



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE
FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELECTROTÉCNICA
ENGENHARIA ELÉCTRICA LABORAL
TRABALHO DE LICENCIATURA

Estudo para o melhoramento da qualidade de energia eléctrica na Faculdade de Engenharia da Universidade Eduardo Mondlane

Autor:

Saice, Anísio Carlos Ernesto

Supervisor:

Mestre. Eng^o Fernando Chachaia

Maputo, Julho de 2023



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE
FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELECTROTÉCNICA
ENGENHARIA ELÉCTRICA LABORAL
TRABALHO DE LICENCIATURA

Estudo para o melhoramento da qualidade de energia eléctrica na Faculdade de Engenharia da Universidade Eduardo Mondlane

Autor:

Saice, Anísio Carlos Ernesto

Supervisor:

Mestre. Eng^o Fernando Chachaia

Maputo, Julho de 2023

SAICE, ANÍSO CARLOS ERNESTO

**Estudo para o melhoramento da qualidade de energia eléctrica na
Faculdade de Engenharia da Universidade Eduardo Mondlane**

Projecto referente a cadeira de trabalho de licenciatura, como requisito para a culminação do curso de Engenharia eléctrica na faculdade de Engenharia, Universidade Eduardo Mondlane.

Supervisor: Mestre. Eng^o Fernando Chachaia

Dedicatória

Dedico este trabalho aos meus pais **Carlos Ernesto Saice** e **Rosa André Machecane**, aos meus irmãos, namorada, amigos, colegas e docentes pelo apoio incondicional, e dedicação ao longo da minha vida social e acadêmica

Agradecimentos

Em primeiro lugar agradeço a Deus, pela vida, saúde, motivação e por me proporcionar sabedoria e energias suficientes para o desenvolvimento deste projecto.

Agradeço a minha mãe Rosa André Machecane por ter me trazido ao mundo, pelo carisma, pelas motivações incansáveis, pelos conselhos imensuráveis, por ser a minha primeira professora da vida, por tudo que fez e ainda faz por mim.

Agradeço ao meu falecido pai, Carlos Ernesto Saice, por ter me trazido ao mundo, por ter sido a minha primeira fonte de inspiração, pelos conselhos dados, por ter me levado á escola e por tudo de maravilhoso que concedeu à minha vida.

Agradeço aos meus irmãos Daniel Saice, Matilde Carlos, Carlos Junior, Cremildo Carlos, Silvino Nhancale, Maria Nhancale, Paulina Carlos, e Maria Eugenia, pela inspiração e por terem me dado suporte emocional e financeiro com vista o desenvolvimento da minha vida social e acadêmica.

O meu especial agradecimento ao Mestre. Eng^o Fernando Chachaia, meu supervisor, pela paciência, disponibilidade, atenção, ensinamentos e pela inspiração pelo seu elevado nível de experiência profissional.

Outro especial agradecimento vai para os eng. Albino Cuinhane, eng. Roberto Luciano, eng. Cacilda Chilundo, membros da direção do DPM, e aos técnicos Tomás Madeira e Tiago Boene pela logística e apoio institucional no processo de desenvolvimento do trabalho em causa.

Especial agradecimento a todos os docentes da faculdade de engenharia da UEM, por terem me dotado de conhecimentos imensuráveis para o meu desenvolvimento acadêmico.

O especial agradecimento vai para a minha namorada Ganild Matundo, por estar e ter estado sempre ao meu lado nos momentos acadêmicos e de descontração, pela força que me dá e pelo carisma.

Aos meus amigos e colegas, Juclêncio, Ismael, Albino, Lurdes, Jennifer, Karen, Maira, Mabecuane, Gagane, Balbina, Cossa, Canda e Carmona, vão os meus especiais agradecimentos pelo suporte que tem me dado no processo de crescimento social e acadêmico.

Resumo

O baixo custo e a qualidade de energia eléctrica são elementos bastante determinantes na melhoria do nível de vida dos cidadãos de uma nação. Este facto levou o autor à busca exaustiva de uma solução óptima e de fácil implementação com vista a reduzir o custo e garantir a qualidade da energia eléctrica consumida na Faculdade de Engenharia da Universidade Eduardo Mondlane. Com vista a satisfazer este facto, este projecto foi elaborado e dividido em seis capítulos com sete pontos que são:

Capítulo I

Neste capítulo foi feita uma introdução do trabalho feito, onde apresenta-se a contextualização, a formulação do problema, a justificativa, os objetivos (geral e específico) e por fim a metodologia usada para a elaboração do trabalho.

Capítulo II

É neste capítulo onde se fez a revisão da literatura que consistiu na leitura e retirada de informação de diversas normas técnicas, livros, artigos científicos, monografias e teses de doutorado com vista a reunir conhecimentos suficientes para fundamentar a resolução dos problemas identificados no capítulo um.

Capítulo III

É neste capítulo onde inicia o desenvolvimento do projecto, fez-se neste capítulo a localização geográfica do local de estudo, a subdivisão do local de estudo, a descrição da instalação, a apresentação dos motivos que levaram a efectivação do estudo, e a localização das cargas mais perturbadoras ou mais consumidoras da instalação.

Capítulo IV

Neste capítulo são apresentados os dados coletados no local de estudo e também apresentam-se os resultados correspondentes ao processamento destes e a simulação da instalação feita pelo *software matlab-simulink*.

Os dados coletados correspondem ao levantamento das cargas da instalação e a medição da resistência eléctrica dos eléctrodos de terra dos postos de transformação.

A simulação no *software matlab-simulink* foi com vista a obtenção das formas de onda da tensão e corrente o que serviu como uma base para a detenção de distorções

harmônicas de corrente e alguns distúrbios na tensão na saída do posto de transformação do departamento de Engenharia Mecânica.

Capítulo V

Este capítulo apresenta a discussão dos resultados obtidos. Os resultados consistem na identificação da potência de carga dos transformadores, determinação das perdas devido as harmônicas, a determinação do fator de potência final (devido as harmônicas) e o cálculo do valor da factura de energia.

Ainda neste capítulo fez-se a identificação dos problemas da instalação e propôs-se a resolução. E por fim fez-se a conclusão, recomendações, as limitações que o autor teve durante a elaboração do projecto e a apresentação das referências bibliográficas usadas para a elaboração do trabalho.

Capítulo VI

Este constitui o último capítulo do trabalho. Neste capítulo constam imagens referentes às simulações em *matlab-simulink*, algumas tabelas referentes às distorções harmônicas de cada equipamento eléctrico, os desenhos dos quadros eléctricos e as suas respectivas legendas.

Palavras Chave: Qualidade de energia eléctrica, baixo custo de consumo da energia eléctrica.

ÍNDICE

CAPÍTULO I	1
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Contextualização	1
1.2 Formulação do problema	2
1.3 Justificativa	2
1.4 Objectivos	3
1.4.1 Geral	3
1.4.2 Específicos:	3
1.5 Metodologia	4
2 REVISÃO DA LITERATURA	5
2.1 Qualidade de Energia	5
2.1.1 ATERRAMENTO ELÉCTRICO	7
2.1.2 FACTOR DE POTÊNCIA (OU $\cos \Phi$)	12
2.1.3 HARMÔNICAS	21
2.1.4 <i>FLICKER</i> DE TENSÃO	36
3 Desenvolvimento	39
3.1 Localização geográfica da Faculdade de Engenharia da UEM	39
3.2 Subdivisão da Faculdade de engenharia	39
3.3 Descrição da rede eléctrica da Faculdade de Engenharia	40
3.3.1 Posto de transformação central	40
3.3.2 Posto de transformação do departamento de Eng. Electrotécnica	40
3.3.3 Posto de transformação do departamento de Eng. Mecânica	41
3.3.4 Armário de distribuição do DEQUI	41
3.4 Tipo de cargas	42
4 RECOLHA DE DADOS E SIMULAÇÃO DA INSTALAÇÃO	43
4.1 Simulação no simulink para análise da THD de corrente e tensão	43

4.1.1	Para o posto de transformação (PT) Central	44
4.1.2	Para o posto de transformação (PT) do Departamento de Engenharia Electrotécnica (DEEL)	45
4.1.3	Para o posto de transformação (PT) do Departamento de Engenharia Mecânica	45
4.2	Levantamento das cargas de saída dos postos de transformação	46
4.2.1	Para o posto de transformação (PT) Central (da entrada da faculdade) ...	47
4.2.2	Para o posto de transformação (PT) do Departamento de Engenharia Electrotécnica (DEEL)	47
4.2.3	Para o posto de transformação (PT) do departamento de Engenharia Mecânica	47
4.3	Medição da resistência do eléctrodo de terra	48
4.4	Posto de transformação central.....	48
4.4.1	Resultados obtidos na medição	48
4.5	Posto de transformação do Departamento de Engenharia Eletrotécnica (DEEL)	48
4.5.1	Resultados obtidos na medição	49
4.5.2	Posto de transformação do Departamento de Engenharia Mecânica (DEMA).....	49
4.5.3	Resultados obtidos na medição	49
4.6	Quadro eléctrico do tipo armário do Departamento de Engenharia Química (DEQUI)	50
4.6.1	Resultados obtidos na medição	50
5	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	51
5.1	Cálculo da fatura de energia	52
5.2	Anomalias detectadas durante a análise da instalação.....	53
5.2.1	Proposta de solução para a minimização das anomalias	53
5.2.2	Projecção dos filtros harmónicos ativos e bancos de condensadores	54

6	CONCLUSÃO	58
6.1	Recomendações	59
6.2	Limitações	60
7	BIBLIOGRAFIA	61
8	ANEXOS	A
8.1	Anexo 1	A
8.2	Anexo 2	E
8.3	Anexo 3	I
8.4	Anexo 4	L
8.5	Anexo 5	N
8.6	Anexo 6	O
8.7	Anexo 7	Q
8.8	Anexo 8	S
8.9	ANEXO 9	U
8.10	ANEXO 10	Z
8.11	ANEXO 11	AA
8.12	ANEXO 12	BB
8.13	ANEXO 13	CC

Lista de abreviaturas e siglas

AVRs – *automatic voltage regulators*;

CA – corrente alternada;

CC – Corrente contínua;

DEEL – Departamento de engenharia Eletrotécnica;

DEMA – Departamento de engenharia Mecânica;

DEQUI – Departamento de engenharia Civil;

DTD – Distorção total de demanda;

DHlv – Distorção harmónica individual da tensão;

DHli – Distorção harmónica individual da corrente;

DHTv – distorção harmónica total da tensão;

DHTi - Distorção harmónica total da corrente;

EDM – Electricidade de Moçambique;

FAP – Filtro ativo de potência;

FHL – *Factor harmonic losses*;

Fp – factor de potência;

IEEE – *Institute of electrical and electronic engineers*;

IEC – *International Electrotechnical Commission*;

kW – Kilowatt, unidade de potência ativa;

kWh – Unidade de energia eléctrica;

kVA – Unidade de potência aparente;

kVAR - Unidade de potência reativa;

UPS - *Uninterruptible Power Supply*;

PT – Posto de transformação;

PCC – Ponto de conexão de cargas;

QEE – Qualidade de energia eléctrica;

QGBT – Quadro geral de baixa tensão;

Rms – *Root mean square*;

TS – Terra de serviço;

TP – terra de protecção;

UEM – Universidade Eduardo Mondlane;

Lista de símbolos

C – Capacitância;

Cbc – Capacitância do banco de condensador;

Cdc – Capacitância de acoplamento;

$\cos\phi$ – Factor de potência;

Cf – Capacitância do filtro;

Dmax – Demanda máxima;

f – Frequência;

fs – Frequência de chaveamento;

h – Harmônicas;

If – Corrente do filtro;

IL – Corrente na carga;

Is – Corrente na fonte;

I_{max} – corrente máxima;

Isc – Corrente de curto circuito;

I_h – Corrente harmônica;

Ke – Factor de evolução de carga;

Ks – Factor de simultaneidade;

Ku – Factor de utilização ou demanda;

L – Indutância;

Lf – Indutância do filtro;

Lc – Indutância de acoplamento;

L_{cmin} - Indutância de acoplamento mínima;

L_{cmax} - Indutância de acoplamento máxima;

P – Potência activa;

Q – Potência reactiva;

Qbc – potência reactiva do banco de capacitores;

R – Resistência eléctrica;

Rf – Resistência eléctrica do filtro harmónico;

S – Potência aparente;

Sf – Potência aparente do filtro;

T – Período;

t – Tempo;

V – Tensão;

Vdc - Tensão de referência;

Vp – Tensão de pico

ΔE – perda de energia;

ΔP – perda de potência;

ω – Frequência angular;

ϕ – Ângulo da carga;

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Sistema de aterramento TN-S. Fonte: (Kinderman e Jorge, 1995)	8
Figura 2: Sistema de aterramento TN-C. Fonte: (Kinderman e Jorge, 1995)	8
Figura 3: Sistema de aterramento TN-C-S. Fonte: (Kinderman e Jorge, 1995).....	9
Figura 4: Sistema de aterramento TT. Fonte: (Kinderman e Jorge, 1995)	9
Figura 5: Sistema de aterramento IT. Fonte: (Kinderman e Jorge, 1995)	10
Figura 6: Medição com o <i>Megger</i> . Fonte: (Kinderman e Jorge, 1995)	11
Figura 7: Triângulo de potência. Fonte: (Autor, 2023)	13
Figura 8: fator de potência unitário. Fonte: (João, 2013).....	14
Figura 9: Fator de potência diferente de um. Fonte: (João, 2013).....	14
Figura 10: Fator de potência diferente de um. Fonte: (João, 2013).....	15
Figura 11: Compensação do factor de potência de um quadro eléctrico por banco de capacitor fixo. Fonte: (Autor, 2023)	19
Figura 12: correção do factor de potência por banco de capacitores automático. Fonte: (Riese, 2014)	20
Figura 13: Exemplo de distorção na forma da onda por causa das harmônicas. Fonte: (IEEE-519,1992).....	22
Figura 14: Construção de uma onda quadrada a partir de seus componentes harmônicos Fonte: (Mohamed, 2015).....	28
Figura 15: Espectro harmônico Fonte: (Mohamed, 2015).	28
Figura 16: Característica de tensão e corrente de uma carga linear. Fonte: (Baptista, 2006).	30
Figura 17: Característica de tensão e corrente de uma carga não linear. Fonte: (Baptista, 2006).	31
Figura 18: Filtro harmônico em série. Fonte: (KIMBARK,1971).....	32
Figura 19: Filtro harmônico em paralelo (<i>shunt</i>). Fonte: (KIMBARK,1971)	33
Figura 20: Filtros harmônicos passivos típicos. Fonte: (ORTMEYER e HIYAMA 1996; TOSTES et al, 2003)	34
Figura 21: filtro ativo série. Fonte: (Ribeiro, 2003).....	34
Figura 22: filtro ativo paralelo. Fonte: (Ribeiro, 2003).....	35
Figura 23: Correção da onda de corrente de uma carga não-linear por meio ao uso de um filtro ativo paralelo. Fonte: (Emadi et al, 2005).	36

Figura 24: Máximas flutuações de tensão permitidas por IEEE519. Fonte: (Mohamed, 2015).	37
Figura 25: Vista aérea da Faculdade de engenharia da UEM. Fonte: (Google Maps, 2023)	39
Figura 26: Armário do PT central. Fonte: (Autor, 2023).....	40
Figura 27: Armário do PT do DEEL. Fonte: (Autor, 2023)	41
Figura 28: QGBT do PT do DEMA. Fonte: (Autor, 2023)	41
Figura 29: Armário do DEQUI. Fonte: (Autor, 2023).....	42
Figura 30: formas de onda da corrente no lado do transformador. Fonte: (Autor, 2023)	44
Figura 31: formas de onda da tensão no lado do transformador. Fonte: (Autor, 2023) .	44
Figura 32: formas de onda da corrente no lado do transformador. Fonte: (Autor, 2023)	45
Figura 33: formas de onda da tensão no lado do transformador. Fonte: (Autor, 2023) .	45
Figura 34:formas de onda da corrente no lado do transformador. Fonte: (Autor, 2023)	46
Figura 35:formas de onda da tensão no lado do transformador. Fonte: (Autor, 2023) ..	46
Figura 36: Forma de onda de corrente do PT central. Fonte: (Autor, 2023)	55
Figura 37: Forma de onda de corrente do PT do DEEL. Fonte: (Autor, 2023)	56
Figura 38: Forma de onda de corrente do PT do DEMA. Fonte: (Autor, 2023)	56
Figura 39: Diagrama equivalente do PT central. Fonte: (Autor, 2023)	A
Figura 40: Espectro harmônico da corrente na fase R. Fonte: (Autor, 2023)	A
Figura 41: Espectro harmônico da corrente na fase S. Fonte: (Autor, 2023)	B
Figura 42: Espectro harmônico da corrente na fase T. Fonte: (Autor, 2023).....	B
Figura 43: Espectro harmônico da tensão na fase S. Fonte: (Autor, 2023)	C
Figura 44: Espectro harmônico da tensão na fase R. Fonte: (Autor, 2023).....	C
Figura 45: Espectro harmônico da tensão na fase T. Fonte: (Autor, 2023)	D
Figura 46: Diagrama equivalente do DEEL. Fonte: (Autor, 2023)	E
Figura 47: Espectro harmônico da corrente na fase R. Fonte: (Autor, 2023)	E
Figura 48: Espectro harmônico da corrente na fase S. Fonte: (Autor, 2023)	F
Figura 49: Espectro harmônico da corrente na fase T. Fonte: (Autor, 2023).....	F
Figura 50: Espectro harmônico da tensão na fase R. Fonte: (Autor, 2023).....	G
Figura 51: Espectro harmônico da tensão na fase S. Fonte: (Autor, 2023)	G
Figura 52: Espectro harmônico da tensão na fase T. Fonte: (Autor, 2023)	H

Figura 53: Diagrama equivalente do DEMA. Fonte: (Autor, 2023)	I
Figura 54: Espectro harmônico da corrente na fase R. Fonte: (Autor, 2023)	I
Figura 55: Espectro harmônico da corrente na fase S. Fonte: (Autor, 2023)	J
Figura 56: Espectro harmônico da corrente na fase T. Fonte: (Autor, 2023).....	J
Figura 57: Espectro harmônico da tensão na fase R. Fonte: (Autor, 2023).....	K
Figura 58: Espectro harmônico da tensão na fase S. Fonte: (Autor, 2023).....	K
Figura 59: Espectro harmônico da tensão na fase R.....	K
Figura 60: Espectro harmônico da tensão na fase T. Fonte: (Autor, 2023)	L
Figura 61: THDi de um UPS. Fonte: (Moreno, 2001)	M
Figura 62:THDi de uma máquina de soldar. Fonte: (Moreno, 2001)	M
Figura 63: Diagrama de blocos de um filtro ativo. Fonte: (Chiang e Chang, 1999)	N
Figura 64: Geração das correntes de referência. Fonte: (Azevedo e Ferreira et al, 2003)	N
Figura 65: Cálculo da potência ativa. Fonte: (Autor, 2023).....	O
Figura 66: filtro passa baixo. Fonte: (Autor, 2023).....	O
Figura 67: controlador PI. Fonte: (Autor, 2023)	O
Figura 68: geração das correntes de referência. Fonte: (Autor, 2023)	P
Figura 69: geração dos sinais <i>Gate</i> , para os tirístores. Fonte: (Autor, 2023)	P
Figura 70: filtro. Fonte: Autor 2023	P
Figura 71: Banco de condensadores. Fonte: (Autor, 2023).....	Q
Figura 72: PT central com compensadores. Fonte: (Autor, 2023)	Q
Figura 73: PT do DEEL com compensadores. Fonte: (Autor, 2023)	R
Figura 74: PT do DEMA com compensadores. Fonte: (Autor, 2023)	R
Figura 75: Onda de tensão do PT central após compensação. Fonte: (Autor, 2023).....	S
Figura 76:Onda de tensão do PT do DEEL após compensação. Fonte: (Autor, 2023) ..	S
Figura 77: Onda de tensão do PT do DEQUI após compensação. Fonte: (Autor, 2023) T	T
Figura 78: Departamento das Cadeiras Gerais. Fonte: (Autor, 2023)	U
Figura 79: Departamento de Engenharia Civil. Fonte: (Autor, 2023).....	U
Figura 80: Departamento de Engenharia Electrotécnica. Fonte: (Autor, 2023)	V
Figura 81: Departamento de Engenharia Química. Fonte: (Autor, 2023)	V
Figura 82: Departamento de Engenharia Mecânica. Fonte: (Autor, 2023)	W
Figura 83: Departamento de Pós-graduação. Fonte: (Autor, 2023).....	W
Figura 84: Departamento de Geologia. Fonte: (Autor, 2023).....	X

Figura 85: Bloco administrativo. Fonte: (Autor, 2023)	X
Figura 86: Carpintaria. Fonte: (Autor, 2023)	Y
Figura 87: Centro de eletrônica e instrumentação. Fonte: (Autor, 2023)	Y
Figura 88: Chapa característica do transformador do PT do DEMA. Fonte: (Autor, 2023)	Z
Figura 89: Chapa característica do transformador do PT central. Fonte: (Autor, 2023) .	Z
Figura 90: Chapa característica do transformador do DEEL. Fonte: (Autor, 2023)	AA
Figura 91: Esquema de ligação do equipamento de medição da resistência do eletrodo de terra. Fonte: (Kinderman e Jorge, 1995)	AA
Figura 92: modelo de uma carga geradora de distorções harmonias com fontes de corrente (para cargas com características capacitiva e indutiva respectivamente). Fonte: (Autor, 2023)	BB
Figura 93: Modelo de carga trifásica ligada em Y e monofásica não geradoras de harmônicas respectivamente (cargas com características indutivas). Fonte: (Autor, 2023)	CC

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1:Fator de potência e relação Q/P. Fonte: (Ramasamy, 2005)	16
Tabela 2: Distorção máxima de tensão de acordo com o padrão IEEE-519. Fonte: (Ramasamy, 2005)	23
Tabela 3: Distorção máxima de corrente para sistemas de 120-69 kV de acordo com o padrão IEEE-519. Fonte: (Ramasamy, 2005).....	23
Tabela 4: Classificação das ondas harmônicas. Fonte: (Ramasamy, 2005)	29
Tabela 5: Aplicação dos fatores de correção na potência total conectada para a determinação da demanda máxima. Fonte: (Autor, 2023)	47
Tabela 6: Aplicação dos fatores de correção na potência total conectada para a determinação da demanda máxima. Fonte: (Autor, 2023)	47
Tabela 7: Aplicação dos fatores de correção na potência total conectada para a determinação da demanda máxima. Fonte: (Autor, 2023)	48
Tabela 8: Resultados de medições da resistência do sistema de aterramento. Fonte: (Autor, 2023).....	48
Tabela 9: Resultados de medições da resistência do sistema de aterramento. Fonte: (Autor, 2023).....	49
Tabela 10: Resultados de medições da resistência do sistema de aterramento. Fonte: (Autor, 2023).....	49
Tabela 11: Resultados de medições da resistência do sistema de aterramento. Fonte: (Autor, 2023).....	50
Tabela 12: Perdas devido as harmônicas para o PT central. Fonte: (Autor, 2023)	51
Tabela 13: Perdas devido as harmônicas para o PT do DEEL. Fonte: (Autor, 2023)....	51
Tabela 14: Perdas devido as harmônicas para o PT do DEMA. Fonte: (Autor, 2023)...	51
Tabela 15: Fator de potência devido as harmônicas. Fonte: (Autor, 2023)	52
Tabela 16: Factura de energia calculada. Fonte: (Autor 2023).....	52
Tabela 17: Factura de energia média medida. Fonte: (EDM 2022-2023).....	53
Tabela 18: Parâmetros para a implementação dos filtros ativos e bancos de condensadores. Fonte: (Autor, 2023)	55
Tabela 19: factura de energia calculada após as correções. Fonte: (Autor, 2023).....	57
Tabela 20:THDi de lâmpada fluorescente tubular. Fonte: (Vessozi, 2011)	L
Tabela 21:THDi de um computador. Fonte: (Jeferson, 2011).....	L

CAPÍTULO I

1 INTRODUÇÃO

A redução dos custos de consumo de energia eléctrica e a garantia da sua qualidade são factores determinantes na garantia da qualidade de vida da população de uma nação assim como da vida de uma instituição, principalmente a de ensino.

O presente trabalho de licenciatura consistirá no desenvolvimento de um projecto com vista a apurar a causa da má qualidade e elevado custo de energia eléctrica, assim como a implementação de técnicas para o melhoramento da qualidade e redução dos custos da factura de energia na faculdade de Engenharia da Universidade Eduardo Mondlane.

1.1 Contextualização

A energia eléctrica é um bem indispensável para o funcionamento de uma instituição, principalmente a de ensino, onde diversas necessidades precisam deste recurso para que sejam satisfeitas. Estas necessidades partem desde a iluminação de recintos, a alimentação de equipamentos eléctricos (como bombas de água, computadores e projetores), o accionamento de equipamentos laboratoriais, até ao accionamento de equipamentos para o uso geral da comunidade institucional. Para que os equipamentos acima mencionados funcionem apresentando uma performance aceitável é necessário que a sua fonte de alimentação (energia) disponha de uma qualidade também aceitável e baixo custo. São tidos como factores determinantes na qualidade da energia, a constância da tensão em níveis recomendados, a constância da frequência, o nível de transitórios, o nível de interrupção, os ruídos, níveis de potência reativa solicitada da rede, e as distorções harmónicas.

O trabalho em causa visa fazer um estudo para o melhoramento da qualidade de energia eléctrica na faculdade de engenharia da UEM.

O sistema eléctrico da faculdade de engenharia é constituído uma linha de média tensão que alimenta 3 transformadores de 500kVA, 200kVA, e 500kVA, estando estes distribuídos na entrada da faculdade, no departamento de mecânica e no departamento de engenharia eletrotécnica respectivamente. A distribuição das cargas segue a seguinte ordem:

- Os departamentos das cadeiras gerais, o bloco administrativo, o centro de electrónica, o departamento de pós-graduação e o departamento de Engenharia Química são alimentados pelo transformador de 500kVA que se encontra na entrada da faculdade;
- Os departamentos de Engenharia Mecânica e de Engenharia Civil são alimentados pelo transformador de 200kVA que se encontra no departamento de Engenharia Mecânica; e por fim
- O departamento de Engenharia Eletrotécnica é alimentado pelo transformador de 500kVA que se encontra no respectivo departamento.

1.2 Formulação do problema

O elevado custo da factura de energia, a ocorrência frequente de fenómenos indesejáveis tais como: a queima de equipamentos, o disparo de dispositivos de proteção (originando interrupções), e oscilação de certas lâmpadas principalmente com a entrada em funcionamento de certas máquinas em laboratórios, criou condições para a realização do estudo para o melhoramento da qualidade de energia eléctrica na Faculdade de Engenharia. Para atingir os objectivos deste estudo há necessidade de responder à seguinte questão: Como reduzir o custo e melhorar a qualidade de energia eléctrica na Faculdade de Engenharia da Universidade Eduardo Mondlane?

1.3 Justificativa

A faculdade de Engenharia da Universidade Eduardo Mondlane vem a tempos enfrentando problemas no que concerne aos onerosos custos de energia eléctrica que tem pago à concessionária (EDM), oscilação de lâmpadas, disparos sucessivos e indevidos dos dispositivos de proteção, queima de equipamentos. Como forma de responder a esta preocupação, levantou-se a necessidade de se fazer um estudo com vista a apurar os principais factores que levam a ocorrência destes fenómenos maléficos à instalação eléctrica da instituição em causa.

Os estudos passarão pela verificação do fator de potência, verificação do nível de distorção das ondas de corrente e tensão (ocorrência de harmônicas), verificação dos valores da resistência do aterramento dos postos de transformação até a verificação da qualidade da tensão.

O factor de potência é apontado como um dos factores predominantes na oneração da factura de energia eléctrica, pois o seu baixo valor classifica a instalação como

poluidora à rede de energia sob o ponto de vista da concessionária. Por este motivo a concessionária aplica taxas agravadas aos consumidores com estas características como forma de obriga-los a melhorar o fator de potência (aproxima-lo a unidade).

A ocorrência de distorção das ondas de tensão e corrente em um sistema elétrico leva os equipamentos ao aquecimento excessivo e disparo indevido dos dispositivos de proteção, o que impulsiona a ocorrência de perdas excessivas de energia e redução da qualidade de energia em uma instalação.

A frequência e a tensão fora dos limites estabelecidos pelo regulamento levam à variações indevidas no funcionamento do equipamento eléctrico (principalmente máquinas rotativas) e consequente redução da vida útil dos mesmos em uma instalação, afectando-se desta forma o nível de qualidade de energia eléctrica.

1.4 Objectivos

1.4.1 Geral

- Avaliar a qualidade de energia eléctrica nas instalações eléctricas da Faculdade de Engenharia da Universidade Eduardo Mondlane.

1.4.2 Específicos:

- Verificar a causa da má qualidade de energia eléctrica da faculdade de Engenharia;
- Verificar a causa da alta factura de energia eléctrica da faculdade de Engenharia;
- Fazer o levantamento da potência de carga nos quadros de distribuição na faculdade de Engenharia;
- Fazer levantamento dos quadros de distribuição de energia eléctrica na faculdade de Engenharia.
- Fazer o levantamento de carga na saída dos postos de transformação (lado da baixa tensão) da faculdade de Engenharia;
- Verificar os sistemas de aterramento eléctrico dos postos de transformação da faculdade de Engenharia;
- Propor o melhoramento da qualidade da energia eléctrica da faculdade de Engenharia;

1.5 Metodologia

A metodologia que será usada para a elaboração deste trabalho consistirá em:

- Revisões bibliográficas sobre a qualidade de energia.

Nesta fase far-se-ão visitas a diversos manuais relacionados com o propósito do tema. Estas visitas serão feitas em bibliotecas físicas assim como virtuais (manuais em PDF ou bibliografias online), de modo a colher informações sobre as bases teóricas à cerca do tema em estudo.

- Entrevistas formais assim como informais.

As entrevistas formais serão feitas de forma estruturada assim como não. As entrevistas estruturadas consistirão no uso de guiões contendo questões pontuais com vista a obter informações relevantes ao estudo em causa.

