÃO HARMÔNICA (TENSÃO DE FASE)



**Figura 43 – Gráfico da taxa de distorção harmônica da tensão de fase (concessionária).**  
 Fonte: Programa computacional PowerPad III (AEMC).

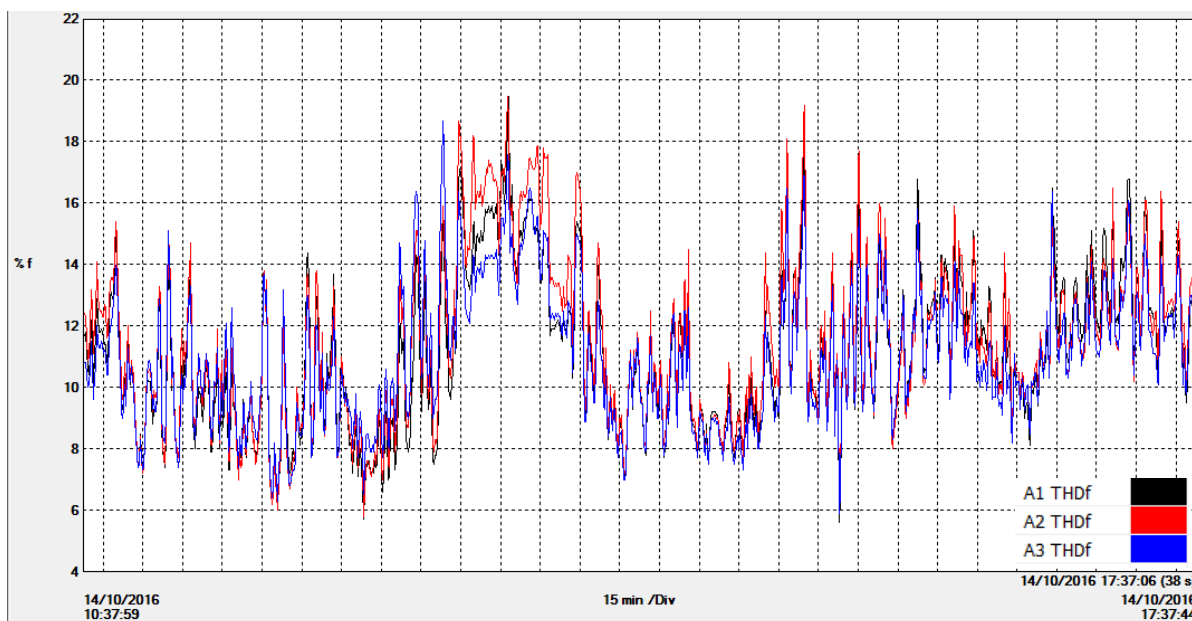


**Figura 44 – Gráfico da taxa de distorção harmônica da tensão de fase (gerador).**  
**Fonte: Programa computacional PowerPad III (AEMC).**

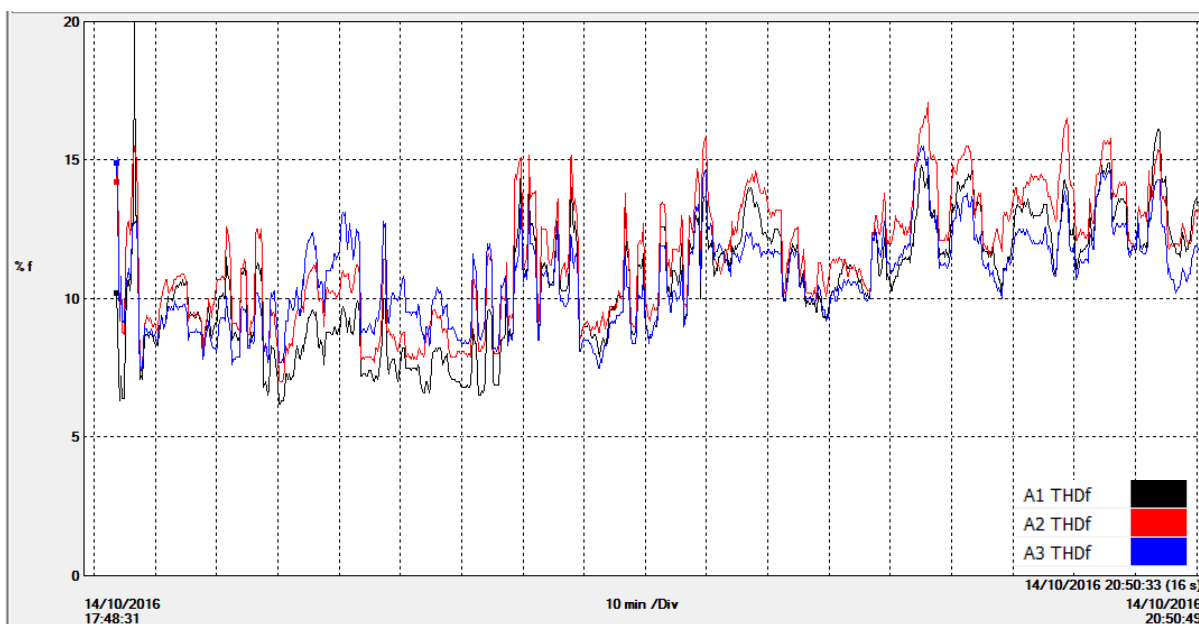
A medição da grandeza elétrica (distorção harmônica total – tensão de fase) encontra-se em conformidade com os parâmetros estabelecidos pela IEEE-519, estando abaixo de 8% nos dois cenários avaliados.

