



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE
FACULDADE DE ENGENHARIA
CURSO DE LICENCIATURA EM ENGENHARIA ELÉCTRICA

Análise de Distorções Harmônicas na Rede de Distribuição de Baixa Tensão do Bairro de Kumbeza

Autor

COMÉ, Milton Da Conceição

Supervisores:

Da UEM **Prof. Doutor** Zacarias Chilengue, eng^o

Da EDM **Eng^o** Waldemar Lifaniça

Maputo, Novembro de 2023



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE
FACULDADE DE ENGENHARIA
CURSO DE LICENCIATURA EM ENGENHARIA ELÉCTRICA

Análise de Distorções Harmônicas na Rede de Distribuição de Baixa Tensão do Bairro de Kumbeza

Autor

COMÉ, Milton Da Conceição

Supervisores:

Da UEM **Prof. Doutor** Zacarias Chilengue, eng^o

Da EDM **Eng^o** Waldemar Lifaniça

Maputo, Novembro de 2023



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE
FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELECTROTÉCNICA

TERMO DE ENTREGA DE RELACTÓRIO DO ESTAGIO PROFISSIONAL

Declaro que o estudante: COMÉ, Milton Da Conceição

entregou no dia / /20 as h: min cópias do relatório de Estagio Profissional com a referência: 2023ELEPD53 intitulado: Análise de distorções harmônicas na rede de distribuição de baixa tensão do bairro de Kumbeza

Maputo, 08 de 12 de 2024

O(a) Chefe de Secretaria

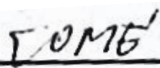
Arlete Luco Chiconela

(Arlete Chiconela)

DECLARAÇÃO DE HONRA

Milton Da Conceição Comé, estudante do 5º nível do curso de Engenharia Eléctrica na Faculdade de Engenharia da Universidade Eduardo Mondlane, declara, que este trabalho é da sua autoria, sendo fruto dos conhecimentos adquiridos ao longo da sua formação, investigação pessoal e da orientação do supervisor. O conteúdo deste trabalho é original e todos os documentos consultados estão devidamente identificados nas referências bibliográficas.

Maputo, Novembro de 2023



(Milton da Conceição Comé)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais Agostinho Comé e Maria de Fátima Zandamela

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho marca pela graça de Deus, uma etapa muito importante na minha vida.

Serve este presente espaço para agradecer e homenagear todas as pessoas que contribuíram para a sua concretização.

Aos meus Supervisores **Prof. Doutor** Zacarias Chilengue e **Engº** Waldemar Lifaniça, o meu sincero e profundo agradecimento por toda disponibilidade e sabedoria depositada, que foram fatores essenciais para que chegasse ao fim deste trabalho com um enorme sentimento de satisfação.

Aos meus pais **dr.** Agostinho Comé e Maria de Fátima Zandamela e meus irmãos Fábio Comé e Elzef da Luz Comé pelo apoio incondicional, vai um agradecimento muito sentido, pelo amor e imenso carinho demonstrado, não só durante o tempo em que me encontrei a fazer este projeto, mas durante toda a minha vida. A eles e ao resto da minha família o meu muito obrigado pela compreensão e por toda a confiança transmitida ao longo deste percurso.

A todos os meus amigos e colegas que me acompanharam durante o meu percurso na UEM, agradeço pela vossa amizade, apoio e motivação nesta caminhada.

Por fim, um agradecimento a todos os docentes, por tudo o que me ensinaram e que de um modo geral contribuíram para a minha formação académica.

EPÍGRAFE

*“Não se desvie desse desafio, deixe o desafio vir, lute, tenha fé e certeza que este
Deus, está contigo”*

Você não é normal!

(Prof Dr. Apóstolo Samuel Namburete)

RESUMO

O presente relatório descreve as análises e causas de distorções harmónicas do bairro de Kumbeza, que tem vindo a criar distúrbios na rede eléctrica, desta forma foram analisados os principais factores da ocorrência de harmónicas, bem como análise dos mecanismos de mitigação de riscos e dos indicadores que causam a irregularidade no fornecimento de energia eléctrica neste bairro. Este estudo foi feito baseando-se na recolha de informações no campo e nas bibliografias bem como pela inspeção visual do estado da rede. O conteúdo harmónico criado pelos equipamentos dos utentes, criou redução do FP total, pois com a adição de harmónicos, chega-se a uma certa distorção de corrente, tendo por consequência um acréscimo de corrente no valor eficaz e posteriormente uma diminuição no factor de potência. Esta elevada distorção, deu origem o desgaste do armário do PT 322R em estudo, de tal maneira que os barramentos se encontram super aquecidos, os fusíveis com mau aspecto visual devido a deterioração das bases do fusível e do cartucho, da mesma forma o conductor do neutro apresenta perda de isolamento e desgaste do conductor. Como forma de mitigação desta problemática criado pelo uso excessivo de cargas não lineares, como lâmpadas fluorescentes, equipamentos de refrigeração e climatização, computadores e mais equipamentos descritos no capítulo 3, o resultado deste relatório traz como resposta, a equipotencialização dos sistemas de aterramento para que não ocorra o acoplamento capacitivo. A instalação do filtro harmónico activo multifuncional modelo AFQevo no lado mais próximo da carga e a implementação de um modelo contratual, onde o cliente é cobrado uma multa ao usar equipamentos não declarados no projecto eléctrico o qual a EDM aprovou como estando dentro dos limites harmónicos das normas vigentes, nos casos em que o cliente recebe uma tensão distorcida que viola a confiabilidade fixada no contrato, o cliente terá o direito de requer a reposição dos danos e a correção do problema.

Palavra-chave: conteúdo harmónico, baixa tensão, filtros harmónicos, aterramento

ABSTRAT

The present work describes the analyzes and causes of harmonic distortions of the Kumbeza neighborhood, which has been creating disorders in the mains. In this way, the main factors of harmonic occurrence were analysed, as well as analysis of the mitigation mechanisms of risk and indicators that cause the irregularity in the supply of electricity in this neighbourhood. This study was done based on the collection of information in the field and bibliographies as well as the visual inspection of the state of the network. The harmonic content created by the equipment of the users, and this created the total PF reduction, because with de addition of harmonics, a certain current didtortion, there is a stream of current in the effective value and a decrease in the power. This high distorction, gave rise to the wear of the PT 322R under study, in such a way that the buses sre super heated, the fuses with bad visual aspect due deterioration of the fuse and cartridge bases, in the same way the neutral conductor`s insulation and wear loss. As a way of mitigating this problem, created by excessive use of non-linear loads, such as fluorescente lamps, cooling and air conditioning equipment, computers and more equipment described in chapter 3. The result this provides the answer, the equipotencialization of grounding systems so that capacitive coupling does not occur. Installing harmonic filters AFQevo active multifunctional model on the side closest to the oud and a contractual model was proposed, were the customer is charged a fine when using undeclared equipment in the electrical project which EDM has approved as being within the harmonic limits of the current standards, in cases where the client receives a distorted tension that violates the reliability set in the contract, the customer will have The right requires the replacement of damage and correction of the problem.

Keyword: harmonic content, Low voltage, harmonic filter, grounding system

ÍNDICE

I CAPÍTULO.....	1
1 Introdução.....	1
1.1 Formulação do problema	1
1.2 Justificativa.....	2
1.3 Objectivo geral	2
1.3.1 Objectivos específicos	2
1.4 Metodologia.....	3
II CAPÍTULO -FUNDAMENTOS TEÓRICOS E NORMATIVOS.....	4
2 Análise harmônica	4
2.1 Fontes de emissões harmônicas.....	4
2.2 Consequências na rede	5
2.2.1 Efeitos instantâneos	6
2.2.2 Efeitos de longa duração	6
2.3 Agregação de harmônicos	11
2.3.1 Formas de medição	12
2.4 Propagação de harmônicos	13
2.4.1 Domínio de frequência.....	15
2.4.1.1 Método directo	15
2.4.1.2 Análise Harmônica Iterativa (IHA)	15
2.4.1.3 Fluxo de Potência Harmônico (HPF).....	15
2.4.1.4 Análise multifásica	16
2.4.1.5 Domínio Harmônico Dinâmico (DHD)	16
2.4.1.6 Matriz de admitâncias acopladas	16
2.4.1.7 Método retroceder/avançar	16
2.4.1.8 Método probabilístico	16
2.4.1.9 Método Possibilístico	17

2.4.2	Domínio do tempo	17
2.4.2.1	Convencional (Força Bruta (BF))	17
2.4.2.2	Soluções rápidas periódicas em estado estacionário.....	17
2.4.3	Híbrido	17
2.5	Indicadores essenciais da distorção harmónica.....	18
2.5.1	Fator de potência.....	19
2.5.2	Modelagem periódica das harmónicas num intervalo de 24horas	23
III	CAPITULO -Caracterização da rede de distribuição de Kumbeza	25
3	Descrição do sistema de distribuição de energia eléctrica no bairro de Kumbeza	26
3.1	Rede de Media tensão	26
3.1.1	Ramal em cabo Aéreo	30
3.1.2	Protecção do PT no lado MT	30
3.1.3	Apoios.....	31
3.2	Rede de Baixa Tensão.....	31
3.2.1	Redes subterrâneas de BT.....	31
3.2.2	Quedas de tensão:	31
3.2.3	Armários de distribuição	31
3.2.4	Transições das redes aéreas para redes subterrâneas.....	32
3.2.5	Sistemas de aterramento.....	33
3.2.6	Protecção do PT no lado BT.....	33
3.3	Levantamento de carga do bairro Kumbeza	34
3.3.1	Harmónicas geradas por cada consumidor	36
3.3.1.1	Limites para emissão dos harmónicos	42
IV	CAPITULO	44
4	Conclusões	44
V	CAPITULO	45
5	Recomendações para mitigação dos problemas	45

5.1	Recomendação 1-Monitoramento harmónico	45
5.2	Recomendação 2-Mitigação de ressonâncias por equipotencialização das terras	46
5.3	Recomendação 3- Instalação de filtros harmónicos.....	46
6	Referências bibliográficas.....	49

LISTA DE SÍMBOLOS

Sn – Potência aparente nominal
cos φ - Factor de potência
Icc - Corrente de curto circuito
F - Frequência
R – Resistência eléctrica
 ΔP – Perdas de energia
 ΔV – Queda de tensão
TC - Transformador de Corrente
TP - Transformador de Potência
TT – Transformador de Tensão
BC – Banco de Condensadores
TC's – Transformadores de Corrente
TT's – Transformadores de Tensão
BT – Baixa Tensão
MT – Média Tensão
AT – Alta Tensão
APFs-Filtro activo de potência
APFse-potência activa série
APFsh-filtro de potência ativa shunt
UPQC- Condicionador de qualidade de energia universal
MAT – Muito Alta Tensão
SE – Subestação
SA – Serviços Auxiliares
CC – Curto-Circuito
mm – Milímetros
mm²– Milímetros quadrados
m – Metros
km - Quilómetros
A – Amperes
V – Volts
kV – Kilovolts
kA – Kilo amperes
MW – Megawatts
MVA - Megavolt-amperes
 Ω – Ohms

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- distorção harmónica da onda sinusoidal	4
Figura 2: Efeitos das cargas não lineares sobre a tensão	5
Figura 3- Onda de corrente e espectro harmónico de conversor	7
Figura 4-Onda de corrente em um equipamento de som	9
Figura 5- Onda de corrente em lâmpadas fluorescentes.....	10
Figura 6-Espectro de frequência harmónica em lâmpadas fluorescentes	10
Figura 7: Classificação de modelos de fonte harmónica.	14
Figura 8 Modelos corrente constante	15
Figura 9 Modelos desacoplado do Norton	15
Figura 10 Modelos Norton acoplado.....	15
Figura 11: triangulo de potências de componentes harmónicas.....	19
Figura 12: Sinal fundamental mais terceira harmónica.....	22
Figura 13 Distorção Harmônica Total de Tensão no período de 24 horas - Inverter.	23
Figura 14 Distorção Harmônica Total de Corrente no período de 24 hora – Inverter. ...	24
Figura 15 Relação entre o Factor de Potência e a distorção harmônica total de corrente. Fonte: [S. A. Soliman].....	24
Figura 16: Delimitação da área de serviço ao cliente KA-GUAVA.....	26
Figura 17: P.T. aéreo em pórtico "M2" - vista frontal	30
Figura 18:Fluxograma de celebração de contracto com limite harmónico.....	45
Figura 19: AFQevo Filtro activo Multifuncional	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1:Dados dos PT da linha EL-07 em Kumbeza.....	27
Tabela 2: Dados dos PT da linha EL-MALI em Kumbeza	28
Tabela 3: Dados dos PT da linha EL-Cumbeza no bairro Kumbeza	29
Tabela 4: Parâmetros das redes BT da EDM	31
Tabela 5: dimensões dos armários.....	32
Tabela 6 Cabos de torçada com conductor de alumínio	33
Tabela 7:Levantamento de cargas geradoras de harmónicas.....	35
Tabela 8: Cargas puramente resistivas não geradoras de harmónicas.....	36
Tabela 9:Harmónicas geradas pelo consumidor 1	37
Tabela 10: Harmónicas geradas pelo consumidor 2	37
Tabela 11:Harmónicas geradas pelo consumidor 3	38
Tabela 12: harmónicas geradas pelo consumidor 4	38
Tabela 13: harmónicas geradas pelo consumidor 5	39
Tabela 14:Harmonicas geradas pelo consumidor 6	39
Tabela 15: Harmónicas geradas pelo consumidor 7	40
Tabela 16: Harmónicas geradas pelo consumidor 8	40
Tabela 17: Harmónicas geradas pelo consumidor 9	40
Tabela 18: Harmónicas geradas pelo consumidor 10	41
Tabela 19: THD das lâmpadas usadas pelos consumidores.....	41
Tabela 20: taxa de distorção harmónica de geleira e congeladores.....	42
Tabela 21: Taxa de distorção harmónica nos modos resfriar e ventilar	42
Tabela 22 Limites de Distorção de Tensão segundo a norma internacional IEEE-519 ..	43

I CAPÍTULO

1 Introdução

Com a crescente demanda de uso de equipamentos de cargas não lineares, como os conversores de electrónica de potência, rectificadores e sistemas de armazenamento de energia, conversores de frequência, lâmpadas leds e fluorescentes, as redes de distribuição tem vindo a sofrer perturbações na onda senoidal, as quais interferem na confiabilidade e continuidade do fornecimento de energia. Esta pesquisa, visa analisar os principais factores da ocorrência de harmónicas, bem como análise dos mecanismos de mitigação de riscos ou dos indicadores que causam a irregularidade no fornecimento de energia eléctrica no bairro de Kumbeza. Depois de se colher dados quantitativos no terreno, serão usadas ferramentas normativas como as normas vigentes em Moçambique e normais internacionais aceites pela legislação local, para se poder apurar as possíveis irregularidades na conceção ou manuseio da rede pública, por parte dos utentes.

No delineamento deste trabalho, primeiro será realizada a formulação do problema e a justificativa, realçando-se o facto de se estar perante um tema de extrema relevância que aborda factores que atrasam o desenvolvimento sócio económico do bairro e o delineamento de processos de mitigação destes riscos e a solução dos mesmos. Não obstante, o problema será definido em termos pormenorizados, e posteriormente serão realçados os objectivos gerais e específicos do trabalho, para se proceder a sua execução por meio de instrumentos descritos na metodologia.

1.1 Formulação do problema

Os bairros periféricos de Maputo, registam a cada dia, incremento populacional, devido a problemas de imigração em busca de melhores oportunidades, este aumento da densidade populacional também implica aumento da busca de energia, causando desta maneira aumento de carga e desequilíbrio da rede, de igual modo se criam distorções harmónicas na rede de distribuição de baixa tensão, uma vez que as cargas não lineares são as que apresentam maior tendência do uso no mundo actual, por consumirem energia activa relativamente menor que as cargas puramente resistivas.