Por outro lado, as entrevistas informais serão feitas às pessoas singulares que podem fornecer informações relevantes sobre o caso em estudo.

- Colheita de dados no local de estudo

No local de estudo prevê-se fazer um levantamento de potência de cargas com vista a verificar a distribuição destas entre as fases e verificar a qualidade do sistema de aterramento dos PT's.

- Simulação em softwares

Tendo sido feita a colheita de dados e a possível seleção das propostas de resolução do problema de estudo, serão feitas simulações do sistema elétrico em causa em *softwares* com destaque a *excel* e *matlab-simulink*.

CAPÍTULO II

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Qualidade de Energia

Segundo a norma IEEE-1159, 1995, a qualidade de energia é definida como sendo a capacidade do equipamento elétrico de operar de maneira satisfatória, com cuidado e manutenção adequados e sem afetar adversamente a operação de outros equipamentos elétricos conectados ao sistema.

Golkar, 2004 diz que a questão da qualidade de energia (em corrente alternada) gira em torno das formas de onda das tensões e correntes senoidais, a presença de sinais harmônicos nas tensões dos barramentos e nas correntes das cargas assim como a ocorrência de picos e afundamentos momentâneos de tensão, para além de outros distúrbios. O mesmo autor define a qualidade de energia eléctrica (QEE) como sendo o abastecimento de tensões no sistema de modo que o consumidor possa utilizar a energia eléctrica do sistema de forma satisfatória sem que haja interrupções e interferências.

Dungan et al, 2002 descreve três principais razões que actualmente vem criando o interesse de estudo da qualidade de energia eléctrica que são:

1. A implementação de novas tecnologias no que concerne ao controlo microprocessado, que usam dispositivos de eletrônica de potência, exige maior qualidade de energia pelo facto de estes dispositivos apresentarem maior sensibilidade às variações de qualidade do que os sistemas usados no passado;
2. O aumento dos níveis de harmônicos dos sistemas eléctricos devido ao uso de dispositivos de controle de velocidade dos motores, a instalação de banco de capacitores para a correção do fator de potência; e
3. A consciência dos consumidores sobre o assunto qualidade de energia eléctrica (QEE), o que cria um desafio às concessionárias para que possam melhorar a qualidade de energia que é fornecida aos consumidores;

O autor Hydroone, 2007 aborda três principais fatores que contribuem para os problemas associados à qualidade da energia que são:

1. **Uso de Cargas Eletrônicas Sensíveis** – o mesmo autor mostra que as concessionárias são projectadas para fornecer energia com maior qualidade para maior parte dos equipamentos eléctricos, porém, os computadores e controladores digitais tem sido maioritariamente usado pelos consumidores finais de electricidade. Alguns desses dispositivos podem ser susceptíveis a distúrbios na linha de energia.
2. **A Proximidade de Equipamentos que Produzem Perturbações** – são considerados equipamentos que produzem perturbações as cargas de alta potência ou equipamentos que usam semicondutores de comutação de estado sólido tal como fornos a arco, soldadores e inversores eléctricos de velocidade variável. Estes equipamentos podem causar problemas locais de qualidade de energia para cargas sensíveis.
3. **Fonte de Fornecimento** – Caso a concessionária forneça energia fora dos padrões recomendados pela entidade reguladora, pode-se afectar negativamente ao funcionamento dos equipamentos eléctricos do consumidor final, contribuindo desta forma para a redução da qualidade deste recurso.

Os principais distúrbios de energia eléctrica são (IEEE-1159,1995):

- Sobretensões transitórias (transitório impulsivo e oscilatório) – estas ocorrências podem ser provocadas por ocorrência de descargas atmosféricas (transitório impulsivo), ou ainda podem ser resultantes de chaveamentos de cargas (transitório oscilatório);
- Baixo factor de potência (consumo excessivo de energia reactiva) - este distúrbio é causado pelo excesso de cargas indutivas em um sistema eléctrico, o que o leva a um baixo factor de potência.
- Oscilações de tensão (afundamento ou elevação de tensão, subtensões e interrupções);
- Distorções da forma da onda de tensão ou corrente (harmônicos ou ruídos) – A ocorrência destas distorções são fruto de uso maioritário de dispositivos que contém elementos da eletrônica de potência, tal como computadores, compensadores estáticos, variadores de frequência, etc;

- Desequilíbrio de tensão – quando em um sistema trifásico são conectadas cargas desbalanceadas estas causam a sobrecarga de umas fases em detrimento das outras, originando-se desta forma o desequilíbrio de tensão.
- Variação da frequência – este fenômeno é geralmente causado pelo desligamento ou entrada de grandes cargas, pela ocorrência de faltas no sistema, ou o desligamento de uma grande fonte de energia dentro de um sistema interligado.

Segundo ANEEL 414/2010, perturbação no sistema elétrico: é a modificação das condições que caracterizam a operação de um sistema elétrico fora da faixa de variação permitida para seus valores nominais, definidos nos regulamentos sobre qualidade dos serviços de energia elétrica vigentes

2.1.1 ATERRAMENTO ELÉCTRICO

O aterramento é um dos aspectos mais importantes de um sistema de distribuição elétrica, mas geralmente o menos compreendido. Seu Código Elétrico estabelece os requisitos legais em sua jurisdição para padrões de segurança em instalações elétricas.

Este código especifica requisitos nas seguintes áreas:

- a) A proteção da vida contra o perigo de choque elétrico e a mitigação de danos por ligação a sistemas metálicos não condutores de corrente à terra;
- b) A limitação de tensão em um circuito quando exposto sobretensões;
- c) A limitação da tensão fase-terra a um nível fixo de um circuito CA nos sistemas instalação embebida;
- d) Instruções para facilitar a operação de aparelhos elétricos;
- e) Limites para a tensão em um circuito exposto à luz (Hydroone, 2007).

2.1.1.1 Tipos de sistemas de aterramento praticáveis

Kinderman e Jorge, 1995 apontam 5 tipos de sistemas de aterramento praticáveis que são:

- Sistema TN-S: significa que a fonte e a massa estão aterradas usando o mesmo condutor e ligado ao neutro.

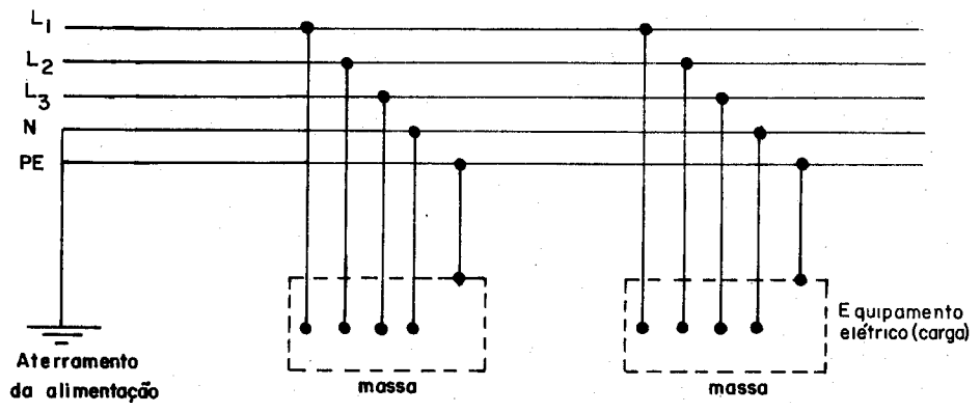


Figura 1: Sistema de aterramento TN-S. Fonte: (Kinderman e Jorge, 1995)

- Sistema TN-C: significa que a fonte e a massa estão aterradas usando o condutor neutro

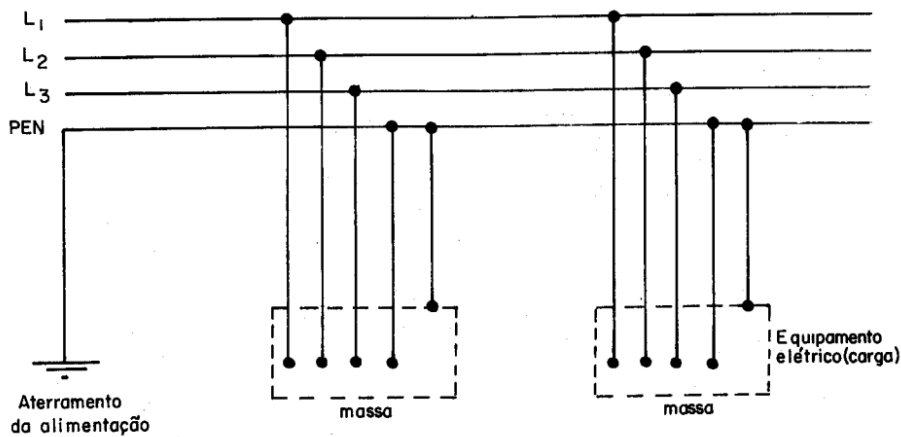


Figura 2: Sistema de aterramento TN-C. Fonte: (Kinderman e Jorge, 1995)

- Sistema TN-C-S: significa que a fonte de alimentação está aterrada, a chapa também está aterrada usando o seu próprio condutor, porém, é conectado ao neutro após uma certa distância.

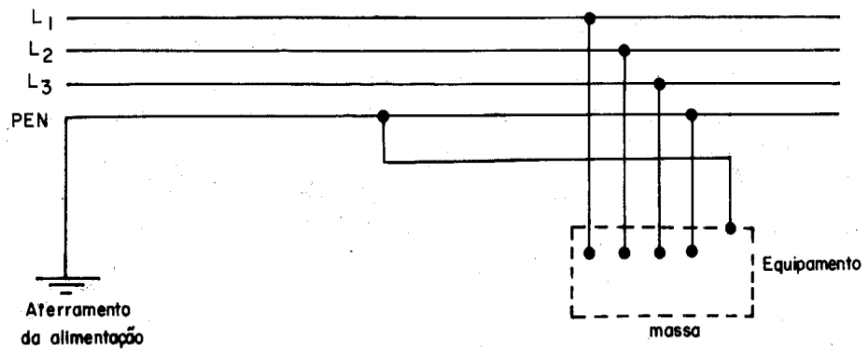


Figura 3: Sistema de aterramento TN-C-S. Fonte: (Kinderman e Jorge, 1995)

- Sistema TT: significa que a fonte e a massa encontram-se aterradas através de condutores separados e sistemas separados

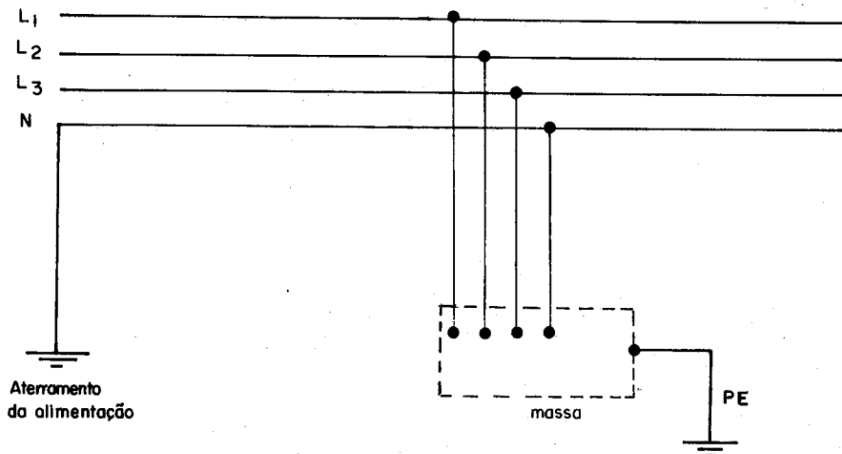


Figura 4: Sistema de aterramento TT. Fonte: (Kinderman e Jorge, 1995)

- Sistema IT: significa que a fonte não está aterrada, ou está aterrada por meio a uma impedância considerável e a massa tem terra próprio.

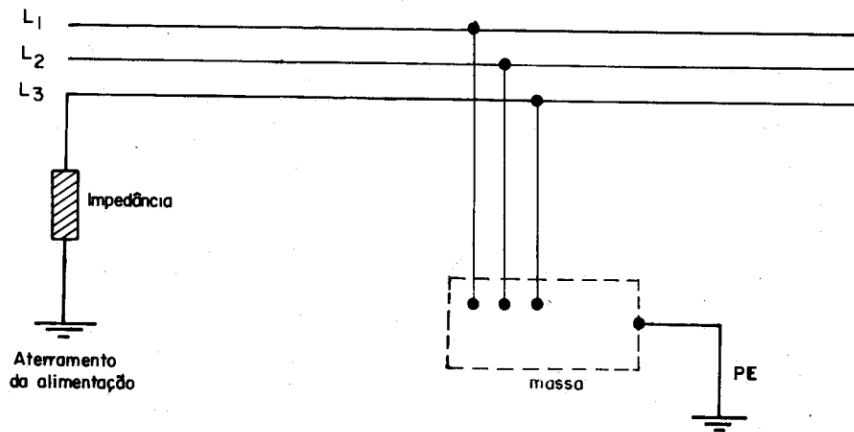


Figura 5: Sistema de aterramento IT. Fonte: (Kinderman e Jorge, 1995)

2.1.1.2 Limites da resistência do sistema de aterramento

A norma internacional IEC60364, 2005 estabelece a resistência eléctrica no valor de 10 ohm como limite máximo de resistência que um sistema de aterramento deva possuir. O que significa que caso o valor esteja acima deste limite, uma investigação deve ser levada a cabo de modo a auferir as causas e corrigi-las.

2.1.1.3 Consequências de um baixo valor da resistência de aterramento

Hydroone, 2007 defende que um pobre valor da resistência do sistema de aterramento pode causar as seguintes consequências:

- Risco de choque eléctrico – No caso de ocorrências de faltas ou falhas a corrente pode não ser drenada devidamente ao solo, percorrendo assim pelo corpo humano;
- Falta de protecção contra sobretensões – a corrente de falta pode causar um aumento de tensões no sistema devido ao mau aterramento;
- Degradação da qualidade do sinal em sistemas de comunicação e instrumentação;
- Redução da eficiência energética – uma inadequada resistência de aterramento pode levar à ocorrência de perdas eléctricas no sistema eléctrico;
- Danos nos equipamentos sensíveis.

2.1.1.4 Medição da resistência de aterramento

Kinderman e Jorge, 1995 propõe o uso do aparelho *Megger* para a medição da resistência de terra. Esta medição deverá ser feita de acordo com o esquema ilustrado na figura a seguir:

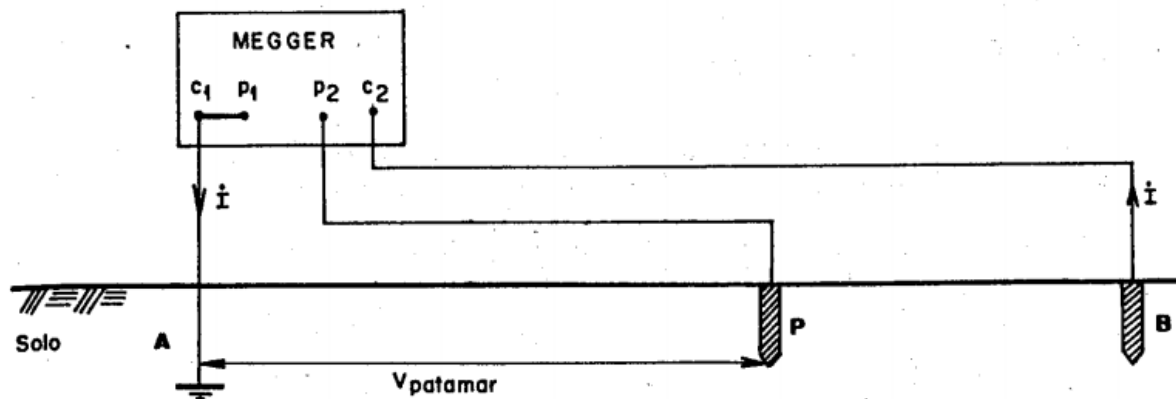


Figura 6: Medição com o *Megger*. Fonte: (Kinderman e Jorge, 1995)

De acordo com o esquema, os terminais C₁ e P₁ devem ser conectados junto à haste de aterramento da instalação. Este aparelho injecta uma corrente eléctrica pelo terminal C₁ que retorna ao aparelho pelo terminal C₂, através da haste auxiliar B. a circulação desta corrente gera um potencial na superfície do solo. O potencial correspondente ao ponto P é processado internamente pelo eparelho (esta operação corresponde á expressão da equação 1).

$$R(x) = \frac{V(x)}{I} \quad (1)$$

Os autores Kinderman e Jorge, 1995 reomendam a observação dos seguintes procedimentos para a medição da resistência da terra:

- Alinhamento do sistema de aterramento principal com hastes de potência e auxiliar;
- A distância entre o sistema de aterramento principal e a haste auxiliar deve ser suficientemente grande, para que a haste de potencial atinja a região plana do patamar;
- O aparelho (*Megger*) deve ficar o mais próximo possível do sistema de aterramento principal;

- As hastes de potencial e auxiliar devem estar bem limpas, principalmente isentas de óxidos e gorduras para possibilitar bom contacto com o solo;
- Calibrar o aparelho, isto é, ajustar o potenciômetro e o multiplicador de *Megger*, até que seja indicado o valor zero;
- As hastes usadas devem ser do tipo *Copperweld*, com 1.2 metros de comprimento e diâmetro de 16 mm;
- Cravar as hastes no mínimo 70 cm no solo;
- O cabo de ligação deve ser de cobre com secção mínima de 2.5 mm²;
- As medições devem ser feitas em dias em que o solo esteja seco, para se obter o maior valor de resistência de terra de aterramento, do contrário devem-se anotar as condições do solo;
- Se houver oscilação da leitura durante a medição, significa a existência de interferência. Deve-se então deslocar as hastes de potencial e auxiliar para outra direção, de modo a contornar o problema;
- Verificar o estado do aparelho; e
- Verificar a carga da bateria.

Pelo facto de esta actividade ter que ser realizada em um sistema eléctrico é sempre necessário ter em conta algumas precauções de segurança durante a realização destas medições. Os autores Kinderman e Jorge, 1995 recomendam a observação das seguintes medidas de segurança:

- Não fazer as medições sob condições atmosféricas adversas, tendo-se em vista a ocorrência de descargas atmosféricas;
- Não tocar na haste e no condutor de aterramento;
- Não permitir com que os animais e pessoas não autorizadas se aproximem do local das medições;
- O sistema de aterramento a ser medido deve estar desconectado do sistema eléctrico.

2.1.2 FACTOR DE POTÊNCIA (OU $\cos \Phi$)

De acordo com Muhammad e Ewald, 2015, o fator de potência é a razão entre a potência fundamental ativa ou real P (medida em W ou kW) e a potência aparente fundamental S (medida em VA ou KVA) conforme a equação 2

$$\cos \phi = \frac{P}{S} \quad (2)$$

A potência reativa Q (medida em VAR ou KVAR) fornecida a dispositivos indutivos é a diferença fasorial entre as potências real e aparente. O factor de potência é o *coseno* de o ângulo entre essas duas grandezas ($F_p = \cos \phi$). Reflete a eficiência com que uma instalação usa eletricidade comparando a quantidade de trabalho útil que é extraído do sistema elétrico da potência aparente fornecida (Muhammad e Ewald, 2015).

A relação entre S, P e Q é definida pelo triângulo de potência e é expressa a partir das equações 3 e 4

$$S^2 = P^2 + Q^2 \quad (3)$$

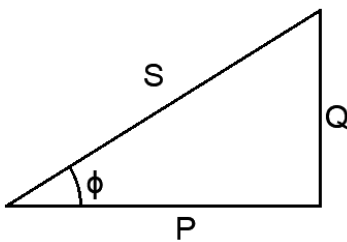


Figura 7: Triângulo de potência. Fonte: (Autor, 2023)

De acordo com o triângulo da Figura 7 nota-se a existência de um ângulo ϕ que mede o ângulo de deslocamento entre os componentes fundamentais da tensão de fase e corrente de fase, e é dado por:

$$\phi = \arctg\left(\frac{Q}{P}\right) \quad (4)$$

O factor de potência é um valor que varia entre zero (0) e um (1).

João, 2013 apresenta a consequência da variação do fator de potência (fp) em uma instalação eléctrica.

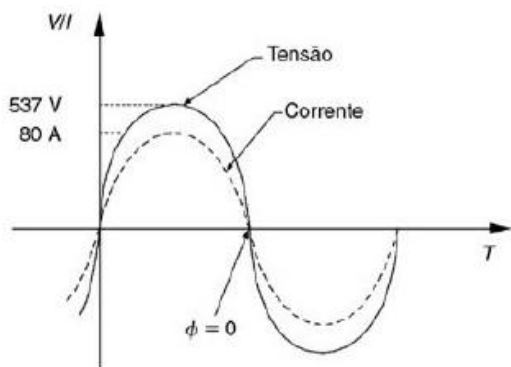


Figura 8: fator de potência unitário. Fonte: (João, 2013).

A Figura 8 mostra o comportamento da tensão e corrente apresentado por uma carga puramente resistiva, ou seja, o seu fator de potência é unitário ($F_p = \cos\phi = 1$). Neste caso a corrente e a tensão encontram-se em fase.

Segundo Muhammad e Ewald, 2015 este feito significa que toda a energia consumida por uma instalação vai para produzir trabalho útil, como aquecimento resistivo e iluminação incandescente.

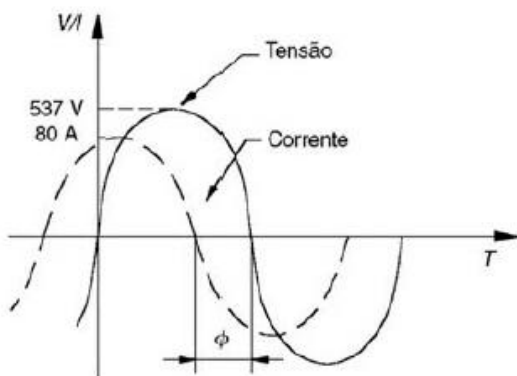


Figura 9: Fator de potência diferente de um. Fonte: (João, 2013).

Para o caso apresentado na Figura 9 nota-se que a tensão encontra-se adiantada em relação a corrente, então, segundo João 2013, o factor de potência é indutivo, ou seja, o ângulo ϕ é negativo.

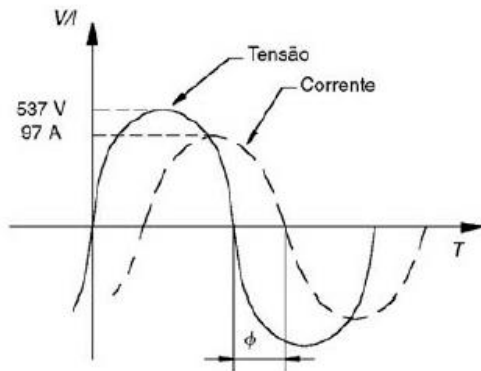


Figura 10: Fator de potência diferente de um. Fonte: (João, 2013).

Este caso apesar de também possuir um factor de potência diferente de um (1), nota-se que a tensão encontra-se em atraso em relação a corrente, então, segundo João 2013, o factor de potência é capacitivo, ou seja, o ângulo ϕ é positivo.

Um valor de fator de potência igual a zero ($F_p = \cos \phi = 0$) significa que toda a energia é fornecida como potência reativa e nenhum trabalho útil é realizado (Muhammad e Ewald, 2015).

2.1.2.1 Causas do baixo fator de potência

Segundo João, 2013 para uma instalação industrial, podem ser apresentadas as seguintes causas que resultam num baixo fator de potência:

- Motores de indução trabalhando a vazio, durante um longo período de Operação;
- Motores superdimensionados para as máquinas a eles acopladas;
- Transformadores em operação a vazio ou em carga leve;
- Grande número de reatores de baixo fator de potência suprimindo lâmpadas de descarga (lâmpadas fluorescentes, vapor de mercúrio, vapor de sódio, etc.);
- Fornos a arco;
- Fornos de indução eletromagnética;
- Máquinas de solda a transformador;
- Equipamentos eletrônicos; e
- Grande número de motores de pequena potência em operação, durante um longo período de tempo.

2.1.2.2 Consequências do baixo fator de potência.

Muhammand e Ewald, 2015, olha sob o ponto de vista da qualidade de um sistema eléctrico e aponta sete principais desvantagens de se ter um fator de potência baixo em um sistema eléctrico, que são:

- Elevação do custo da fatura de energia;
- Degradação da eficiência dos sistemas de distribuição de energia;
- Redução da capacidade dos sistemas de transmissão e distribuição;
- Fraco poder de regulação de tensão;
- Maiores quedas de tensão nos barramentos;
- Aumento de perdas eléctricas; e
- Sobreaquecimento dos cabos eléctricos.

2.1.2.3 Compensação do fator de potência

João, 2013 olha para o baixo fator de potência num âmbito financeiro em uma instalação eléctrica e aponta como consequência deste feito a oneração da conta (fatura) de energia devido ao consumo excessivo de energia reactiva indutiva (Var).

Justificando-se pelo facto de que com a potência reactiva não se produz trabalho útil, mas esta deva ser transportada desde os centros de geração até ao consumidor sem que as concessionárias a transformem em receita, tendo desta forma as entidades reguladoras estabelecido 0.95 como o valor mínimo do factor de potência para as unidades consumidoras industriais. Caso o valor do fator de potência seja inferior ao estabelecido, o consumidor (cliente) será cobrado uma taxa agravada (multa) na factura de energia, como forma a coagi-los a melhorar o valor do fator de potência.

A tabela abaixo mostra a relação Q/P para cada factor de potência:

Fator de potência % ($\cos \varphi$)	Angulo (φ)	Razão Q/P ($\tan \varphi$)
100	0	0,00
95	11.4	0.2
90	26.8	0.48
85	31.8	0.62
80	36.8	0.75
70.7	45	1
60	53.1	1.33
50	60	1.73

Tabela 1:Fator de potência e relação Q/P. Fonte: (Ramamy, 2005)

Da tabela acima podemos facilmente verificar que para um factor de potência de 90% é necessária potência reactiva (Q) em cerca de 48% da potência activa (P), o que constitui uma sobrecarga aos condutores eléctricos.

O melhoramento do valor do factor de potência designa-se por **correção ou compensação do fator de potência**.

O fator de potência é compensado com recurso à injeção de energia reactiva nas cargas com base em uso de capacitores (condensadores).

João 2013 retrata a existência de duas formas de compensação ou correção do fator de potência, que são:

- Correção por banco fixo; e
- Correção por banco automático.

A correção por banco fixo é feita por banco de capacitores sem nenhum controlador da potência reactiva capacitiva injetada ao sistema eléctrico. Segundo Ramasamy 2005, esta prática é dificultada pela existência de vales e picos na curva de demanda de potência reativa (Q), pois poderá ocorrer a supercorreção do factor de potência na condição de carga leve, causando danos nos equipamentos pela ocorrência de sobreensões.

enquanto que o sistema de correção por banco automático é manobrado através de um controlador automático de fator de potência, estes bancos são empregados na compensação de cargas reativas indutivas cuja variação de demanda é lenta e que resulta em poucas manobras do banco de capacitores (João 2013). Segundo Ramasamy 2005, estes bancos são usados para fornecer a Q [kVAr] para as condições de pico de carga. Especificamente, isso evitará a correção excessiva do fator de potência.

Normalmente, os bancos de capacitores são colocados no local do fator de potência mínimo medindo a tensão, corrente, P [KW], Q [kVAr] e S [kVA] no alimentador para determinar as condições de carga máxima e mínima (Ramasamy 2005,).

De acordo com Ramasamy, 2005 os capacitores para a correção do fator de potência podem ser instalados no barramento de alta tensão, na distribuição ou na carga. Os capacitores de correção do fator de potência podem ser instalados para um grupo de

cargas, no local da ramificação ou para uma carga local. Os benefícios devidos à correção do fator de potência para a concessionária são a liberação na capacidade de geração do sistema, economia na capacidade do transformador, redução na perda de energia na linha de transmissão e perfil de tensão melhorado. Os benefícios devido à correção do fator de potência para o cliente (consumidor) são: taxa reduzida associada à melhoria do fator de potência, perda reduzida causando demanda de pico mais baixa, consumo de energia reduzido e classificação de curto-circuito aumentada para o sistema.

2.1.2.4 CORRECÇÃO DOS PROBLEMAS

Pelos motivos apresentados anteriormente, surge a necessidade de se arranjar formas de correcção/mitigação destes problemas. Neste sentido, para aumentar o factor de potência, é necessário falar em compensação/correcção de factor de potência. A compensação do factor de potência é efectuada através da instalação de condensadores. Aquando da necessidade de efectuar esta correcção, coloca-se a questão de onde deverá ser efectuada. A compensação poderá ser efectuada, consoante as necessidades/objectivos, em três locais distintos:

- Nas saídas do QGBT (Quadro geral de baixa tensão);
- Em cada zona do edifício (Quadros parciais);
- Nos terminais de cada equipamento de carácter indutivo.

O que influencia a escolha do local onde se irá efectuar a compensação é:

- A necessidade ou não de eliminar o pagamento de energia reactiva;
- O custo do equipamento a instalar;
- O modo como é efectuada a distribuição de energia eléctrica;
- Os efeitos da instalação de condensadores ao longo da instalação;
- O regime de carga.

A correção do factor de potência pode ser feita por meio ao uso de bancos de condensadores fixos assim como bancos automáticos.