#### 4.10 PARÂMETRO – TAXA DE DISTORÇÃO HARMÔNICA (CORRENTE DE FASE)

A medição da grandeza elétrica (distorção harmônica total - corrente) foi abordada com maiores detalhes, visto que a IEEE-519 avalia a distorção harmônica de corrente para cada ordem harmônica. Neste estudo foram avaliadas as correntes harmônicas de 3<sup>a</sup>, 5<sup>a</sup> e 7<sup>a</sup> ordem, pois as demais, pares ou de ordem superior a 7<sup>a</sup>, não apresentavam valores significativos. Os DHT's de corrente para ambos os cenários, estão expostos nas figuras 45 e 46.



**Figura 45 – Gráfico da taxa de distorção harmônica da corrente de fase (concessionária).**  
 Fonte: Programa computacional PowerPad III (AEMC).



**Figura 46 – Gráfico da taxa de distorção harmônica da corrente de fase (gerador).**  
 Fonte: Programa computacional PowerPad III (AEMC).

Porém, com apenas esses dados, não é possível concluir se os valores de distorção harmônica de corrente estão abaixo do limite recomendado pela IEEE-519. Para isso, calcularam-se os valores máximos (pertencentes ao 95º percentil) e médios para as correntes harmônicas de 3ª, 5ª e 7ª ordem, e também para os TDD's nos dois cenários.

Tabela 6 – Valores médios e máximos para as distorções harmônicas de corrente e TDD (concessionária).

	A1 (%)	A2 (%)	A3 (%)
3ª ordem (média)	2,4	3,2	1,9
3ª ordem (máx)	3,7	4,9	3,0
5ª ordem (média)	9,2	9,0	9,2
5ª ordem (máx)	12,5	12,6	12,4
7ª ordem (média)	4,9	5,4	5,0
7ª ordem (máx)	7,2	8,2	7,0
TDD (média)	5,4	5,7	5,9
TDD (máx)	6,0	6,2	6,4

Fonte: Própria.

Tabela 7 – Valores médios e máximos para as distorções harmônicas de corrente e TDD (gerador).

	A1 (%)	A2 (%)	A3 (%)
3ª ordem (média)	3,1	5,4	3,9
3ª ordem (máx)	4,2	7,3	5,2
5ª ordem (média)	6,3	6,5	6,0
5ª ordem (máx)	9,0	9,1	8,0
7ª ordem (média)	7,4	7,2	7,7
7ª ordem (máx)	9,5	9,1	9,6
TDD (média)	6,4	6,7	7,1
TDD (máx)	7,0	7,0	8,0

Fonte: Própria.

Avaliando os valores mostrados nas tabelas 6 e 7, e comparando com a tabela 2, podemos perceber que no período em que a concessionária alimentava o supermercado, o valor do TDD foi aceitável, abaixo de 8%, mesmo que a corrente harmônica de 5ª ordem tenha estado acima dos 7% recomendados. Já no período em que o gerador esteve operando, o TDD esteve acima do limite recomendado de 5%. Percebe-se que nesse período praticamente todas as correntes harmônicas avaliadas estavam acima do valor recomendado pela IEEE.