Diante desse cenário, surge o seguinte problema central: **Como mitigar as distorções harmónicas na rede de distribuição de baixa tensão, de modo que não afecte os utentes da rede?**

1.2 Justificativa

Devido ao crescimento continuo da demanda na rede eléctrica, aliada também pela insuficiência de infraestruturas eléctricas modernas, surge a necessidade de tornar os escassos recursos existentes, mais eficientes e que respondem a dinâmica actual voltada a exigência na confiabilidade da energia eléctrica fornecida, desta forma, uma análise e mecanismo de redução de interrupções é de grande relevância, para responder as preocupações dos residentes deste bairro. Com este crescimento da demanda com cargas predominantemente não lineares, implica monitoramento constante das grandezas eléctricas para quantificar a evolução de distorções harmónicas e o seu abrandamento para mitigar riscos de perdas eléctricas e de equipamentos eletroelectrónicos domésticos, que é o foco deste trabalho. Nesta vertente, é crucial haver uma análise e um levantamento pormenorizado dos factores que concorrem para o surgimento de harmónicas no sistema, analisando a quantidade de carga existente, a potência prevista e a potência consumida reactiva e activa, na tentativa de se poderem englobar todos os factores possíveis desta problemática e a sua solução.

1.3 Objectivo geral

Analisar as causas das distorções harmónicas da rede eléctrica BT no bairro de Kumbeza

1.3.1 Objectivos específicos

- i) Verificar os principais dispositivos do sistema de distribuição de energia eléctrica no bairro;
- ii) Fazer o levantamento da quantidade e tipo de carga predominante na rede;
- iii) Identificar a execução das normas vigentes para a limitação de correntes indesejáveis no sistema de BT.
- iv) Alistar os impactos negativos das distorções harmónicas, na rede de energia eléctrica de BT;
- v) Desenvolver uma metodologia de simulações dos índices de distorção harmônica num dado período.
- vi) Elaborar modelagem periódica, considerando os espectros harmônicos característicos e a variação das cargas ao longo do dia;
- vii) Desenvolver mecanismos de redução das distorções harmónicas;

1.4 Metodologia

Por meio de instrumentos de pesquisa que serão detalhados nos subtítulos abaixo, pretende-se recolher informações no campo e nas bibliografias, enumerar conceitos sobre os factores que imergem o problema em causa, usando os seguintes passos:

Pesquisa bibliográfica:

- Leitura de manuais técnicos e científicos visando a elucidação dos diversos conceitos técnicos apresentados no trabalho;
- Consulta de catálogos, documentos normativos e guias técnicos visando conhecer as tecnologias de controle e identificação de harmónicas.
- Consulta de relatórios de monitoramento da demanda da EDM.

Entrevistas:

- Colheita de informações sobre a rede eléctrica da cidade de Maputo em particular o bairro de Kumbeza e em diferente pessoal técnico com experiência neste tipo de problemáticas.
- Colheita de informações qualitativas e quantitativas inerentes aos problemas vividos pelos utentes da rede BT de bairro de Kumbeza

Inspeção visual do estado dos dispositivos que compõem a rede.

Análise e processamento dos dados:

A abordagem usada neste trabalho é quantitativa pois os resultados desta pesquisa serão compreendidos com base na análise de dados, recolhidos com o auxílio de instrumentos normalizados.

Serão usadas linguagens matemáticas e físicas para descrever as causas do fenómeno em estudo e também utilizando ferramentas computacionais para a simulação da rede e modelagem do índice de distorções harmónicas.

II CAPÍTULO -FUNDAMENTOS TEÓRICOS E NORMATIVOS

2 Análise harmônica

A análise harmônica nas redes de energia é realizada para obter as tensões e correntes harmônicas em um ou mais pontos na rede, considerando a emissão harmônica de fontes harmônicas, agregação de harmônicas e propagação de harmônicas através da rede. As tensões harmônicas são causadas por correntes não sinusoidais desenvolvidas por fontes harmônicas, a figura 1 mostra uma onda com distorção harmônica.

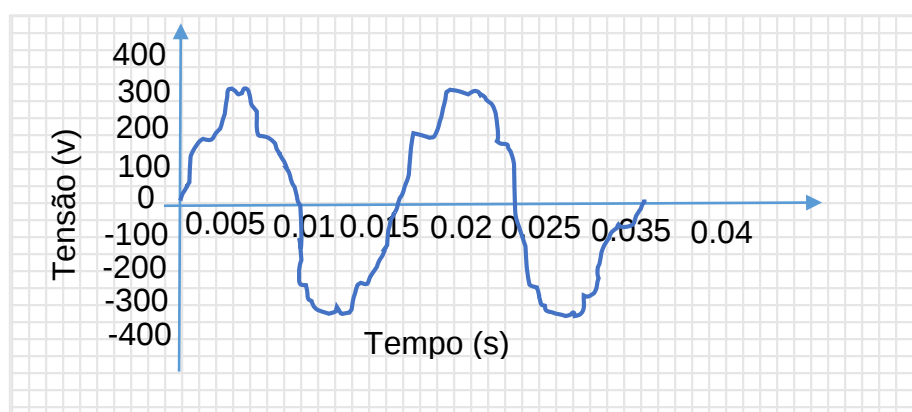


Figura 1- distorção harmônica da onda sinusoidal

Fonte: Adaptado de (CIRCUTOR, 1989.)

2.1 Fontes de emissões harmônicas

Harmônicos são causados por dispositivos não lineares que consomem corrente não senoidal sob alimentação de tensão senoidal tais como:

- 1) compensadores estáticos;
- 2) fornos a arco de CA e CC;
- 3) ciclo conversores;
- 4) inversores;
- 5) iluminação com lâmpadas de descarga, por ex. fluorescentes, vapor de sódio, vapor de mercúrio, com halogêneos metálicos.
- 6) variadores de velocidade em motores de CC e CA;
- 7) fontes comutadas (*switch mode power supplies*);
- 8) fontes ininterrompíveis (*uninterruptible power supplies*);
- 9) balastros eletrônicos e de núcleo de ferro (saturados);
- 10) equipamento eletrônico de controle de processos,

- 11) computadores pessoais, impressoras.
- 12) variadores de luminosidade (*dimmers*);
- 13) equipamento de aquecimento por indução;
- 14) equipamento eléctrico de soldadura;
- 15) funcionamento de transformadores nos limites da saturação;
- 16) geradores;
- 17) motores de indução com rotor em gaiola.

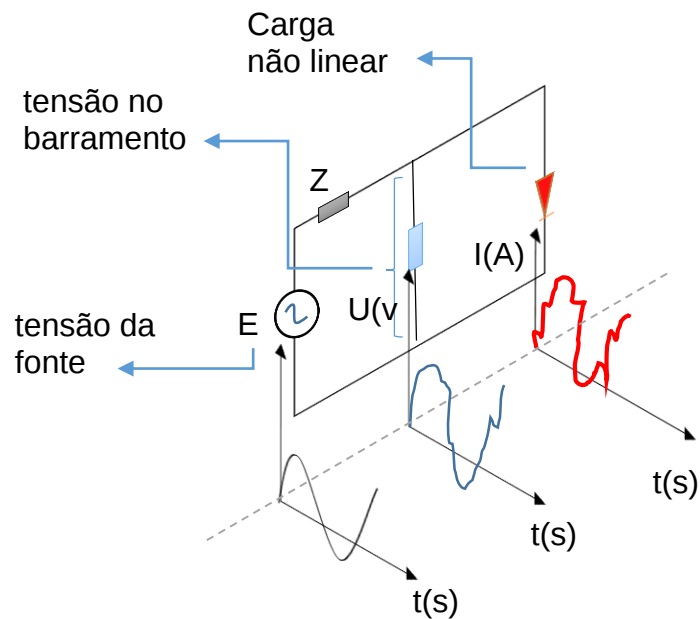


Figura 2: Efeitos das cargas não lineares sobre a tensão
Fonte (o autor)

2.2 Consequências na rede

A maioria dos dispositivos não lineares, embora sendo de potências relativamente reduzidas (em comparação com grandes cargas industriais e alguns equipamentos de rede de energia), a corrente é altamente distorcida e alta penetração dessas pequenas fontes harmônicas afectam a distorção harmônica no sistema.

Os efeitos negativos da ocorrência dos harmónicos podem ser integrados em duas categorias:

- ❖ Efeitos instantâneos
- ❖ Efeitos de longa duração

2.2.1 Efeitos instantâneos

Estes efeitos estão associados a falhas, mau funcionamento ou degradação do desempenho dos equipamentos ou dispositivos devido à perda de sincronismo por alteração da passagem por zero da onda de tensão. Os aparelhos de regulação, equipamento electrónico e computadores são lhes particularmente sensíveis. Elevadas amplitudes dos harmónicos com frequências próximas da frequência de controle podem perturbar o funcionamento de relés detectores de picos usados em grandes redes de energia para controle centralizado.

2.2.2 Efeitos de longa duração

Estes efeitos são sobretudo de natureza térmica e estão ligados, pelas perdas adicionais e sobreaquecimento, ao envelhecimento prematuro e mesmo avaria de condensadores, máquinas rotativas e transformadores.

1) Condensadores

Os condensadores por possuírem impedância inversamente proporcional à frequência são amplificadores de distorção harmónica de corrente. Os harmónicos provocam aumento da dissipação térmica e podem levar à deterioração do dieléctrico. De um modo geral, os condensadores estão habilitados para suportar sobretensões de exploração de longa duração de 10%, sobretensões de curta duração de 20% e sobreintensidades devidas aos harmónicos de 30%. As normas internacionais da CEI/IEC e da ANSI/IEEE especificam as características destes dispositivos, medidas de instalação, filtragem anti-ressonante e outras ações a tomar para o seu uso correto.

2) Disjuntores e fusíveis

Os harmónicos podem prejudicar a capacidade de interrupção para o caso dos disjuntores mercê de elevados di/dt no cruzamento por zero. A produção suplementar de calor nos solenoides dos relés magnéticos em disjuntores magnetotérmicos, devida às frequências elevadas, podem reduzir até 20% o limiar de disparo destes aparelhos.

3) Condutores

Os harmónicos de corrente provocam sobreaquecimento além do esperado pelo valor eficaz da corrente essencialmente por duas ordens de razão: uma devido ao efeito pelicular e ao efeito de proximidade, por um lado e, por outro, em redes com neutro a produção de harmónicos múltiplos de três, por se encontrarem em fase são de

sequência homopolar (sequência zero), somam-se em vez de se anularem dando origem a correntes elevadas no condutor neutro. Valores estes que podem atingir até 1,7 vezes, mesmo mais, dependendo do valor dos harmónicos, a corrente eficaz das fases.

4) Equipamentos e instrumentos electrónicos

A detecção múltipla de passagem por zero, para sistemas que usam a passagem por zero como medida do tempo, pode provocar funcionamento desajustado dos sistemas. Em particular, todos os dispositivos que sincronizam com a passagem por zero são considerados vulneráveis à distorção harmónica. Semicondutores comutados à passagem por zero da tensão, para reduzir a interferência eletromagnética, são também sensíveis à múltipla detecção e sujeitos a mau funcionamento. Equipamento electrónico, como fontes de tensão, que usam o pico da tensão de entrada para carregar condensadores e estabilizar o seu valor de saída, dependendo do conteúdo harmónico da mesma, podem encontrar-se a operar acima ou abaixo do valor de entrada embora possa manter-se o valor eficaz nominal da tensão na mesma.

Outro problema é a quebra de tensão (voltage notch) produzida pela comutação de semicondutores em conversores (quebra de comutação). Estas quedas são expressas através da taxa dv/dt . Podem produzir mau funcionamento dos equipamentos e se cruzarem o zero interferem com os sistemas de detecção de zero como explicado antes. Harmónicos fraccionários, isto é, harmónicos cuja ordem não é um número inteiro, e sub-harmónicos podem afectar televisores e monitores de vídeo.

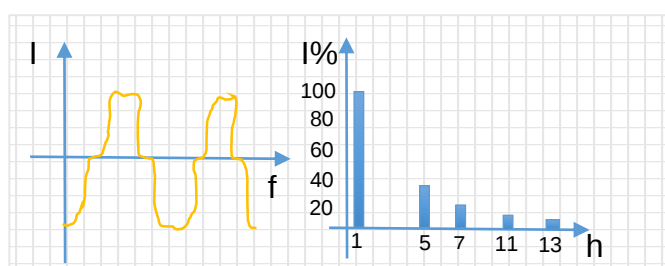


Figura 3- Onda de corrente e espectro harmónico de conversor

Adaptado de (CIRCUTOR, 1989)

Tão-somente 0,5% de um harmónico fraccionário, amplitude referida à fundamental, produz modulação de amplitude do sinal fundamental responsável pelo alargamento e contracção periódicos da imagem num TRC (tubo de raios catódicos).

5) Aparelhagem de medida e contadores

Amperímetros e voltímetros que baseiam o seu funcionamento nos valores eficazes das grandezas a medir são reactivamente imunes à distorção da forma de onda dos sinais. Pelo contrário, os medidores sensíveis ao valor médio absoluto ou ao valor de pico e calibrados para indicar valores eficazes não devem ser empregados na presença de distorção harmónica. Erros podem atingir valores de 13% e mais. Os contadores de energia de indução, os mais frequentes, sob condições de tensão e corrente distorcidas podem apresentar erros de até -20%, subcontagem, e com tensão sinusoidal e corrente distorcida de até +5%, sobrecontagem. Este tipo de contadores não são apropriados para instalações com forte distorção de tensão e corrente devido quer aos erros de contagem quer às possíveis ressonâncias mecânicas na gama dos 400 a 1000Hz. Os contadores electrónicos têm normalmente desempenho excelente em redes poluídas.

6) Relés de protecção

As distorções nas formas de onda afetam o desempenho dos relés, podem causar mau funcionamento ou impedi-los de funcionar. Variando o ângulo de fase entre as componentes fundamental e harmónicas da tensão ou corrente pode significativamente alterar a característica de resposta dos relés.

7) Máquinas rotativas

Os harmónicos aplicados a máquinas rotativas podem causar aquecimento, vibrações, binários pulsantes ou ruído. O sobreaquecimento rotórico é o principal problema associado à distorção da tensão. As perdas no núcleo podem tornar-se significativas para motores de indução alimentados por inversores que produzem harmónicos de frequências elevadas. O aumento da temperatura de funcionamento dos motores reduzirá o tempo de vida médio dos mesmos. Neste âmbito, os motores monofásicos são os mais afetados. A interação entre o fluxo principal do entreferro, maioritariamente de componente fundamental, com os fluxos produzidos pelas correntes harmónicas darão lugar ao aparecimento de binários pulsantes. No caso de motores com controle de velocidade deverá ser feita uma análise de possíveis ocorrências de fenómenos de ressonância mecânica, no sentido de precaver avarias, por efeito de amplificação dos binários pulsantes. Os harmónicos também contribuem para a geração de ruído audível.

8) Telecomunicações

A proximidade de linhas de energia e de telecomunicações cria condições para interferências com estes sistemas, interferências motivadas pela irradiação de campos

electromagnéticos gerados pelos harmónicos das redes de potência. A frequência fundamental, para redes telefónicas, normalmente não é causadora de problemas, como resultado da resposta em frequência do ouvido humano. A indução pelos harmónicos de ruído nos canais de dados pode adulterar a informação transmitida. Existem vários mecanismos pelos quais se pode gerar acoplamento entre as redes de energia e de telecomunicações. Medidas para atenuar os seus efeitos consistem na transposição das linhas de energia (para redes aéreas), escolha de cabos com blindagens electromagnéticas, de pares trançados, realização de terras adequadas para os sistemas de energia, evitando assim a propagação de potenciais, e, naturalmente, a utilização de filtros adequados.

9) Televisores e equipamentos de som

Estes equipamentos constituem fontes geradoras de harmónicos de pequena e media potência, porem estes aparelhos adquirem maior importância de análise quando funcionam em grande numero e em simultâneo, provocando injeção de sinais harmónicos na rede de distribuição. Abaixo está ilustrada uma forma de onda de um equipamento de som (CHAPMAN, 2001).

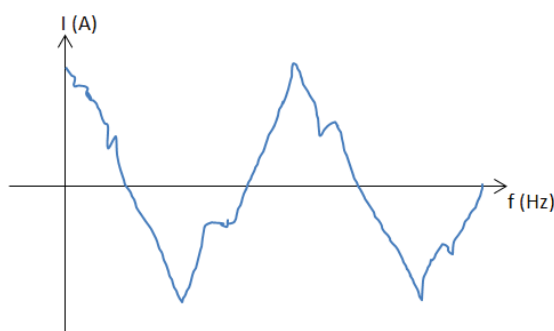


Figura 4-Onda de corrente em um equipamento de som

Fonte: (CHAPMAN, 2001).