2.1.2.5 Correção do fator de potência por banco de capacitores fixo

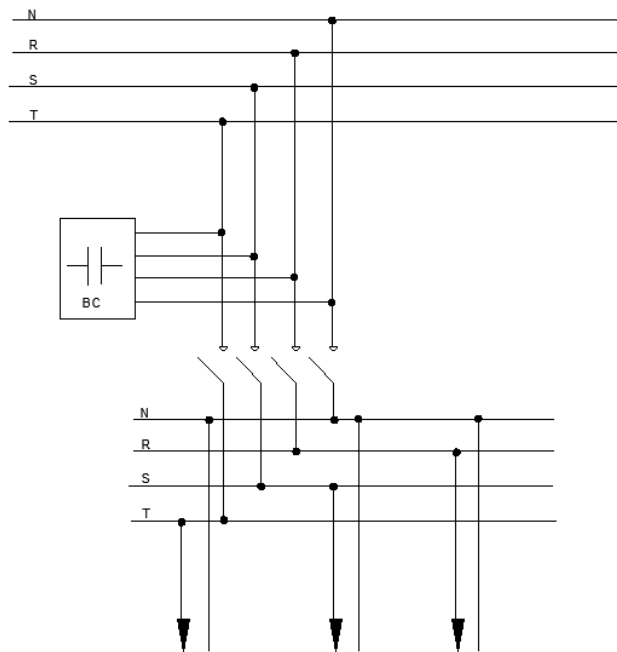


Figura 11: Compensação do factor de potência de um quadro eléctrico por banco de capacitor fixo. Fonte: (Autor, 2023)

O uso de bancos fixos para a correção do fator de potência, apresenta um inconveniente ao ser instalado em barramentos caracterizados por variações lentas e em uma larga faixa de cargas indutivas, o que levará em algum momento a uma sobrecorreção do fator de potência, podendo desta forma desequilibrar os níveis de tensão na carga (Ramasamy, 2005). Para minimizar a ocorrência destes fenómenos apresenta-se no capítulo a seguir a utilização de banco de condensadores automáticos.

2.1.2.6 Correção do fator de potência por banco de capacitores automático

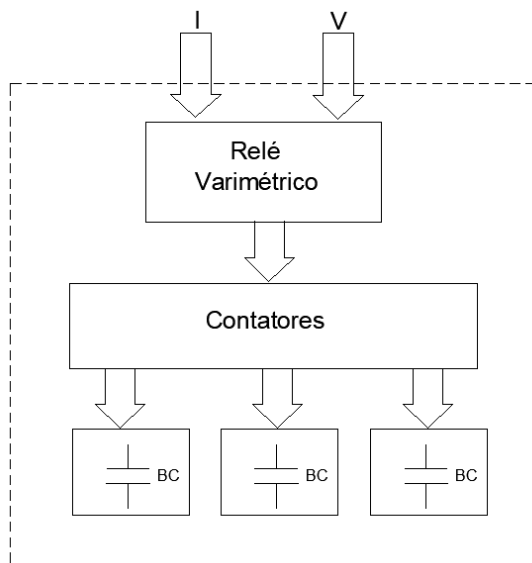


Figura 12: correção do factor de potência por banco de capacitores automático. Fonte: (Riese, 2014)

Este tipo de banco de capacitores é usado quando se deseja que a potência reativa gerada pelo banco de capacitores se adapte ao comportamento variável da carga..

A Figura 12 mostra que um banco automático é constituído por 3 componentes principais que são:

- Relé varimétrico – faz a medição do factor de potência das cargas e determina a quantidade de energia reativa que necessita de compensação;
- Contactores – permitem o ligamento ou desligamento do banco de condensadores; e
- Condensadores/Capacitores – são os equipamentos que realizam a compensação de potência reativa à instalação (Riese, 2014).

Os capacitores chaveados ou comutados fornecem flexibilidade adicional para controlar a tensão do sistema, fator de potência e perdas. Os capacitores comutados são geralmente aplicados com algum tipo de controle de comutação automática. Um sensor (Relé varimétrico) detecta uma condição específica e, em seguida, inicia um sinal de fechamento ou desarme para o contactor conectado ao banco de capacitores. Um controle de capacitor automático típico inclui o seguinte:

Tensão: O controle da regulação de tensão é uma consideração importante.

Corrente: Se a magnitude da corrente for diretamente proporcional à demanda de VAR.

Controle de VAR (Relé varimétrico): a demanda de VAR aumenta com certas cargas e diminui quando a carga específica está desligada.

Interruptor horário: Para ligar os condensadores durante as horas de ponta e desligá-los fora das horas de ponta.

Temperatura: Em certas cargas, como condicionadores de ar, a demanda de VAR aumenta quando a temperatura aumenta.

Entretanto, segundo Ramasamy, 2005 o esquema de segmentar o banco de capacitores apresenta ainda os seguintes inconvenientes:

- A capacidade de adaptação do banco capacitivo depende do número de segmentos, e um número grande de segmentos acarretaria em um sistema bastante oneroso.
- A corrente durante a conexão de uma bateria de capacitores pode alcançar valores consideráveis.
- A utilização de elementos mecânicos para a conexão dos segmentos do banco capacitivo significa limitação quanto à velocidade de atuação.

2.1.3 HARMÔNICAS

De acordo com a norma IEEE-519,1992 as harmônicas são sinais senoidais de tensão ou corrente com a frequência múltipla inteira da frequência fundamental. Estes sinais se somam com a forma de onda de tensão ou corrente fundamental e as distorcem. A figura a seguir mostra o exemplo de onda distorcida por causa das harmônicas.

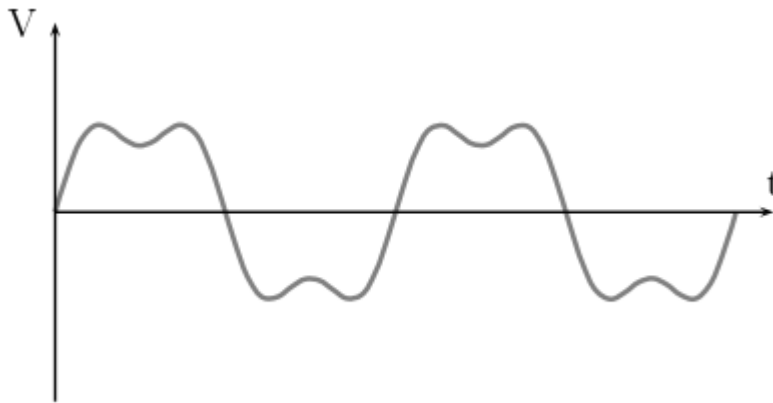


Figura 13: Exemplo de distorção na forma da onda por causa das harmônicas. Fonte: (IEEE-519,1992)

Como as harmônicas (ou componentes harmônicas) causam problemas de qualidade de energia, é necessária a sua regulamentação através de normas que assegurem o nível máximo de harmônicos tolerados. Para isso é necessário que sejam utilizados indicadores para a quantificação e análise dos efeitos dos harmônicos. Segundo Ainsworth, 1965 existem quatro principais indicadores para a quantificação e análise dos efeitos harmônicos que são: DHT (distorção harmônica total), DTD (distorção total da demanda), factor K e FHL (factor de perdas harmônicas), estes indicadores serão abordados de forma detalhada nos próximos subcapítulos.

a) Distorção Harmônica Total (DHT)

De acordo com Ramasamy, 2005 DHT é um índice comumente usado para medir a distorção harmônica na forma de onda da tensão e corrente, onde Ainsworth, 1965 ressalta que a informação fornecida pela THD não é uma informação completa, uma vez que apenas seu valor não é suficiente para quantificar a influência dos harmônicos presentes no local de medição no sistema. Este factor é definido como:

$$DHT_V = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots V_n^2}}{V_1} \quad (5)$$

$$DHT_I = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots I_n^2}}{I_1} \quad (6)$$

Onde:

DHT- é a distorção harmônica total;

$V_2, V_3, V_4, \dots, V_n$ – são as componentes da tensão harmónica rms individuais;

$I_2, I_3, I_4, \dots, I_n$ - são as componentes da corrente harmónica rms individuais;

V_1 – é a tensão rms da componente fundamental;

I_1 - é a corrente rms da componente fundamental;

Os limites aceitáveis de distorção harmónica de tensão e de corrente para diferentes níveis de tensão do sistema são apresentados na Tabela 2 e 3 respectivamente:

Tensão de barramento no PCC	Distorção individual de tensão (%)	Distorção total de tensão THD(%)
$< 69KV$	3,0	5,0
$69001V$ até $161KV$	1,5	2,5
$> 161001V$	1,0	1,5

Tabela 2: Distorção máxima de tensão de acordo com o padrão IEEE-519. Fonte: (Ramasamy, 2005)

Distorção harmónica de corrente máxima em percentagem de I_L						
I_{SC}/I_L	Ordem harmónica n					TDD
	< 11	$11 \leq n \leq 17$	$17 \leq n \leq 23$	$23 \leq n < 35$	$n \geq 35$	
< 20	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
$20 < 50$	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
$50 < 100$	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
$100 < 1000$	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
> 1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

Tabela 3: Distorção máxima de corrente para sistemas de 0-69 kV de acordo com o padrão IEEE-519, 1992. Fonte: (Ramasamy, 2005)

b) Distorção Total da demanda (DTD)

Este indicador é recomendado pela norma IEEE-519, 1992 para quantificar a distorção harmónica de corrente em relação à demanda de corrente da carga. Sua formulação matemática é bastante similar ao DHT, tendo como diferença o facto de que a DTD é calculada em relação à corrente máxima da carga e a DHT utiliza a corrente fundamental no horário da medição. O valor da DTD é uma informação completa uma vez que sempre é calculada em relação à corrente máxima. Assim, se o valor encontrado para a DTD for alto, pode se afirmar que há elevada circulação de harmónicos no sistema em causa.

A DTD é dada por:

$$DTD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}} I_h^2}}{I_L} \quad (7)$$

Em que:

I_L – é a corrente de demanda máxima da carga na frequência fundamental, medida no ponto de acoplamento comum entre a carga e o sistema; e

I_h - Valor rms da componente de corrente harmônica h.

c) Factor K

Segundo a norma IEEE-519, 1992 este factor é amplamente utilizado por projetistas de transformadores, onde baseiam-se neste factor para calcular o aumento do aquecimento de um transformador devido à circulação de correntes harmônicas. O fator K pode ser calculado através da relação:

$$K = \sum_{h=1}^{h_{\max}} \left(\frac{I_h}{I_R} \right)^2 * h^2 \quad (8)$$

Em que:

I_R – Representa a corrente nominal rms total;

I_h – Representa a corrente no harmônico h; e

h – Representa a ordem do harmônico.

d) Fator de perdas harmônicas (F_{HL})

Este é outro factor que segundo a norma IEEE-519, 1992, também é utilizado para se quantificar a diminuição do carregamento de um transformador na presença de harmônicos. Este factor representa o aquecimento efetivo gerado no transformador como resultado de uma determinada corrente harmônica. Este é determinado pela equação:

$$F_{HL} = \frac{\sum_{h=1}^{h_{\max}} \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 * h^2}{\sum_{h=1}^{h_{\max}} \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2} \quad (9)$$

Onde:

I_h – Representa a corrente harmónica;

h - Representa a corrente no harmônico h ; e

I_1 – Representa a corrente da componente fundamental.

A mesma norma aponta como a principal diferença entre o factor K e o F_{HL} o facto de que o factor K é dependente tanto da magnitude quanto da distribuição dos harmônicos da corrente, enquanto que o F_{HL} é apenas dependente da distribuição dos harmônicos. Dessa forma, caso haja medições em transformadores de potências nominais diferentes que apresentem uma distribuição harmônica similar, estes terão o mesmo F_{HL} enquanto que o fator K variará com a diferença entre as amplitudes das correntes em cada transformador. Estes dois fatores estão relacionados através da expressão:

$$K = \left[\frac{\sum_{h=1}^{h_{\max}} I_h^2}{I_R^2} \right] F_{HL} \quad (10)$$

Onde:

K – É o factor K ;

F_{HL} – É o factor de perdas harmónicas;

I_h – É a corrente harmônica; e

I_R – É a corrente nominal rms total.

2.1.3.1 Determinação de perdas por harmónicas

De acordo com a norma IEEE-519, 1992 as perdas por harmónicas podem ser dadas por:

$$\Delta P = \sum_{h=3}^n V_h * I_h, \text{ para } : h = 3, 5, 7, 9, \dots, 2n + 1 \quad (11)$$

A influencia das harmônicas ao fator de potência é dada por:

$$\cos \phi_{(h)} = \frac{1}{\sqrt{1 + THD^2}} * \cos \phi \quad (12)$$

2.1.3.2 Serie de Fourier

Uma vez que as harmônicas são tidas como sinais senoidais (sinais periódicos) com frequência múltipla inteira da fundamental, Mohamed, 2015 define uma função periódica como sendo uma função definida para todos valores reais de t e que possui um número positivo T tal que:

$$f(t) = f(t + T) = f(t + 2T) = f(t + nT) \quad (13)$$

Onde T – é tido como o período da função.

Esta função pode ser expandida em série de Fourier. Esta série tem a expressão:

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) \right) \quad (14)$$

Onde:

a_0 – é o valor médio da função f(t). Também chamado de componente de corrente contínua;

a_n e b_n – são chamados de coeficientes da série de Fourier.

A equação (14) é chamada de série trigonométrica de Fourier. A série de Fourier de uma função periódica é a soma das componentes senoidais de diferentes frequências.

O termo $2\pi/T$ pode ser escrito como ω . O n-ésimo termo $n\omega$ é chamado de n-ésimo harmônico e n=1 fornece o termo fundamental.

Desta forma, a equação (14) pode ser escrita como:

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos\left(\frac{n\omega t}{T}\right) + b_n \sin\left(\frac{n\omega t}{T}\right) \right) \quad (15)$$

Os termos a_0 , a_n e b_n são dados por:

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) dt \quad (16)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \cos\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) dt = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \cos\left(\frac{n\omega t}{T}\right) dt \text{ para } n=1,2,\dots,\infty \quad (17)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \sin\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) dt = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \sin\left(\frac{n\omega t}{T}\right) dt \text{ para } n=1,2,\dots,\infty \quad (18)$$

Em título de exemplo da aplicação da serie de Fourier, Mohamed 2015 demonstra a série de Fourier de uma função de onda quadrada como sendo:

$$f(t) = \frac{4k}{\pi} \left(\frac{\sin \omega t}{1} + \frac{\sin 3\omega t}{3} + \frac{\sin 5\omega t}{5} + \dots \right) \quad (19)$$

Onde K é a amplitude da função.

As Figura 14 mostram a construção de onda quadrada a partir de componentes harmônicas, a decomposição senoidal de fourier e o espectro hamônico respectivamente.

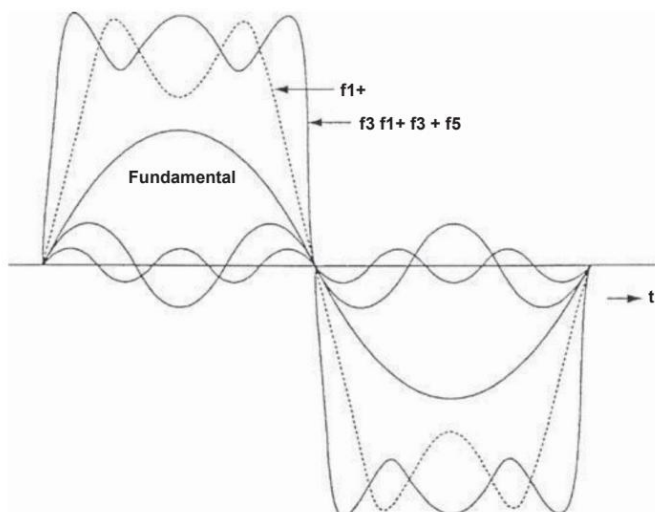


Figura 14: Construção de uma onda quadrada a partir de seus componentes harmônicos Fonte: (Mohamed, 2015)

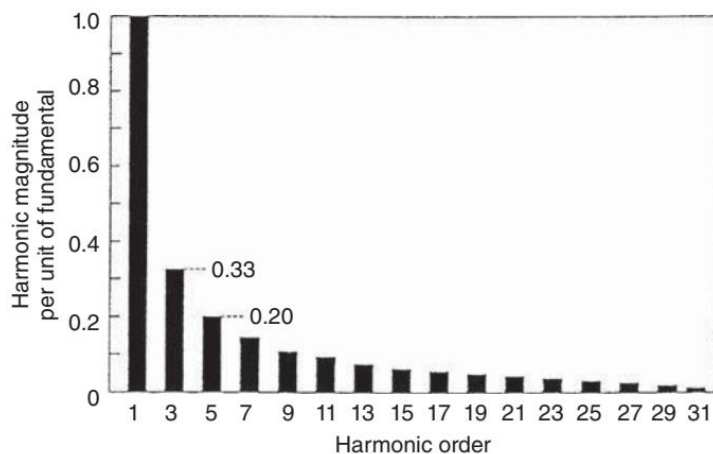


Figura 15: Espectro harmônico Fonte: (Mohamed, 2015).

O espectro harmônico consiste na decomposição do sinal em componentes harmônicas. Esta decomposição, normalmente, é efectuada até às ordens 25 a 31, pela razão de que as frequências de ondas superiores são tidas como menos prejudiciais.

A decomposição em componentes harmônicas é feita em gráficos de barras, no qual se consegue visualizar a ordem do harmônico e a % da componente fundamental existente.

2.1.3.3 Classificação das ondas harmônicas

As ondas harmônicas podem ser classificadas segundo a ordem, sequência e frequência conforme ilustrado na figura abaixo.

Ordem do harmônico	Sequência	Frequência (Hz)
1º(fundamental)	+	50
2º	-	100
3º	0	150
4º	+	200
5º	-	250
6º	0	300
7º	+	350
8º	-	400
9º	0	450
11º	-	550
13º	+	650
15º	0	750
17º	-	850
19º	+	950
etc...		

Tabela 4: Classificação das ondas harmônicas. Fonte: (Ramasamy, 2005)

Da Tabela 4 consegue-se notar que um sinal harmônico possui as sequências positiva negativa e zero. Ainda pode-se notar que a frequência de cada ordem de um sinal harmônico corresponde ao múltiplo da frequência fundamental.

No geral os sinais harmônicos de ordem par (2º, 4º, ..., 2n) não são considerados como prejudiciais aos equipamentos ou instalação, ao passo que as de ordem ímpar precisam de uma atenção especial pois prejudicam as instalações.

Segundo Mohamed, 2015, em um sistema trifásico balanceado sob condições não senoidais, a corrente harmônica de ordem h (ou corrente) pode ser expressa como:

$$I_a = I_1 \sin \omega t + I_2 \sin 2\omega t + I_3 \sin 3\omega t + I_4 \sin 4\omega t + I_5 \sin 5\omega t + \dots \quad (20)$$

$$I_b = I_1 \sin(\omega t - 120) + I_2 \sin(2\omega t - 240) + I_3 \sin(3\omega t - 360) + I_4 \sin(4\omega t - 480) + I_5 \sin(5\omega t - 600) + \dots \quad (21)$$

$$I_c = I_1 \sin(\omega t + 120) + I_2 \sin(2\omega t + 240) + I_3 \sin(3\omega t + 360) + I_4 \sin(4\omega t + 480) + I_5 \sin(5\omega t + 600) + \dots \quad (22)$$

As harmônicas apresentam 3 sequências que são:

- Sequência zero - harmônicos de ordem 3h;
- Sequencia positiva – harmônicos de ordem 3h+1; e
- Sequencia negativa – harmônicos de ordem 3h+2.

Neste caso, todos harmônicos oriundos de cargas não lineares monofásicas são fasores de sequência zero, estes somam-se no neutro. Em um sistema trifásico de 4 fios com carga perfeitamente balanceada entre as fases, os harmônicos de sequência positiva e negativa são cancelados, deixando apenas os de sequência zero. Enquanto que para um sistema trifásico desbalanceado o neutro carrega as sequencias positiva, negativa e zero, (Mohamed, 2015).

2.1.3.4 FONTES DAS HARMÔNICAS (CAUSAS)

Ramasamy, 2005 aponta as cargas com características não lineares como fontes harmônicas nos sistemas de distribuição.

As cargas lineares são aquelas que apresentam um sinal único de frequência para a tensão assim como para corrente, ou seja, apenas apresenta como resposta a alteração na amplitude ou deslocamento fasorial do sinal da entrada (Fitzgerald et al, 2002). As figuras abaixo ilustram a característica de corrente e tensão absorvida por uma carga linear.

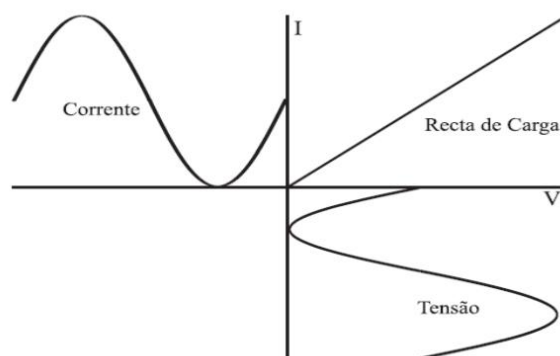


Figura 16: Característica de tensão e corrente de uma carga linear. Fonte: (Baptista, 2006).

Cargas consideradas como não lineares são aquelas que quando alimentadas a partir de um sinal elétrico de frequência única, apresentam como resultado, um sinal elétrico (tensão ou corrente) não senoidal, com múltiplas frequências, podendo ou não haver deslocamento fasorial entre o sinal de entrada e o sinal consumido, ou seja, carga não linear é aquela carga cuja forma de onda da corrente no estado estacionário não segue a forma de onda da tensão aplicada (Fitzgerald et al, 2002).

Segundo Fitzgerald et al, 2002 e Ramasamy, 2005, são cargas não lineares típicas que produzem harmônicos as seguintes:

- Os conversores CA-CC,

- Conversores modulados por largura de pulso;
- Conversores cíclicos,
- Máquinas de solda;
- Fornos a arco;
- Computadores;
- Lâmpadas fluorescentes;
- Refrigeradores;
- Condicionadores de ar
- Compensadores VAR estáticos; e
- Fontes de alimentação de modo chaveado

As figuras a seguir ilustram um exemplo do comportamento das ondas de corrente e tensão de uma carga não linear.

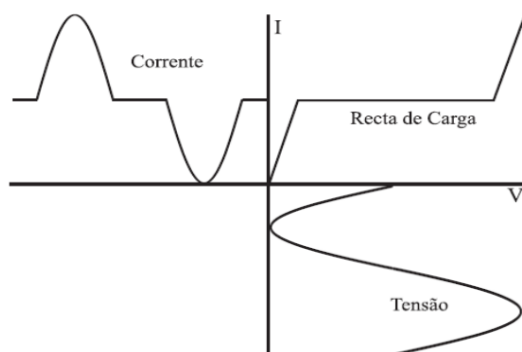


Figura 17:Característica de tensão e corrente de uma carga não linear. Fonte: (Baptista, 2006).

2.1.3.5 PROBLEMAS CAUSADOS PELAS HARMÔNICAS

Dugan et al, 2004, Ramasamy, 2005 e Baptista, 2006, apontam diversos problemas causados à rede ou instalação eléctrica pelo uso excessivo de cargas com comportamento não linear, entre eles:

- Fluxo de correntes harmônicas do conversor para o sistema AC;
- Baixo fator de potência no lado CA;
- Aquecimento dos condutores eléctricos;
- Sobreaquecimento dos condutores de neutro devido à soma dos harmônicos de 3ª ordem;

- Má regulação de tensão no lado CA devido ao baixo fator de potência;
- Interferência nos sistemas de telecomunicações devido a tensões induzidas;
- Distorções de tensões de alimentação CA que afetam o desempenho de equipamentos de informática;
- Erro na medição;
- Aumento da queda de tensão;
- Correntes neutras contínuas nos condutores neutros de sistemas de quatro fios.

2.1.3.6 FORMAS DE MITIGAÇÃO DAS HARMÔNICAS

Nos capítulos anteriores foi feita a descrição de como surgem os componentes harmônicas nos sistemas de potência, seus efeitos sobre os equipamentos e a legislação sobre os limites de injeção de harmônicos no sistema de potência. Este capítulo terá como foco as técnicas utilizadas para eliminar (ou pelo menos para redução) dos níveis de distorções harmônicas nos sistemas elétricos. Dentre essas técnicas, os filtros de harmônicos têm sido os mais utilizados

Os filtros harmônicos são equipamentos instalados em um barramento com a finalidade de absorver os harmônicos de corrente, proporcionando um caminho de baixa impedância para esses harmônicos. Além disso, os filtros harmônicos são usados também para a correção do fator de potência, uma vez que na constituição destes (os filtros) usam-se os bancos de condensadores semelhantes aos empregues para a correção do factor de potência, minimizando-se desta forma os investimentos necessários (KIMBARK, 1971).

Existem dois tipos principais de filtros empregues para a correção das harmônicas, que são: Filtros passivos e filtros ativos.

Estes filtros podem ser instalados em série ou em paralelo (*Shunt*), conforme ilustram as figuras 22 e 23.

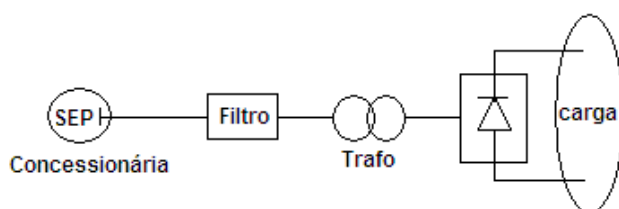


Figura 18: Filtro harmônico em série. Fonte: (KIMBARK,1971)

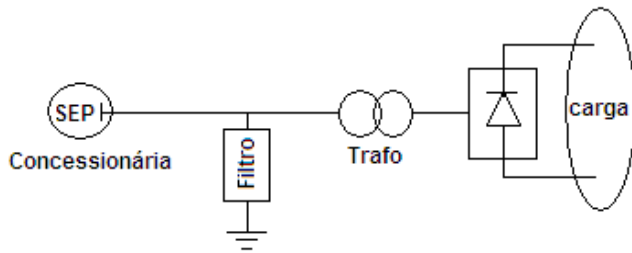


Figura 19: Filtro harmônico em paralelo (*shunt*). Fonte: (KIMBARK,1971)

O filtro shunt é dimensionado para suportar apenas

O filtro “shunt”, em geral, é dimensionado para suportar somente a corrente harmônica para a qual está sintonizado somada a uma corrente fundamental muito menor que aquela do circuito principal. Portanto, o filtro “shunt” é bem mais barato que um filtro série da mesma eficácia. Uma outra vantagem dos filtros *shunt* de corrente alternada sobre os filtros série, é que na frequência fundamental os filtros *shunt* fornecem a potência reativa necessária para correção do fator de potência.

Desta feita torna-se aconselhável o uso de filtros na configuração *shunt*.

2.1.3.6.1 Filtros harmônicos passivos

Os filtros harmônicos passivos são compostos por elementos passivos: resistores, indutores e capacitores. Os tipos mais comuns de filtros harmônicos passivos aplicados em sistemas industriais e de distribuição são os filtros sintonizados, os filtros amortecidos de segunda e terceira ordem e os filtros amortecidos do tipo C (TOSTES et al, 2003).

Os circuitos típicos destes tipos de filtros são ilustrados na Figura 20. O filtro sintonizado é o tipo mais comumente utilizado, principalmente porque apresenta menores custos e perdas do que os filtros amortecidos com mesma capacidade e é mais simples de projetar.

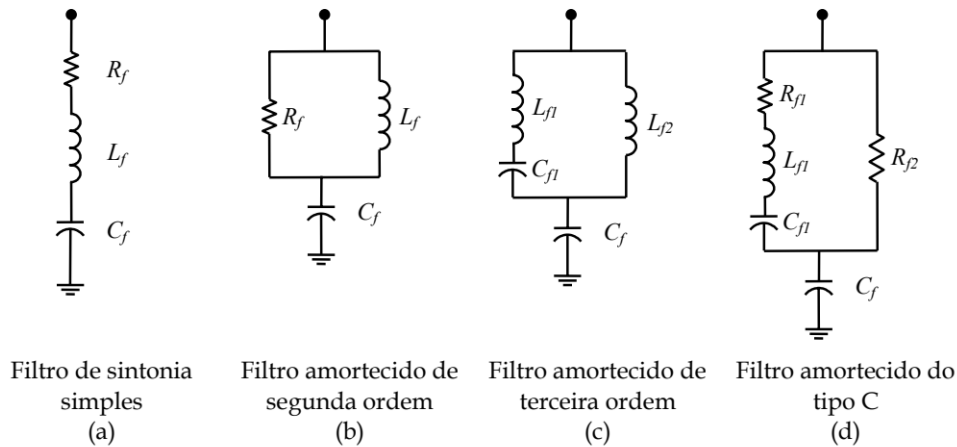


Figura 20: Filtros harmônicos passivos típicos. Fonte: (ORTMEYER e HIYAMA 1996; TOSTES et al, 2003)

2.1.3.6.2 Filtros harmônicos ativos

Os filtros harmônicos ativos são equipamentos que usam conversores eletrônicos para compensar harmônicos de corrente e/ou tensão originados de cargas não-lineares e evitar que estes harmônicos causem problemas em cargas sensíveis (Afonso et al, 2001).

Os filtros ativos podem ser série, paralelos (*shunt*) ou híbridos.

2.1.3.6.3 Filtros ativos série

Segundo Ribeiro 2003, os filtros ativos série funcionam como uma fonte de tensão regulada (V_s). São considerados série porque o elemento que faz a filtragem das harmônicas da rede se encontra em série com esta. A figura 21 mostra um exemplo básico de um filtro ativo série e o seu princípio de funcionamento.

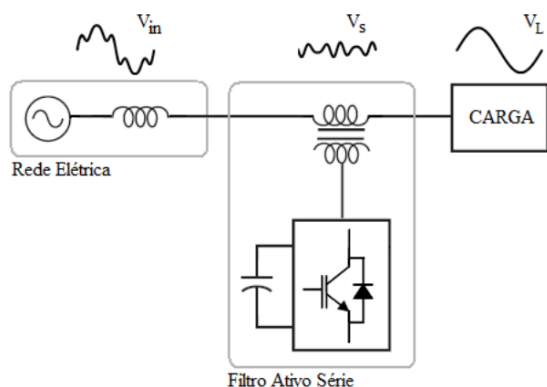


Figura 21: filtro ativo série. Fonte: (Ribeiro, 2003)

De acordo com o mesmo autor, o filtro ativo produz uma tensão V_s que anula a tensão da rede eléctrica V_{in} ao se somar com esta. Desta forma, ele disponibiliza uma tensão V_L livre de sinais harmônicos de acordo com a equação 23

$$V_L = V_{in} + V_s \quad (23)$$

O mesmo autor ressalta que fazendo um uso apropriado de um conversor e tendo a lógica de controle do filtro implementada, este filtro é capaz de corrigir outros distúrbios da fonte de alimentação, como a regulação de tensão disponibilizada para a carga.