#### 4.10.1 Exemplo de análise de variação de distorção harmônica de corrente

Nesta seção será analisado o período de tempo entre 18 h 35 min 33 s, e 18 h 39 min 23 s. Durante este intervalo podemos perceber uma variação nos valores de distorção harmônica de corrente, como pode ser visto na figura 47 abaixo.

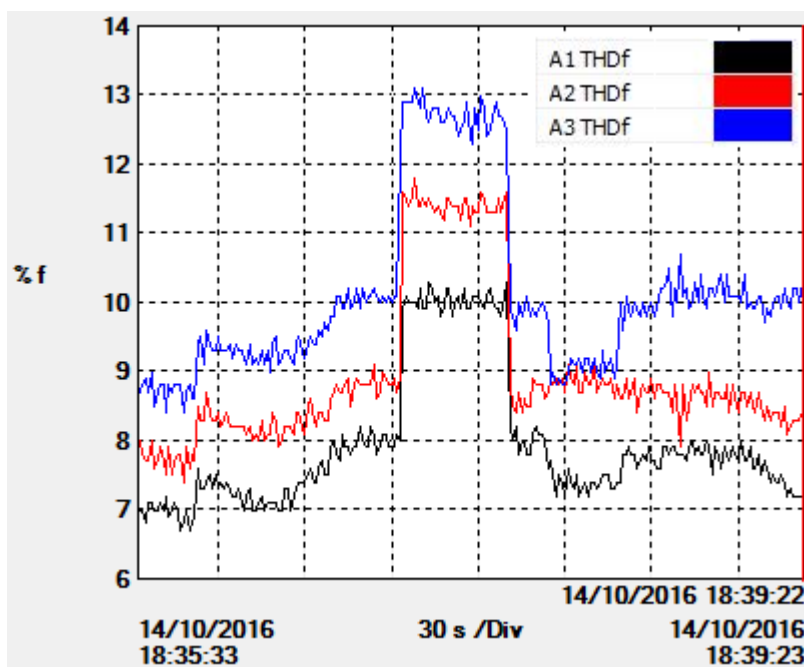


Figura 47 – Variação do THD de corrente (gerador).  
Fonte: Programa computacional PowerPad III (AEMC).

Neste intervalo de tempo, podemos perceber um aumento nos valores de distorção harmônica de corrente de 3ª, 5ª e 7ª ordem, conforme ilustrado nas figuras 48, 49 e 50, respectivamente.

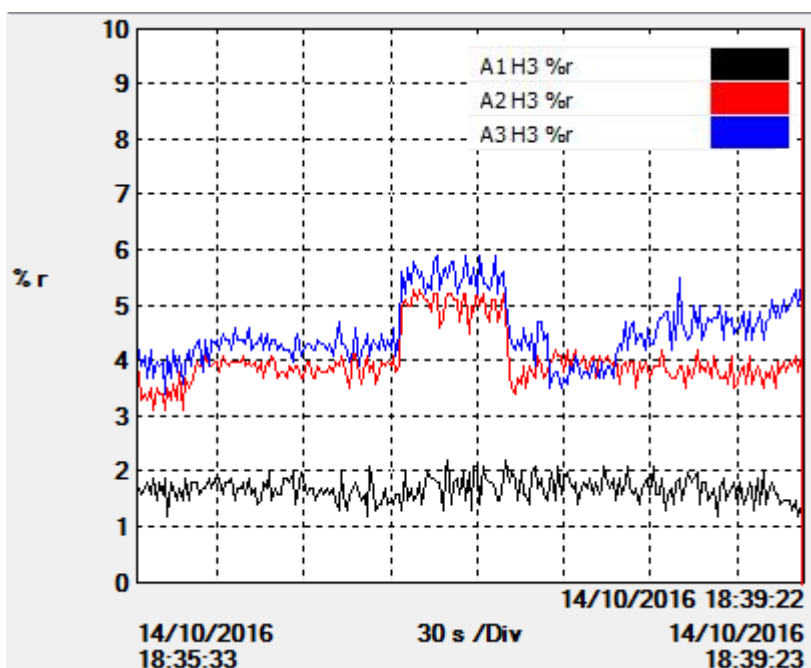


Figura 48 – Distorção harmônica de corrente de 3ª ordem (gerador).  
Fonte: Programa computacional PowerPad III (AEMC).