10) Lâmpadas fluorescentes

Os balastros electrónicos tem enúmeras aplicações no melhoramento da eficiência energética das lâmpadas fluorescentes, os reatores apresentam melhor desempenho em relação aos estabilizadores electrónicos quando trabalham em altas frequências, mantendo a luminosidade constante durante o seu tempo de vida útil, porem sua grande desvantagem é que geram harmônicos na corrente de alimentação. Os tubos de luz

fluorescente são altamente não lineares e resultam em correntes harmônicas ímpares de alta magnitude. Em uma carga trifásica de 4 fios, as harmônicas triplas somam-se basicamente no neutro, sendo a 3ª a mais dominante tal como ilustrado na figura abaixo.

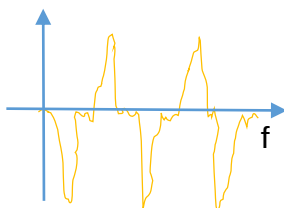


Figura 5- Onda de corrente em lâmpadas fluorescentes

Adaptado de (CHAPMAN, 2001) .

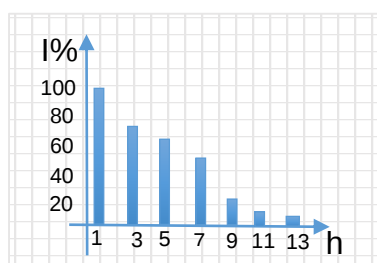


Figura 6-Espectro de frequência harmônica em lâmpadas fluorescentes

(CHAPMAN, 2001)

11) Transformadores

O primeiro efeito dos harmônicos nos transformadores é o aquecimento adicional gerado por efeito das correntes de Foucault induzidas no núcleo destas máquinas. Outros problemas incluem eventual ressonância entre a indutância do transformador e capacidades do sistema, tensões mecânicas no isolamento dos enrolamentos e do núcleo por efeito das variações de temperatura e eventuais pequenas vibrações do núcleo laminado. O sobreaquecimento causado pela presença dos harmônicos, correntes de remoinho ou de Foucault, sendo proporcionais ao quadrado da frequência, obrigam à redução da potência estipulada dos transformadores. A norma IEEE/ANSI Standard C57.110, "IEEE Recommended Practice for Establishing Transformer Capability when Supplying Nonsinusoidal Load Currents", estipula como máxima distorção à plena carga o valor de 5%. Contempla ainda formas para determinar o abaixamento da potência por efeito da presença dos harmônicos. Para tal é definido um fator K dependendo da ordem do harmônico e do valor da corrente harmônica. As normas contemplam ainda a máxima sobretensão (valor eficaz) permitida sendo de 5% à plena

carga e de 10% para funcionamento em vazio (de referir que as correntes de Foucault são proporcionais ao quadrado da indução máxima e, como tal, proporcionais ao quadrado do valor máximo da tensão aplicada). Por outro lado, para transformadores com secundários ligados em triângulo, as correntes de frequência múltipla de três, por serem de natureza homopolar, podendo circular nestes enrolamentos, não se transmitem para o primário o que pode dar indicação errónea da carga do transformador para medições efetuadas nos condutores destes enrolamentos.

De forma geral pode-se dizer que entre as principais consequências de harmônicas na rede estão o aumento de perdas, devido à relação quadrática com a corrente, a redução da vida útil de equipamentos como transformadores e banco de capacitores causada por sobreaquecimento ou sobrecarga, problemas de compatibilidade electromagnética e nos sistemas de proteção, além dos casos de ressonância. A circulação de correntes harmônicas múltiplas de três no condutor de neutro mostra-se importante a sua análise, mesmo em condições de equilíbrio, as harmônicas múltiplas de 3 somam-se no neutro em sistemas $Y_{aterrado}$, criando sobreaquecimento do condutor sem acionar a proteção (BOLLEN; GU, 2006), (DUGAN; MCGRANAGHAN; BEATY, 1996).

2.3 Agregação de harmônicos

Destacam-se dois tipos: agregação de dados medidos ao longo de um tempo específico (agregação de tempo harmónico) e modelo agregado das fontes harmónicas para análise harmónica do sistema de potência (agregação de fonte harmónica). A IEC 61000-4-30 definiu o tempo de 10 ciclos (tempo de 12 ciclos para 60 Hz) como o intervalo de tempo de medição básico para medição e agregação de harmónicos (um tipo de compactação de dados). O padrão também define um intervalo de 150/180 ciclos e um intervalo de 10 minutos para agregação de medições ao longo do tempo. As agregações devem ser realizadas utilizando a raiz quadrada da média aritmética dos valores de entrada ao quadrado.

Contudo, a agregação é definida apenas para magnitude harmônica e a informação do ângulo de fase é perdida após a agregação. O conceito de “ângulo de fase predominante” foi proposto como método de agregação de ângulo de fase. No entanto, o método não é amplamente utilizado, utiliza métodos de agregação separados para magnitude e ângulo de fase e nem sempre dá um resultado.

Um dos métodos mais simples para agregação de fontes harmônicas é o uso dos expoentes de agregação recomendados na IEC-61000-3-6 para alocação de harmônicas. Neste método, uma lei de soma expressa a diversidade entre as fontes harmônicas e o valor agregado é obtido por (1).

$$u_h = \sqrt[\alpha]{\sum_i U_{hi}^\alpha} \quad 1$$

onde α é escolhido de acordo com a ordem harmônica com um valor de $\alpha = 1$ para ordem harmônica menor que cinco, $\alpha = 1,4$ para harmônicos no intervalo $5 \leq h \leq 10$ e $\alpha = 2$ para ordens harmônicas superiores a 10. Mesmo que este método pode ser geralmente usado, existem resultados práticos e simulados que mostram desvio da lei de soma da IEC.

2.3.1 Formas de medição

Nesta categoria, os dados de medição são a base para a obtenção do modelo agregado que considera inerentemente as propriedades das fontes harmônicas e da rede durante o período de medição. O procedimento de obtenção de um modelo começa com a medição seguida do pré-processamento dos dados, filtragem e processamento do sinal, identificação dos parâmetros do modelo e finalmente termina com a validação do modelo [Z. Y. Dong,]. As medições podem ser realizadas em diferentes locais da rede como pontos de conexão dos clientes, ao longo de um alimentador ou na subestação.

Em abordagens baseadas em medições determinísticas, a medição geralmente é realizada por um período específico de tempo e algumas análises estatísticas e índices (como média ou valor do percentil 95) são utilizados para obter o modelo. A saída é um valor fixo para os parâmetros de um modelo agregado. O modelo agregado pode ser apresentado na forma de qualquer um dos modelos de origem ilustrados na Figura 7. Na forma mais simples, o modelo é apresentado apenas como fonte de corrente. Em estudos mais detalhados, o modelo é definido como equivalente de Norton e os parâmetros do modelo são obtidos por diferentes técnicas de processamento de sinal como erro mínimo quadrado, filtro de Kalman ou conceito de correlação. Os parâmetros do modelo equivalente Norton acoplado harmônico também podem ser obtidos pelo método proposto em [C. F. M. Almeida]. Os modelos desenvolvidos utilizando métodos determinísticos baseados em medição são válidos apenas para o tempo específico em

que a medição é realizada e nem sempre apresentam a variação na emissão de harmônicos dos clientes e alterações na rede fora do período de medição.

Nos métodos estocásticos, o modelo agregado é obtido com base na análise estatística de dados harmônicos medidos durante um longo período. Não existe um período definido como um período longo adequado, mas uma semana de medição (conforme recomendado pela IEEE 519 e por muitos documentos regulamentares) pode ser um período razoável. A razão para escolher uma semana é que muitas vezes há uma variação de uma semana nas emissões; especialmente quando se trata de clientes domésticos, de escritório e comerciais. Para clientes industriais, a emissão pode ser constante durante um longo período e apenas algumas horas podem ser suficientes. Mas também pode ser que a variação sazonal seja dominante, de modo que é necessário medir um ano.

2.4 Propagação de harmônicos

Durante a simulação da propagação harmônica, as impedâncias de transferência e/ou os harmônicos de corrente e tensão dos ramos e barramentos da rede são obtidos usando métodos de domínio de frequência, domínio de tempo ou domínio híbrido de tempo-frequência. Um dos primeiros estudos gerais sobre métodos de simulação harmônica foi apresentado em [A. Bonner], onde os métodos foram ilustrados com exemplos e sistemas de amostra, é apresentada uma visão geral concisa dos métodos, incluindo os fundamentos teóricos dos métodos clássicos de análise harmônica, mas a visão geral é limitada aos métodos determinísticos. Uma revisão mais abrangente da literatura sobre os métodos é apresentada e abrange também métodos de análise harmônica probabilística e possibilística. Um folheto técnico do CIGRE discute mais detalhadamente os métodos de modelagem de redes de última geração para estudos harmônicos [CIGRE]. Uma breve descrição dos diferentes métodos é fornecida nas próximas seções.

A Modelagem da fonte harmônica é importante na análise harmônica. Ambas modelagens, modelo elétrico e modelo do estado operacional devem ser considerados para uma representação da fonte harmônica. Na Figura 7, é apresentado uma classificação de modelos de fonte harmônica. O modelo elétrico expressa a característica harmônica elétrica da carga, enquanto o modelo de estado operacional considera a variação da emissão ao longo do tempo.

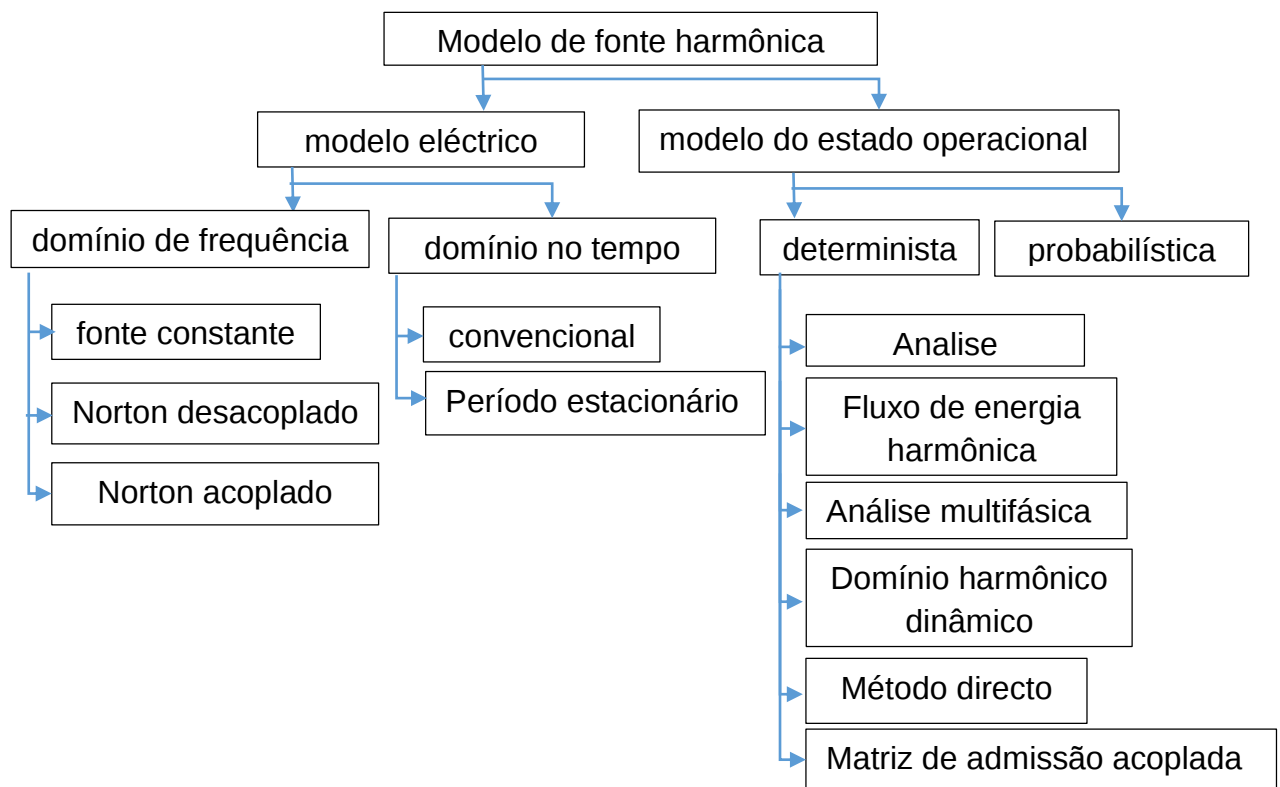


Figura 7: Classificação de modelos de fonte harmônica.

Fonte (o autor)

diferentes modelos de domínio de frequência são mostrados na figura abaixo. No modelo de corrente constante (à esquerda), a carga é representada apenas por uma emissão constante, independente na tensão terminal; Parte da dependência da emissão harmônica na tensão harmônica da mesma ordem harmônica pode ser expressa com uma admissão paralela no modelo equivalente desacoplado do Norton [A.S. Koch].

Finalmente, o modelo de Norton acoplado (direita) considera a interação entre diferentes ordens harmônicas adicionando uma fonte de corrente dependente de tensão ao modelo. Devido à simplicidade do modelo e do cálculo, e a aplicação mais fácil em programas de simulação de radiodifusão de frequência, modelos de domínio de frequência (especialmente os modelos equivalentes de Norton de corrente constante e desacoplados) são amplamente utilizados em estudos harmônicos. A diferença entre os resultados do modelo equivalente desacoplado do Norton e as medições reais são avaliadas, mostrando a interação não linear entre a emissão harmônica de diferentes dispositivos em instalações de BT. Usando um número de índices propostos, também é mostrado em que ponto o modelo equivalente do Norton desacoplado pode ser usado.



Figura 8 Modelos
corrente constante

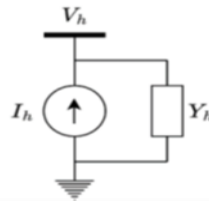


Figura 9 Modelos
desacoplado do Norton

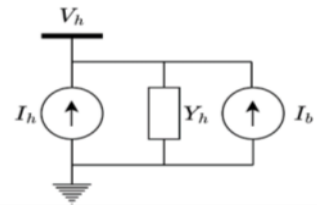


Figura 10 Modelos
Norton acoplado

Fonte adaptado de (Naser Nakhodchi, 2023)

2.4.1 Domínio de frequência

2.4.1.1 Método directo

No método directo, a resposta em frequência da rede é calculada em um determinado nó a partir da conectividade e impedância de todos os componentes da rede e as tensões harmônicas do barramento são obtidas conhecendo a matriz de admitância da rede e injeções de corrente para cada frequência. Neste método o impacto das tensões harmônicas na injeção harmônica da fonte não é considerado. Contudo, qualquer impacto linear, para a mesma harmônica, pode ser modelado utilizando um equivalente Norton. A impedância da fonte pode ser incluída na matriz Y . Este método é amplamente utilizado para análise harmônica da rede de energia devido à sua simplicidade de formulação e simulação. É geralmente entendido que esta não é uma suposição correcta, mas modelos mais precisos muitas vezes não estão disponíveis e/ou resultarão em demandas computacionais excessivas quando um grande número de fontes harmônicas for incluído no estudo (J. Arrillaga).

2.4.1.2 Análise Harmônica Iterativa (IHA)

Neste método, as fontes harmônicas são modeladas como fontes de corrente dependentes de tensão e o processo começa com uma forma de onda e/ou espectro de tensão de alimentação estimado.

2.4.1.3 Fluxo de Potência Harmônico (HPF)

O método HPF é uma reformulação do método convencional de fluxo de potência utilizado para a frequência fundamental 50/60 Hz. As equações harmônicas de tensão e corrente são adicionadas às equações fundamentais associadas e são resolvidas simultaneamente utilizando métodos de solução de Newton-Raphson ou Gauss-Seidel.

2.4.1.4 Análise multifásica

Este método é uma versão melhorada do método HPF, que resolve as equações de rede para condições desequilibradas. Os harmônicos não característicos (triplos e até mesmo harmônicos) causados pelo desequilíbrio podem ser avaliados usando este método. O impacto das cargas monofásicas, que são a principal fonte de harmônicas nas redes de BT, também pode ser avaliado pelo método multifásico. Outra vantagem é a capacidade deste método em apresentar os efeitos harmônicos de mudança de fase dos transformadores.

2.4.1.5 Domínio Harmônico Dinâmico (DHD)

Um algoritmo de fluxo de potência harmônico aprimorado é apresentado em [J. Arrillaga,] que inclui a interação entre componentes fundamentais, harmônicos e interharmônicos.

2.4.1.6 Matriz de admitâncias acopladas

O método é desenvolvido com base no facto de que dispositivos comuns baseados em electrónica de potência, como conversores de ponte, podem ser modelados usando uma equação matricial acoplada [J. Arrillaga,]. Todas as equações neste método são equações lineares e podem ser resolvidas simultaneamente sem iteração.