2.1.3.6.4 Filtros ativos Paralelo

Segundo Emadi et al, 2005 as correntes distorcidas das cargas podem ser compensadas por um filtro ativo paralelo. Este filtro é projectado para a correção da distorção harmônica de corrente e opera em paralelo com a rede eléctrica. A figura a seguir mostra o princípio de compensação paralela por um filtro ativo paralelo.

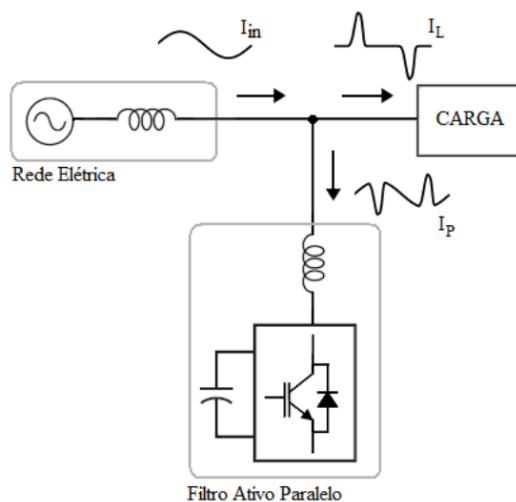


Figura 22: filtro ativo paralelo. Fonte: (Ribeiro, 2003)

O filtro ativo paralelo injecta uma corrente I_p na rede, de forma que a corrente total absorvida pela carga não-linear juntamente com a corrente I_p seja vista como uma corrente resistiva para o sistema eléctrico de acordo com a equação 26

$$I_{in} = I_L + I_p \quad (24)$$

A figura a seguir mostra um resultado experimental de um filtro ativo montando em paralelo.

A forma de onda I_L refere ao consumo da carga com alto conteúdo harmônico. A segunda corrente I_P é a corrente injectada pelo filtro ativo à rede para que a soma destas resulte em uma corrente I_{in} que segue a forma de onda de tensão da fonte em que estes equipamentos estão ligados que é no caso uma senoide (Emadi et al, 2005).

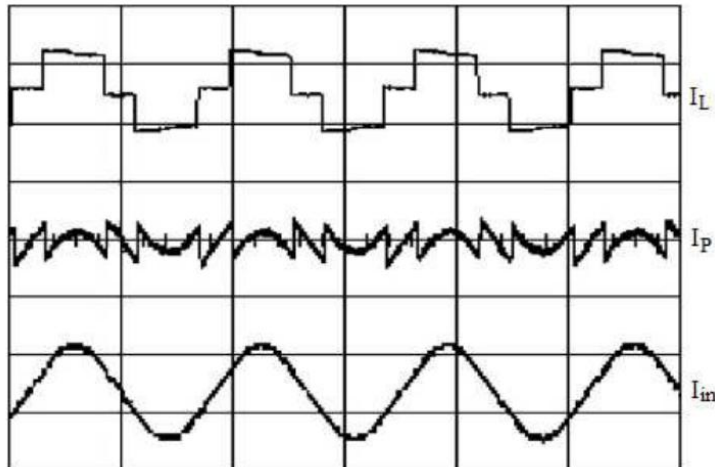


Figura 23: Correção da onda de corrente de uma carga não-linear por meio do uso de um filtro ativo paralelo. Fonte: (Emadi et al, 2005).

As principais vantagens de um filtro ativo paralelo em detrimento dos outros reside no facto de este manter a sua capacidade de correção (filtragem) perante ao dinamismo de cargas geradoras de harmônicos, e ainda, por se encontrar em paralelo com a rede não é necessário que seja dimensionado para suportar a máxima corrente de carga, o que o torna menos robusto (Riese, 2014).

2.1.4 FLICKER DE TENSÃO

Flicker de tensão é um efeito de oscilação de tensão causada pela operação de cargas que variam rapidamente, como fornos a arco. Isso pode causar incômodo resultante de oscilação da luminosidade principalmente em lâmpadas de filamento de tungstênio. O olho humano é mais sensível a variações de luz na faixa de frequência de 5 a 10 Hz e variações de tensão de menos de 0,5%, e essa frequência pode causar oscilações irritantes da iluminação de lâmpada de tungstênio (Mohamed, 2015).

2.1.4.1 Limites de perceptibilidade

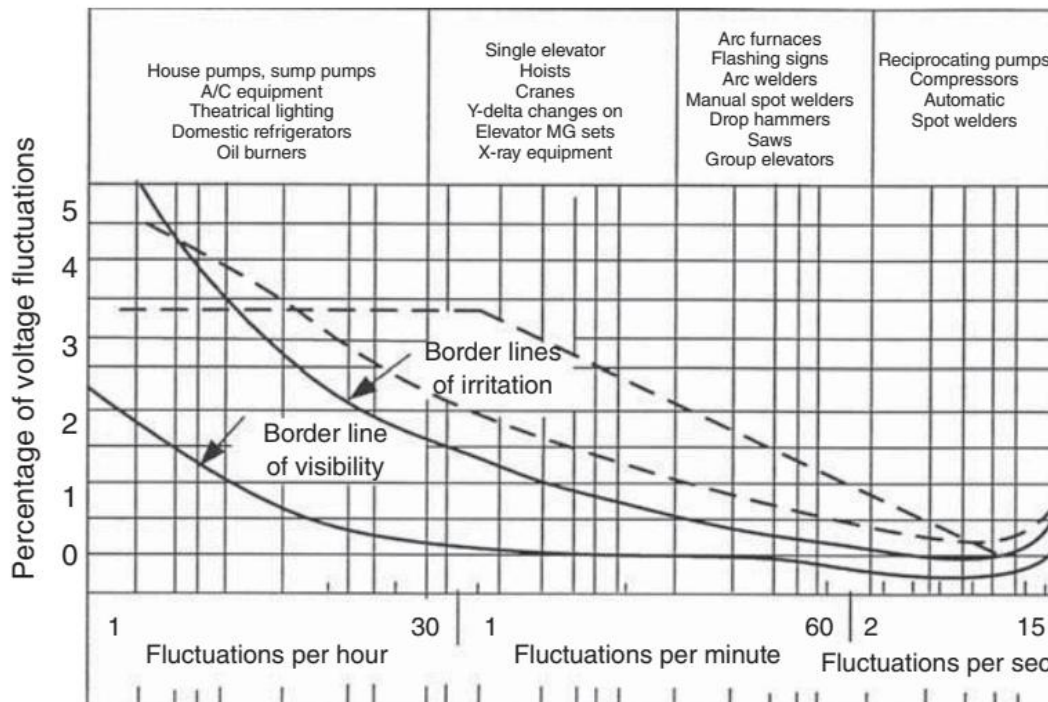


Figura 24: Máximas flutuações de tensão permitidas por IEEE519. Fonte: (Mohamed, 2015).

2.1.4.2 Causas do *Flicker* de tensão

De acordo com Mohamed, 2015 este fenômeno é causado por:

- Grandes máquinas de solda a pontos;
- Fornos a arco;
- Série de motores com cargas que variam rapidamente;
- Fogões e máquinas de lavar (para sistemas fracos)

Ainda segundo o mesmo autor, estas cargas causam *flickers* de tensão pelo facto de estas demandarem alta potência reactiva e um baixo fator de potência, o que causa quedas de tensão cíclicas no sistema de alimentação.

2.1.4.3 Formas de mitigação do *Flicker* de tensão

Mohamed 2015 e João, 2013 apontam quatro formas principais de mitigação deste fenômeno:

- Compensação de energia reativa: a instalação de banco de capacitores fornecem a energia reativa capacitiva para o sistema, melhorando a estabilidade de tensão.
- Uso de filtros ativos ou passivos: Estes filtros além da compensação de harmónicas podem injectar energia reactiva no sistema e ajudar a mitigar os *flickers* de tensão.
- Regulação de tensão: O uso de sistemas de regulação de tensão como AVRs, podem ser implementados para manter a tensão dentro de limites aceitáveis e reduzir os *flickers*.
- Limitação de carga: A redução da demanda durante os períodos de ponta, podem ajudar a evitar ou minimizar os *flickers* de tensão.

CAPÍTULO III

3 Desenvolvimento

3.1 Localização geográfica da Faculdade de Engenharia da UEM

A Faculdade de Engenharia da UEM localiza-se na cidade de Maputo ao longo da Avenida de Moçambique, endereço cujas coordenadas geográficas são:-25.9354, 32.5482.

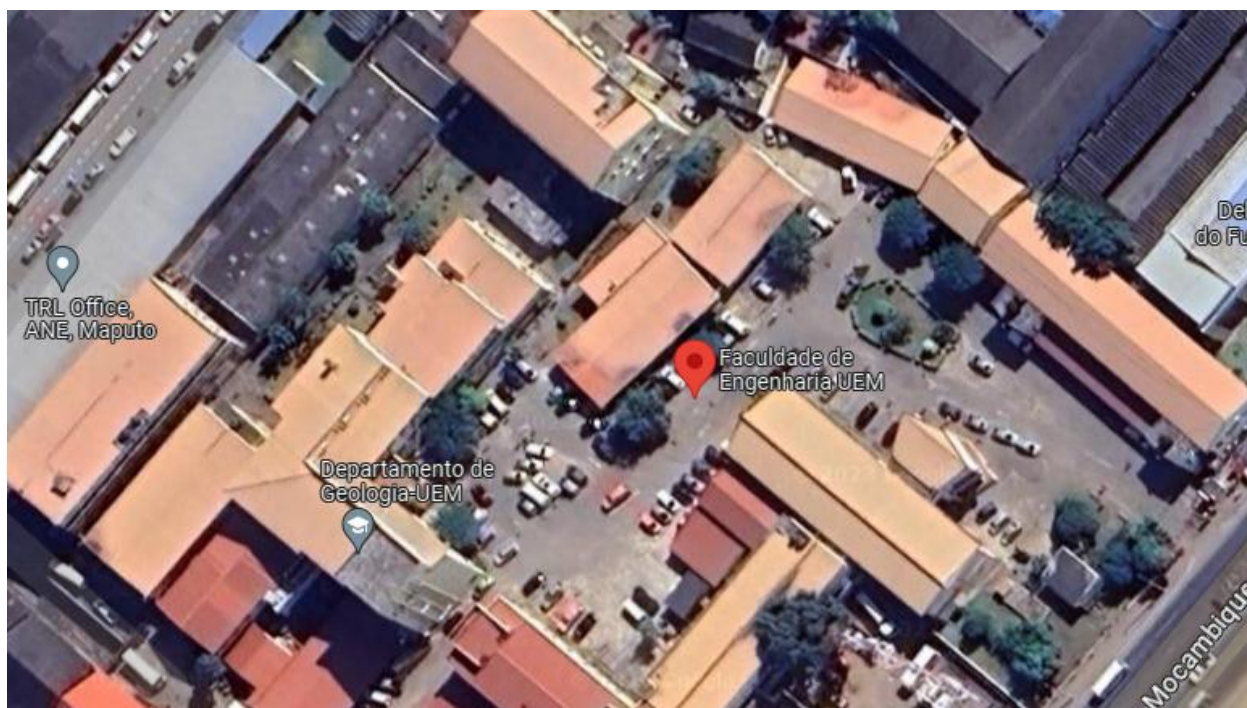


Figura 25: Vista de cima da Faculdade de engenharia da UEM. Fonte: (Google Maps, 2023)

3.2 Subdivisão da Faculdade de engenharia

A Faculdade de engenharia encontra-se dividida em sete departamentos (que são: Departamento das cadeiras gerais, departamento de Eng. Civil, departamento de engenharia electrotécnica, departamento de engenharia química, departamento de engenharia mecânica, departamento de pós-graduação e departamento de geologia), um bloco administrativo, uma carpintaria e um centro de electrónica, conforme ilustrado no anexo 9.

3.3 Descrição da rede eléctrica da Faculdade de Engenharia

A rede eléctrica desta faculdade é constituída por uma linha de média tensão de 11kV, uma sub-estação abaixadora, 3 postos de transformação (sendo um de 200 kVA e outros de 500 kVA) e um armário de distribuição.

3.3.1 Posto de transformação central

Este PT possui um transformador com potência de 500 kVA, que se destina a alimentar os seguintes edifícios: Dep. de Cadeiras Gerais, Dep. de Eng. Química, Centro de electrónica, D. Pós-Graduação, Bloco administrativo, os laboratórios de alta tensão, medidas e oficinas de electricidade.



Figura 26: Armário do PT central. Fonte: (Autor, 2023)

As imagens do transformador e da sua chapa característica encontram-se no anexo 10.

3.3.2 Posto de transformação do departamento de Eng. Electrotécnica

O transformador deste PT alimenta o DEEL, carpintaria, uma parte do DEQUI, e o departamento de Geologia.

Este PT possui um transformador com potência de 500 kVA.



Figura 27: Armário do PT do DEEL. Fonte: (Autor, 2023)

As imagens do transformador e a chapa característica encontram-se em anexo 10.

3.3.3 Posto de transformação do departamento de Eng. Mecânica

Este PT alimenta as cargas dos departamentos de Eng. Mecânica e Civil.

Este PT possui um transformador com potência de 200 kVA,



Figura 28: QGBT do PT do DEMA. Fonte: (Autor, 2023)

A chapa característica deste transformador encontra-se no anexo 10

3.3.4 Armário de distribuição do DEQUI

Este armário tem como fonte o PT do DEEL e alimenta uma parte das cargas do departamento de Eng. Química e todo departamento de Geologia.

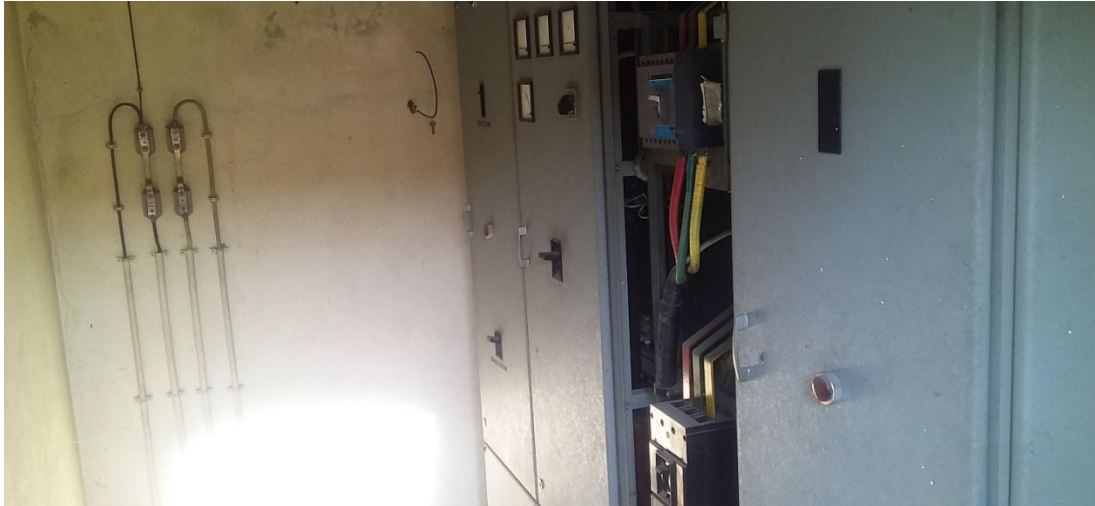


Figura 29: Armário do DEQUI. Fonte: (Autor, 2023)

3.4 Tipo de cargas

A faculdade de engenharia é composta por oito tipos de cargas predominantes que são:

Lâmpadas fluorescentes, computadores, Ups, impressoras, fornos, equipamentos de condicionamento de ar (A/C), motores de indução e máquinas de soldar.

As características de consumo de cada carga são:

- Lâmpadas fluorescentes - elevado valor de DHTi;
- Computadores, Ups e impressoras – elevado índice de DHTi e baixo factor de potência;
- Motor de indução – elevado consumo de potência reativa e baixo factor de potência;
- Máquina de soldar – baixo factor de potência e elevado índice de DHTi; e
- A/C – factor de potência próximo à unidade.

As cargas com destaque para os motores de indução e máquinas de soldar, encontram-se localizadas nos laboratórios do DEEL, DEMA, departamento de eng. Civil, departamento de Geologia e na carpintaria. Os fornos encontram-se com predominância nos laboratórios do DEQUI e departamento de Geologia.

O posto de transformação que apresenta maior consumo é o PT central pois alimenta cargas em departamentos com maior índice de fator de utilização.

CAPÍTULO IV

4 RECOLHA DE DADOS E SIMULAÇÃO DA INSTALAÇÃO

Foi feita no terreno a coleta de todas as cargas da instalação e a posterior simulada no software Matlab-simulink e na planilha excel, de onde foi possível observar as taxas de distorção harmónica (THD) da corrente e tensão reflectidas para cada posto de transformação, verificou-se o consumo de potência ativa e reativa da instalação, e por fim fez-se a observação da qualidade da tensão. Foram feitas também em cada posto de transformação as medições de terra de serviço e de protecção.

A instalação eléctrica da faculdade de engenharia é constituída por 3 postos de transformação, um de potência de 200kVA e outros dois de 500 kVA.

4.1 Simulação no simulink para análise da THD de corrente e tensão

A simulação foi feita tendo em conta as características das cargas que são tidas como principais fontes de distorções harmónicas em uma instalação eléctrica (cargas com características não lineares). As cargas que foram identificadas na instalação com estas características e consideradas para a simulação são: computadores, lâmpadas fluorescentes, UPS, e máquinas de soldar. estas cargas possuem uma maior contribuição na geração de harmónicas na instalação.

Estas cargas foram modeladas no simulink através de fontes de corrente, tendo como base as medições isoladas já feitas por outros autores tal como é ilustrado a seguir.

- a) **Para lâmpadas fluorescentes:** segundo as medições feitas por Vessozi 2011 as lâmpadas fluorescentes tubulares com balastro de 36 ou 40 W possuem uma THDi de 43.3%.
- b) **Para computadores:** segundo as medições feitas por Jeferson 2011 um computador possui uma THDi de 53.50%
- c) **Para UPS:** segundo as medições feitas pelo autor Moreno 2001, verifica-se uma THDi média na ordem de 93%.
- d) **Para máquina de soldar:** O autor Moreno 2001 aponta que em média a máquina de soldar possui um THDi de 58%

As tabelas e espectros harmónicos correspondentes ás distorções harmónicas individuais encontram-se no anexo 4.

A partir dos dados apresentados nas tabelas em anexo 4 e nos dados das chapas características dos equipamentos, foi possível através de fontes de corrente modelar as cargas causadoras de distorções harmônicas. Considerando as quatro primeiras ordens por ser as mais notórias e prejudiciais, as cargas foram modeladas como ilustram as figuras patentes no anexo 12.

4.1.1 Para o posto de transformação (PT) Central

O transformador deste PT alimenta os departamentos das cadeiras gerais, o bloco administrativo e uma parte do departamento de Engenharia Química. Para questões de facilitação na análise, a rede destes departamentos foi reduzida à três cargas monofásicas ligadas em Y_n , tal como ilustra-se no anexo 1.

Tendo sido feita a simulação, os resultados obtidos para corrente e tensão foram:

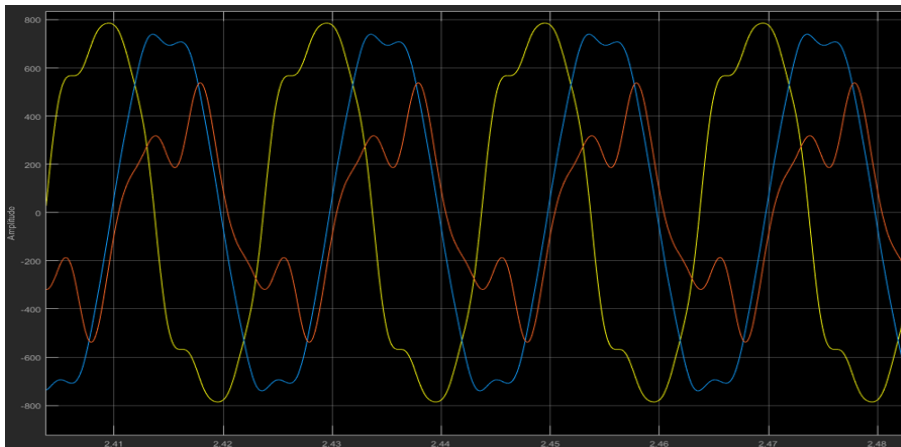


Figura 30: formas de onda da corrente no lado do transformador. Fonte: (Autor, 2023)

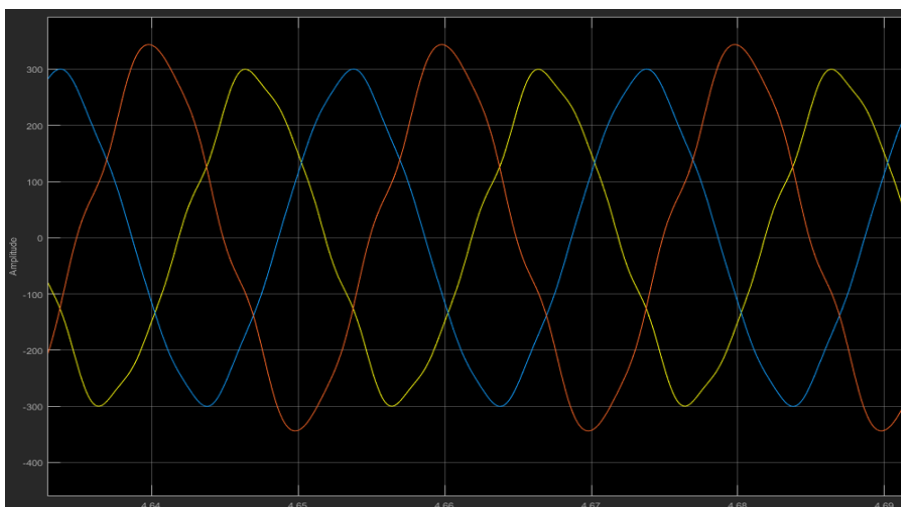


Figura 31: formas de onda da tensão no lado do transformador. Fonte: (Autor, 2023)

4.1.2 Para o posto de transformação (PT) do Departamento de Engenharia Electrotécnica (DEEL)

O transformador do DEEL serve como alimentador das cargas de uma parte do departamento de engenharia química, departamento de geologia e ex-física.

Tendo sido feita a simulação, os resultados obtidos para corrente e tensão foram:

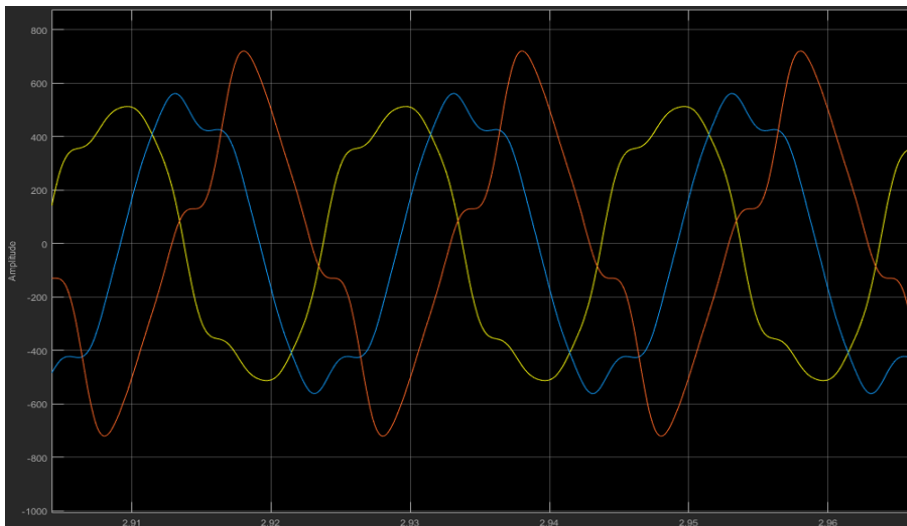


Figura 32: formas de onda da corrente no lado do transformador. Fonte: (Autor, 2023)

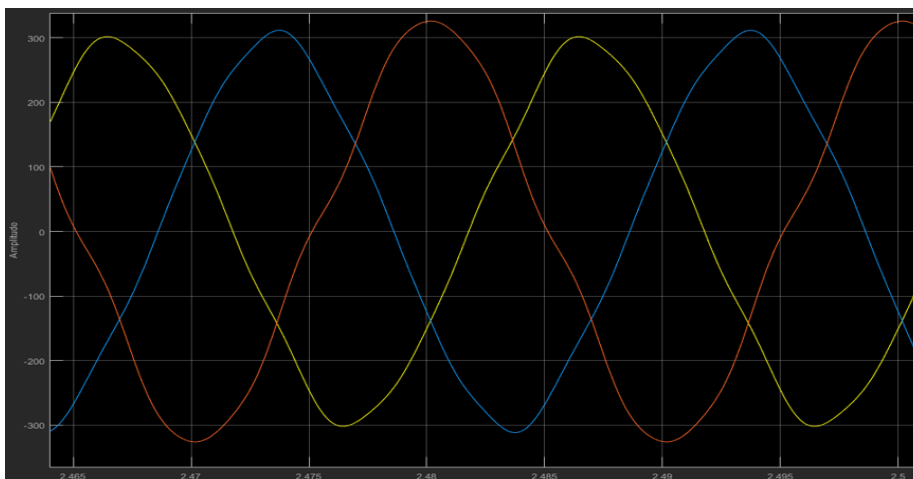


Figura 33: formas de onda da tensão no lado do transformador. Fonte: (Autor, 2023)

4.1.3 Para o posto de transformação (PT) do Departamento de Engenharia Mecânica

O transformador alocado neste ponto serve para a alimentação do departamento de Engenharia Mecânica e Civil.

Tendo sido feita a simulação, os resultados obtidos para corrente e tensão foram:

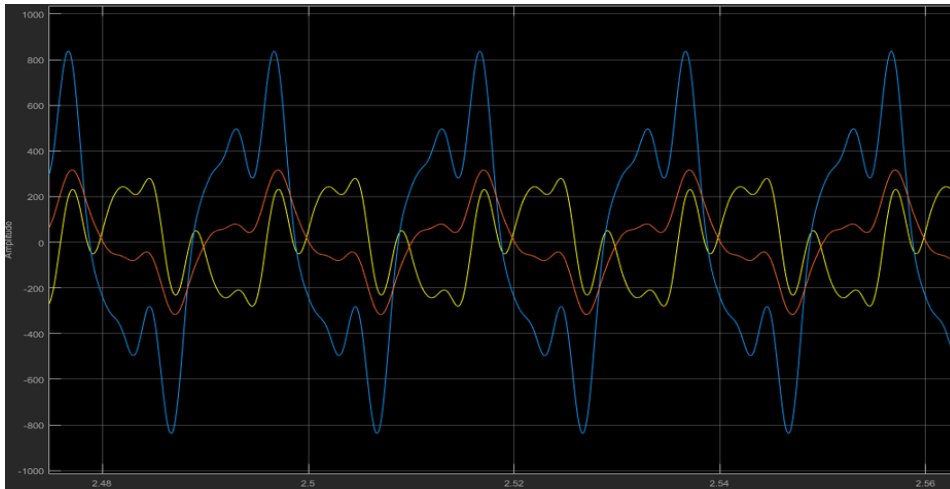


Figura 34:formas de onda da corrente no lado do transformador. Fonte: (Autor, 2023)

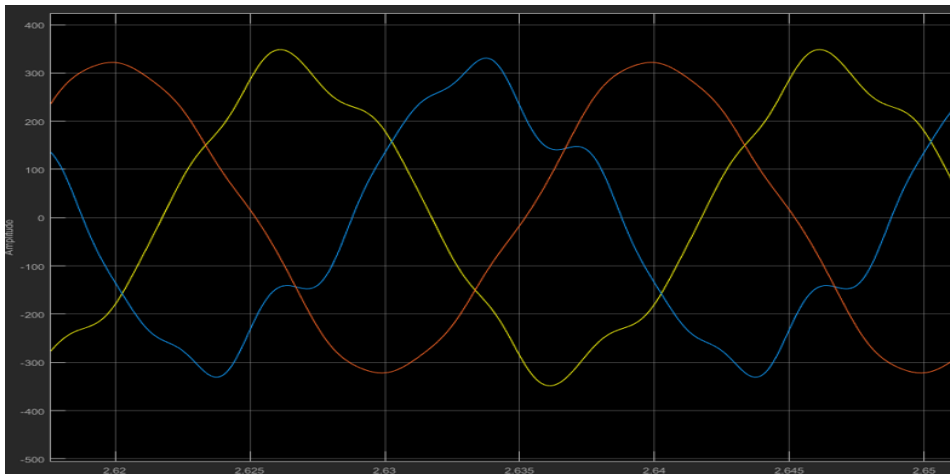


Figura 35:formas de onda da tensão no lado do transformador. Fonte: (Autor, 2023)

4.2 Levantamento das cargas dos quadros dos departamentos

As cargas dos quadros principais dos departamentos encontram-se no anexo 14. Os desenhos dos quadros parciais dos departamentos, as cargas e as suas legendas encontram-se detalhadamente organizadas em um lote de 106 páginas entregue ao Departamento de Patrimônio e Manutenção. Neste trabalho está patente o valor equivalente das cargas destes quadros.

4.3 Levantamento das cargas de saída dos postos de transformação

Foi feita no local de estudo a recolha de dados das cargas (potência ativa, reativa e fator de potência) que se fazem presente na instalação com vista a apurar a potência de carga dos transformadores e a energia diária consumida pela instalação. Estes dados foram colhidos e processados em uma planilha do *excel*.