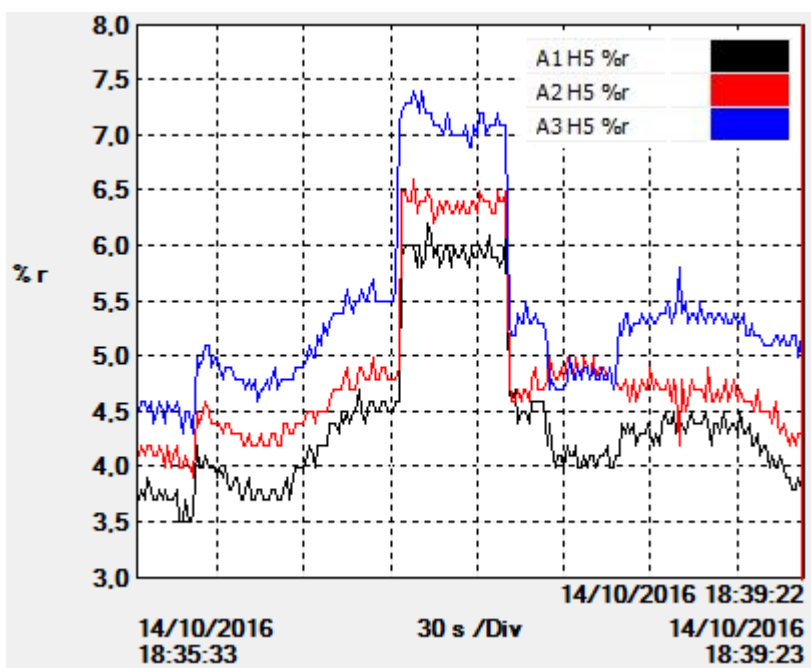
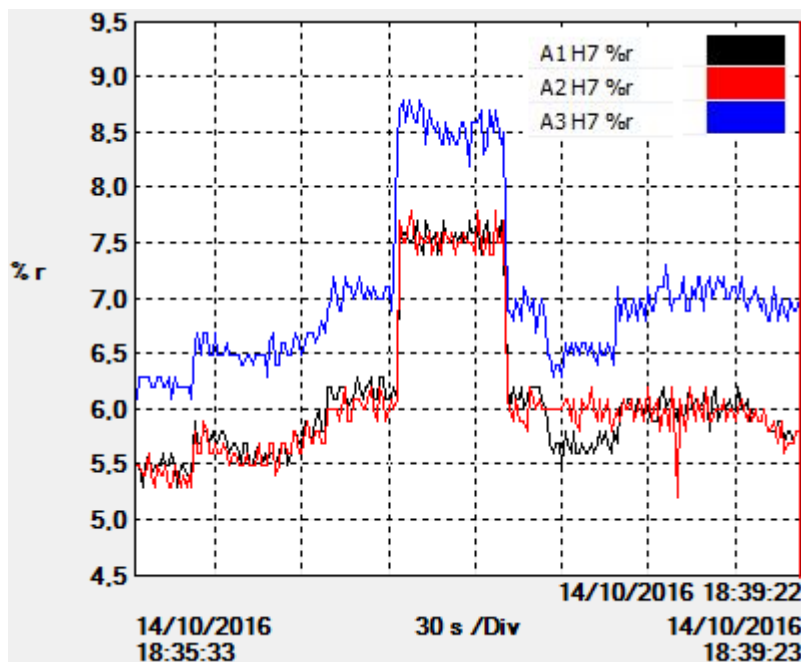


Figura 49 – Distorção harmônica de corrente de 5ª ordem (gerador).  
Fonte: Programa computacional PowerPad III (AEMC).





**Figura 50 – Distorção harmônica de corrente de 7ª ordem (gerador).**  
 Fonte: Programa computacional PowerPad III (AEMC).

Pode-se notar que as variações mais significativas neste período analisado, ocorreram nas correntes harmônicas de 5ª e 7ª ordem. Analisando a figura 48, observa-se que não houve variação no valor da corrente harmônica de 3ª ordem na fase 1, significando que praticamente toda variação da corrente harmônica nesta fase, mostrada na figura 47, é devida as correntes de 5ª e 7ª ordem .

Esse comportamento está de acordo com o esperado, pois as principais cargas não lineares da instalação são os inversores de frequência, que controlam os motores dos compressores para refrigeração. Essas cargas produzem principalmente correntes harmônicas de 5ª e 7ª ordem com maior intensidade, e também correntes de 11ª e 13ª ordem com menor intensidade.