2.4.1.7 Método retroceder/avançar

Em [J. H. Teng], o método convencional de varredura para trás/para frente que tem sido utilizado na análise de redes de distribuição (para a frequência fundamental) é modificado para estudos harmônicos. Durante a varredura de corrente reversa, a corrente do ramal é obtida da corrente injetada ou das correntes do barramento; durante a varredura direta de tensão, as tensões do barramento são calculadas do barramento emissor em direção ao barramento recetor. Este método é eficiente em termos de tempo e útil para análise harmônica em redes de distribuição radial.

2.4.1.8 Método probabilístico

Este tipo de método é capaz de abordar as incertezas inevitáveis em um sistema de energia real causadas pela variação temporal de cargas lineares e não lineares e por mudanças nas configurações da rede. Os métodos baseados em Monte Carlo e os métodos analíticos pertencem a este grupo.

2.4.1.9 Método Possibilístico

Nos métodos possibilísticos, são utilizadas distribuições de possibilidades em vez de probabilidades para apresentar incertezas na emissão e composição das cargas. Um fluxo de carga harmônico Possibilístico baseado na análise do método direto foi proposto em [A. A. Romero].

2.4.2 Domínio do tempo

Nos métodos no domínio do tempo, as formas de onda de tensão e corrente são obtidas pela integração das equações diferenciais do sistema de potência e das cargas em modo estacionário. Em seguida, os componentes harmônicos das formas de onda são calculados a partir das formas de onda no domínio do tempo utilizando a transformada de Fourier. Os métodos no domínio do tempo podem ser classificados em dois grupos como segue:

2.4.2.1 Convencional (Força Bruta (BF))

Neste método, as equações diferenciais do sistema são resolvidas quando o tempo transitório passa. O cálculo do transiente completo também está incluído no processo para garantir que o sistema atingiu o modo estacionário [H. W. Dommel]. Portanto, este método foi sugerido apenas para sistemas onde o período transitório dura apenas alguns ciclos.

2.4.2.2 Soluções rápidas periódicas em estado estacionário

Para reduzir os esforços computacionais no método BF, um método baseado em iteração de Newton é proposto para obter a solução periódica do estado estacionário sem a necessidade de calcular o período transitório completo [T. J. Aprille].

2.4.3 Híbrido

Nos métodos híbridos, os componentes da rede de energia, como linhas de transmissão e transformadores e cargas invariantes da rede, são modelados no domínio da frequência. O domínio do tempo é utilizado para representar componentes não lineares e variantes no tempo (normalmente fontes harmônicas). O método iterativo é utilizado para obter as tensões harmônicas em nós com componentes não lineares [A. Semlyen].

Dependendo do objectivo da análise harmônica e do nível de precisão exigido, qualquer um dos métodos mencionados acima pode ser utilizado. Os métodos no domínio da

frequência são numericamente robustos, simples e precisos para dispositivos operando na região linear. No entanto, estes métodos apresentam algumas limitações na modelagem de dispositivos não lineares com função de realimentação, como conversores e filtros activos. Métodos no domínio da frequência são comumente usados para estudos de contribuição harmônica, investigando as frequências ressonantes na rede, avaliação da classificação do filtro e estudos de propagação harmônica que lidam com soma e cancelamento harmônico.

Os métodos no domínio do tempo podem modelar com precisão as características não lineares e variáveis no tempo de fontes harmônicas, como sistema de controle do conversor, saturação do transformador e instabilidades harmônicas. No entanto, o alto esforço computacional e o tempo de inicialização lento antes de atingir o modo estacionário estão entre os principais encargos que limitam a aplicação de métodos no domínio do tempo.

Embora um método híbrido combine a eficiência do método no domínio da frequência e a habilidade do domínio do tempo em lidar com a não linearidade, devido a algumas dificuldades na implementação dos modelos, ele não tem sido comumente utilizado na indústria e sua aplicação é limitada à academia.

Além de seleccionar um método de análise harmônica adequado, a consideração adequada do modelo de rede também é um dos principais desafios.

Qual parte da rede precisa ser incluída detalhadamente no modelo e qual parte pode ser apresentada usando um modelo agregado, faz parte desses desafios. O modelo deve ser desenvolvido considerando o equilíbrio entre a disponibilidade dos dados de entrada do modelo e os esforços computacionais de um lado e a precisão e resolução exigidas do outro lado.

2.5 Indicadores essenciais da distorção harmónica

A existência de indicadores permite quantificar e avaliar a distorção harmônica das ondas tensão e corrente. São eles:

- ❖ Factor de potência
- ❖ Espectro de frequências
- ❖ Taxa de distorção harmônica

"Estes indicadores são indispensáveis para a determinação de ações corretivas necessário" (Harper, 2002)

2.5.1 Fator de potência

O factor de potência é definido como a razão entre a potência activa (P) e a potência aparente (S) (Harper, 2002)

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{P_1 + P_h}{S} \quad 2$$

Na área eléctrica, o factor de potência é muitas vezes confundido com o cosseno fi ($\cos \varphi$), cuja definição é:

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{S_1} \quad 3$$

Onde:

P= potência activa [W}

P1=potência activa da fundamental [W]

Ph=potência activa da componente harmónicas [W]

S=potência aparente [VA]

S1= potência aparente da fundamental [VA]

Portanto, o ($\cos \varphi$) refere-se apenas à frequência fundamental e na presença de harmónicos é diferente do factor de potência (FP) (Harper, 2002)

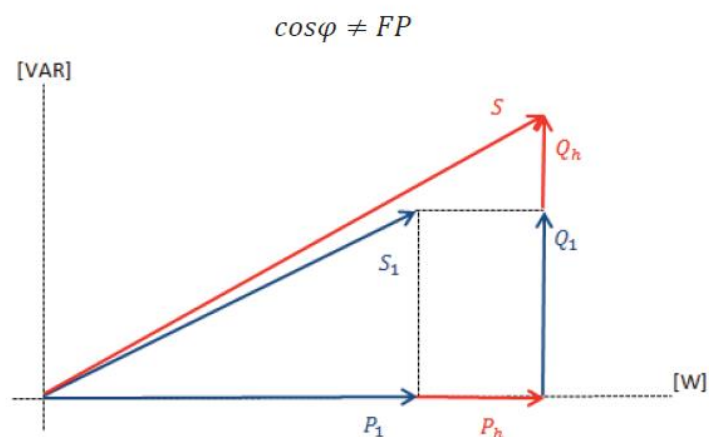


Figura 11: triângulo de potências de componentes harmónicas

Fonte: (Harper, 2002)

Onde:

$$FP = \cos \varphi \times FP_{Dist} \quad 4$$

$$FP_{Dist} = \frac{1}{\sqrt{(1^2 + THDi^2)}} \quad 5$$

Substituindo (5) em (4) obtemos que o factor de potência na presença de componentes harmônicos é:

$$FP = \cos \varphi \times FP_{Dist} = \cos \varphi \times \frac{1}{\sqrt{(1^2 + THDi^2)}} \quad 6$$

POTÊNCIA ACTIVA (P)

A potência activa P de um sinal distorcido harmônico é a soma das potências activas correspondentes a tensões e correntes da mesma ordem. A decomposição da tensão e intensidade em seus componentes harmônicos pode ser escrita como (Harper, 2002).

$$P = \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \cos \varphi_h \quad 7$$

Onde φ_h é o deslocamento entre a tensão e a intensidade do harmônico de ordem h.

Assume-se que o sinal não contém componentes contínuos. Na ausência de harmônicos, a equação $P = V_1 I_1 \cos \varphi_1$ indica a intensidade do sinal senoidal, onde $\cos \varphi_1$ é igual a (φ) .

Na expressão da equação (7)

P = Potência activa na presença de harmônicos. [W]

V_h = Tensão eficaz harmónica h. [V]

I_h = Corrente eficaz harmónica [A]

φ_h = é o desfasamento entre a tensão harmónica e corrente harmónica [%]

POTÊNCIA REATIVA (Q)

O poder reactivo na presença de harmônicos é dado pela equação geral:

$$Q = \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \sin \varphi_h \quad 8$$

Q = Potência reactiva na presença de harmônicos. [VAR]

V_h = Tensão eficaz harmónica h. [V]

I_h = Corrente eficaz harmónica [A]

φ_h = é o desfasamento entre a tensão harmónica e corrente harmónica [%]

Potência de distorção (D)

Consideramos a potência aparente s:

$$S = V_{rms} \times I_{rms} \quad 9$$

$$S = (\sum_{h=1}^{\infty} V_h^2)^2 \times (\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2)^2 \quad 10$$

Como consequência, na presença de harmônicas a relação $S^2 = P^2 + Q^2$ não é válida, se define a potência de distorção D de tal forma que:

$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2$, desta maneira se define que:

$$D^2 = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} \quad 11$$

D= Potência de distorção [VA]

Q = Potência reactiva. [VAR]

P = Potência activa. [W]

S= potência aparente [VA]

Taxa de Distorção Harmônica

Se a tensão e corrente em uma rede eléctrica estiverem definidos por:

$$v(t) = V \times \cos w_0 t \quad 12$$

$$i(t) = I \times \cos w_0 t \quad 13$$

Respetivamente, mas como em sistemas eléctricos, estes sinais podem ter presença de tensões e correntes harmônicas, então a tensão e corrente são representadas como segue:

$$v(t) = V_1 \times \cos(w_0 t + \theta_1) + V_2 \times \cos(2w_0 t + \theta_2) + V_3 \times \cos(3w_0 t + \theta_3) + \dots + \quad 14$$

$$i(t) = I_1 \times \cos(w_0 t + \theta_1) + I_2 \times \cos(2w_0 t + \theta_2) + I_3 \times \cos(3w_0 t + \theta_3) + \dots + \quad 15$$

Na forma compacta pode ser escrita como:

$$v(t) = \sum_{n=1}^k V_n \times \cos(nw_0 t + \theta_n) \quad 16$$

$$i(t) = \sum_{n=1}^k I_n \times \cos(nw_0 t + \theta_n) \quad 17$$

Onde:

V_n : se define como tensão harmónica de ordem n

I_n :se define como corrente harmónica de ordem n

θ_n :se define como ângulo harmónica de ordem n

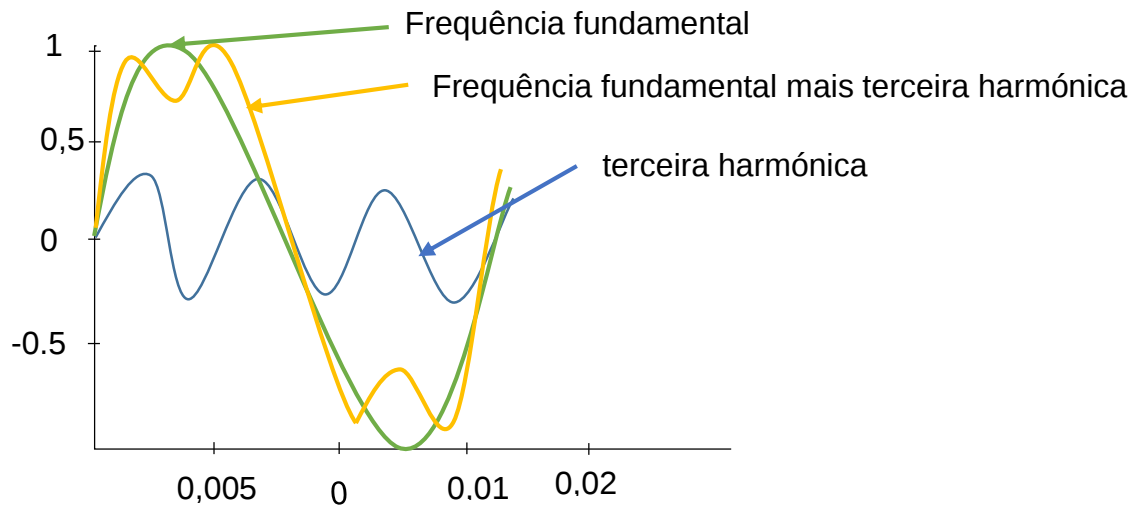


Figura 12: Sinal fundamental mais terceira harmónica

Fonte: adaptado de Harper,2002

Os valores de distorção estão definidos em percentagem (%).

Distorção Harmónica Total

THD corresponde a Distorção Total Harmónica). A taxa de distorção harmónica é utilizada para definir o conteúdo harmónico de um sinal alternado, quando se trata de harmónicos de tensão, a expressão é definida como:

$$THD_V = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots}}{V_1} \times 100\% \quad 18$$

quando se trata de harmónicos de intensidade, a expressão se converte em:

$$THD_I = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots}}{I_1} \times 100\% \quad 19$$

Esta equação é equivalente a mostrada a seguir, a qual é mais direta e fácil de utilizar quando se conhece o valor eficaz total:

$$THD_I = \sqrt{\left(\frac{I_{RMS}}{I_1}\right)^2 - 1} \times 100\% \quad 20$$

2.5.2 Modelagem periódica das harmônicas num intervalo de 24 horas

O conteúdo harmônico nas redes elétricas, apresenta o seu pico em determinados intervalos. No período da tarde por se tratar de um intervalo com muito calor, os aparelhos de ar condicionado e congeladores, solicitam mais corrente devido as condições ambientais em que se submetem. O conteúdo harmônico destes equipamentos, será apresentado no capítulo 3.3.1 na secção sobre harmônicas geradas por cada consumidor. Na dissertação do RANGEL, foi realizada uma sequencia de medições, que resultou a modelagem dos gráficos 13, 14 e 15. Através do gráfico da figura 13, pode-se avaliar o comportamento harmônico de tensão durante todo o processo de medição. De modo geral, o percentual mínimo atingido para as distorções harmônicas totais de tensão foi de 1,5%, já o valor máximo atingido foi de 2,3%.

O valor médio total foi de 1,907% valores estes, os quais mantiveram-se dentro do que determina as leis vigentes com um limite de THDv de até 8% para uma faixa de tensão de até 1KV. Logo, dentro do que é estabelecido segundo as normas nacionais e internacionais (IEEE-519, IEC, ONS).

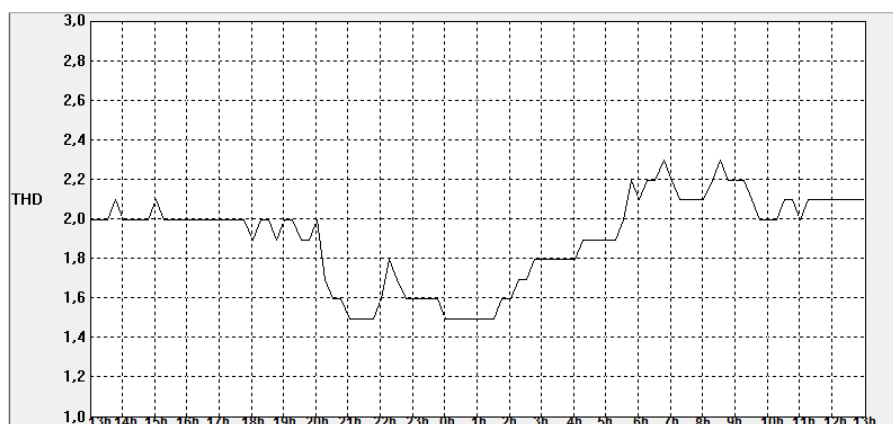


Figura 13 Distorção Harmônica Total de Tensão no período de 24 horas - Inverter.

Fonte: RANGEL

Conforme foi registrado na figura 14, o valor mínimo de THDi durante a análise foi de 53,4% .O valor máximo atingiu 64,7% que é considerado um valor relevante. A média de todo o processo foi de 58,98%. Logo, como visto na tabela 8 o nível de THDi para ar condicionado é de 123%, se tratando de um nível de distorção harmônico total, e sem levar em consideração os harmônicos individuais. Aa existência de harmônicos elevados pode ser indício de variações bruscas de tensão ou corrente.

Um THDi inferior a 10% é considerado normal. Praticamente não há risco de funcionamento atípico nos equipamentos. Já valor de THDi compreendido entre 10% e 50%, revela distorção significativa. Existe o risco de um aumento de temperatura, logo os cabos e fontes precisam ser superdimensionados. Por fim, o nível de THDi acima de 50%, revela uma distorção harmônica importante. O funcionamento anômalo dos equipamentos é provável. Uma análise profunda e um sistema de atenuação serão necessários, como por exemplo a inserção de um filtro ativo de harmônicos.