4.3.1 Para o posto de transformação (PT) Central (da entrada da faculdade)

De acordo com os dados adquiridos e processados em excel (em anexo 14) foi possível obter a informação tabelada abaixo.

	kW	kVA	kVAR	cos fi
Potência total dos quadros	95.2	145	109.782	0.6552
Fator de simultaneidade (Ks)	0.6	0.6	0.6	-
Fator de evolução de carga (Ke)	1.2	1.2	1.2	-
Demanda máxima (Dmax)	68.6	105	79.0427	0.6552

Tabela 5: Aplicação dos fatores de correção na potência total conectada para a determinação da demanda máxima. Fonte: (Autor, 2023)

4.3.2 Para o posto de transformação (PT) do Departamento de Engenharia Electrotécnica (DEEL)

De acordo com os dados adquiridos e processados em excel (em anexo 14) foi possível obter a informação tabelada abaixo.

	kW	kVA	kVAR	cos fi
Potência total dos quadros	84.92441	110.7	70.94517	0.7674
Fator de simultaneidade (Ks)	0.6	0.6	0.6	-
Fator de evolução de carga (Ke)	1.2	1.2	1.2	-
Demanda máxima (Dmax)	61.14558	79.67	51.08052	0.7674

Tabela 6: Aplicação dos fatores de correção na potência total conectada para a determinação da demanda máxima. Fonte: (Autor, 2023)

4.3.3 Para o posto de transformação (PT) do departamento de Engenharia Mecânica

De acordo com os dados adquiridos e processados em excel (em anexo 14) foi possível obter a informação tabelada abaixo.

	kW	kVA	kVAR	cos fi
Potência total dos quadros	60.8	85.752	60.47264	0.709
Fator de simultaneidade (Ks)	0.6	0.6	0.6	-
Fator de evolução de carga (Ke)	1.2	1.2	1.2	-
Demanda máxima (Dmax)	43.77	61.741	43.5403	0.709

Tabela 7: Aplicação dos fatores de correção na potência total conectada para a determinação da demanda máxima. Fonte: (Autor, 2023)

4.4 Medição da resistência do eléctrodo de terra

Para a medição da resistência do sistema de aterramento usou-se o equipamento de medição da marca "AEMC" e foi baseada no esquema que se apresenta em anexo 11.

4.5 Posto de transformação central

O sistema de aterramento do posto de transformação central possui um esquema de aterramento do tipo TN-S.

Para a realização das medições os eléctrodos auxiliares foram inspetados no solo tal que: $d=6.71\text{m}$ e $a=4.16\text{m}$ para os eléctrodos de terra de proteção e serviço.

4.5.1 Resultados obtidos na medição

Num. medição	Classificação do aterramento medido	Data da medição	Hora da medição
	TP&TS (Ω)		
1	4.82	0.3/06/2023	13:45
2	4.85	0.3/06/2023	13:50
3	4.78	0.3/06/2023	14:00
4	4.77	0.3/06/2023	14:10
5	4.87	0.3/06/2023	14:20
Média	4.818	Temperatura: 33°C	

Tabela 8: Resultados de medições da resistência (Ω) do sistema de aterramento. Fonte: (Autor, 2023)

4.6 Posto de transformação do Departamento de Engenharia Eletrotécnica (DEEL)

O sistema de aterramento do posto de transformação do DEEL possui um esquema de aterramento do tipo TN-S.

Para a realização das medições os eléctrodos auxiliares foram inspetados no solo tal que: $d=10\text{m}$ e $a=6.2\text{m}$ para os eléctrodos de terra de serviço e proteção

4.6.1 Resultados obtidos na medição

Num. medição	Classificação do aterramento medido		Data da medição	Hora da medição
	Electrodo 1 (Ω)	Electrodo 2 (Ω)		
1	24	21	27/05/2023	09:17
2	23.9	21	27/05/2023	09:27
3	23.9	21.1	27/05/2023	09:37
4	23.6	20.8	27/05/2023	09:47
5	23.7	21	27/05/2023	09:57
Média	23.82	20.98	Temperatura: 21°C	

Tabela 9: Resultados de medições da resistência (Ω) do sistema de aterramento. Fonte: (Autor, 2023)

4.6.2 Posto de transformação do Departamento de Engenharia Mecânica (DEMA)

O sistema de aterramento do posto de transformação do DEMA possui um esquema de aterramento do tipo TT.

Para a realização das medições os eléctrodos auxiliares foram inspetados no solo tal que: $d=15\text{m}$ e $a=9.3\text{m}$ para os eléctrodos de terra de proteção e $d=12\text{m}$ e $a=7.44\text{m}$ para terra de serviço

4.6.3 Resultados obtidos na medição

Num. medição	Classificação do aterramento medido		Data da medição	Hora da medição
	TP (Ω)	TS (Ω)		
1	4.9	3.97	27/05/2023	10:10
2	5.04	4.3	27/05/2023	10:20
3	5.12	3.9	27/05/2023	10:30
4	5.16	4.02	27/05/2023	10:40
5	5.29	3.99	27/05/2023	10:50
Média	5.102	4.036	Temperatura: 21°C	

Tabela 10: Resultados de medições da resistência (Ω) do sistema de aterramento. Fonte: (Autor, 2023)

4.7 Quadro eléctrico do tipo armário do Departamento de Engenharia Química (DEQUI)

O sistema de aterramento do posto de transformação do DEQUI possui um esquema de aterramento do tipo TT.

Para a realização das medições os eléctrodos auxiliares foram inspetados no solo tal que: $d=12\text{m}$ e $a=7.44\text{m}$ para os eléctrodos de terra de proteção e serviço.

4.7.1 Resultados obtidos na medição

Num. medição	Classificação do aterramento medido		Data da medição	Hora da medição
	TP (Ω)	TS (Ω)		
1	8.25	22.3	27/05/2023	11:10
2	8.28	22.3	27/05/2023	11:30
3	8.29	22.3	27/05/2023	11:40
4	8.3	22.3	27/05/2023	11:50
5	8.28	22.3	27/05/2023	12:00
Média	8.28	22.3	Temperatura: 21°C	

Tabela 11: Resultados de medições da resistência (Ω) do sistema de aterramento.
Fonte: (Autor, 2023)

CAPÍTULO V

5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

No capítulo III observou-se que as cargas ligadas aos três PT's apresentam um nível de distorção harmônica de corrente fora dos padrões recomendados de acordo com a norma IEEE519, 1992.

Pelos valores de DHTv e DHTi e os fatores de potência que se encontram em anexo 1 a 3 e usando as equações 11 e 12 pode-se determinar as perdas de potência e o fator de potência real que ocorrem devido às harmônicas.

Ordem	FASE R			FASE S			FASE T		
	I _{rms} (A)	V _{rms} (V)	P(kW)	I _{rms} (A)	V _{rms} (V)	P(kW)	I _{rms} (A)	V _{rms} (V)	P(kW)
3	76.81025	10.05332	0.772198	40.81632	5.34072	0.217989	105.5816	13.80386	1.457433
5	37.39065	8.1139	0.303384	19.73904	4.28876	0.084656	51.1598	11.09812	0.567778
7	11.36212	3.44346	0.039125	6.24512	1.88139	0.01175	6.74696	2.04077	0.013769
9	2.26083	0.87076	0.001969	0.94792	0.38437	0.000364	0.61336	0.2293	0.000141
Subtotal			1.116676			0.314758			2.03912
Total(kW)	3.470554373								

Tabela 12: Perdas devido as harmônicas para o PT central. Fonte: (Autor, 2023)

Ordem	FASE R			FASE S			FASE T		
	I _{rms} (A)	V _{rms} (V)	P(kW)	I _{rms} (A)	V _{rms} (V)	P(kW)	I _{rms} (A)	V _{rms} (V)	P(kW)
3	49.22162	6.43386	0.316685	42.89068	5.5993	0.240158	83.83312	10.9662	0.919331
5	21.4662	4.65123	0.099844	20.01048	4.35735	0.087193	37.5032	8.0568	0.302156
7	6.66582	2.02851	0.013522	5.73944	1.74715	0.010028	7.8736	2.39466	0.018855
9	1.05448	0.4098	0.000432	1.43486	0.56835	0.000816	0.95312	0.38046	0.000363
Subtotal			0.430483			0.338194			1.240704
Total(kW)	2.00938043								

Tabela 13: Perdas devido as harmônicas para o PT do DEEL. Fonte: (Autor, 2023)

Ordem	FASE R			FASE S			FASE T		
	I _{rms} (A)	V _{rms} (V)	P(kW)	I _{rms} (A)	V _{rms} (V)	P(kW)	I _{rms} (A)	V _{rms} (V)	P(kW)
3	85.01836	11.12198	0.945572	31.90474	4.16326	0.132828	58.2912	7.61634	0.443966
5	43.31124	9.40025	0.407136	15.55498	3.37507	0.052499	34.9952	7.59407	0.265756
7	14.20792	4.31422	0.061296	4.99576	1.51575	0.007572	9.3312	2.82829	0.026391
9	1.77599	0.71244	0.001265	0.73801	0.28294	0.000209	1.3824	0.53448	0.000739
Subtotal			1.41527			0.193108			0.736852
Total(kW)	2.345230174								

Tabela 14: Perdas devido as harmônicas para o PT do DEMA. Fonte: (Autor, 2023)

As perdas totais de energia devido as harmônicas são dadas por:

$$\Delta P_{Tot} = \Delta P_{Central} + \Delta P_{DEEL} + \Delta P_{DEQUI} = 3.47 + 2.0 + 2.35 = 7.82kW \quad (25)$$

A energia ativa perdida mensalmente devido as harmônicas é dada por:

$$\Delta E_{Tot} = 7.82 * 24 * 30 = 5630.4kWh \quad (26)$$

Descrição	Fp calculado	THD%	Fp final
PT central	0.66	21.7	0.64
PT do DEEL	0.77	16.3	0.76
PT do DEMA	0.71	25.6	0.69

Tabela 15: Fator de potência devido as harmônicas. Fonte: (Autor, 2023)

5.1 Cálculo da fatura de energia

De acordo com os dados recolhidos, a factura de energia calculada será:

Descrição	Unidade	Preço unitário	Preço Total
Energia activa consumida (kWh)	65278.8	4.78	312032.7
Energia reactiva consumida (kVArh)	28152.9	1.43	40258.65
Potência de Ponta (Dmax) (kW)	181.33	497.03	90126.45
Taxa fixa	1 mês	3207.25	3207.25
IVA(16% de 62%)	1 mês	-	44206
Taxa de lixo	1 mês	-	150
Total da factura (Mts)			489981

Tabela 16: Factura de energia calculada. Fonte: (Autor 2023)

De acordo com as facturas de energia correspondente aos meses de dezembro de 2022 à maio de 2023 o valor médio da factura medido pela concessionária (EDM) é apresentado na tabela a seguir

Descrição	Unidade	Preço unitário	Preço Total
Energia activa consumida (kWh)	52497.5	4.78	250938.1
Energia reactiva consumida (kVARh)	22351.17	1.43	31962.17
Potência de Ponta (Dmax) (kW)	260.67	497.03	129560.8
Taxa fixa	1 mês	3207.25	3207.25
IVA(16% de 62%)	1 mês	-	41234.29
Taxa de lixo	1 mês	-	150
Total da factura (Mts)			457052.6

Tabela 17: Factura de energia média medida. Fonte: (EDM 2022-2023)

5.2 Anomalias detectadas durante a análise da instalação

De acordo com dados processados e apresentados no capítulo V e as visitas efectuadas na instalação, foi possível verificar que a instalação sofre das seguintes anomalias:

- Níveis elevados de harmônicas de corrente;
- Obstrução na onda de tensão (*flicker* de tensão) do PT do departamento da Engenharia Mecânica;
- Baixo fator de potência devido o excesso de cargas indutivas e ocorrência de harmônicas de corrente;
- Consumo excessivo de potência ativa nos períodos de ponta;
- Altos valores de resistência do sistema de aterramento (excedendo 10 ohms) dos transformadores do DEEL e DEQUI;
- Desequilíbrio de potência nas fases; e
- Agravamento do valor da factura mensal de energia devido ao excesso de consumo de energia reactiva e excessivo consumo de energia activa no período de ponta.
- Ruído anormal no transformador do PT do DEEL;
- Derivações feitas nos terminais dos dispositivos de protecção; e
- Excesso de poeiras e resíduos sólidos nos PT's.

5.2.1 Proposta de solução para a minimização das anomalias

Das anomalias detectadas na instalação verifica-se que estas influenciam também para o agravamento da factura mensal de energia. Desta forma as propostas para a resolução dos problemas identificados são:

- Projecção de três filtros harmônico ativos – este filtro permite a correção de harmónicos, do fator de potência assim como a correção da obstrução verificada na onda de tensão.
- Projecção de banco de capacitores para elevação do fator de potência para 0.95;
- Redução do uso de cargas pesadas no período de ponta – estas cargas correspondem a uma potência de 101.55kW referente ao consumo de potência da carpintaria, laboratório de motores, serralharia e o laboratório de fresagem;
- Reestruturação da distribuição das cargas entre as fases;
- Elaboração de um projecto de aterramento para a melhoria do sistema de aterramento.

5.2.2 Projecção dos filtros harmônicos ativos e bancos de condensadores

O filtro proposto será composto pela unidade ativa (indutores, capacitores e tirístores) e por uma unidade de controle, tal como ilustrado na figura 36 do anexo 5.

O seu dimensionamento obedecerá 5 passos que são:

- Seleção do dispositivo;
- Seleção da tensão de referência do capacitor;
- Seleção do indutor de acoplamento;
- Seleção do capacitor de dc-link; e
- Projecção da unidade de controle. (Chiang e Chang, 1999)

De acordo com Azevedo e Ferreira et al, 2003 cinco expressões são fundamentais para a seleção da tensão de referência, capacitor de acoplamento, banco de capacitores e indutor de acoplamento. Estas expressões encontram-se no anexo 13.

Das expressões em anexo 13 foi possível seleccionar os componentes para os três filtros e bancos de condensadores:

Parâmetros	PT central	PT do DEEL	PT do DEMA
Vs	230V	230V	230V
VP	325.27	325.27	325.27
fs	450Hz	450Hz	450Hz
ω	314	314	314
f	50Hz	50Hz	50Hz
Imax	819.9A	532.6A	810.3A
$\Delta I_c(p-p)_{max}$	122.97A	87.9A	121.5A
Vdc	542.12V	542.12V	542.12V
Vdc max	650.544V	650.544V	650.544V
Vdc min	433.969V	433.969V	433.969V
Lcmin	3.91mH	5.48mH	3.97mH
Lcmax	15.6mH	21.9mH	15.8mH
Lc	4mH	6mH	4mH
DHT	21.70%	16.30%	25.60%
SL	105.0kVA	79.67kVA	61.74kVA
Sf	22.27kVA	12.8kVA	15.31kVA
Cdc	1.896 μ F	1.096 μ F	5.26 μ F
Qbc	55.54kVAr	30.48kVAr	29.03kVAr
Cbc	3.65mF	2.01mF	1.91mF

Tabela 18: Parâmetros para a implementação dos filtros ativos e bancos de condensadores. Fonte: (Autor, 2023)

A projecção da unidade de controle do filtro seguirá a implementação das expressões apresentadas no diagrama de blocos apresentado no anexo 6.

5.2.2.1 Resultados pós Implementação dos filtros e bancos de condensadores

- a) Após a implementação dos filtros harmônicos, banco de condensadores e equilíbrio entre as fases foi possível obter para os três Pt's as formas de onda que se seguem:

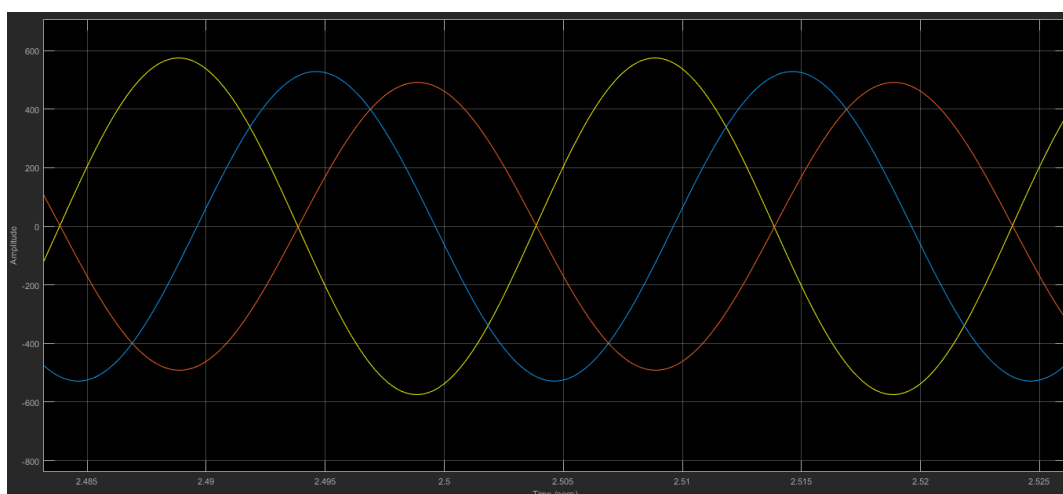


Figura 36: Forma de onda de corrente do PT central. Fonte: (Autor, 2023)

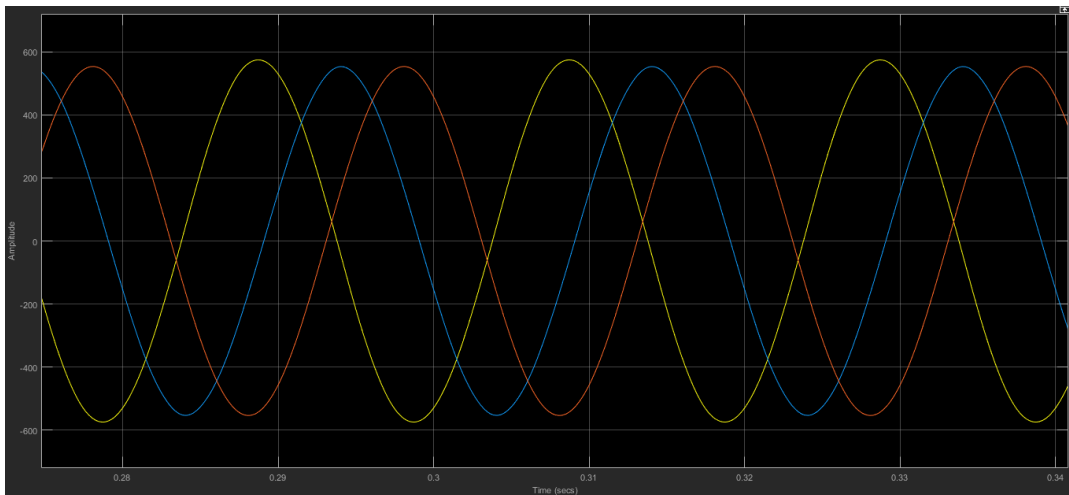


Figura 37: Forma de onda de corrente do PT do DEEL. Fonte: (Autor, 2023)

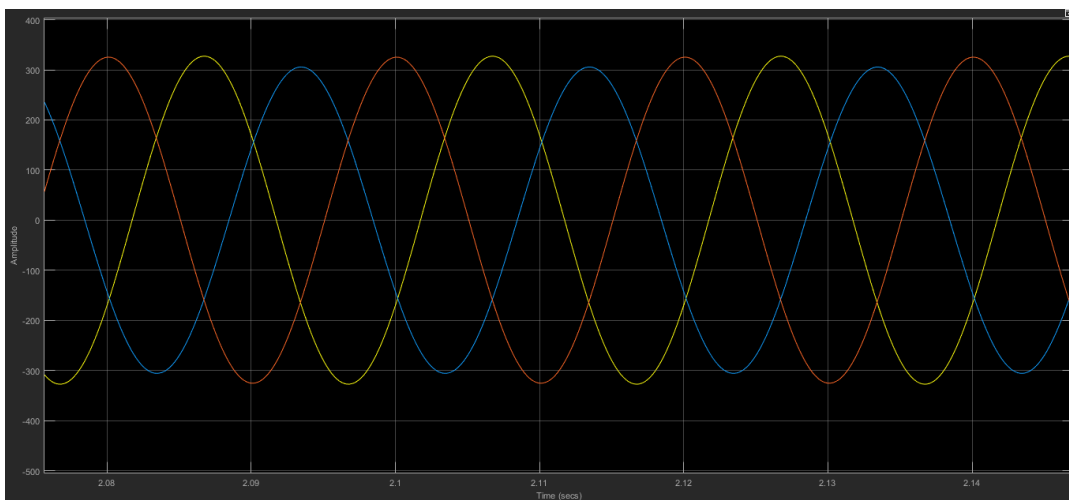


Figura 38: Forma de onda de corrente do PT do DEMA. Fonte: (Autor, 2023)

As formas de onda da tensão para os três PT's após a correção são apresentadas no anexo 8.

Com a aplicação dos compensadores com vista a corrigir as harmónicas e o factor de potência e a redução do uso excessivo de cargas pesadas no período de ponta, a factura paga mensalmente passará a ser:

Descrição	Unidade	Preço unitário	Preço Total
Energia activa consumida (kWh)	59648.4	4.78	285119.4
Energia reactiva consumida (kVArh)	0	1.43	0
Potência de Ponta (Dmax) (kW)	79.78	497.03	39653.05
Taxa fixa	1 mês	3207.25	3207.25
IVA(16% de 62%)	1 mês	-	32535.58
Taxa de lixo	1 mês	-	150
Total da factura (Mts)			360665.2

Tabela 19: factura de energia calculada após as correções. Fonte: (Autor, 2023)

O novo valor total da factura de energia eléctrica possui uma diferença de 129315.8 Mts da factura sem compensação, o que corresponde a uma redução de 26.4%.

6 CONCLUSÃO

Tendo sido feita a coleta de dados no local de estudo, o processamento e a simulação do funcionamento da instalação eléctrica foi possível constatar que esta apresenta algumas características fora dos parâmetros aceitáveis de qualidade de energia eléctrica tais como: altos valores de resistência de aterramento (valores acima de 10 ohms) para os postos de transformação do DEEL e para o quadro do tipo armário do DEQUI, altos valores dos níveis de distorção harmónica de corrente para as saídas de todos os postos de transformação, ocorrência de distúrbios na onda de tensão de saída do PT do DEMA (que é devido a entrada de grandes cargas como o caso de máquinas de soldar o que resulta na oscilação de lâmpadas), e baixo factor de potência para as saídas dos três postos de transformação.

Constatou-se que os elevados níveis de distorções harmónicas são causados pelo uso excessivo de computadores, ups, lâmpadas fluorescentes e máquinas de soldar. Os efeitos deste cenário resulta no aquecimento dos condutores eléctricos, causando desta forma disparos indevidos de alguns disjuntores ou fusíveis.

Foi também possível constatar que a factura de energia paga mensalmente apresenta valores agravados relativamente ao que efectivamente é consumido pela instituição. Este facto é causado pelos seguintes factores:

- Perdas de energia causadas pelas distorções harmónicas de corrente, o que origina perdas de energia nos cabos eléctricos;
- Baixo factor de potência – este factor é causado pelo excesso de cargas indutivas (como motores eléctricos, e computadores) assim como também pelas distorções harmónicas existentes na instalação. O elevado valor de consumo de energia reactiva é prejudicial no ponto de vista da concessionária (EDM) por isso a instituição sofre uma sanção na factura de energia o que constitui um incremento no seu valor; e
- Uso de grandes cargas nos períodos de ponta – as perdas de energia e as grandes cargas somam-se e resultam no elevado nível de potência de ponta. A concessionária aplica taxas agravadas para desencorajar esta modalidade de utilização das cargas.

A instalação eléctrica do local de estudo possui dois pontos com elevados valores de resistência do sistema de aterramento, que são: o posto de transformação do DEEL e o quadro eléctrico do tipo armário do DEQUI.

Para a melhoria da qualidade e o elevado custo da factura de energia desta instalação foi proposto o uso de três filtros activos, uso de três bancos de condensadores e a redução do uso de equipamentos pesados nos períodos de ponta. Com a aplicação destas técnicas previu-se a redução do valor da factura de energia em uma percentagem de 26.4%.

6.1 Recomendações

De acordo com as constatações verificadas ao longo da realização do projecto, vê-se como importante dar a devida atenção às seguintes recomendações:

1. Executar a instalação de filtros harmónicos nos três postos de transformação;
2. Executar a instalação de três bancos de condensadores para a correção do fator de potência nos três postos de transformação;
3. Realização e execução de um projecto para a investigação e implementação de dois sistemas de aterramento para o posto de transformação do DEEL e para o quadro eléctrico do tipo armário do DEQUI;
4. Realização de um estudo e dimensionamento dos circuitos sempre que se pretender realizar uma expansão do sistema eléctrico, esta medida servirá para evitar possíveis sobrecargas nos circuitos eléctricos existentes, desbalanceamento de fases e evitará a prática de derivações nos terminais dos dispositivos de protecção;
5. Realização de uma negociação com os responsáveis da carpintaria e dos laboratórios de motores, serralharia e torneamento, no sentido de se replanificar o regime de funcionamento das cargas (operando fora do período de ponta), pois a replanificação desta prática permitirá a redução do agravamento da factura de energia, contribuindo desta forma para a redução significativa do custo deste recurso. O período de ponta corresponde aos seguintes horários: das 6h às 10h e das 17h às 21h.
6. Realização de um plano de limpeza regular e manutenção dos PT's – Os PT's encontram-se cheios de impurezas e resíduos sólidos, o que facilmente pode facilitar a ocorrência de uma combustão. Recomenda-se também a realização

de manutenção dos transformadores com vista a verificar o nível de óleo e a sua qualidade, o aperto dos terminais, e uma intervenção no transformador do DEEL com vista a apurar as causas do ruído e elimina-las.

6.2 Limitações

Durante a realização deste trabalho houve algumas limitações no que concerne a:

- Dificuldades para aquisição do equipamento de medição da qualidade de energia (*power quality analyser*);
- Dificuldades para o acesso á certos compartimentos para a recolha de dados das cargas existentes, como é o caso da ex-física.
- Dificuldades para a medição da secção dos condutores de alimentação dos PT's (média tensão) pelo facto de estes estarem em tensão; e
- Dificuldades de acesso físico ao transformador do PT central, devido a existência das linhas de média tensão no local.

7 BIBLIOGRAFIA

ANEEL 414/2010. 2010 – Parâmetros de qualidade de energia elétrica, São Paulo.

A Fitzgerald, Charles Kingsley, Stephen Umans. 2002 - Electric Machinery, 6th edition, London.

Ainsworth J. D. 1995 - Filters, Damping Circuits and Reactive Volt Amperes in HVDC Convertors, London.

AFONSO, João L; SILVA, Henrique J.R. da; Martins, Júlio S. 2001 - Active filters for power quality improvement. IEE Power tech, Porto.

Baptista, José Manuel Ribeiro. 2006 - Análise harmónica em instalações Eléctricas BT, Harmosim uma ferramenta eficiente de simulação, UTAD, Portugal.

Danilo Filipin vessozi. 2011 - Modelagem, análise e redução de distorções harmônicas produzidas por reatores de lâmpadas fluorescentes Monografia (Trabalho de conclusão do curso de bacharel em engenharia elétrica) - Universidade Federal do Pampa.

Dugan, R. C., McGranaghan, M. F., Santoso, S. e Beaty, H. W. 2004 - Electrical Power Systems Quality, McGrawHill.

EMADI, Ali; NASIRI, Abdolhosein; BEKIAROV, Stoyan B. 2005 - Uninterruptible Power Suppliss and active filters, CRC Press, Chicago.

Golkar, M. A. 2004 - Eletric power quality: Types and measurements, Hong Khong.

Geraldo Kindermann, Jorge Mário Campagnolo. 1995 – Aterramento elétrico, Sagra-DC luzzatto editores, 3^a edição, Porto Alegre.

Hydroone. 2007 - Power Quality Energy Efficiency Reference, CEATI, Canada.

Helder J. Azevedo, Jose M. Ferreira, Antonio P. Martins and Adriano S. Carvalho. 2003 - Direct current control of an active power filter for harmonic elimination, power factor correction and load unbalancing compensation, 3rd edition, Toulouse.

IEC 60364. 2005 – Low-voltage electrical installations, 5th edition, Geneva.

IEEE. 1995 - IEEE standard 1159 - IEEE reommended practice for monitoring electric power quality. New York.

IEEE Std. 519-1992, IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, 1992.

Jeferson Prates Marques. 2011 - Modelagem e análise da distorção harmônica de computadores em instalações elétricas. Monografia (Trabalho de conclusão do curso de bacharel em engenharia elétrica) - Universidade Federal do Pampa.

Joao Mamede Filho. 2013 – Manual de equipamentos elétricos, 4ª edição, LTC, Rio de Janeiro.

J. Chiang, J.M. Chang. 1999 - Design and Implementation of the parallelable active power filter, Proc. 30th Annual IEEE Power Electric. Specialists Conference, Akita.

Kimbark, E.W. 1971 - Harmonics and filters. In: Direct Current Transmission, J. Wiley, New York.

Mohammad A.S. Masoum, Ewald F. Fuchs. 2015 – Power Quality in Power systems and electrical Machines, 2nd edition, Elsevier, Amsterdam.

Moreno, H. 2001 - harmônicas nas instalações elétricas: causas, efeitos e soluções. 1. Ed, Procobre. São Paulo.

ORTMEYER, T. H., HIYAMA, T. 1996 - Distribution System Harmonic Filter Planning, IEEE Transactions on Power Delivery, 4th edition, New York.

Peter Riese. 2014 – Manual of power factor correction, Frako, Teningen.

Ramasamy Natarajan. 2005 – Power system Capacitors, LLC, Florida.

Ribeiro, Enio R. 2003 - Filtros ativos série para a compensação de harmônica de tensão. Tese (doutorado em engenharia elétrica) - Universidade Federal de santa catarina, Florianópolis.

TOSTES, M. E., BEZERRA, U. H., GARCEZ, J. N., TUPIASSU, A. A., SENA, A. C. A. 2001 - Development of Experimental Models for harmonic Representation of Low Voltage Customers, In: IEEE Power Tech Proceedings, Portugal.