A instalação elétrica não apresenta um grande número de cargas não lineares responsáveis pela produção de correntes harmônicas de 3ª ordem. Nesse quesito, sua principal carga é o conjunto de reatores eletrônicos utilizados na iluminação.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste estudo observaram-se e compararam-se as principais grandezas elétricas em uma instalação elétrica de um supermercado, que no horário de ponta utiliza um grupo motor gerador para produzir a própria energia elétrica. Pôde-se concluir que, somente um parâmetro não se encontrava dentro dos limites estabelecidos por norma ou recomendados. No período em que o gerador estava alimentando o supermercado, a taxa de distorção de demanda apresentou valores acima do limite recomendado pela IEEE. Frequência, tensão, taxa de distorção harmônica de tensão e fator de potência, apresentaram valores aceitáveis nos dois cenários analisados: quando a concessionária alimentava a instalação, e quando o gerador estava operando.

O desequilíbrio de tensão durante o funcionamento do gerador se encontra dentro dos limites recomendados pela IEEE. Não foi possível concluir sobre os valores de desequilíbrio de tensão durante o período da concessionária utilizando o Prodist.

Pôde-se notar que a regulação de tensão, quando o gerador é quem alimentava o supermercado, apresentou melhores resultados. O perfil de tensão ao longo do tempo apresentou menos variações nesse cenário. Este resultado confirmou a hipótese de que a regulação de tensão realizada nas subestações da concessionária não apresenta uma resposta com a mesma qualidade de um regulador de tensão que está próximo da carga, e regula a tensão fornecida a somente um consumidor.

Outro parâmetro para qual o gerador apresentou melhores resultados é a regulação de frequência. O perfil de frequência ao longo do tempo, também apresentou menos variações quando o gerador estava alimentando o supermercado. Novamente, pôde-se perceber que a regulação quando feita próxima a carga, apresenta melhores resultados.

Neste caso, também foi possível observar a diferença nos valores de distorção harmônica de tensão nos dois cenários avaliados. Pôde-se confirmar que os valores de DHT eram maiores quando o gerador estava alimentando o supermercado: resultado esperado, pois a reatância subtransitória do gerador era

maior que a impedância vista pelo lado de baixa tensão do transformador. Também se pôde avaliar o DHT nos dois cenários considerando as diferenças nos valores de corrente RMS, pois quando o gerador estava operando, a carga que ele alimentava era menor que a carga no período em que a concessionária estava alimentando o supermercado.

Por fim, pôde-se concluir que a qualidade da energia elétrica fornecida pelo grupo motor gerador é diferente da fornecida pela concessionária. Em alguns aspectos como regulação de tensão e velocidade, o grupo motor gerador apresentou resultados melhores. No caso da distorção harmônica, a concessionária apresentou valores menores de DHT e TDD. Porém, como já foi dito anteriormente, apenas o TDD apresentou valores acima dos recomendados, quando o gerador esteve em operação. Conclui-se que, um grupo motor gerador a diesel é uma alternativa que pode fornecer energia elétrica com boa qualidade, desde que o projeto de instalação do gerador seja feito de forma satisfatória, considerando a carga que o gerador irá alimentar, a presença de cargas não lineares significativas, e também a presença ou não de bancos de capacitores. Deve-se realizar uma investigação mais apurada sobre o alto valor de TDD quando o gerador está operando, e verificar se há a necessidade de realizar um investimento com o objetivo de melhorar esse parâmetro.

Por sugestão do professor Antonio Ivan Bastos Sobrinho, para um trabalho futuro, seria interessante realizar este mesmo estudo numa instalação comercial de grande porte, como um shopping center.

## REFERÊNCIAS

ABS – American Bureau of Shipping. **Control of Harmonics in Electrical Power Systems**. Maio, 2006.

ALEXANDER, C.; SADIKU, M. **Fundamentos de Circuitos Elétricos**. 5. ed. McGraw-Hill, 2013.

ALMEIDA, D. D.; CATALÃO, J. P. S. **Regulação de Velocidade do Gerador Síncrono num Sistema de Aproveitamento Hidroelétrico**. 2016. Disponível em: <<http://webx.ubi.pt/~catalao/11.pdf>>. Acesso em: 28 mai. 2016.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – Prodist. Módulo 8 – Qualidade da energia elétrica**. Resolução Normativa N° 664 de 1 de janeiro de 2016. Disponível em: [http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/M%c3%b3dulo8\\_Revis%c3%a3o\\_7.pdf](http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/M%c3%b3dulo8_Revis%c3%a3o_7.pdf). Acessado em fevereiro de 2016.