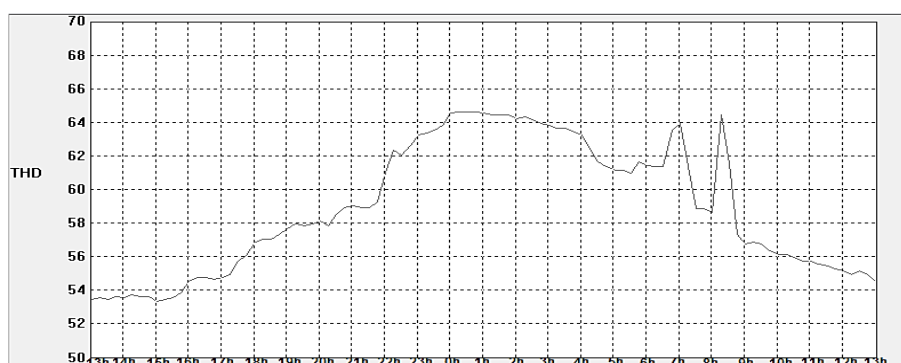


Figura 14 Distorção Harmônica Total de Corrente no período de 24 hora – Inverter.

Fonte: RANGEL

O gráfico da figura 15 mostra a relação entre o FP e o THDi de uma carga qualquer. De acordo com que o percentual de distorção harmônica total de corrente aumenta, a tendência é que o FP obtenha uma redução inversamente proporcional. Logo, conforme o comportamento do condicionador de ar inverter analisado na figura 13 e 14, pode-se afirmar que, tanto o Fator Potência quanto o THDi encontraram-se coerentes com a curva seguinte.

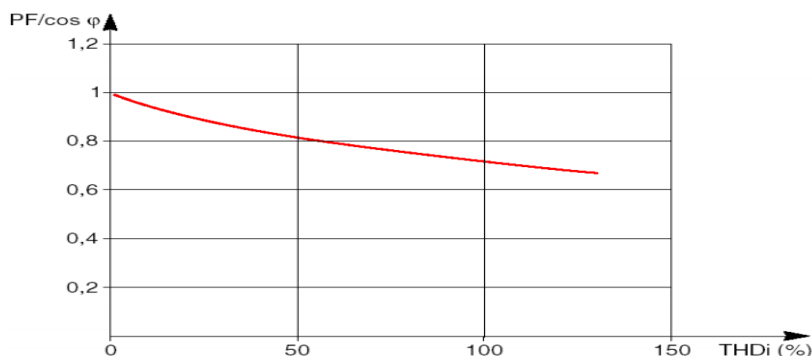


Figura 15 Relação entre o Factor de Potência e a distorção harmônica total de corrente.

Fonte: [S. A. Soliman]

III CAPITULO -Caracterização da rede de distribuição de Kumbeza

O bairro de Kumbeza está inserido na zona da área de serviço ao cliente KA-GUAVA da concessionária EDM, que responde toda extensão do distrito de Marracuene e o bairro Magoanine pertencente geograficamente a cidade de Maputo.

A unidade orgânica ASC KA-GUAVA compreende 4 departamentos:

- 1) Sector Técnico Comercial (SETEC)
- 2) Departamento de Manutenção de redes (DEMAN)
- 3) Departamento de operações(DOP)
- 4) Departamento de Planeamento e Estatística(DEP)

O SETEC (sector técnico comercial) KA-GUAVA é um dos departamentos pertencente a EDM de Marracuene cuja as suas actividades são divididas em dois ramos, em que uma parte dessas actividades são de natureza técnica e outra comercial.

As actividades exercidas a nível técnico são: vistorias, novas ligações, leituras de IP's¹ e grandes consumidores, religações e inspeções. A nível comercial a actividade primordial é o cálculo do débito em situações de clientes fraudulentos para combate as perdas de energia e no incremento das receitas a nível institucional.

O DEMAN tem actividade mais interventiva do que a simples observação do estado das instalações e identificação de anomalias. A manutenção consiste num conjunto de ações de manutenção preventiva e correctiva, passando pela análise da condição dos equipamentos, por inspeção visual e por via de medição da resistência dos eléctrodos de terra, e ainda por diversos conjuntos de ações de análise das condições dos equipamentos eléctricos.

¹ Iluminação pública contabilizada no posto de transformação para controlo de perdas

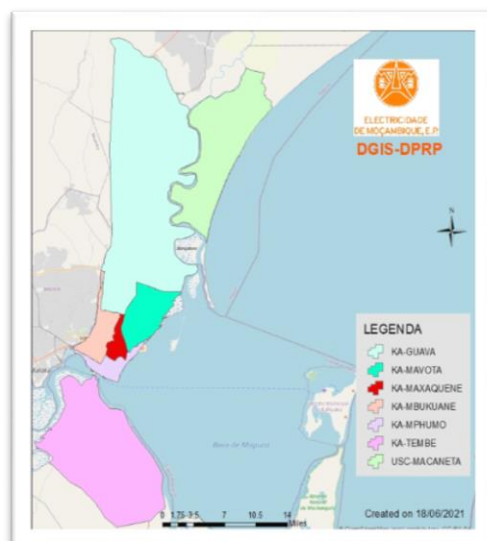


Figura 16: Delimitação da área de serviço ao cliente KA-GUAVA

Fonte: DRCM, EDM

A Área de Serviço ao Cliente de Ka Guava como parte da Direção Regional Da Cidade de Maputo é a mais extensa conforme se visualiza na figura acima e é alimentada a partir de 4 Subestações de Distribuição, conta atualmente com um total de 120,395 Clientes. O bairro Cumbeza é abastecido pela subestação SE10, que possui 6 principais linhas de saídas, linha EL-07, EL-ZIMPETO, EL-10, EL-MALI, EL-Estádio Nacional, EL-CUMBEZA conforme indicado no anexo 4.

3 Descrição do sistema de distribuição de energia eléctrica no bairro de Kumbeza

3.1 Rede de Media tensão

A distribuição de energia eléctrica para as redes de média tensão é realizada por meio de redes aéreas de tipologia anelar a uma tensão alternada de 33 kV, 50 Hz. Estas linhas ligam a Subestação SE10 (Zimpeto) aos Postos de Transformação ou ligam diferentes Postos de Transformação entre si, pelas linhas EL-MALI, EL-Cumbeza e EL-07 feita para descongestionar a linha EL-Cumbeza, com os seguintes carregamentos:

- ❖ EL-MALI tem 47 PT públicos e 26 PT privados
- ❖ EL-Cumbeza contem 45 PT públicos e 23 PT privados
- ❖ EL-07 dispõe de 17 PT públicos e 7 PT privados.

Abaixo é apresentado o quadro descritivo dos postos de transformação alimentados pelas 3 linhas no bairro de Kumbeza:

Tabela 1:Dados dos PT da linha EL-07 em Kumbeza

Nº	Nº PT	Localização	Sn (kVA)	Un (kV)	In (A)	I _{max} (A)	Corte Geral (A)
1	105R	Kumbeza	315	0.40	455	546	500
2	209R	Kumbeza	250	0.40	361	434	400
3	210R	Kumbeza	250	0.40	361	434	400
4	211R	Kumbeza	100	0.40	145	173	250
5	212R	Kumbeza	100	0.40	145	173	400
6	212R	Kumbeza	100	0.40	145	173	401
7	214R	Kumbeza	160	0.40	231	277	400
8	215R	Kumbeza	315	0.40	455	546	400
9	216R	Kumbeza	500	0.40	723	867	400
10	335R	Kumbeza	100	0.40	145	173	630
11	481R	Kumbeza	200	0.40	289	347	250
12	779R	Kumbeza	100	0.40	145	173	160
13	104R	Kumbeza	630	0.40	910	1,092	630
14	702R	Kumbeza	100	0.40	145	173	160
15	107R	Kumbeza	160	0.40	231	277	240
16	651R	Kumbeza	100	0.40	145	173	80
17	797	Kumbeza	100	0.40	145	173	160

Fonte: DEP ASC KA-GUAVA, EDM

Tabela 2: Dados dos PT da linha EL-MALI em Kumbeza

LINHA EL - MALI							
N°	N° PT	Localização	Sn (kVA)	Un (kV)	In (A)	I_{max} (A)	Corte Geral
1	103R	Kumbeza	500	0.40	723	867	630
2	309R	Kumbeza	315	0.40	455	546	400
3	265R	Kumbeza	315	0.40	455	546	400
4	266R	Kumbeza	315	0.40	455	546	500
5	710R	Kumbeza	75	0.40	108	130	160
6	319R	Kumbeza	315	0.40	455	546	500
7	315R	Kumbeza	315	0.40	455	546	400
8	313R	Kumbeza	500	0.40	723	867	630
9	531R	Kumbeza	500	0.40	723	867	630
10	620R	Kumbeza	75	0.40	108	130	125R
11	806R	Kumbeza	75	0.40	108	130	80
12	332R	Kumbeza	315	0.40	455	546	400
13	329R	Kumbeza	200	0.40	289	347	315
14	106R	Kumbeza	250	0.40	361	434	630
15	328R	Kumbeza	200	0.40	289	347	250

Fonte: DEP ASC KA-GUAVA, EDM

Tabela 3: Dados dos PT da linha EL-Cumbeza no bairro Kumbeza

Nº	Nº PT	Localização	Sn (kVA)	Un (kV)	In (A)	I _{max} (A)	Corte Geral (A)
1	82R	Kumbeza	315	0.40	455	546	500
2	16R	Kumbeza	250	0.40	361	434	250
3	31R	Kumbeza	315	0.40	455	546	630
4	83R	Kumbeza	500	0.40	723	867	1030
5	322R	Kumbeza	315	0.40	455	546	630
6	355R	Kumbeza	500	0.40	723	867	800
7	384R	Kumbeza	250	0.40	361	434	400
8	320R	Kumbeza	315	0.40	455	546	630
9	264R	Kumbeza	100	0.40	145	173	160
10	106R	Kumbeza	500	0.40	723	867	630
11	104R	Kumbeza	315	0.40	455	546	400
12	213R	Kumbeza	315	0.40	455	546	500
13	499R	Kumbeza	315	0.40	455	546	400
14	655R	Cumbeza	75	0.40	108	130	160
15	694R	Cumbeza	100	0.40	145	173	160
16	695R	Cumbeza	100	0.40	145	173	160

Fonte: DEP ASC KA-GUAVA, EDM

3.1.1 Ramal em cabo Aéreo

No bairro de Kumbeza utilizam-se cabos nus da tipologia ACSR MINK para alimentar os primários dos PT's em pórtico do tipo M2 tal como disposto na figura abaixo, com transformadores que variam de 100KVA a 500KVA.

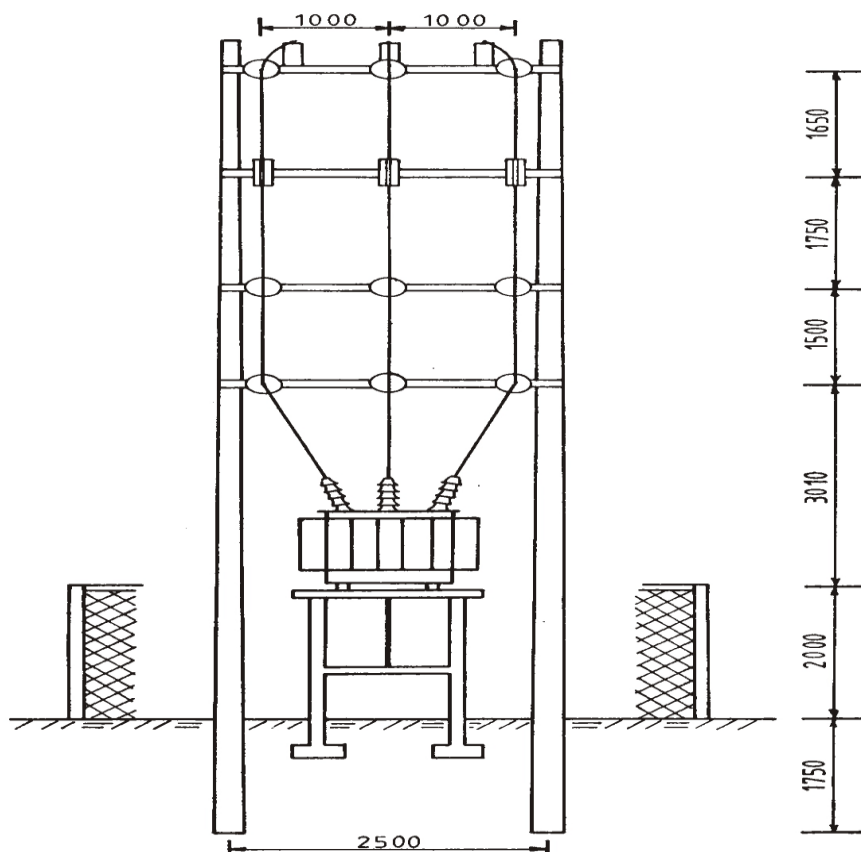


Figura 17: P.T. aéreo em pórtico "M2" - vista frontal

Fonte (EDM 2006)

Os pórticos instalados em Kumbeza são classificados como do tipo M2 por possuírem tamanho ou peso superior a 1200 Kg ou no geral com potência superior a 100 KVA, os quais foram montados sobre bases de alvenaria, situadas entre os postes do pórtico de chegada de média tensão.

3.1.2 Protecção do PT no lado MT

A protecção do lado da media tensão é feita através de Drop-outs da marca AB-CHANCE tensão nominal 35kV, corrente nominal 100A, poder de corte 8kA, tensão de choque de 95kV e uma distância de fuga de 216mm e pára-raios de modelo XBE, de tensão de operação de 36kV e capacidade de 10kA.

3.1.3 Apoios

Os apoios que constituem as redes de MT foram utilizados os apoios de eucalipto creosotado cujo nome é “EUCALYTUS SALIGNA”. Com as seguintes dimensões:

- Altura..... 12,25m
- Diâmetro do topo..... 0,12m

3.2 Rede de Baixa Tensão

As redes de distribuição de baixa tensão, são constituídas por condutores isolados em feixe (torçadas), do tipo LXS. Com um nível de tensão de 0.4 (0.23) kV e 50 Hz da frequência. estas redes são concessão da empresa EDM, e têm como parâmetros eléctricos e ambientais, os referidos no Quadro 1.

Tabela 4: Parâmetros das redes BT da EDM

Tensão nominal: 230/400 V	Corrente de curto-circuito máxima: 25 KA
Nº fases: 3	Tensão estipulada (cabos): 0,6/1kv
Frequência: 50Hz	Tensão máxima a 50Hz (1min): 4kV _{ef}
Temperatura ambiente: -10 a 40°C	Tensão ao choque (+1,2/50µs): 6KV _{crista}
	Regime de neutro: TN

3.2.1 Redes subterrâneas de BT

As redes eléctricas de baixa tensão, do tipo subterrâneo são constituídas por canalizações eléctricas instaladas em rede de tubagem, estabelecendo-se as ligações e derivações a partir de armários de distribuição.

3.2.2 Quedas de tensão:

São calculadas de forma a que a tensão não atinge no início da cada instalação de utilização, um valor inferior a 10% em relação à tensão nominal, recomendando-se os seguintes critérios de cálculo:

- ❖ 5 % na rede distribuição BT e 2 % nas entradas individuais de cada instalação
- ❖ 5 % nas redes de iluminação pública
- ❖ 1,5% nas instalações colectivas, correspondente ao conjunto coluna e entrada

3.2.3 Armários de distribuição

Os armários de distribuição instalados nas redes de baixa tensão da EDM, destinados às interligações de redes, protecção e seccionamento de ramais, obedecem às seguintes características gerais, no que respeita à sua constituição e instalação.