CAPÍTULO V

8 ANEXOS

8.1 Anexo 1

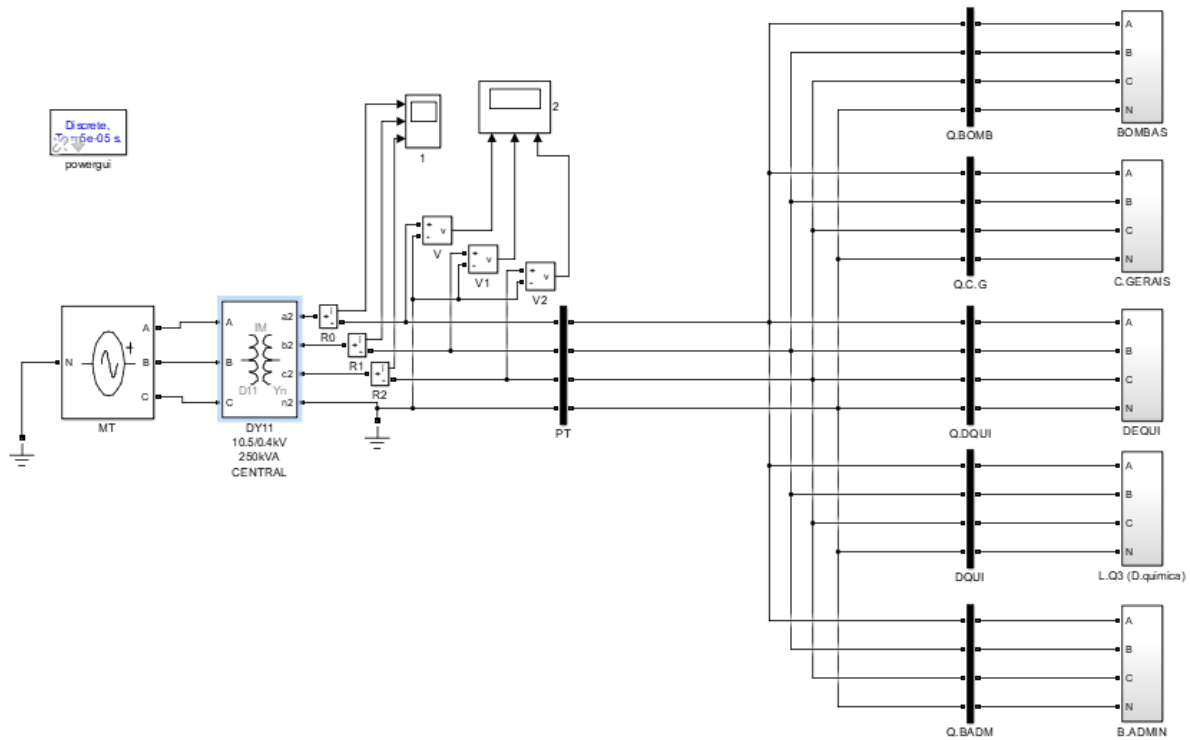


Figura 39: Diagrama equivalente do PT central. Fonte: (Autor, 2023)

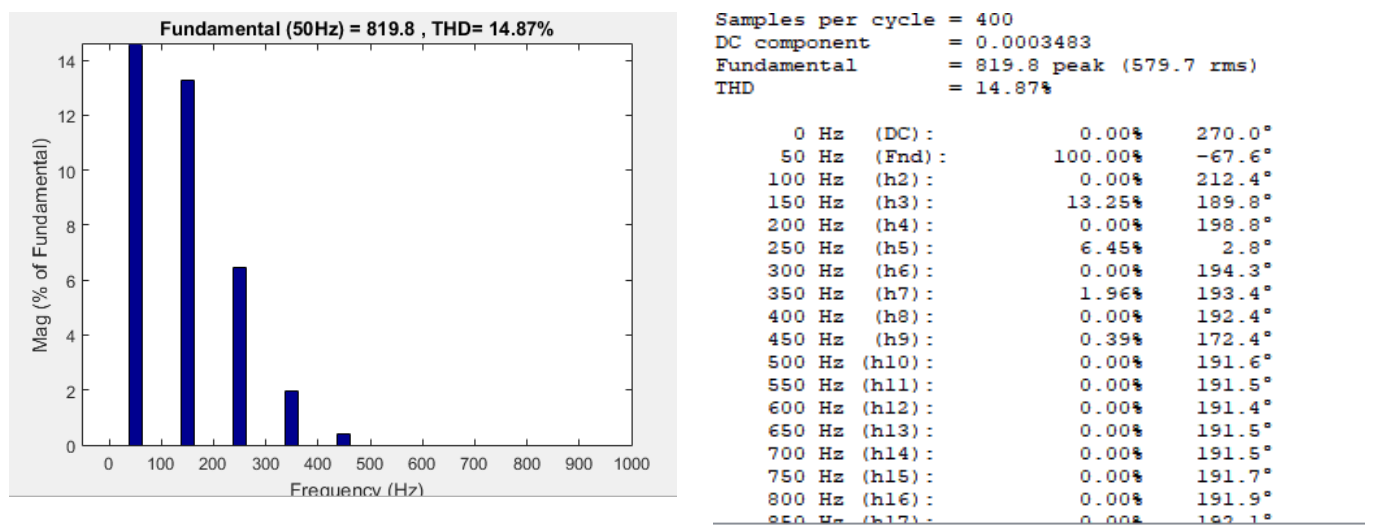


Figura 40: Espectro harmônico da corrente na fase R. Fonte: (Autor, 2023)

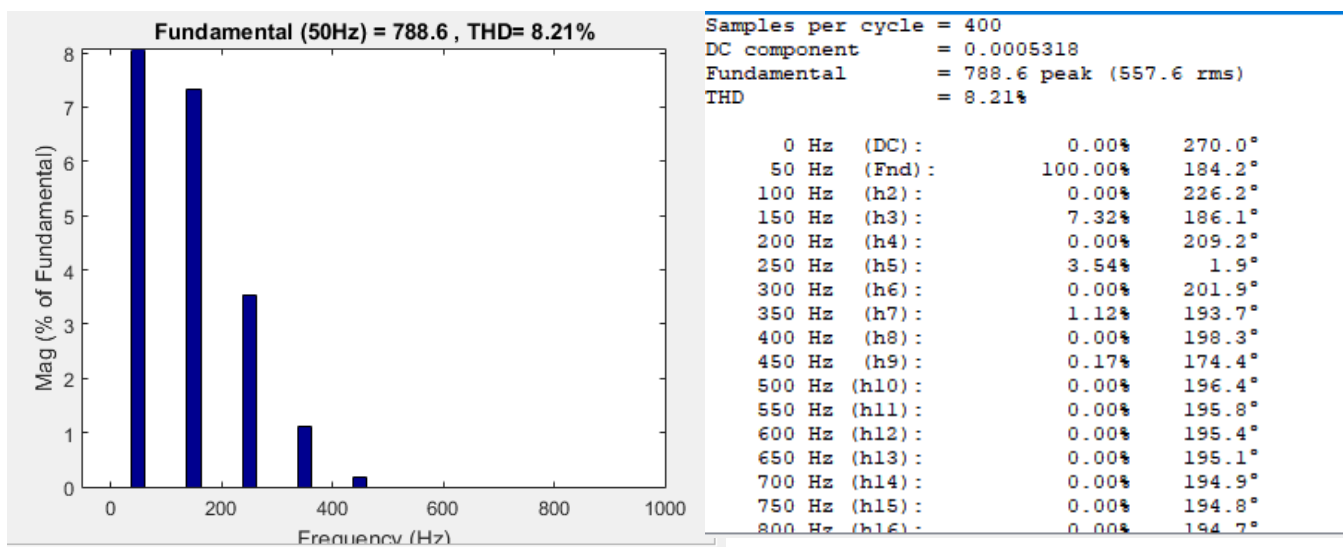


Figura 41: Espectro harmônico da corrente na fase S. Fonte: (Autor, 2023)

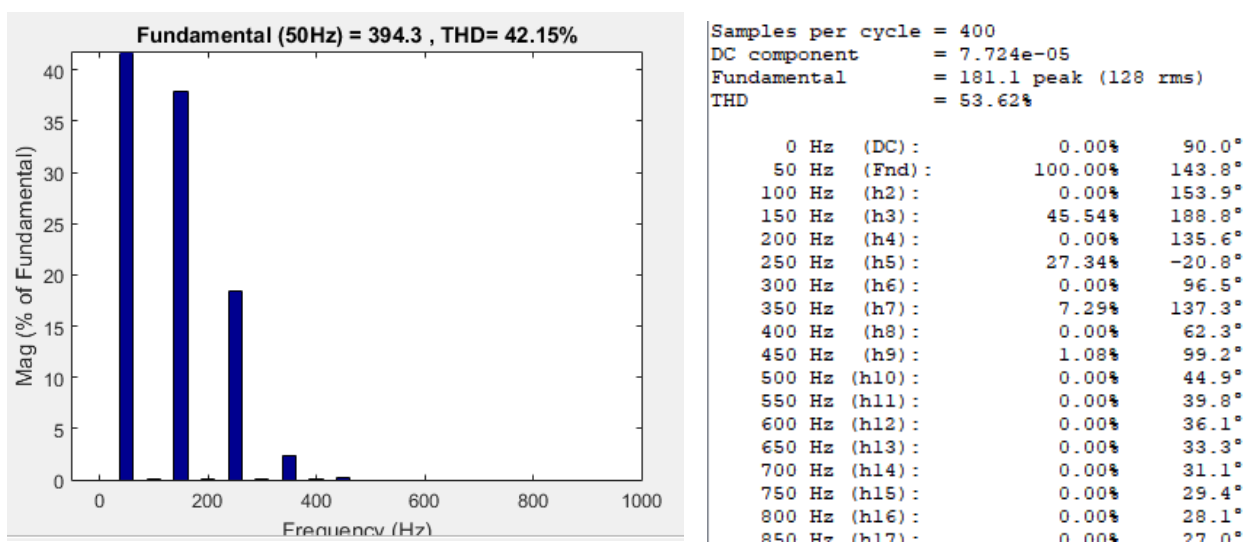
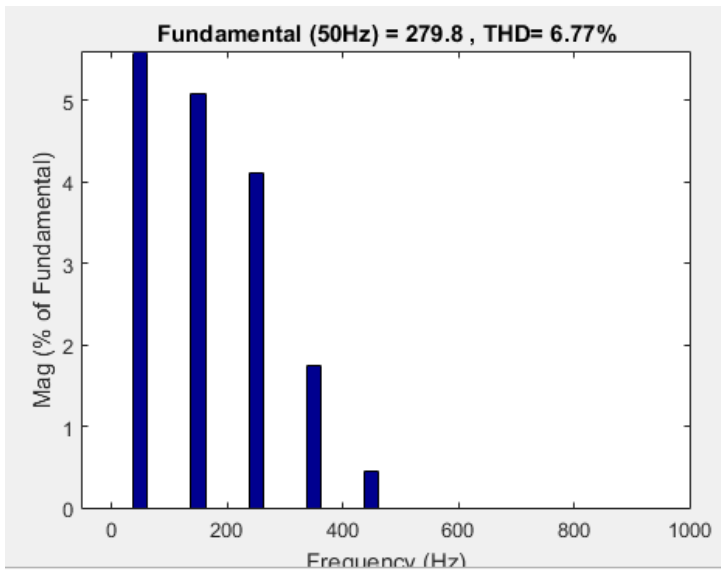


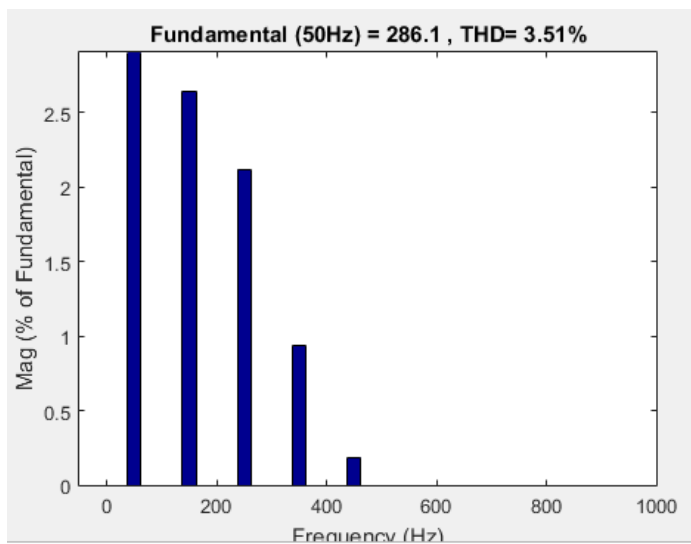
Figura 42: Espectro harmônico da corrente na fase T. Fonte: (Autor, 2023)



```
Samples per cycle = 400
DC component       = 1.804e-05
Fundamental       = 279.8 peak (197.9 rms)
THD               = 6.77%
```

Frequency (Hz)	Component	Mag (%)	Phase (°)
0	(DC)	0.00%	270.0°
50	(Fnd)	100.00%	-34.3°
100	(h2)	0.00%	235.6°
150	(h3)	5.08%	93.4°
200	(h4)	0.00%	239.8°
250	(h5)	4.10%	269.0°
300	(h6)	0.00%	246.7°
350	(h7)	1.74%	100.7°
400	(h8)	0.00%	252.1°
450	(h9)	0.44%	80.3°
500	(h10)	0.00%	256.3°
550	(h11)	0.00%	258.1°
600	(h12)	0.00%	259.6°
650	(h13)	0.00%	261.0°
700	(h14)	0.00%	262.3°
750	(h15)	0.00%	263.5°
800	(h16)	0.00%	264.5°

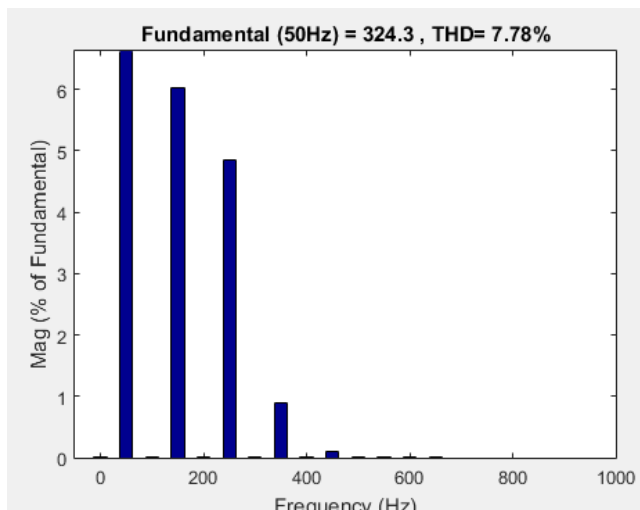
Figura 44: Espectro harmônico da tensão na fase R. Fonte: (Autor, 2023)



```
Samples per cycle = 400
DC component       = 4.112e-05
Fundamental       = 286.1 peak (202.3 rms)
THD               = 3.51%
```

Frequency (Hz)	Component	Mag (%)	Phase (°)
0	(DC)	0.00%	270.0°
50	(Fnd)	100.00%	204.8°
100	(h2)	0.00%	231.3°
150	(h3)	2.64%	89.7°
200	(h4)	0.00%	217.1°
250	(h5)	2.12%	268.1°
300	(h6)	0.00%	212.7°
350	(h7)	0.93%	100.9°
400	(h8)	0.00%	212.1°
450	(h9)	0.19%	82.2°
500	(h10)	0.00%	213.2°
550	(h11)	0.00%	214.0°
600	(h12)	0.00%	215.1°
650	(h13)	0.00%	216.2°
700	(h14)	0.00%	217.4°
750	(h15)	0.00%	218.7°
800	(h16)	0.00%	220.0°

Figura 43: Espectro harmônico da tensão na fase S. Fonte: (Autor, 2023)



Samples per cycle = 400
 DC component = 0.0007634
 Fundamental = 324.3 peak (229.3 rms)
 THD = 7.78%

0 Hz (DC):	0.00%	270.0°
50 Hz (Fnd):	100.00%	88.0°
100 Hz (h2):	0.00%	-75.5°
150 Hz (h3):	6.02%	77.0°
200 Hz (h4):	0.00%	247.1°
250 Hz (h5):	4.84%	178.3°
300 Hz (h6):	0.00%	190.9°
350 Hz (h7):	0.89%	-15.6°
400 Hz (h8):	0.00%	182.3°
450 Hz (h9):	0.10%	-35.2°
500 Hz (h10):	0.00%	181.3°
550 Hz (h11):	0.00%	181.5°
600 Hz (h12):	0.00%	181.8°
650 Hz (h13):	0.00%	182.3°
700 Hz (h14):	0.00%	182.8°
750 Hz (h15):	0.00%	183.4°
800 Hz (h16):	0.00%	183.9°
850 Hz (h17):	0.00%	184.5°

Figura 45: Espectro harmônico da tensão na fase T. Fonte: (Autor, 2023)

8.2 Anexo 2

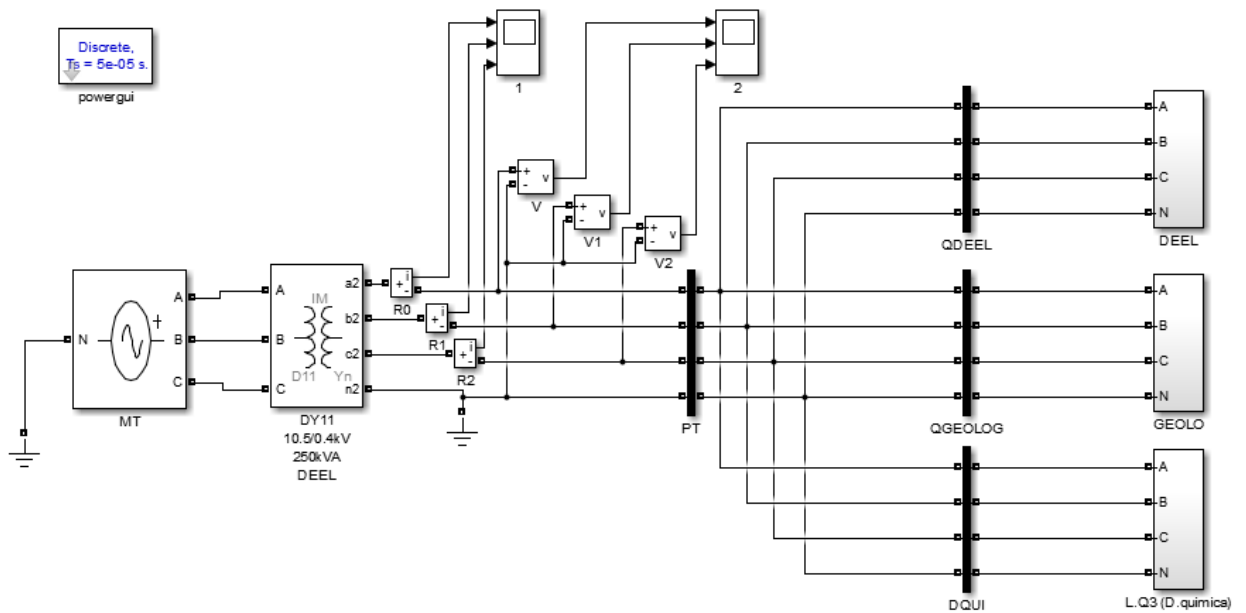
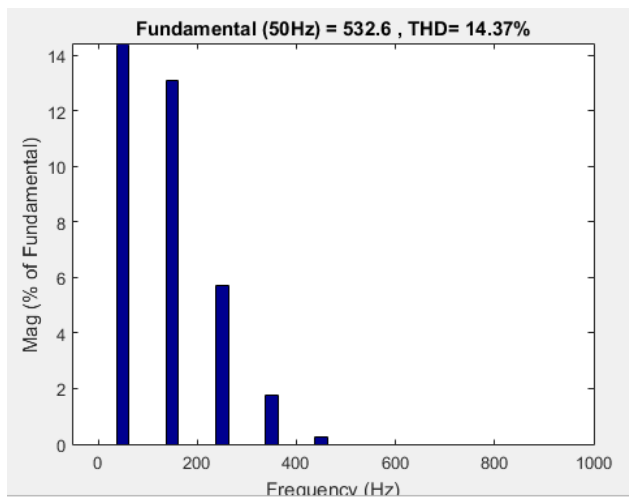


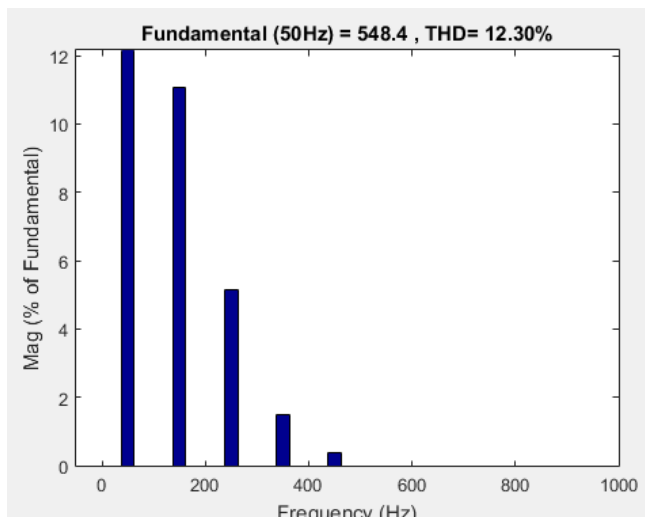
Figura 46: Diagrama equivalente do DEEL. Fonte: (Autor, 2023)



Samples per cycle = 400
 DC component = 0.0003108
 Fundamental = 532.6 peak (376.6 rms)
 THD = 14.37%

0 Hz (DC):	0.00%	270.0°
50 Hz (Fnd):	100.00%	-69.4°
100 Hz (h2):	0.00%	211.3°
150 Hz (h3):	13.07%	190.0°
200 Hz (h4):	0.00%	198.1°
250 Hz (h5):	5.70%	4.5°
300 Hz (h6):	0.00%	193.7°
350 Hz (h7):	1.77%	194.5°
400 Hz (h8):	0.00%	192.0°
450 Hz (h9):	0.28%	173.9°
500 Hz (h10):	0.00%	191.3°
550 Hz (h11):	0.00%	191.1°
600 Hz (h12):	0.00%	191.1°
650 Hz (h13):	0.00%	191.1°
700 Hz (h14):	0.00%	191.2°
750 Hz (h15):	0.00%	191.4°
800 Hz (h16):	0.00%	191.6°
850 Hz (h17):	0.00%	191.8°

Figura 47: Espectro harmônico da corrente na fase R. Fonte: (Autor, 2023)



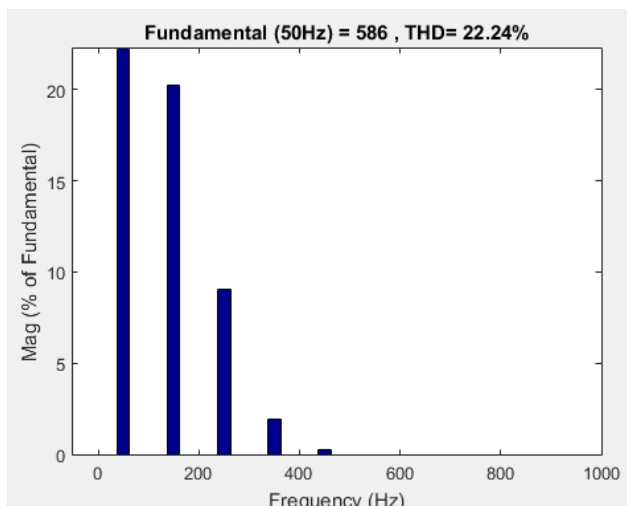
```

Samples per cycle = 400
DC component      = 0.0006069
Fundamental      = 548.4 peak (387.8 rms)
THD              = 12.30%

  0 Hz (DC):      0.00%   270.0°
  50 Hz (Fnd):   100.00%  196.6°
 100 Hz (h2):    0.00%   221.5°
 150 Hz (h3):   11.06%  188.7°
 200 Hz (h4):    0.00%  209.4°
 250 Hz (h5):    5.16%   -2.6°
 300 Hz (h6):    0.00%  204.6°
 350 Hz (h7):    1.48%  186.9°
 400 Hz (h8):    0.00%  202.8°
 450 Hz (h9):    0.37%  159.2°
 500 Hz (h10):   0.00%  202.3°
 550 Hz (h11):   0.00%  202.3°
 600 Hz (h12):   0.00%  202.4°
 650 Hz (h13):   0.00%  202.6°
 700 Hz (h14):   0.00%  202.9°
 750 Hz (h15):   0.00%  203.1°
 800 Hz (h16):   0.00%  203.4°
 850 Hz (h17):   0.00%  202.7°

```

Figura 48: Espectro harmônico da corrente na fase S. Fonte: (Autor, 2023)



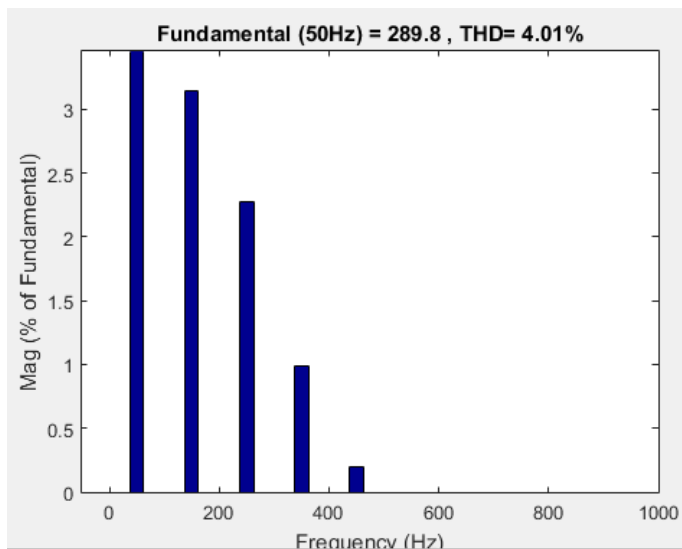
```

Samples per cycle = 400
DC component      = 0.000424
Fundamental      = 586 peak (414.4 rms)
THD              = 22.24%

  0 Hz (DC):      0.00%   90.0°
  50 Hz (Fnd):   100.00%  119.9°
 100 Hz (h2):    0.00%   55.2°
 150 Hz (h3):   20.23%  167.8°
 200 Hz (h4):    0.00%    2.5°
 250 Hz (h5):    9.05% -53.1°
 300 Hz (h6):    0.00% -44.2°
 350 Hz (h7):    1.90%  116.2°
 400 Hz (h8):    0.00% -70.3°
 450 Hz (h9):    0.23%   91.9°
 500 Hz (h10):   0.00% -85.7°
 550 Hz (h11):   0.00%  268.6°
 600 Hz (h12):   0.00%  263.8°
 650 Hz (h13):   0.00%  259.6°
 700 Hz (h14):   0.00%  256.0°
 750 Hz (h15):   0.00%  252.8°
 800 Hz (h16):   0.00%  250.0°
 850 Hz (h17):   0.00%  247.4°

```

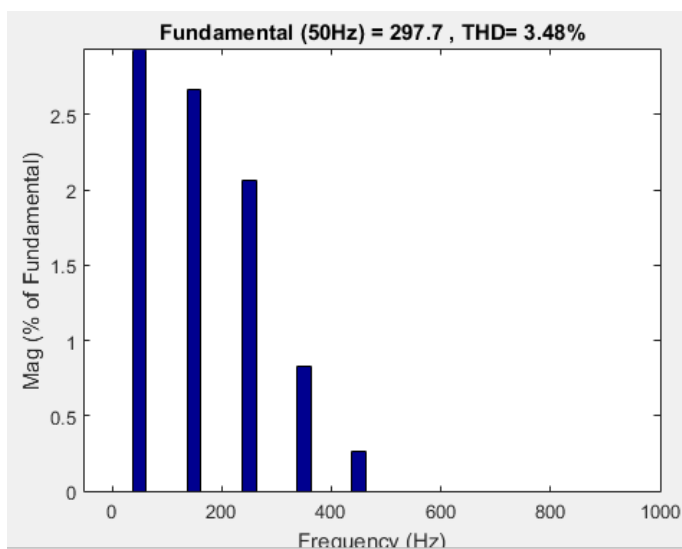
Figura 49: Espectro harmônico da corrente na fase T. Fonte: (Autor, 2023)



```
Samples per cycle = 400
DC component      = 1.376e-05
Fundamental      = 289.8 peak (204.9 rms)
THD              = 4.01%
```

Frequency (Hz)	Component	Mag (%)	Phase (°)
0	(DC)	0.00%	270.0°
50	(Fnd)	100.00%	-32.6°
100	(h2)	0.00%	230.0°
150	(h3)	3.14%	93.7°
200	(h4)	0.00%	232.8°
250	(h5)	2.27%	-89.3°
300	(h6)	0.00%	239.9°
350	(h7)	0.99%	101.8°
400	(h8)	0.00%	246.0°
450	(h9)	0.20%	81.8°
500	(h10)	0.00%	250.9°
550	(h11)	0.00%	253.0°
600	(h12)	0.00%	254.8°
650	(h13)	0.00%	256.5°
700	(h14)	0.00%	258.0°
750	(h15)	0.00%	259.4°
800	(h16)	0.00%	260.7°
850	(h17)	0.00%	261.8°

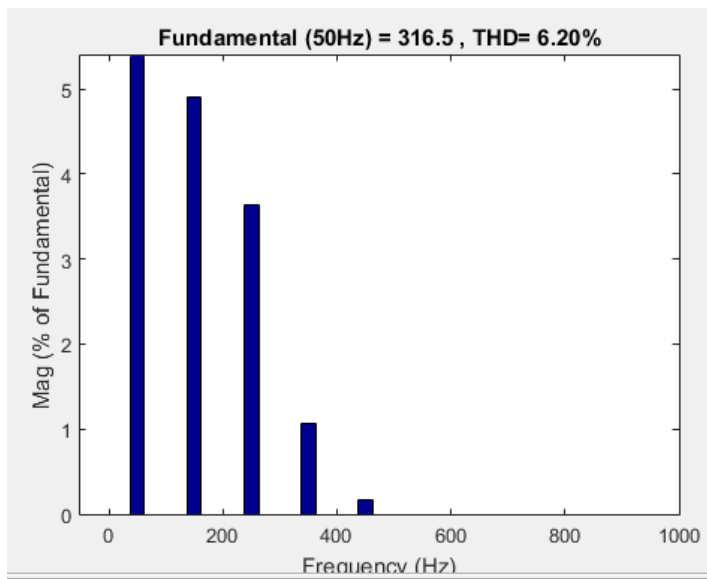
Figura 50: Espectro harmônico da tensão na fase R. Fonte: (Autor, 2023)



```
Samples per cycle = 400
DC component      = 2.945e-05
Fundamental      = 297.7 peak (210.5 rms)
THD              = 3.48%
```