ARRILLAGA, J.; WATSON, N. **Power System Harmonics**. Chischester: Jhon Wiley & Sons, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE SERVIÇOS DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA. **Custo Para Evitar Racionamento Será Alto**. Disponível em: <<http://www.abesco.com.br/novidade/custo-para-evitar-acionamento-sera-alto/>>. Acesso em: 20 out 2015.

\_\_\_\_\_, **Demanda Movidada pela Crise Hídrica**. Disponível em: <<http://www.abesco.com.br/novidade/demanda-movida-pela-crise-hidrica/>>. Acesso em: 20 out 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5410: Instalações Elétricas de Baixa Tensão**. Rio de Janeiro, 2004.

BAGI, **Sistemas de Controle para Grupos Geradores**. Disponível em: <<http://excitatrizestatica.com.br/gruposgeradores.htm>>. Acesso em: 02 nov 2016.

CATERPILLAR, **Generator Systems**. Application and Installation, Caterpillar, 2008.

COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA. **Glossário – Industrial e Comercial**. 2014. Disponível em: <<http://www.copel.com/hpcopel/root/nivel2.jsp?endereco=%2Fhpcopel%2Froot%2Fpagcopel2.nsf%2F0%2FC8C0FB31C7B9BD93032573F700549161#h>>. Acesso em: 20 out. 2015.

DECKMANN, S. M.; POMILIO, J. A. **Avaliação da Qualidade da Energia Elétrica**. UNICAMP/FEEC/DSCE. Junho, 2010.

DUGAN, Roger, C. **Electrical Power Systems Quality**. 2. ed. McGraw-Hill, 2004.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Série Estudos da Eficiência Energética, Nota Técnica DEA 10/14. **Consumo de energia no Brasil, Análises Setoriais**. Rio de Janeiro, jun.2014

IEEE Task Force; **Effects of Harmonics on Equipment**. IEEE TRANS. POWER, Vol 8, No. 8, Abril, 1993.

IEEE std 112-2004. **Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators**. New York, USA, 2004.

IEEE std 519-2014. **Recomended Pratices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems**. New York, USA, 2014.

KOSOW, Irving. **Máquinas Elétricas e Transformadoras**. Ed Globo, 4º Edição, 1982, Porto Alegre.

MARTINHO, Edson. **Distúrbios da energia elétrica**. 2. ed. São Paulo: Érica, 2009.

MELLO, F. **Governadores Mecânicos e Eletrônicos para Grupos Geradores**. 2009. Disponível em: <<http://www.gruposgeradores.info/2009/11/governadores-mecanicos-e-eletronicos.html>>. Acesso em: 28 mai. 2016.

PEREIRA, J. C. **Motores e Geradores: Princípios de funcionamento, Instalação, Operação e Manutenção de Grupos Diesel Geradores**. 2016. Disponível em: <<http://www.joseclaudio.eng.br/geradores/PDF/diesel1.pdf>>. Acesso em: 23 mai. 2016.

PINHEIRO,H; **Máquinas e Acionamentos Elétricos - Geradores de Corrente Alternada**. IFRN, 2007. Disponível em:

<<https://docente.ifrn.edu.br/heliopinheiro/Disciplinas/maquinas-e-acionamentos-eletricos/apostila-de-geradores-de-ca>> Acesso em: 18 mai. 2016

PIVETA, F.C.B; **Estudo dos Grupos Geradores Síncronos**. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade São Francisco, Campinas, 2010.

STAROSTA, J. Comportamento dos geradores na presença de capacitores - Parte 2. ed.64. Maio, 2011. Disponível em:  
<<http://www.osetoreletrico.com.br/web/colunistas/jose-starosta/644-comportamento-dos-geradores-na-presenca-de-capacitores--parte-ii.html>> Acesso em: 26 mai. 2016

STEVENSON, W. **Elementos de Análise de Sistemas de Potência**. 2 ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.

WEG; **DT-5 Características e Especificações de Geradores**. Disponível em:  
<<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-curso-dt-5-caracteristicas-e-especificacoes-de-geradores-artigo-tecnico-portugues-br.pdf>> Acesso em: 24 mai.2016

\_\_\_\_\_, **Manual para correção do Fator de Potência**. Disponível em:  
<<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-correcao-do-fator-de-potencia-958-manual-portugues-br.pdf>> Acesso em: 28 nov.2016