Tabela 5: dimensões dos armários

Tamanh o do armário	Numer o de portas	Dimensões do involucro (mm)					nº max. de circuito s	Secção dos barramentos (mm)		
		largur a	altura		Prof.			fase s	neutr o	Terra *
		Min	Min	Ma x	Mi n	Ma x				
X(DIN 1)	1	760	800	875	290	360	5	40x5	30x5	30x5
Z(DIN 2)	2	1090	112,5	575	290	360	7	60x5	30x5	30x5

Fonte EDM 2006

3.2.4 Transições das redes aéreas para redes subterrâneas

Nas saídas de PTs, armários de distribuição ou nas travessias subterrâneas os cabos transitam de LXS para cabo subterrâneo, normalmente do tipo LXV. Nessas transições, seguem-se as seguintes regras:

- 1) Ligação dos cabos LXS / LXV, por uniões de cravar de alumínio;
- 2) Aplicação de caixa terminal Termo retrátil do cabo LXV;
- 3) Aplicação de manga Termo retrátil, de forma a cobrir o isolamento de cada uma das pontas do cabo LXV expostas, com vista à sua protecção contra os raios UV. A manga é aplicada desde a caixa terminal e cobre a união de alumínio a pelo menos 2 cm dos condutores do cabo de torçada;
- 4) Protecção mecânica do cabo LXV, até 2,5 m do solo e 0,5 m de profundidade, pela instalação de tubo PVC (K10), de diâmetro adequado ao cabo;
- 5) Aplicação de manga Termo retrátil na extremidade superior do tubo, de forma a cobrir pelo menos 5 cm do tubo e 5 cm do cabo, com vista a impedir a entrada de água;
- 6) Fixação do tubo, no poste, através de fita de aço inox;

Os cabos de alumínio, em feixe (torçadas) normalizados pela EDM, são os que constam na tabela abaixo.

Tabela 6 Cabos de torçada com conductor de alumínio

S (mm ²)	R _{20°} (Ω/km)	Z (Ω/km)	I _z (A)	I _s (A)
LXS 2 x 16	1,91	2,19	85	63
LXS 4 x 16	1,91	2,19	75	63
LXS 4 x 25+16	1,20	1,38	100	80
LXS 4 x 35 + 16	0,87	1,05	120	100
LXS 4 x 50 + 16	0,64	0,75	150	125
LXS 4 x 70 + 16	0,44	0,49	190	160
LXS 4 x 70+2 x 16	0,44	0,49	190	160

Fonte EDM 2006

Onde:

S - secção e tipo dos condutores

R - resistência eléctrica, linear, dos condutores a 20 ° C

Z - Impedância linear dos condutores

I_z - corrente máxima admissível nas condições de instalação

I_s - corrente máxima de serviço, idêntica à corrente do fusível de protecção

3.2.5 Sistemas de aterramento

O sistema de aterramento em vigor na EDM é também objecto de análise deste projecto, pois o autor acredita concorrer para a baixa mitigação das harmónicas, visto que é um sistema que propicia o acoplamento capacitivo entre as terras, todavia esta análise será feita com mais detalhes nos capítulos subsequentes. A concessionária EDM usa dois tipos de terras, nomeadamente, terra de serviço (**TS**) e terra de protecção (**TP**), distanciadas em 20m. Os eléctrodos de terra são enterrados verticalmente no solo, a uma profundidade tal que entre a superfície do solo e a parte superior do eléctrodo, haja uma distância mínima de 0,80m de modo que se obtenha a resistência inferior a 20Ω. Os eléctrodos utilizados são de aço galvanizado, cobre ou aço cobreado de Ø20 mm cobreados e com um comprimento não inferior a 2m.

3.2.6 Protecção do PT no lado BT

A protecção do PT, é estabelecido no interior do quadro de distribuição de BT, o qual possui um dispositivo de corte geral de marca SACE, que oferece protecção contra sobreintensidades no lado de baixa tensão e fusíveis com alto poder de corte com as Condições:

$$I_s \leq I_n \leq I_z \quad (21)$$

$$I_f \leq 1,45 \times I_z \quad (22)$$

Onde:

I_s : corrente de serviço da canalização (A);

I_z : corrente máxima admitida no circuito em regime permanente (A);

I_f : corrente de fusão do circuito (A);

I_n : Corrente nominal do dispositivo de protecção(A)

O disjuntor é escolhido segundo a tabela do anexo 1.

A tabela de seleção dos fusíveis está indicada no anexo 2.

3.3 Levantamento de carga do bairro Kumbeza

Tal como descrito nas secções anteriores, o bairro de Kumbeza é alimentado por 3 linhas, e, compreende uma área consideravelmente muito extensa. Como forma de delimitar a zona de estudo, para melhor colheita de dados e análise de dados, nesta secção, serão apresentados os resultados das medições de carga colhidas no período de ponta, na região próximo da portagem de Kumbeza, no PT322R.

Foi feito levantamento das primeiras 10 casas, para se aferir o tipo de carga predominante sendo alimentado pelo PT322R, segundo o anexo 3, tem-se os seguintes dados da tabela 7:

Tabela 7: Levantamento de cargas geradoras de harmônicas

consumidor		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Equipamento											
Lâmpadas Led	unidades	2	5	42	11	2	18	6	2	38	4
	Potência	20	25	210	55	18	90	42	80	190	36
Lâmpadas fluorescentes	unidades	6	4	3	2	2	3	1	4	3	2
	Potência	120	70	45	38	38	60	18	72	108	72
Geleira	unidades	2	1	2	2	1	2	1	1	2	1
	Potência	16	80	160	140	70	160	65	80	180	80
Ar condicionado	unidades	2	0	3	1	0	1	0	0	2	0
	Potência	800	0	2100	1200	0	1200	0	0	1800	0
microondas	unidades	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0
	Potência	600	0	800	800	0	800	0	700	900	0
computador	unidades	1	0	2	1	0	2	0	0	3	0
	Potência	40	0	120	60	0	120	0	0	170	0
liquidificar	unidades	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0
	Potência	700	0	800	0	0	800	0	0	800	0
Tv plasma	unidades	2	1	3	1	1	2	1	1	2	1
	Potência	110	60	240	70	60	120	55	60	160	60
Ventoinha	unidades	0	1	0	1	1	0	0	1	0	1
	Potência	0	60	0	80	55	0	0	60	0	60
Secador de cabelo	unidades	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0
	Potência	300	0	500	300	0	300	0	300	500	0
Máquina de barbear	unidades	1	0	1	1	0	1	0	0	1	0
	Potência	18	0	22	15	0	20	0	0	20	0
Electric Fence	-	1		1	-	-	1	-	-	-	-
UPS	unidades	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0
	Potência	0	0	3000	0	0	5000	0	0	3500	0

Fonte: O autor

Onde: Potencia (W)

Os valores de potência, foram extraídos na chapa de característica de cada dispositivo, alguns equipamentos de difícil acesso usou-se a ferramenta de reconhecimento de

imagens do motor de busca Google para se ter os dados do fabricante. Desta forma a tabela foi mesclada a partir das ferramentas de recolha de dados do consumidor, onde foi feito o preenchimento da ficha de cargas, tal como indicado no anexo 3.

Tabela 8: Cargas puramente resistivas não geradoras de harmónicas

consumidor		1	2	3	5	5	6	7	8	9	10
Equipamento											
Ferro de engomar	unidades	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1
	Potência	1200	1000	1000	1000	0	1000	0	1000	1000	1000
Lâmpadas incandesc	unidades	0	1	0	0	2	0	1	0	0	1
	Potência	0	60	0	0	120	0	100	0	0	60
Chaleira eléctrica	unidades	1	0	1	1	0	1	0	0	1	0
	Potência	1800	0	1200	1200	0	1200	0	0	1800	0
Termo acumulado r eléctrico	unidades	1	0	11	0	0	0	0	0	1	0
	Potência	1800	0	1200	0	0	0	0	0	1800	0

Fonte: O autor

3.3.1 Harmónicas geradas por cada consumidor

Nesta secção, através das características dos equipamentos residenciais utilizados pelos utentes, foi possível obter as harmónicas produzidas por estes aparelhos com base nos instrumentos literários referenciados na norma internacional IEEE-519 bem como da revisão bibliográfica feita no capítulo 2.

Consumidor 1

Tabela 9:Harmónicas geradas pelo consumidor 1

	Harmónicas					
equipamento	3	5	7	9	11	13
Lâmpadas Led	50%	15%	5%	12%	10%	5%
Lâmpadas fluorescentes	70%	65%	58%	25%	18%	10%
Geleira	6.7%	3.6%	1.04%	0.44%	0%	0%
Ar condicionado	12%	1.61%	0.73%	0.83%	0%	0%
microondas	27.14%	4.79%	4.84%	1.75%	1.68%	0%
computador	85%	75%	65%	35%	10%	0
liquidificador	14.52%	8.78%	0.98%	0%	0%	0%
Tv plasma	85%	75%	65%	35%	10%	0
Ventoinha	0%	50%	25%	0%	12.5%	7%
Secador de cabelo	0%	50%	25%	0%	12.5%	7%
Máquina de barbear	0%	35%	19%	0%	15%	8%
Electric fence	0%	40%	15%	0%	20%	10%
UPS	0%	35%	18%	0%	10%	8%

Fonte: O autor

As harmónicas mais predominantes e objecto de estudo deste relactório, são as de ordem 3,5,7,9,11 e 13.

Consumidor 2

Tabela 10: Harmónicas geradas pelo consumidor 2

	Harmónicas					
equipamento	3	5	7	9	11	13
Lâmpadas Led	50%	15%	5%	12%	10%	5%
Lâmpadas fluorescentes	70%	65%	58%	25%	18%	10%
Geleira	6.7	3.6	1.04	0.44	0	0
Tv plasma	85%	75%	65%	35%	10%	0
Ventoinha	0%	50%	25%	0%	12.5%	7%

Fonte: O autor

Consumidor 3

Tabela 11: Harmônicas geradas pelo consumidor 3

equipamento	Harmônicas					
	3	5	7	9	11	13
Lâmpadas Led	50%	15%	5%	12%	10%	5%
Lâmpadas fluorescentes	70%	65%	58%	25%	18%	10%
Geleira	6.7%	3.6%	1.04%	0.44%	0%	0%
Ar condicionado	12%	1.61%	0.73%	0.83%	0%	0%
microondas	27.14%	4.79%	4.84%	1.75%	1.68%	0%
computador	85%	75%	65%	35%	10%	0
liquidificador	14.52%	8.78%	0.98%	0%	0%	0%
Tv plasma	85%	75%	65%	35%	10%	0%
Secador de cabelo	0%	50%	25%	0%	12.5%	7%
Máquina de barbear	0%	35%	19%	0%	15%	8%
Electric fence	0%	40%	15%	0%	20%	10%
UPS	0%	35%	18%	0%	10%	8%

Fonte: O autor

Consumidor 4

Tabela 12: harmônicas geradas pelo consumidor 4

equipamento	Harmônicas					
	3	5	7	9	11	13
Lâmpadas Led	50%	15%	5%	12%	10%	5%
Lâmpadas fluorescentes	70%	65%	58%	25%	18%	10%
Geleira	6.7%	3.6%	1.04%	0.44%	0%	0%
Ar condicionado	12%	1.61%	0.73%	0.83%	0%	0%
microondas	27.14%	4.79%	4.84%	1.75%	1.68%	0%
computador	85%	75%	65%	35%	10%	0%
Tv plasma	85%	75%	65%	35%	10%	0%
Ventoinha	0%	50%	25%	0%	12.5%	7%
Secador de cabelo	0%	50%	25%	0%	12.5%	7%
Máquina de barbear	0%	35%	19%	0%	15%	8%

Fonte: O autor

Consumidor 5

Tabela 13: harmônicas geradas pelo consumidor 5

equipamento	Harmônicas					
	3	5	7	9	11	13
Lâmpadas Led	50%	15%	5%	12%	10%	5%
Lâmpadas fluorescentes	70%	65%	58%	25%	18%	10%
Geleira	6.7%	3.6%	1.04%	0.44%	0%	0%
Tv plasma	85%	75%	65%	35%	10%	0%
Ventoinha	0%	50%	25%	0%	12.5%	7%

Fonte: O autor

Consumidor 6

Tabela 14: Harmônicas geradas pelo consumidor 6

equipamento	Harmônicas					
	3	5	7	9	11	13
Lâmpadas Led	50%	15%	5%	12%	10%	5%
Lâmpadas fluorescentes	70%	65%	58%	25%	18%	10%
Geleira	6.7%	3.6%	1.04%	0.44%	0%	0%
Ar condicionado	12%	1.61%	0.73%	0.83%	0%	0%
microondas	27.14%	4.79%	4.84%	1.75%	1.68%	0%
computador	85%	75%	65%	35%	10%	0%
liquidificador	14.52%	8.78%	0.98%	0%	0%	0%
Tv plasma	85%	75%	65%	35%	10%	0%
Secador de cabelo	0%	50%	25%	0%	12.5%	7%
Máquina de barbear	0%	35%	19%	0%	15%	8%
Electric fence	0%	40%	15%	0%	20%	10%
UPS	0%	35%	18%	0%	10%	8%

Fonte: O autor

Consumidor 7

Tabela 15: Harmônicas geradas pelo consumidor 7

equipamento	Harmônicas					
	3	5	7	9	11	13
Lâmpadas Led	50%	15%	5%	12%	10%	5%
Lâmpadas fluorescentes	70%	65%	58%	25%	18%	10%
Geleira	6.7%	3.6%	1.04%	0.44%	0%	0%
Tv plasma	85%	75%	65%	35%	10%	0%

Fonte: O autor

Consumidor 8

Tabela 16: Harmônicas geradas pelo consumidor 8

equipamento	Harmônicas					
	3	5	7	9	11	13
Lâmpadas Led	50%	15%	5%	12%	10%	5%
Lâmpadas fluorescentes	70%	65%	58%	25%	18%	10%
Geleira	6.7%	3.6%	1.04%	0.44%	0%	0%
microondas	27.14%	4.79%	4.84%	1.75%	1.68%	0%
Tv plasma	85%	75%	65%	35%	10%	0
Ventoinha	0%	50%	25%	0%	12.5%	7%
Secador de cabelo	0%	50%	25%	0%	12.5%	7%

Fonte: O autor

Consumidor 9

Tabela 17: Harmônicas geradas pelo consumidor 9

equipamento	Harmônicas					
	3	5	7	9	11	13
Lâmpadas Led	50%	15%	5%	12%	10%	5%
Lâmpadas fluorescentes	70%	65%	58%	25%	18%	10%
Geleira	6.7%	3.6%	1.04%	0.44%	0%	0%
Ar condicionado	12%	1.61%	0.73%	0.83%	0%	0%
microondas	27.14%	4.79%	4.84%	1.75%	1.68%	0%

computador	85%	75%	65%	35%	10%	0
liquidificador	14.52%	8.78%	0.98%	0%	0%	0%
Tv plasma	85%	75%	65%	35%	10%	0
Secador de cabelo	0%	50%	25%	0%	12.5%	7%
Máquina de barbear	0%	35%	19%	0%	15%	8%
Electric fence	0%	40%	15%	0%	20%	10%
UPS	0%	35%	18%	0%	10%	8%

Fonte: O autor

Consumidor 10

Tabela 18: Harmônicas geradas pelo consumidor 10

equipamento	Harmônicas					
	3	5	7	9	11	13
Lâmpadas Led	50%	15%	5%	12%	10%	5%
Lâmpadas fluorescentes	70%	65%	58%	25%	18%	10%
Geleira	6.7%	3.6%	1.04%	0.44%	0%	0%
Tv plasma	85%	75%	65%	35%	10%	0%
Ventoinha	0%	50%	25%	0%	12.5%	7%

Fonte: O autor

As lâmpadas fluorescentes maioritariamente usadas pelos consumidores, tem as potências abaixo indica na tabela 19, onde cada potência da lâmpada contem uma dada distorção harmónica.

Tabela 19: THD das lâmpadas usadas pelos consumidores

Harmônicos	Irms = 0,071 A	
	THD _i = 111,21	
	Fator de crista = 4,11	
	Módulo (%)	Ângulo (graus)
1	100,00	20,81
3	69,37	-113,07
5	33,40	137,99
7	29,90	62,28
9	33,02	-47,11
11	25,17	-154,91
13	21,10	111,33

Fonte:CHAPMAN, 2001

As distorções harmónicas criadas pelos computadores em alguns consumidores, varia pelas dimensões do monitor e processador. Um dos consumidores usa computador de mesa Pentium 4-3 GHz com monitor 17", desta forma a THD para tensões é de 5,28% e THD para correntes é 94,42% (IGOR 2006).

Os consumidores com Laptop, injectam distorções na taxa de THD 3.04% para tensões e 10% correntes para um laptop de 15 polegadas.

Tabela 20: taxa de distorção harmónica de geleira e congeladores

Harmônicos	$I_{rms} = 2,120 \text{ A}$	
	$THD_i = 8,01\%$	
	Fator de crista = 1,01	
	Módulo (%)	Ângulo (graus)
1	100,00	-45,72
2	2,07	-98,18
3	6,72	48,71
5	3,60	110,91
7	1,04	7,99
9	0,44	72,55

Fonte: Santilio et al

A taxa de distorção para aparelhos de ar condicionado, depende do modo em que o consumidor coloca a funcionar, se estiver no modo resfriar a taxa é relativamente maior que no modo ventilar, tal como se pode verificar abaixo.