Frequency (Hz)	Component	Mag (%)	Phase (°)
0	(DC)	0.00%	270.0°
50	(Fnd)	100.00%	205.9°
100	(h2)	0.00%	247.4°
150	(h3)	2.66%	92.4°
200	(h4)	0.00%	242.9°
250	(h5)	2.07%	263.6°
300	(h6)	0.00%	242.9°
350	(h7)	0.83%	94.2°
400	(h8)	0.00%	243.2°
450	(h9)	0.27%	67.0°
500	(h10)	0.00%	243.1°
550	(h11)	0.00%	242.9°
600	(h12)	0.00%	242.6°
650	(h13)	0.00%	242.2°
700	(h14)	0.00%	241.8°
750	(h15)	0.00%	241.3°
800	(h16)	0.00%	240.8°
850	(h17)	0.00%	240.3°

Figura 51: Espectro harmônico da tensão na fase S. Fonte: (Autor, 2023)



```

Samples per cycle = 400
DC component      = 5.127e-05
Fundamental      = 316.5 peak (223.8 rms)
THD              = 6.20%
  
```

Frequency (Hz)	Component	Mag (%)	Phase (°)
0	(DC)	0.00%	270.0°
50	(Fnd)	100.00%	85.3°
100	(h2)	0.00%	-61.3°
150	(h3)	4.90%	71.5°
200	(h4)	0.00%	268.8°
250	(h5)	3.64%	213.1°
300	(h6)	0.00%	234.7°
350	(h7)	1.07%	23.5°
400	(h8)	0.00%	217.9°
450	(h9)	0.17%	-0.2°
500	(h10)	0.00%	209.8°
550	(h11)	0.00%	207.4°
600	(h12)	0.00%	205.5°
650	(h13)	0.00%	204.1°
700	(h14)	0.00%	203.0°
750	(h15)	0.00%	202.2°
800	(h16)	0.00%	201.6°
850	(h17)	0.00%	201.0°

Figura 52: Espectro harmônico da tensão na fase T. Fonte: (Autor, 2023)

8.3 Anexo 3

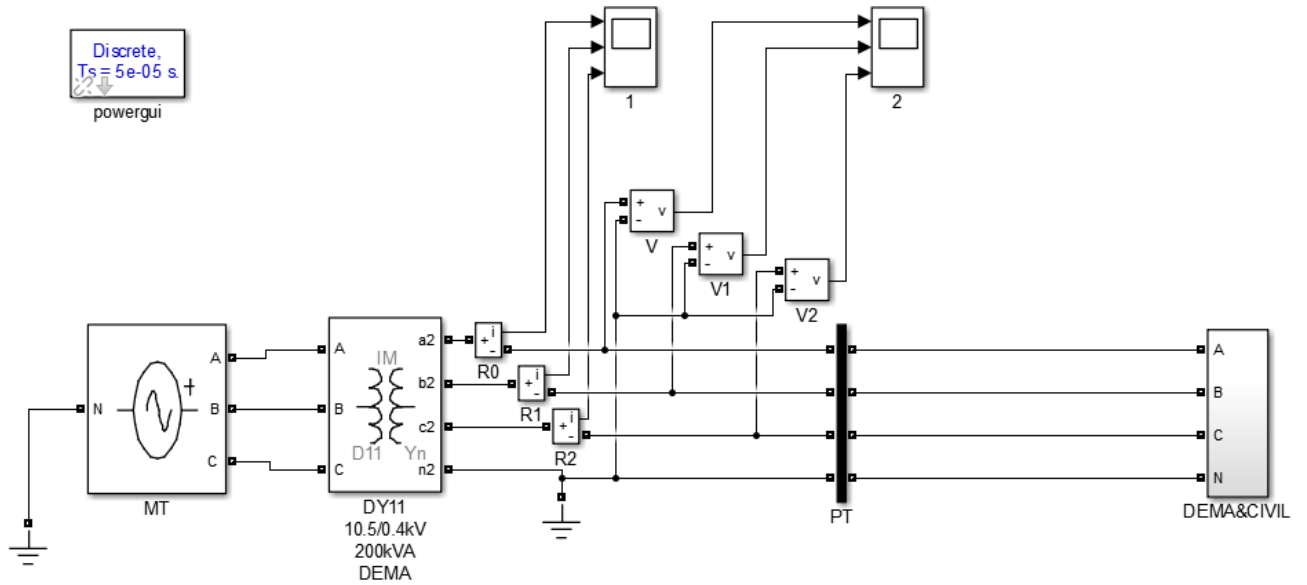


Figura 53: Diagrama equivalente do DEMA. Fonte: (Autor, 2023)

Frequency (Hz)	Component	Magnitude (%)	Phase (°)
0	DC component	0.000399	
50	Fundamental	810.3 peak (572.9 rms)	-68.4°
150	(h3)	14.84%	186.0°
250	(h5)	7.56%	1.2°
350	(h7)	2.48%	190.2°
450	(h9)	0.31%	171.9°
550	(h11)	0.00%	191.2°
650	(h13)	0.00%	191.2°
750	(h15)	0.00%	191.5°
850	(h17)	0.00%	191.9°

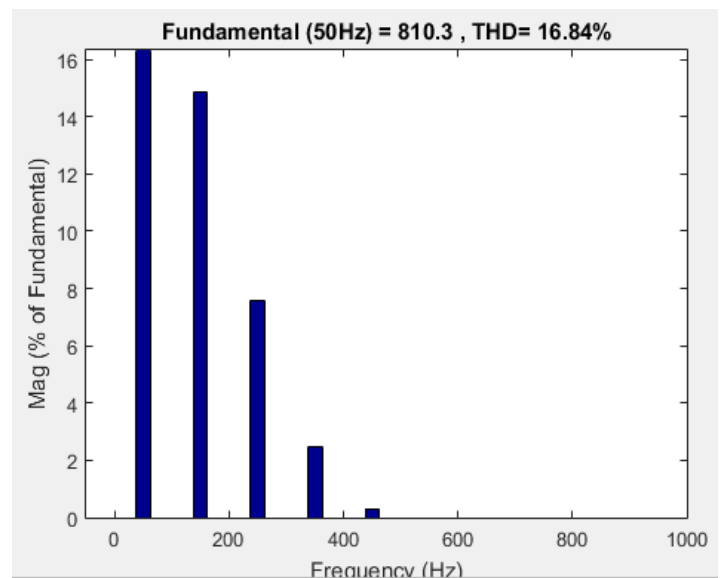


Figura 54: Espectro harmônico da corrente na fase R. Fonte: (Autor, 2023)

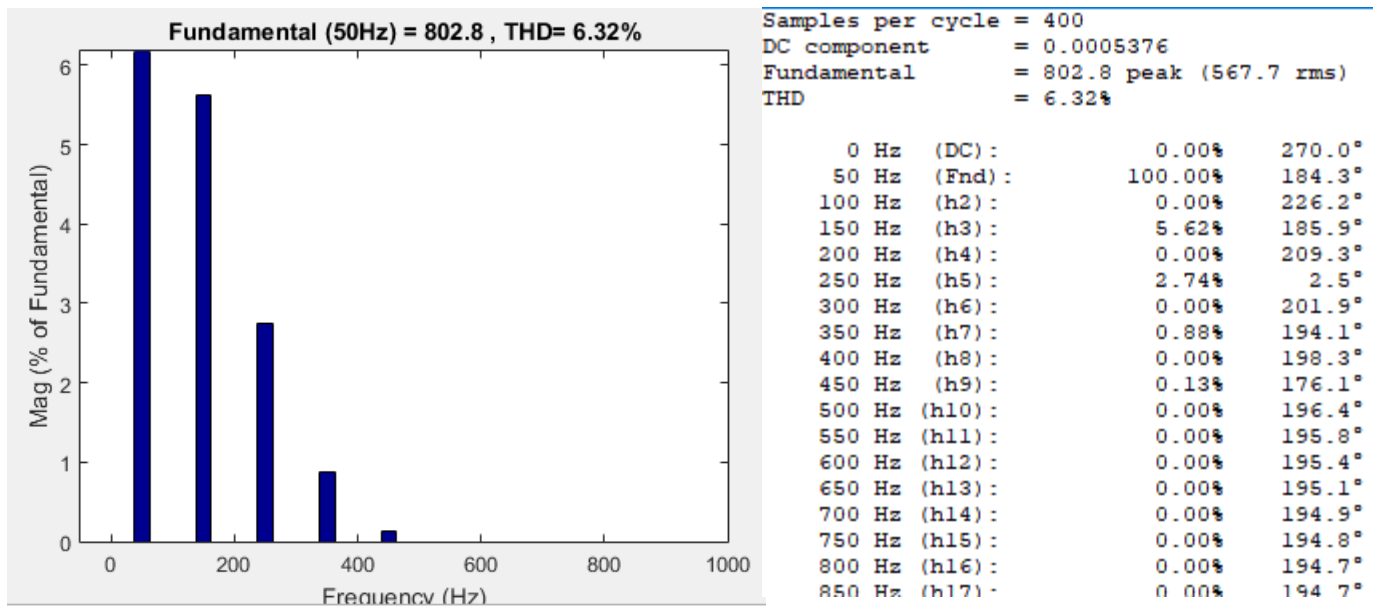


Figura 55: Espectro harmônico da corrente na fase S. Fonte: (Autor, 2023)

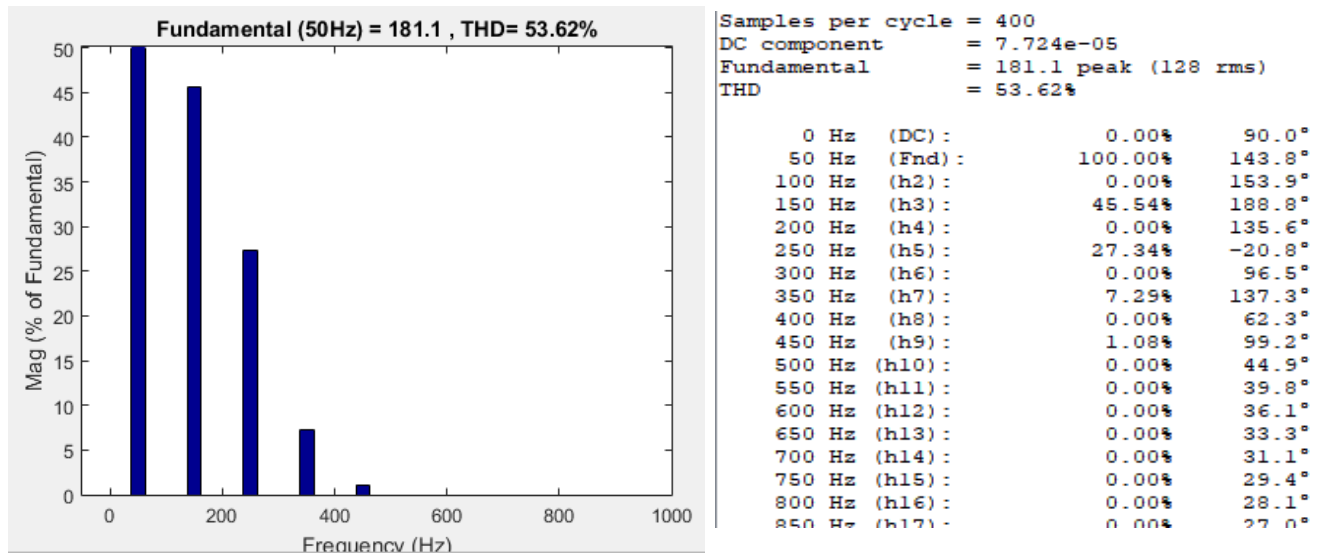
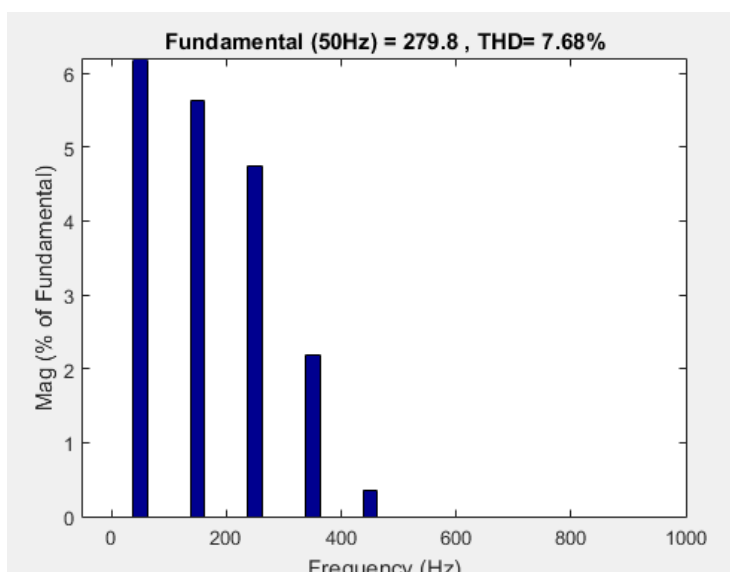


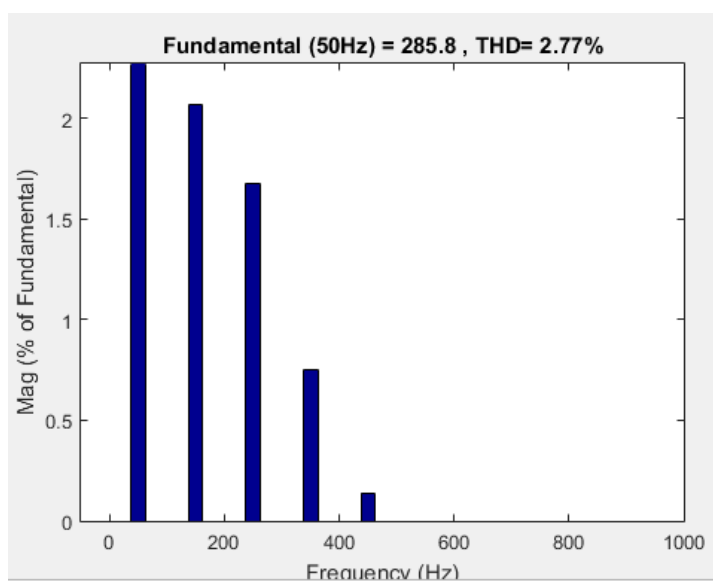
Figura 56: Espectro harmônico da corrente na fase T. Fonte: (Autor, 2023)



Samples per cycle = 400
 DC component = 1.946e-05
 Fundamental = 279.8 peak (197.9 rms)
 THD = 7.68%

0 Hz (DC):	0.00%	270.0°
50 Hz (Fnd):	100.00%	-34.1°
100 Hz (h2):	0.00%	235.2°
150 Hz (h3):	5.62%	89.6°
200 Hz (h4):	0.00%	240.0°
250 Hz (h5):	4.75%	267.4°
300 Hz (h6):	0.00%	247.0°
350 Hz (h7):	2.18%	97.5°
400 Hz (h8):	0.00%	252.5°
450 Hz (h9):	0.36%	79.8°
500 Hz (h10):	0.00%	256.7°
550 Hz (h11):	0.00%	258.4°
600 Hz (h12):	0.00%	260.0°
650 Hz (h13):	0.00%	261.3°
700 Hz (h14):	0.00%	262.6°
750 Hz (h15):	0.00%	263.8°
800 Hz (h16):	0.00%	264.8°
850 Hz (h17):	0.00%	265.8°

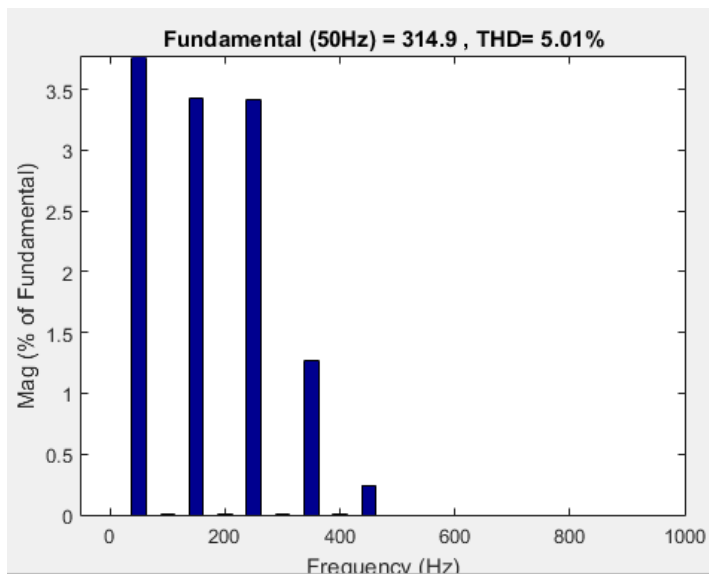
Figura 57: Espectro harmônico da tensão na fase R. Fonte: (Autor, 2023)



Samples per cycle = 400
 DC component = 4.1e-05
 Fundamental = 285.8 peak (202.1 rms)
 THD = 2.77%

0 Hz (DC):	0.00%	270.0°
50 Hz (Fnd):	100.00%	204.7°
100 Hz (h2):	0.00%	230.6°
150 Hz (h3):	2.06%	89.5°
200 Hz (h4):	0.00%	215.6°
250 Hz (h5):	1.67%	268.7°
300 Hz (h6):	0.00%	210.5°
350 Hz (h7):	0.75%	101.3°
400 Hz (h8):	0.00%	209.2°
450 Hz (h9):	0.14%	84.0°
500 Hz (h10):	0.00%	209.6°
550 Hz (h11):	0.00%	210.2°
600 Hz (h12):	0.00%	210.9°
650 Hz (h13):	0.00%	211.8°
700 Hz (h14):	0.00%	212.7°
750 Hz (h15):	0.00%	213.8°
800 Hz (h16):	0.00%	214.8°
850 Hz (h17):	0.00%	215.9°

Figura 58: Espectro harmônico da tensão na fase S. Fonte: (Autor, 2023)



Samples per cycle = 400
 DC component = 0.0002127
 Fundamental = 314.9 peak (222.7 rms)
 THD = 5.01%

Frequency (Hz)	Component	Mag (%)	Angle (°)
0 Hz	(DC)	0.00%	90.0°
50 Hz	(Fnd)	100.00%	88.8°
100 Hz	(h2)	0.00%	87.7°
150 Hz	(h3)	3.42%	92.5°
200 Hz	(h4)	0.00%	75.6°
250 Hz	(h5)	3.41%	245.4°
300 Hz	(h6)	0.00%	45.5°
350 Hz	(h7)	1.27%	44.6°
400 Hz	(h8)	0.00%	18.9°
450 Hz	(h9)	0.24%	7.2°
500 Hz	(h10)	0.00%	7.6°
550 Hz	(h11)	0.00%	5.0°
600 Hz	(h12)	0.00%	3.5°
650 Hz	(h13)	0.00%	2.8°
700 Hz	(h14)	0.00%	2.4°
750 Hz	(h15)	0.00%	2.3°
800 Hz	(h16)	0.00%	2.5°
850 Hz	(h17)	0.00%	2.7°

Figura 60: Espectro harmônico da tensão na fase T. Fonte: (Autor, 2023)

8.4 Anexo 4

THDi = 43,3%		Irms = 0,300A
Ordem Harmônica	Módulo (%)	Ângulo (°)
1	100	0,0
3	41,7	-110,8
5	6,7	85,3
7	6,9	-10,7
9	4,9	-170,5

Tabela 20:THDi de lâmpada fluorescente tubular. Fonte: (Vessozi, 2011)

THD _v = 3,28%	THD _i = 53,50%	I _{RMS} = 0,64A
Ordem Harmônica	Módulo (%)	Ângulo (°)
1	100	9,09
3	48,71	163,76
5	12,33	-6,73
7	12,83	-47,01
9	9,46	131,67
11	1,70	110,54

Tabela 21:THDi de um computador. Fonte: (Jeferson, 2011)

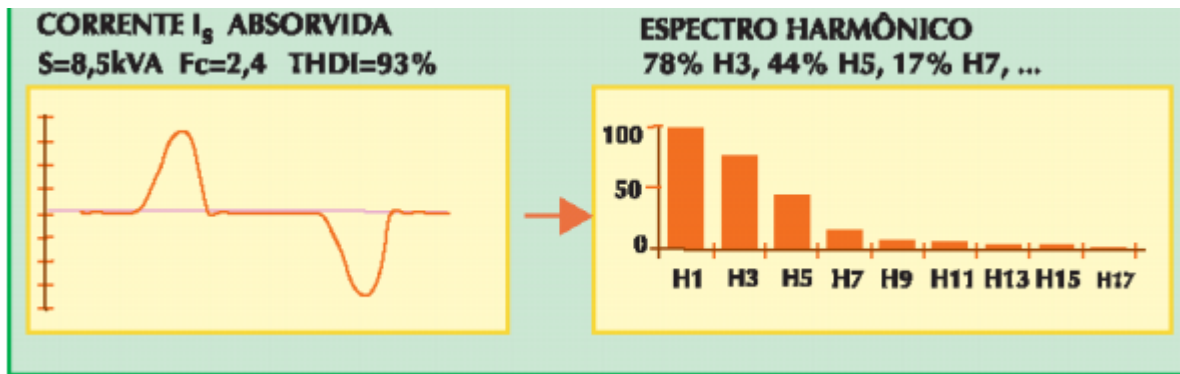


Figura 61: THDi de um UPS. Fonte: (Moreno, 2001)

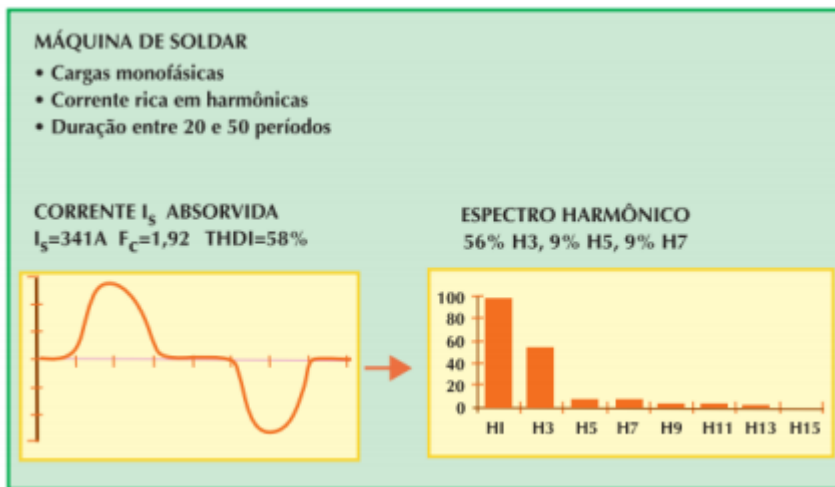


Figura 62: THDi de uma máquina de soldar. Fonte: (Moreno, 2001)

8.5 Anexo 5

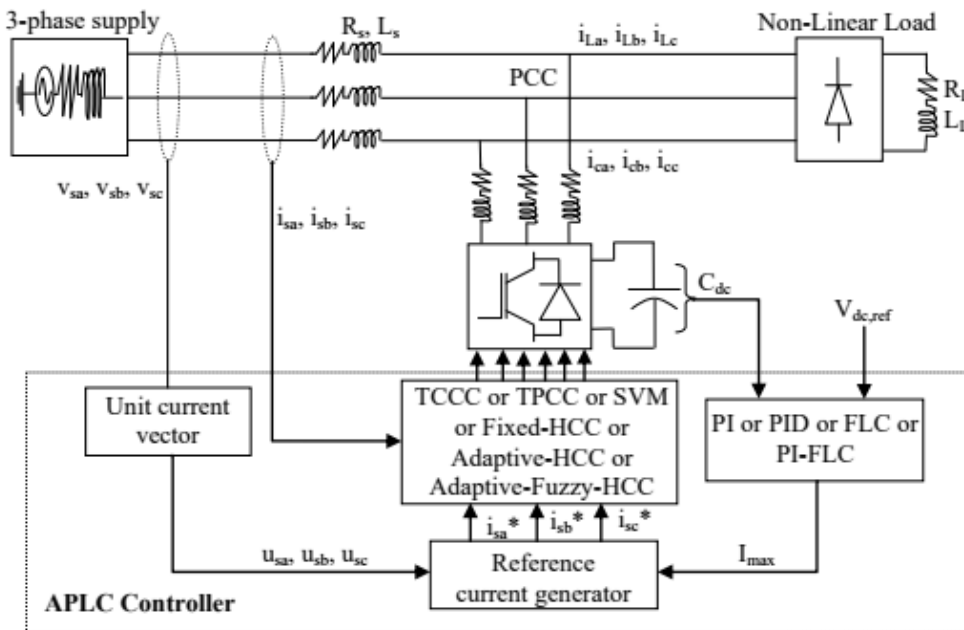


Figura 63: Diagrama de blocos de um filtro ativo. Fonte: (Chiang e Chang, 1999)

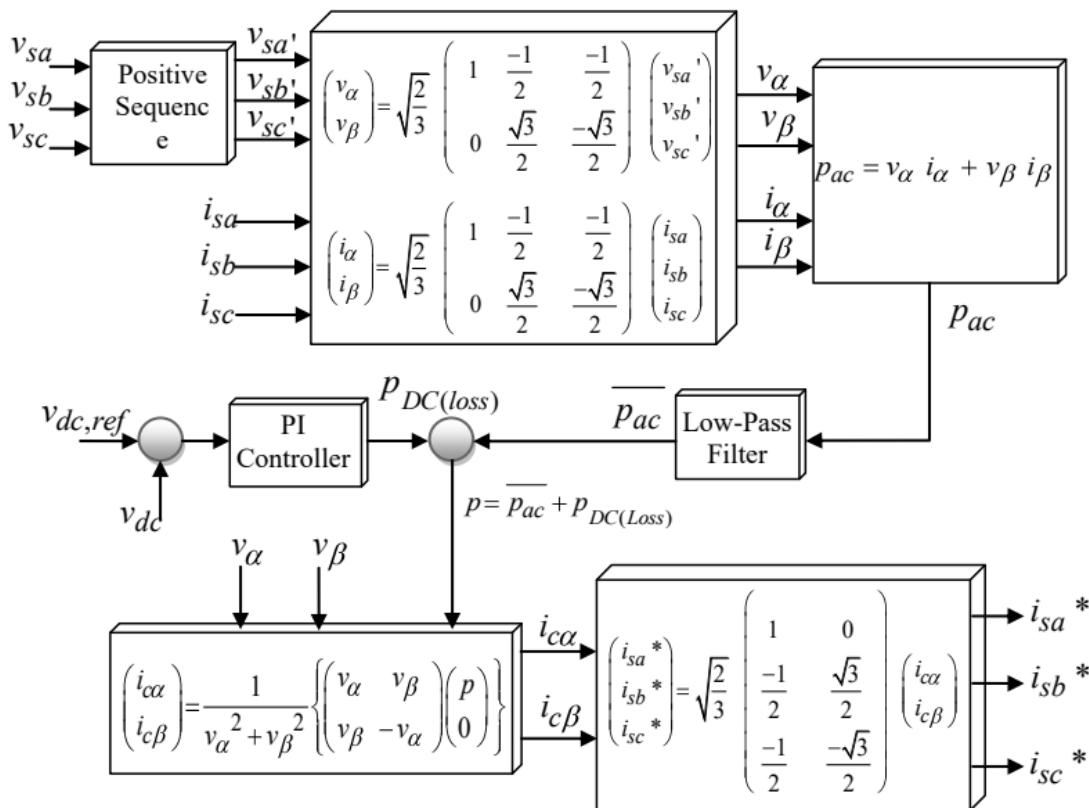


Figura 64: Geração das correntes de referência. Fonte: (Azevedo e Ferreira et al, 2003)

8.6 Anexo 6

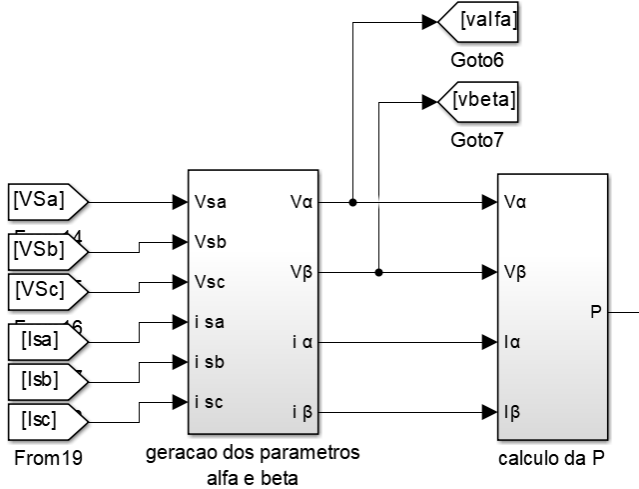


Figura 65: Cálculo da potência ativa. Fonte: (Autor, 2023)

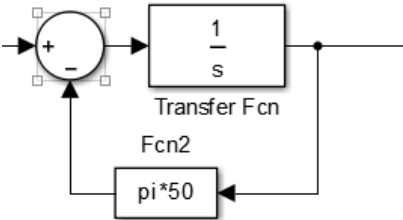


Figura 66: filtro passa baixo. Fonte: (Autor, 2023)

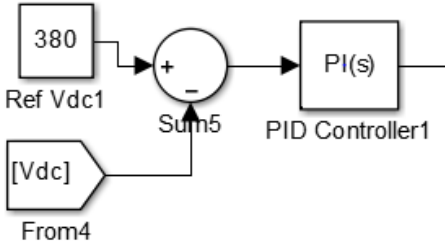


Figura 67: controlador PI. Fonte: (Autor, 2023)