Tabela 21: Taxa de distorção harmónica nos modos resfriar e ventilar

Harmônicos	Resfriar		Ventilar	
	$I_{rms} = 9,856 \text{ A}$		$I_{rms} = 0,967 \text{ A}$	
	$THD_i = 17,31\%$		$THD_i = 7,87\%$	
	Fator de crista = 1,43		Fator de crista = 1,04	
	Módulo (%)	Ângulo (graus)	Módulo (%)	Ângulo (graus)
1	100,00	-2,38	100,00	15,80
2	12,50	125,33	0,14	51,20
3	12,00	104,03	7,50	116,20
5	1,61	-163,86	2,90	-147,02
7	0,73	138,83	0,82	-75,43
9	0,83	113,51	0,25	65,31

Fonte: IGOR 2006.

3.3.1.1 Limites para emissão dos harmónicos

Destaques dos consumidores que injetam demasiada THD

das tabelas 9 a 18 é possível fazer balanço dos consumidores com mais equipamentos que criam harmónicas, destaca-se os seguintes: consumidor 1, 3, 4, 6 e 9. Para se

comparar as distorções, usou-se os limites recomendados na norma IEEE 519 da tabela 22 e dos anexos 6 que delimita Limites de harmônicos individuais em sistema públicos de baixa tensão (240V e 415V), bem como do anexo 8 que delinea os valores limites de harmônicos de corrente, esta norma internacional IEC 61000-3-2 (1995) tem por objectivo impor limites para a emissão de harmônicos que consumam até 16A por fase, conectado a uma rede pública de baixa tensão. Os equipamentos são classificados em 4 classes, segundo a norma IEC 61000-2-3 e com as devidas classificações dos equipamentos descritas anexo 7.

Segundo a norma internacional IEEE-519, Controle de harmônicas no sistema eléctrico de potência (2014), que veio para tratar dos principais efeitos causadores de distorção harmônica, além de indicar métodos de medição e aplicar limites de distorção abaixo.

Tabela 22 Limites de Distorção de Tensão segundo a norma internacional IEEE-519

Faixa de Tensão	Distorção individual por harmônico (%)	THDv (%)
Até 1 KV	5%	8%
1 KV < V < 69 KV	3%	5%
69 KV < V < 161 KV	1.5%	2.5%
161 KV < V	1%	1.5%

Fonte: Norma internacional IEEE-519

IV CAPITULO

4 Conclusões

Apos o estudo realizado, foi possível constatar que os utentes da rede eléctrica usam predominantemente equipamentos com alto conteúdo harmónico, com destaque os equipamentos de climatização e refrigeração, lâmpadas fluorescentes, computadores e equipamentos de son.

Verificou-se também o fraco cumprimento das normas vigentes, no que concerne a presença da terra de serviço e de protecção na instalação eléctrica, dos consumidores analisados, apenas um é que dispõe dos sistemas de terras segundo recomendam as normas. O excessivo uso de cargas não lineares aliada a falta de terras e equipontecialização das terras, cria ressonâncias na rede e este distúrbio criado por um dado consumidor, propaga na rede, com mais índice nos clientes ligados no mesmo ponto de conexão ou barramento.

A presença do conteúdo harmónico criado pelos equipamentos dos utentes, criam consequências das distorções reflectidas ao FP total, com a adição de harmónicos, chega-se a uma certa distorção de corrente, tendo por consequência um acréscimo de corrente no valor eficaz e uma diminuição no factor de potência. Com elevado conteúdo harmónico propiciou o desgaste do armário do PT 322R em estudo, onde os barramentos se encontram super aquecidos, os fusíveis com mau aspecto visual devido a deterioração das bases do fusível e do cartucho, da mesma forma o conductor do neutro apresenta perda de isolamento e desgaste do conductor.

Contudo, entre o cliente e a concessionaria foi proposto no presente relatório uma especificação clara dos limites harmónicos na forma de um contracto, para resolver ou mitigar problemas de conteúdo harmónico. O cliente recebe a tensão dentro dos limites harmónicos máximos permitidos ou a injeção de corrente harmónica máxima permitida em diferentes frequências harmónicas. Uma vez que cada cliente receberá um limite especificado de distorção de corrente, medições podem ser feitas para determinar se o cliente está dentro do limite harmónico fornecido, e o cliente específico pode ser notificado por escrito para solucionar o problema se o limite harmónico é excedido ou pagar uma multa conforme estabelecido no contracto.

V CAPITULO

5 Recomendações para mitigação dos problemas

5.1 Recomendação 1-Monitoramento harmónico

Actualmente os sistemas de distribuição de energia eléctrica da EDM, não dispõe de políticas de controlo e monitoramento das distorções harmônicas. O autor propõe a adopção de novas metodologias contratuais entre o cliente e a EDM, para que as harmónicas sejam monitoradas com precisão na detecção de fontes harmônicas entre a concessionária e os clientes. O sistema de monitoramento harmônico poderá ser desenvolvido através de um fluxograma que descreve todos os procedimentos a serem seguidos pelas concessionárias durante a fase de planeamento ou elaboração do contracto da EDM com o cliente, com base nas normas internacionais que especificam limites harmônicos. A baixo é apresentado os procedimentos proposto para os futuros contractos:

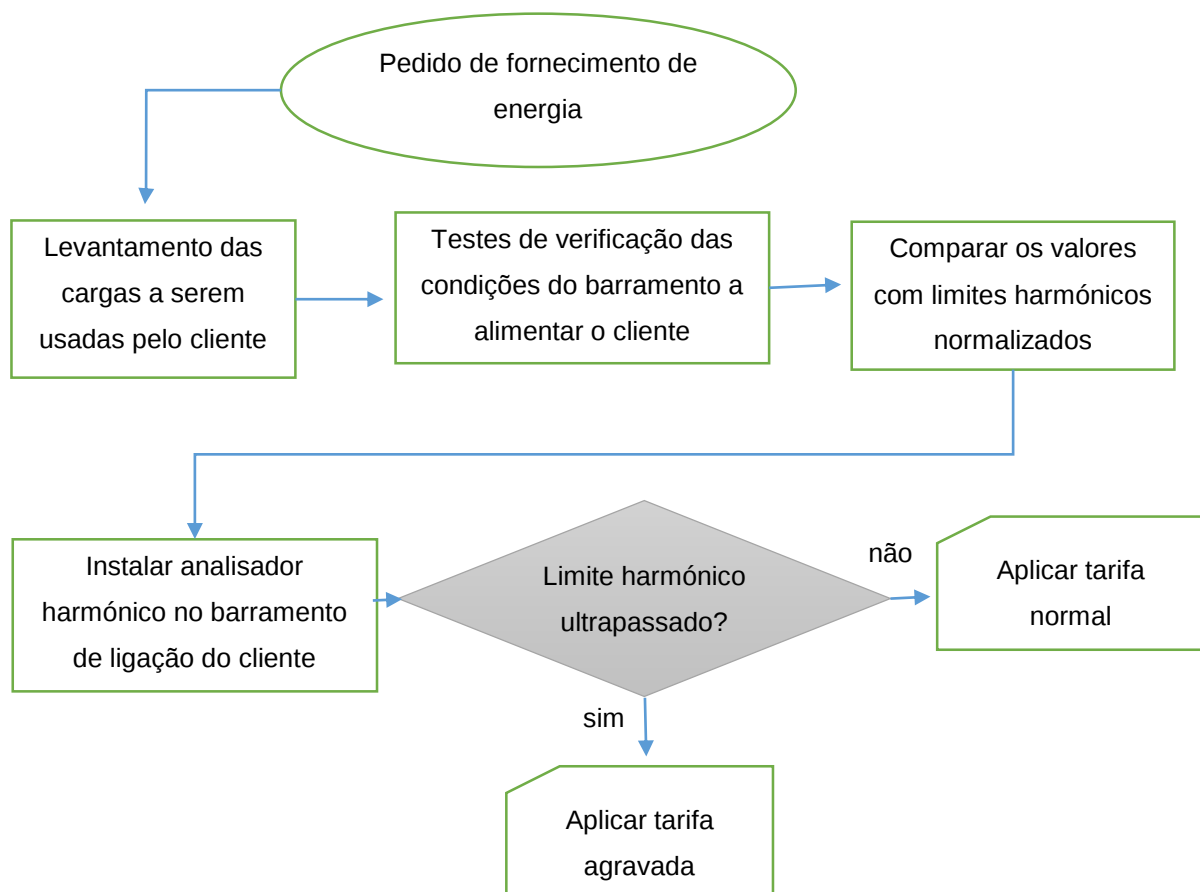


Figura 18: Fluxograma de celebração de contracto com limite harmónico

Fonte: o autor

Esta medida vai sensibilizar o cliente a racionalizar o uso dos equipamentos que produzem harmónicas, em simultâneo, para evitar com que o analisador harmónico dispare ou marque violação do termo contractual por exceder o limite harmónico.

No levantamento das cargas do cliente, deverá se tornar um requisito estritamente a se controlar, para se ter com precisão os tipos de cargas que fazem parte da planta do consumidor. Se esta informação não fizer parte do pedido de contrato, a concessionária deverá indeferir o documento pois a análise deveria ser abrangente para se obter um limite harmónico especificado com precisão.

5.2 Recomendação 2-Mitigação de ressonâncias por equipotencialização das terras

O sistema de terras equipotencializados, elimina os ruídos² nos equipamentos electrónicos, do contrário, em sistemas com alto conteúdo reactivo, ocorre um acoplamento capacitivo entre os eléctrodos ou sistema de terras.

No anexo 11, está ilustrado um edifício predial onde se fez a equipotencialização das terras de protecção e de serviço através da malha da estrutura da obra civil do edifício, localizado em Kumbeza. Uma vez que a carga predominante é equipamento de som e lâmpadas fluorescentes, adoptou-se esta técnica para se ter o mesmo referencial e desta maneira se evitar o ruído.

Este sistema que se recomenda nesta secção, visa também elucidar sobre a importância de fazer os aterramentos, uma pratica incomum nas instalações residências do bairro Kumbeza, tal como mostra a ficha de anomalias do anexo 9.

5.3 Recomendação 3- Instalação de filtros harmónicos

Os problemas que envolvem flutuações de tensão e frequência bem como presença de harmónicos, podem ser solucionados com a instalação de filtros harmónicos no lado mais próximo da carga ou ainda no barramento aéreo de ponto de conexão comum, onde ligam-se as baixadas dos clientes da EDM. Pode-se ainda montar estes filtros no armário dos postos de transformação, em cada saída de modo a se melhorar a qualidade de potência.

Ao usar o filtro de potência activo (APF) adequado, os problemas de PQ (qualidade de potência), incluindo a distorção das formas de onda de corrente e tensão (harmónicos)

² Ruído em electrónica, é toda perturbação da onda do sinal, que pode modificar a qualidade de imagem, som e processamento dos sinais analógicos e digitais.

atribuíveis às fontes criadoras de harmónicas, podem ser reduzidos. Actualmente no mercado, os APFs (Filtro activo de potência) mais populares sejam D-STATCOM, UPQC, DVR). O D-STATCOM é essencialmente um APF shunt enquanto o DVR é um APF em série. O UPQC é uma combinação de D-STATCOM e DVR.

O UPQC possui em sua estrutura um filtro de potência activa série (APFse) e um filtro de potência activa shunt (APFsh) para ajuste simultâneo de tensão de alimentação e problemas de corrente final de carga na rede. O APFse fornece uma tensão, V_{se} , em série com a tensão de alimentação de forma que a tensão não seja afectada por perturbações, enquanto o APFsh fornece uma corrente que reduz os harmónicos da corrente de carga, tal como pode se ver no anexo 10. no mercado existe filtros digitais modernos que realizam com as seguintes características:

- Capacidade unitária de filtração para correntes de 30 A por fase e de 90 A por neutro.
- São necessárias maiores capacidades de filtração, o sistema pode ser ampliado com até 100 filtros activos AFQevo conectados em paralelo.
- Reduzida envolvente metálica para a montagem. Facilidade na instalação por dimensões.
- Comunicações para uma melhor gestão energética da instalação.
- Ligação do lado da rede ou da carga para uma maior flexibilidade de instalação.
- Ajuste de prioridade para filtrar harmónicos, compensação reactiva e equilibrar fases.
- Redução das correntes harmónicas até à ordem 50 (2500 Hz).
- Filtração selectiva de determinados harmónicos. Compensação de potência reactiva (indutiva/capacitativa).
- Equilíbrio das correntes de fase. O modelo 4W ajuda à redução do consumo em neutro.



Figura 19: AFQevo Filtro activo Multifuncional

Fonte: Circutor

As funções que mais facilitam a colocação em funcionamento são realizadas em 3 passos: conectar, configurar, arrancar. O display é tátil para uma gestão rápida, possui um sistema de alarmes como erro de configuração, polaridade, temperaturas, ressonância, tensões, sobrecarga.

6 Referências bibliográficas

- [1]. A. Bonner et al., “Modeling and simulation of the propagation of harmonics in electric power networks. Part I: Concepts, models, and simulation techniques,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 11, no. 1, pp. 452–460, 1996, doi: 10.1109/61.484130.
- [2]. A. Medina et al., “Harmonic analysis in frequency and time domain,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 28, no. 3, pp. 1813–1821, 2013, doi: 10.1109/TPWRD.2013.2258688.
- [3]. A. Romero, H. C. Zini, G. Rattá, and R. Dib, “Harmonic load-flow approach based on the possibility theory,” *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 5, no. 4, pp. 393–404, Apr. 2011, doi: 10.1049/iet-gtd.2010.0361.
- [4]. A. S. Koch, J. M. A. Myrzik, T. Wiesner, and L. Jendernalik, “Evaluation and validation of Norton approaches for nonlinear harmonic models,” 2013, doi: 10.1109/PTC.2013.6652270.
- [5]. A. Semlyen and A. Medina, “Computation of the periodic steady state in systems with nonlinear components using a hybrid time and frequency domain methodology,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 10, no. 3, pp. 1498–1504, 1995, doi: 10.1109/59.466497.
- [6]. BOLLEN; GU, 2006), (DUGAN; MCGRANAGHAN; BEATY, 1996).
- [7]. C. F. M. Almeida and N. Kagan, “Harmonic coupled norton equivalent model for modeling harmonic-producing loads,” 2010, doi: 10.1109/ICHQP.2010.5625491.
- [8]. CHAPMAN, D. (2001). *Armonicos causas y efectos*. España: cooper.
- [9]. Cigre C4/B4 technical brochure: Network modelling for harmonic studies,” 2019.
- [10]. CIRCUTOR. (1989). *Guia de Calidad de Energia Electrica*. España: Omega.
- [11]. D. Salles, C. Jiang, W. Xu, W. Freitas, and H. E. Mazin, “Assessing the collective harmonic impact of modern residential loads-part I: Methodology,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 27, no. 4, pp. 1937–1946, 2012, doi: 10.1109/TPWRD.2012.2207132.
- [12]. D. Xia and G. T. Heydt, “Harmonic Power Flow Studies, Part I-Formulation and solution,” *IEEE Power Eng. Rev.*, vol. PER-2, no. 6, p. 17, 1982, doi: 10.1109/MPER.1982.5520965.
- [13]. DUGAN, R. C. et al., *Electrical Power Systems Quality*, second edition, McGraw-Hill, 2000.
- [14]. Gerência de Especialistas em Sistemas Elétricos de Potência – Classificação dos Equipamentos Quanto à Norma IEC 61000 -2-3. Universidade Federal de Viçosa - MG (Gesep-UFV).

- [15]. Gerência de Especialistas em Sistemas Elétricos de Potência – Limites de Harmônicas de Corrente. Universidade Federal de Viçosa - MG (Gesep-UFV).
- [16]. H.Moghadam, F. Ackermann, and S. Rogalla, "Improving the summation law for harmonic current emissions of parallel operated pv inverters by considering equivalent grid impedance," *Renew. Energy Power Qual. J.*, vol. 1, no. 15, pp. 371–376, Apr. 2017, doi: 10.24084/repqj15.325.
- [17]. IEEE-519 – Limites de Distorção de Tensão Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power System, 2014.
- [18]. J.E. Caicedo, A. A. Romero, and H. C. Zini, "Assessment of the harmonic distortion in residential distribution networks: literature review," *Ing. e Investig.*, vol. 37, no. 3, pp. 72–84, Dec. 2017, doi: 10.15446/ing.investig.v37n3.64913.
- [19]. J.H. Teng and C. Y. Chang, "Backward/forward sweep-based harmonic analysis method for distribution systems," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 22, no. 3, pp. 1665–1672, 2007, doi: 10.1109/TPWRD.2007.899523.
- [20]. LEONARDO-ENERGY – Procobre, 2018 - Relação entre Harmônicos de Corrente e o Fator de Potência – Medição de Harmônicas - Capítulo 2. Disponível em <www.leonardo-energy.org.br> Acessado em 25 de Fevereiro 2019.
- [21]. P.Li, S. Tao, L. Yao, Y. Qian, and S. Jian, "An assessment method of power system harmonic impedance based on mixed total least squares," *Asia-Pacific Power Energy Eng. Conf. APPEEC*, vol. 2016-December, pp. 1694–1698, Dec. 2016, doi: 10.1109/APPEEC.2016.7779839.
- [22]. Q.Shu, Y. Wu, F. Xu, and H. Zheng, "Estimate Utility Harmonic Impedance via the Correlation of Harmonic Measurements in Different Time Intervals," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 35, no. 4, pp. 2060–2067, Aug. 2020, doi: 10.1109/TPWRD.2019.2960415.
- [23]. S.A. Soliman and R. A. Alammari, "Harmonic modeling of linear and nonlinear loads based on Kalman filtering algorithm," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 72, no. 2, pp. 147– 155, Dec. 2004, doi: 10.1016/j.epsr.2004.03.012.
- [24]. S.A. Soliman, N. H. Abbasy, and M. E. El-Hawary, "Frequency domain modelling and identification of nonlinear loads using a least error squares algorithm," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 40, no. 1, pp. 1–6, Jan. 1997, doi: 10.1016/s0378-7796(96)01123-6.

- [25]. S.Sudha Letha, A. E. Delgado, S. K. Rönnerberg, and M. H. J. Bollen, "Evaluation of Medium Voltage Network for Propagation of Supraharmonics Resonance," *Energies*, vol. 14, no. 4, p. 1093, Feb. 2021, doi: 10.3390/en14041093.
- [26]. T.Busatto, V. Ravindran, A. Larsson, S. K. Rönnerberg, M. H. J. Bollen, and J. Meyer, "Deviations between the commonly-used model and measurements of harmonic distortion in low-voltage installations," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 180, p. 106166, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.epsr.2019.106166.
- [27]. T.J. Aprille and T. N. Trick, "A Computer Algorithm to Determine the Steady-State Response of Nonlinear Oscillators," *IEEE Trans. Circuit Theory*, vol. 19, no. 4, pp. 354– 360, 1972, doi: 10.1109/TCT.1972.1083500.
- [28]. W.Xu, J. R. Marti, and H. W. Dommel, "A Multiphase Harmonic Load Flow Solution Technique," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 6, no. 1, pp. 174–182, 1991, doi: 10.1109/59.131060.
- [29]. Y. Sun, G. Zhang, W. Xu, and J. G. Mayordomo, "A harmonically coupled admittance matrix model for AC/DC converters," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 22, no. 4, pp. 1574– 1582, Nov. 2007, doi: 10.1109/TPWRS.2007.907514.
- [30]. Z.Y. Dong, A. Borghetti, K. Yamashita, A. Gaikwad, P. Pourbeik, and J. Milanović, "CIGRE WG C4.605 Recommendations on Measurement Based and Component Based Load Modelling Practice.," 2012.

ANEXOS

Anexo 1 selecção do disjuntor SACE

Tabela A1-1 selecção do disjuntor SACE

Potencia transformador (KVA)	Corrente secundaria (A)	Tipo disjuntor "Sace"	Tipo relé	Observações
30	43,3	SN-125	R-50	`
50	72,2	SN-125	R-80	`
100	144,3	SN-250	R-200	`
160	230,9	SN-250	R-250	`
200	288,9	SN-400	R-400	deve ser regulado
250	360,8	SN-400	R-400	`
315	454,7	SN-630	R-630	`

fonte:EDM 2006 manual PTs

Anexo 2- Selecção dos fusíveis NH

Tabela A2-2 selecção dos fusíveis NH

Secção cabo NYBY mm2	Corrente admissível (A)	Calibre fusível (A)	Corrente não fusão (A)	Correspondencia com linhas aereas
4x6	43	25	45	`
4x10	60	35	59	`
4x16	80	50	77	<i>GNAT</i>
3x25+16	106	63	100	<i>LADY BIRD</i>
3x35+25	131	80	130	<i>FLY</i>
3x50+35	159	100	170	<i>GRASS HOPER</i>
3x70+50	202	125	200	<i>WASP</i>
3x90+50	244	160	260	`
3x120+75	282	200	320	`
3x150+95	324	224	370	`

fonte EDM

Anexo 3- Ficha de recolha de dados de carga

Tabela A3-3 Ficha de recolha de dados de carga do consumidor

Levantamento de carga dos consumidores do PT322R

	Descrição-marque com X			
Potência contratada KVA?	2.2	3.3	6.9	10.35
Numero de compartimentos	1	1 a 2	2 a 6	mais de 6
Agregado Familiar	1	2 a 3	4 a 5	6 ou mais

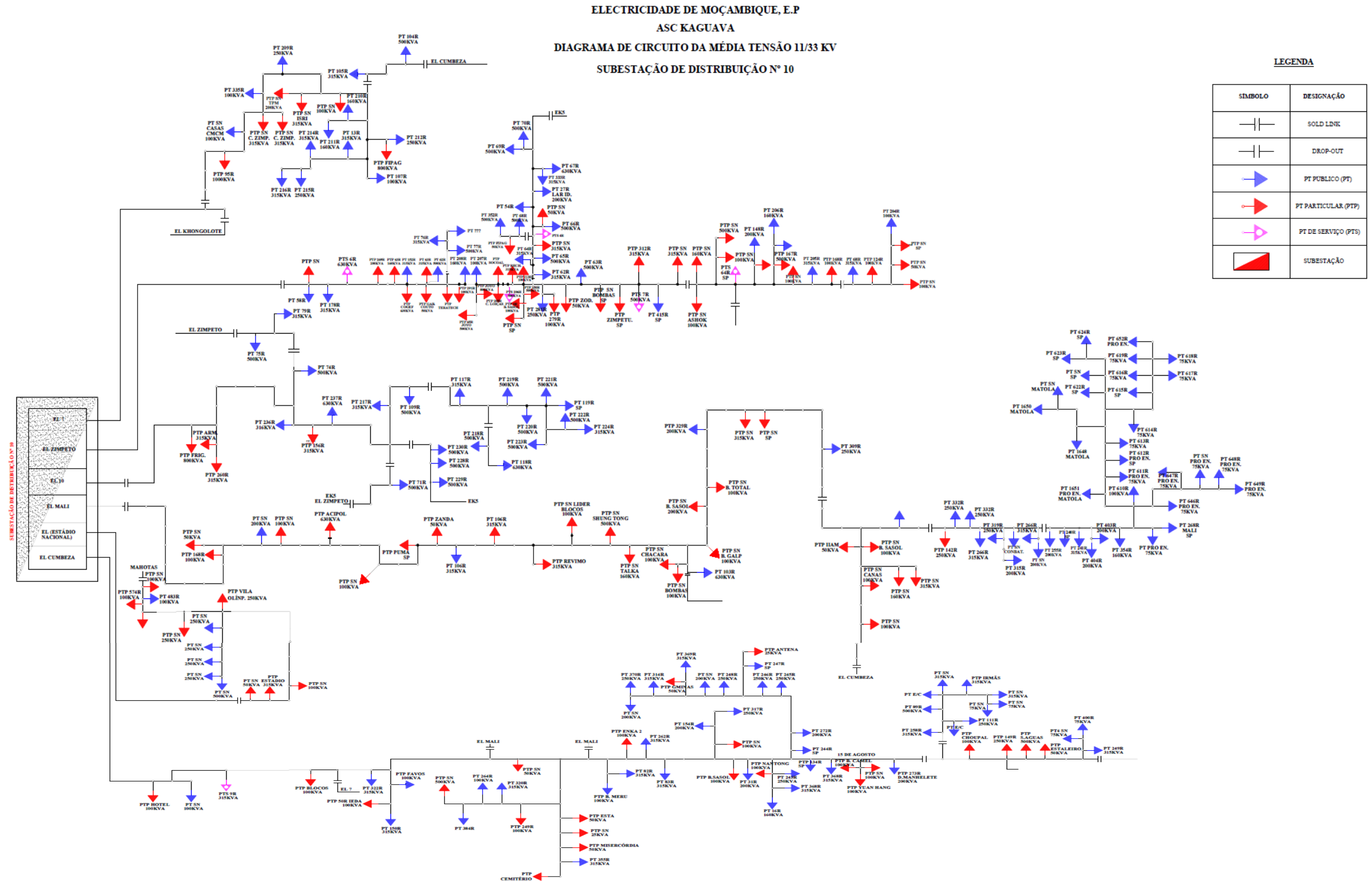
	cargas não lineares	
	Marque com x o item existente	
Equipamento	unidades	potência
Lâmpadas Led		
Lâmpadas fluorescentes		
Freezer		
Ar condicionado		
microondas		
computador		
liquidificar		
equipamento de som		
Tv plasma		
Ventoinha		
Secador de cabelo		
Máquina de barbear		
Electric Fence		
UPS		

	cargas lineares	
	Marque com x o item existente	
Equipamento	unidades	potência
Ferro de engomar		
Lâmpadas incandescentes		
Chaleira elétrica		
Termo acumulador elétrico		

Nome do Técnico -----
 Nome do
 Consumidor -----

Fonte: O autor

ANEXO 4- Subestação SE10
Figura A4.4 Configuração da rede de saída da subestação SE10



Anexo 5- Ficha de medição de cargas

Tabela A5-5 Ficha de medição de cargas do PT322R

							
Direcção de Distribuição							
Direcção Regional				Da Cidade de Maputo			
Area do Serviço ao Cliente				Ka Guava			
FICHA DE MEDIÇÃO DE CARREGAMENTO DO PT E RESISTENCIA DA TS E TP							
PT Nº	322R	Potencia	315KVA	Corte Geral	630A		
Localização: EL Cumbeza		Kumbeza zona da portagem					
Corrente no Alimentador		Corrente Nas Saida					
			Saida 1	Saida 2	Saida 3	Saida 4	Saida 5
R		R					
S		S					
T		T					
Neutro							
10							
RN		RS		TS			
SN		RT		TP			
TN		ST		TSP			
Corrente no Alimentador		Corrente Nas Saida					
			Saida 1	Saida 2	Saida 3	Saida 4	Saida 5
R		R					
S		S					
T		T					
Neutro							
Medição de Tensão				Medição de Resistencia de Aterramento			
RN		RS		TS			
SN		RT		TP			
TN		ST		TSP			
Data		12/9/2023	Hora	18:46			
Nome do Técnico Responsavel							

Fonte-EDM KA-GUAVA

Anexo 6- Limites de harmônicos

Tabela A6-6 – Limites de harmônicos individuais em sistema públicos de baixa tensão (240V e 415V) conforme norma IEC 61000-2-2 (extraída de Dugan)

Ordem ímpar	Tensão harmônica (%)*	Ordem ímpar – múltiplo de 3	Tensão harmônica (%)*	Ordem par	Tensão harmônica (%)*
5	6,0	3	5,0	2	2
7	5,0	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,3	6	0,5
13	3,0	21	0,2	8	0,5
17	2,0	>21	0,2	10	0,2
19	1,5			12	0,2
23	1,5			>12	0,2
25	1,5				
>25	0,2 + 1,3 x 25/h				
THDv (até o 40º harmônico) < 8%					

Anexo 7- Classificação dos equipamentos

Tabela 7-7 - Classificação dos equipamentos quanto à norma IEC 61000-2-3

Classe A	- Equipamentos trifásicos equilibrados - Aparelhos domésticos, exceto aqueles identificados como Classe D - Ferramentas, com exceção das portáteis - <i>Dimmers</i> para lâmpadas incandescentes - Equipamento de áudio - Todo equipamento não classificado como B, C e D
Classe B	- Ferramentas portáteis - Equipamento de solda a arco que não seja profissional
Classe C	- Equipamentos de iluminação
Classe D	- Computadores pessoais e monitores de PC - Aparelhos de televisão Nota: Potência de entrada $P \leq 600$ W. Não há limites para $P < 75$ W.

Fonte- Norma IEC 61000-2-3

Anexo 8- classificações dos equipamentos na norma IEC 61000-2-3

Tabela A8-8 norma IEC 61000-2-3 e com as devidas classificações dos equipamentos:

Ordem h	Classe A (A)	Classe B (A)	Classe C (% da fund.) $P > 25 \text{ W}$	Classe C (mA/W) $P \leq 25 \text{ W}$	Classe D (mA/W)	Classe D (A)
Harmônicas ímpares						
3	2,30	3,45	$30 \times \lambda^*$	3,40	3,40	2,30
5	1,14	1,71	10	1,90	1,90	1,14
7	0,77	1,16	7	1,00	1,00	0,77
9	0,40	0,60	5	0,50	0,50	0,40
11	0,33	0,50	3	0,35	0,35	0,33
13	0,21	0,312	3	3,85/h	3,85/h	Ver Classe A
$15 \leq h \leq 39$	$0,15 \times 15/h$	$0,23 \times 15/h$	3	3,85/h	3,85/h	Ver Classe A
Harmônicas pares						
2	1,08	1,62	2	—	—	—
4	0,43	0,65	—	—	—	—
6	0,30	0,45	—	—	—	—
$8 \leq h \leq 40$	$0,23 \times 8/h$	$0,35 \times 8/h$	—	—	—	—

Fonte- norma IEC 61000-2-3

Anexo 9- Verificação de anomalias

Tabea A9-9 Verificação de anomalias nos consumidores do PT322R

Verificação de anomalias na instalação eléctrica dos consumidores do PT322R

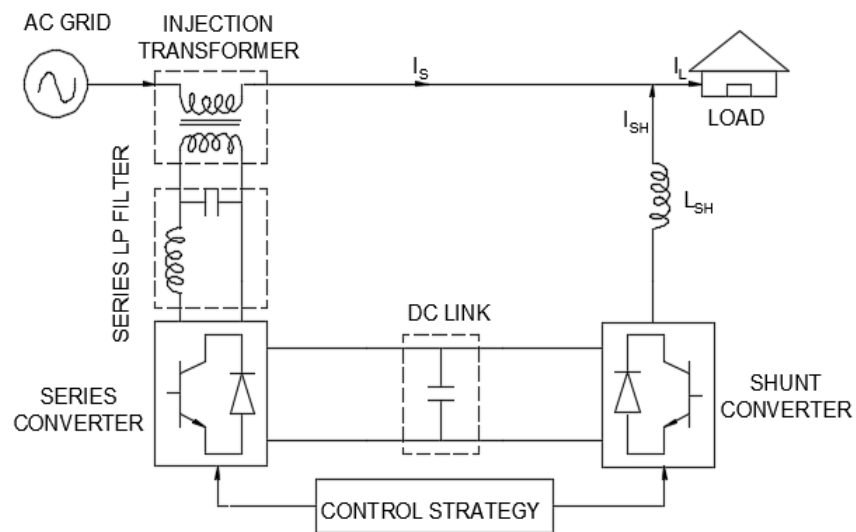
Secção dos condutores	Descrição-marque com X			
Secção do cabo alimentador	2.5	4	10	>10
Secção dos condutores tomada	1.5	2.5	4	mais de 6
secção condutores iluminação	1.5	2.5	4	6 ou mais
secção condutor neutro iluminação	1.5	2.5	4	6 ou mais
secção condutor neutro tomada	1.5	2.5	4	6 ou mais
Existência de terra de serviço	sim?		não?	
Existência de terra de protecção	sim?		nao?	
Existência de terra de protecção	sim?		não?	
Regime de terra	TN-S	TN-C-S	TN-C	TT

	As protecções da instalação	
	Marque com x o item existente	
Aparelho	sim	não
tem descarregador sobretensão?		
estabilizadores de tensão?		
usa filtros de harmónicos?		

Fonte: o autor

Anexo 10- Estrutura interna do UPQC

Figura A10.10 Estrutura interna do UPQC



Fonte: A.S. Koch 2013

Anexo 11 aterramentos

FIGURA A11.11 Equipontecialização dos aterramentos para minimizar ressonâncias