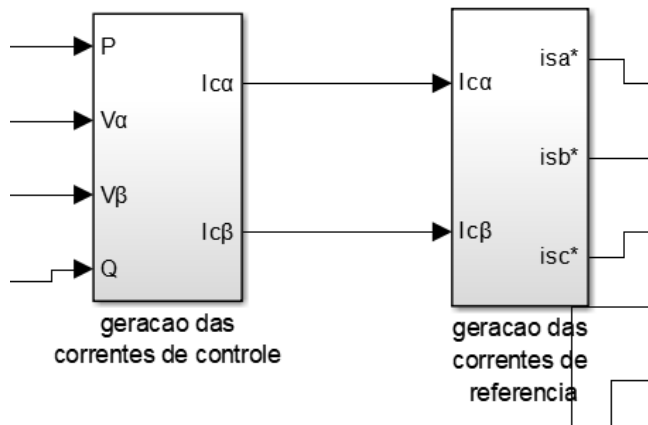


Figura 68: geração das correntes de referência. Fonte: (Autor, 2023)

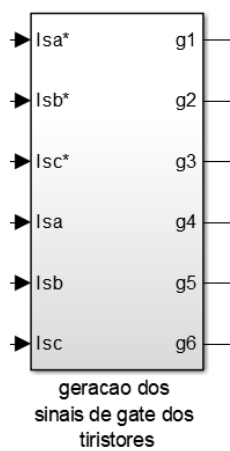


Figura 69: geração dos sinais Gate, para os tiristores. Fonte: (Autor, 2023)

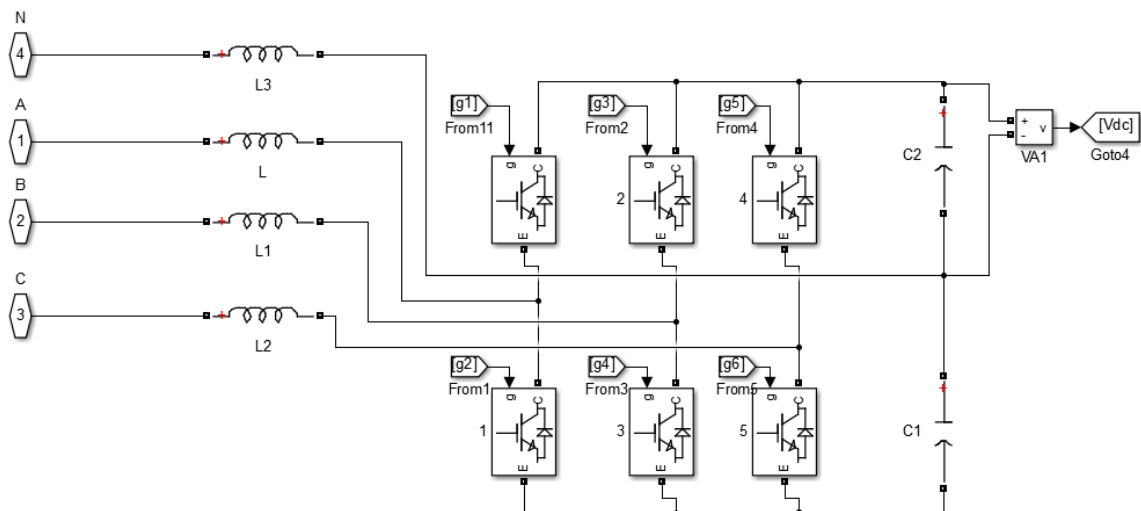


Figura 70: filtro. Fonte: Autor 2023

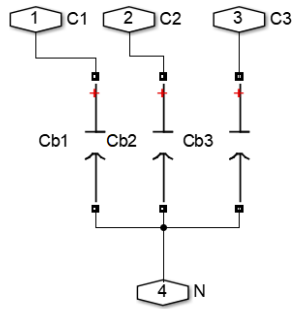


Figura 71: Banco de condensadores. Fonte: (Autor, 2023)

8.7 Anexo 7

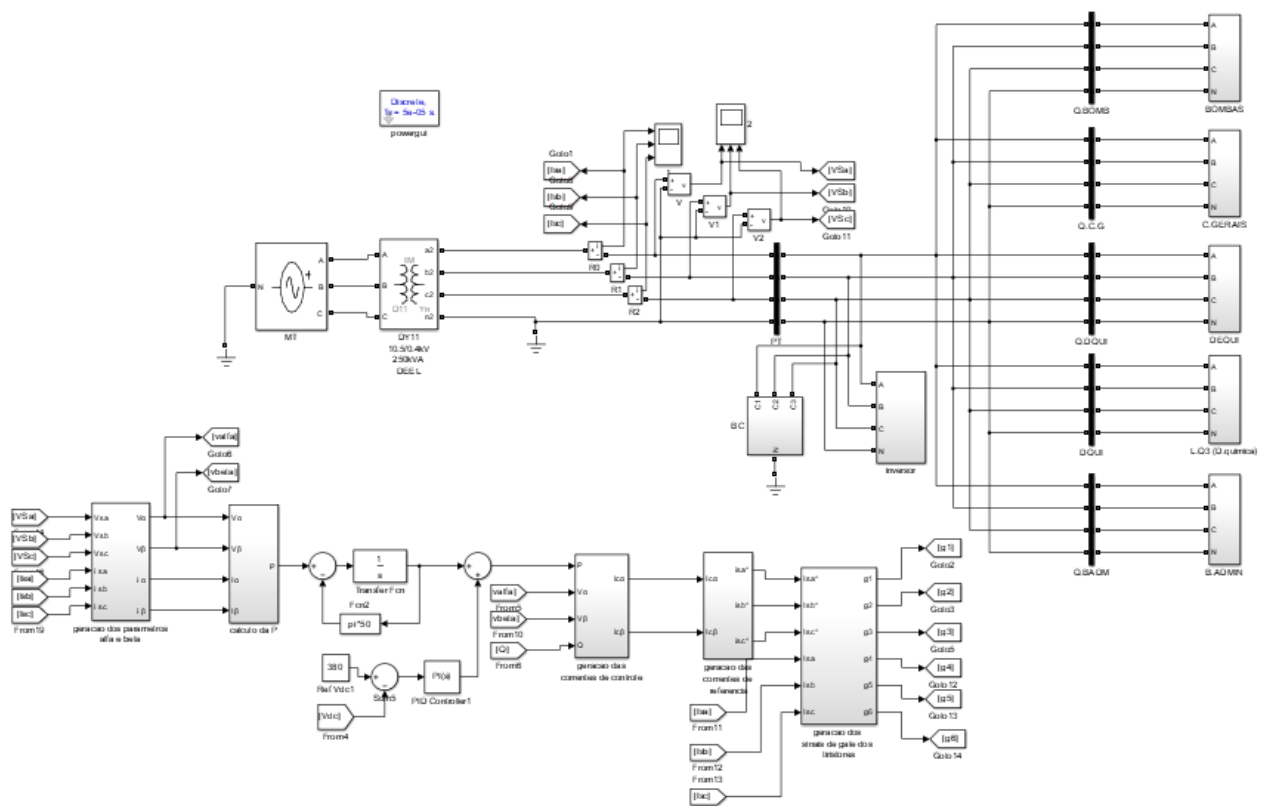


Figura 72: PT central com compensadores. Fonte: (Autor, 2023)

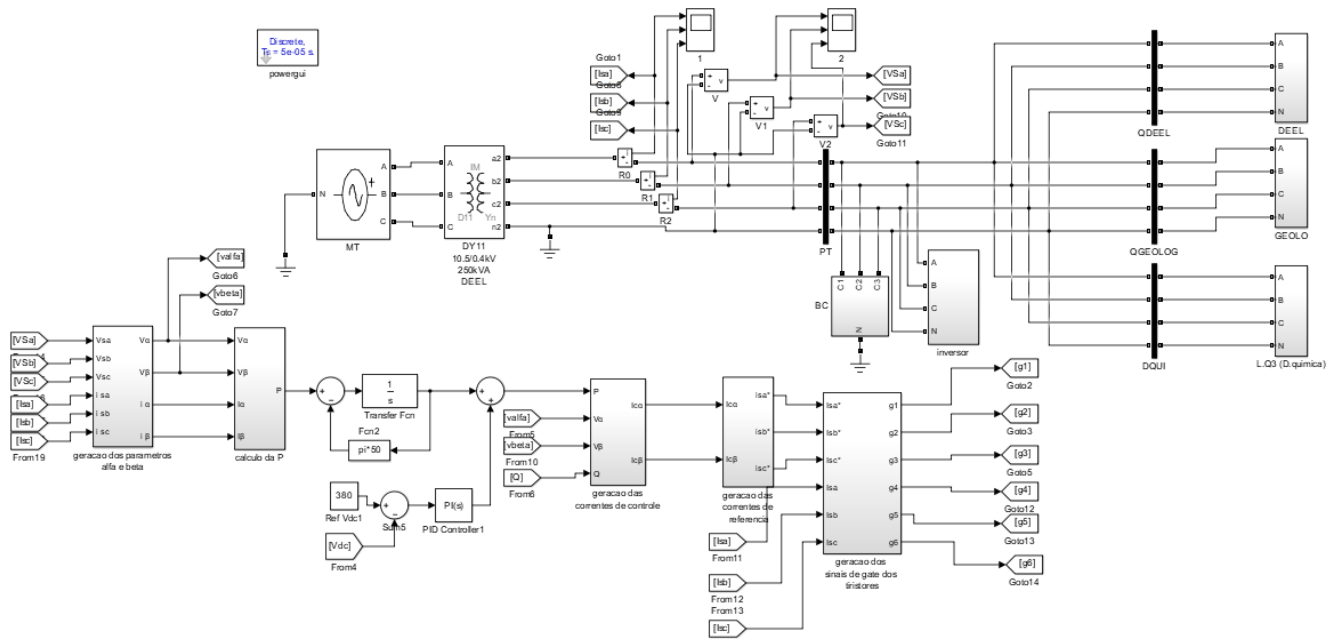


Figura 73: PT do DEEL com compensadores. Fonte: (Autor, 2023)

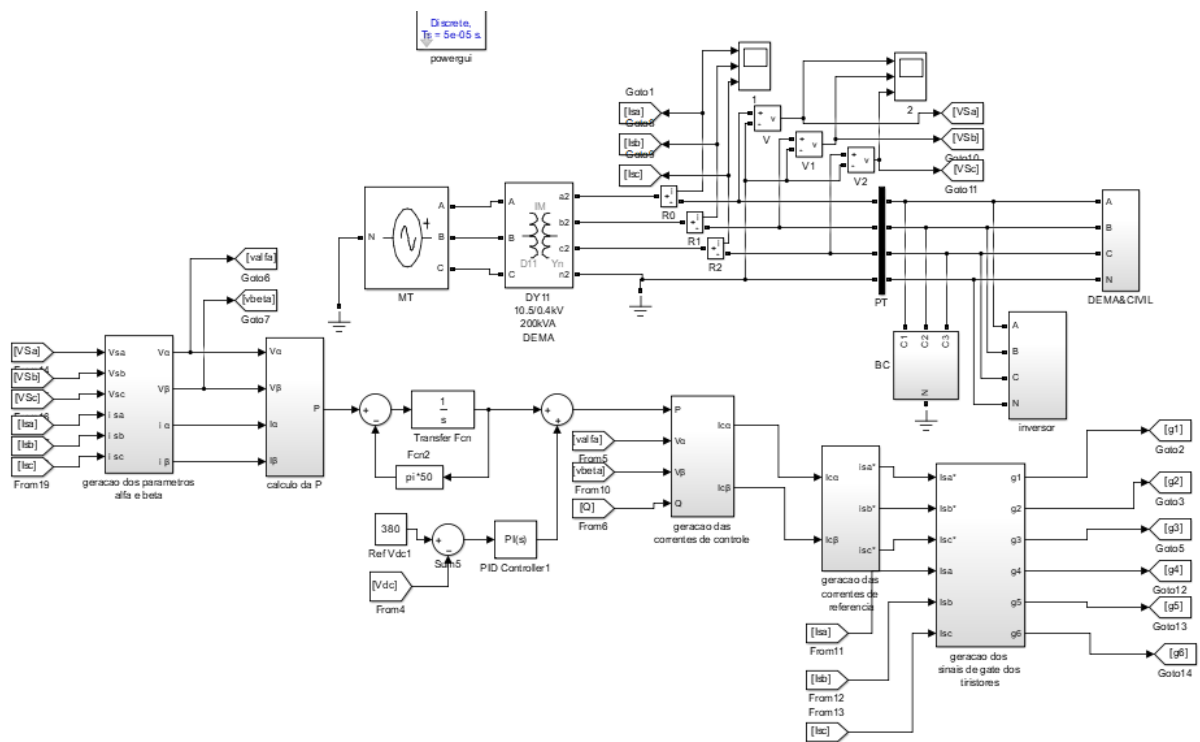


Figura 74: PT do DEMA com compensadores. Fonte: (Autor, 2023)

8.8 Anexo 8

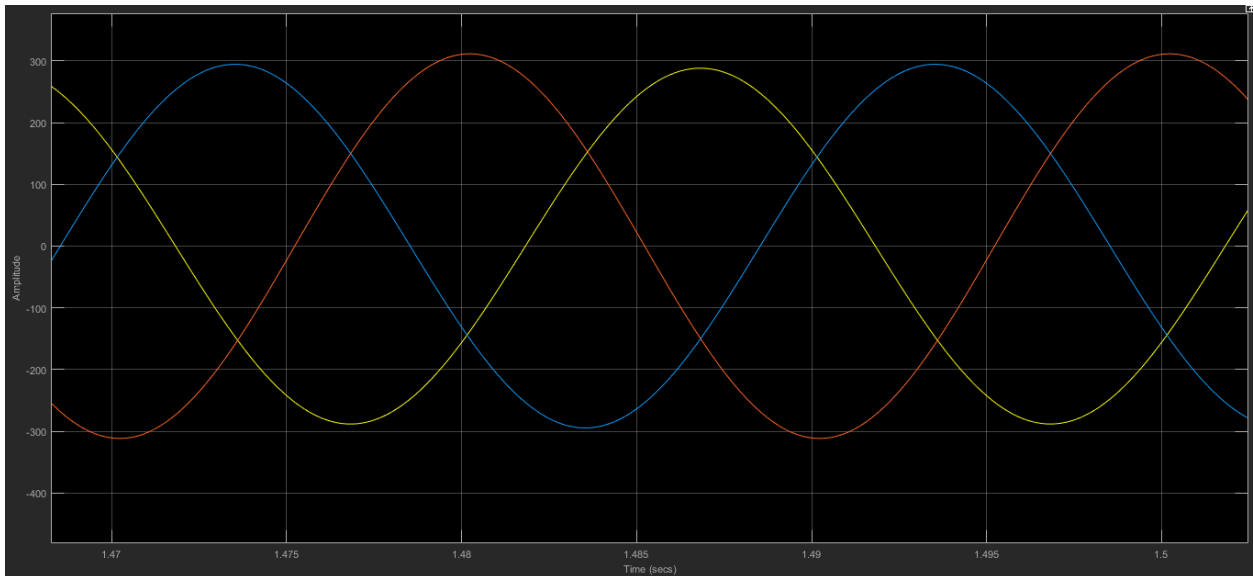


Figura 75: Onda de tensão do PT central após compensação. Fonte: (Autor, 2023)

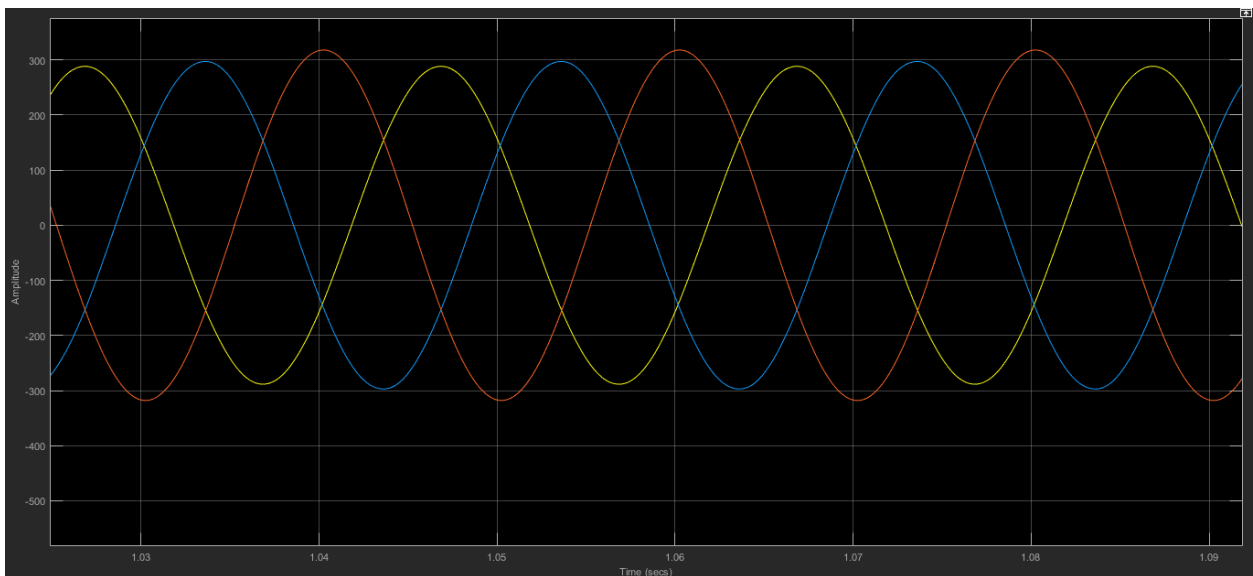


Figura 76: Onda de tensão do PT do DEEL após compensação. Fonte: (Autor, 2023)

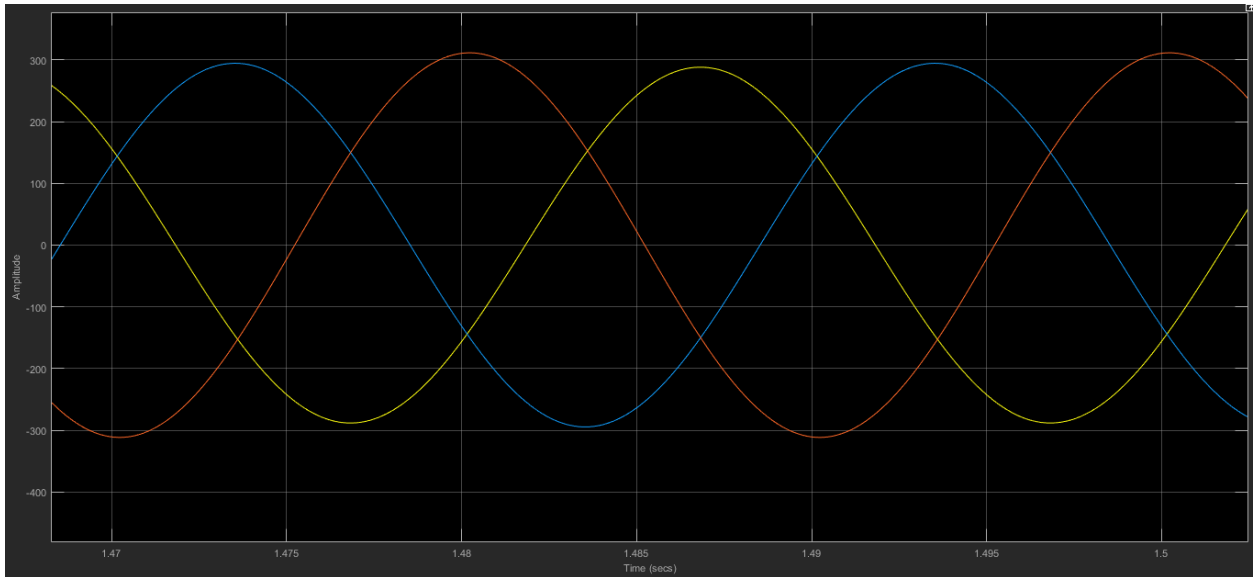


Figura 77: Onda de tensão do PT do DEQUI após compensação. Fonte: (Autor, 2023)

8.9 ANEXO 9



Figura 78: Departamento das Cadeiras Gerais. Fonte: (Autor, 2023)



Figura 79: Departamento de Engenharia Civil. Fonte: (Autor, 2023)



Figura 80: Departamento de Engenharia Electrotécnica. Fonte: (Autor, 2023)



Figura 81: Departamento de Engenharia Química. Fonte: (Autor, 2023)



Figura 82: Departamento de Engenharia Mecânica. Fonte: (Autor, 2023)



Figura 83: Departamento de Pós-graduação. Fonte: (Autor, 2023)



Figura 84: Departamento de Geologia. Fonte: (Autor, 2023)



Figura 85: Bloco administrativo. Fonte: (Autor, 2023)



Figura 86: Carpintaria. Fonte: (Autor, 2023)



Figura 87: Centro de eletrônica e instrumentação. Fonte: (Autor, 2023)

8.10 ANEXO 10



Figura 88: Chapa característica do transformador do PT do DEMA. Fonte: (Autor, 2023)



Figura 89: Chapa característica do transformador do PT central. Fonte: (Autor, 2023)



Figura 90: Chapa característica do transformador do DEEL. Fonte: (Autor, 2023)

8.11 ANEXO 11

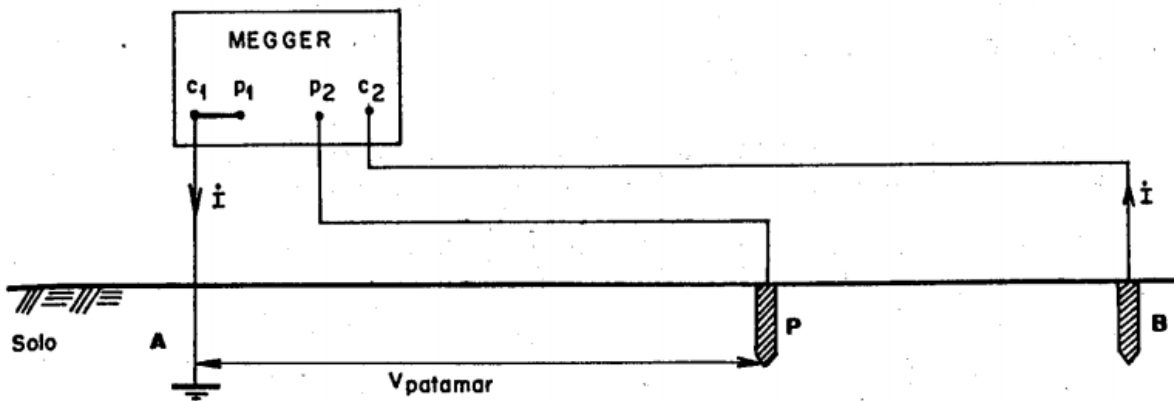


Figura 91: Esquema de ligação do equipamento de medição da resistência do eletrodo de terra. Fonte: (Kinderman e Jorge, 1995)

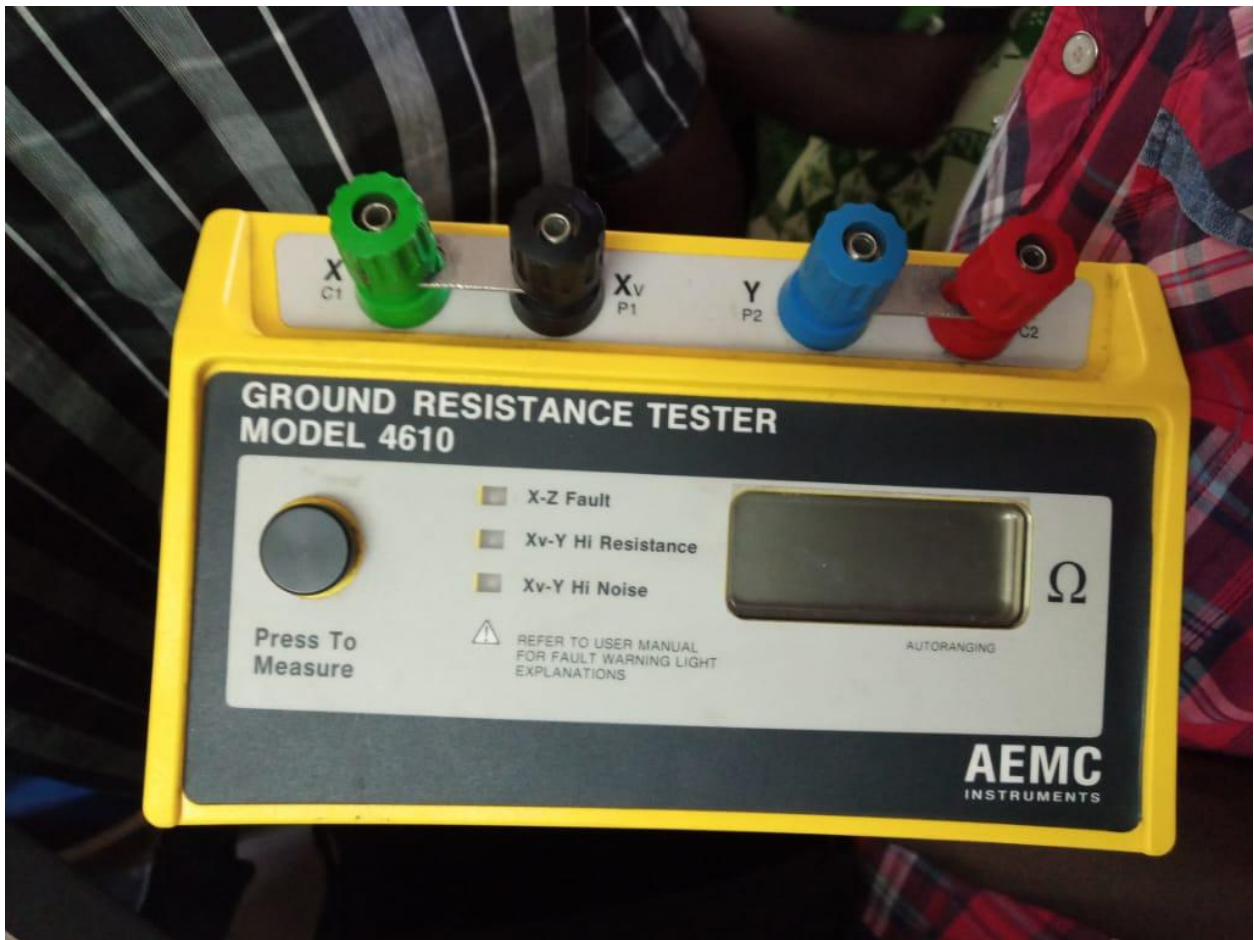


Figura 92: Equipamento para a medição da resistência de terra. Fonte: (Autor, 2023)

8.12 ANEXO 12

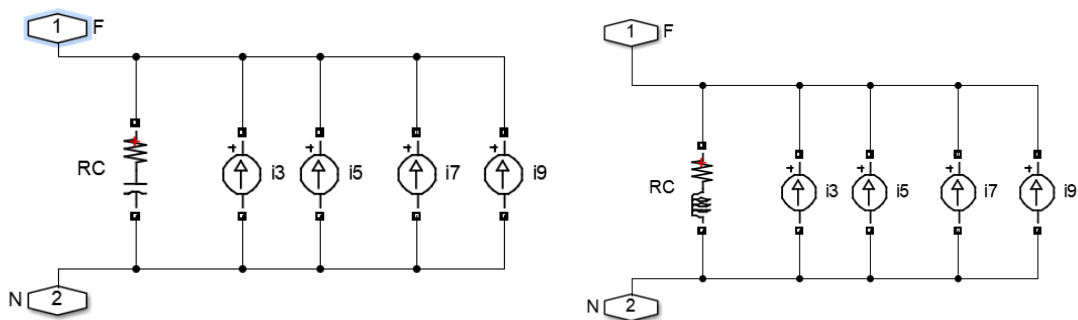


Figura 93: modelo de uma carga geradora de distorções harmônicas com fontes de corrente (para cargas com características capacitiva e indutiva respectivamente). Fonte: (Autor, 2023)

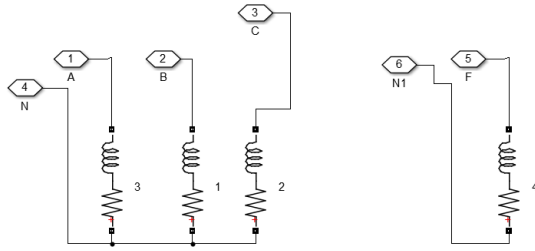


Figura 94: Modelo de carga trifásica ligada em Y e monofásica não geradoras de harmônicas respectivamente (cargas com características indutivas). Fonte: (Autor, 2023)

8.13 ANEXO 13

a) Para a tensão de referência:

$$V_{dc} = \frac{2}{3}V_P + V_P \quad (27)$$

Onde V_s é a tensão da fonte

b) Para indutor de acoplamento

$$L_{C\min} \leq L_C \leq L_{C\max} \quad (28)$$

Onde

$$L_{C\min} = \frac{3V_{dc} - 3V_P}{3f_S \Delta I_{C(p-p)\max}}; L_{C\max} = \frac{3V_{dc} + 3V_P}{3f_S \Delta I_{C(p-p)\max}} \quad (29)$$

$$\Delta I_{c(p-p)\max} = 15\% I_{p/compensar} \quad (30)$$

c) Para a seleção do capacitor de acoplamento

$$C_{dc} = \frac{S_f}{f(V_{dc\max}^2 - V_{dc\min}^2)} \quad (31)$$

$$S_f = \left(\frac{DHT}{\sqrt{1 + DHT^2}} \right) S_L \quad (32)$$

$$V_{dc\max} = V_{dc} * 1.2 ; V_{dc\min} = 0.8V_{dc} \quad (33)$$

d) Para o capacitor de elevação do fator de potência

$$C = \frac{Q_{Bc}}{\omega V_s^2} \rightarrow Q_{Bc} = P [\tan(\phi_1) - \tan(\phi_2)] \quad (34)$$

8.14 ANEXO 14

DESENHOS E LEGENDA DOS QUADROS PRINCIPAIS