



Universidade do Minho

Vítor João Moreira Peneda

**Análise da Qualidade de Energia Elétrica e
dos Consumos Energéticos de uma
Indústria Têxtil**

Dissertação submetida na Universidade do Minho

para a obtenção do grau de

Mestre em Engenharia Eletrónica Industrial e Computadores

Trabalho realizado sob orientação do

Doutor João Luiz Afonso

e sob orientação na empresa do

Engenheiro Baltazar Filipe Ribeiro Peixoto

Janeiro de 2019

DECLARAÇÃO

Vítor João Moreira Peneda

Endereço eletrónico: vitorpeneda@gmail.com

Título da Dissertação:

Análise da Qualidade de Energia Elétrica e dos Consumos Energéticos de uma Indústria Têxtil

Orientador:

Doutor João Luiz Afonso

Orientador na empresa:

Engenheiro Baltazar Filipe Ribeiro Peixoto

Dissertação submetida na Universidade do Minho para a obtenção do grau de

Mestre em Engenharia Eletrónica Industrial e Computadores

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA TESE/TRABALHO APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE;

Universidade do Minho, ___/___/_____

Assinatura: _____

À minha família.

Agradecimentos

A concretização desta Dissertação de Mestrado tornou-se possível com importantes apoios e encorajamentos sem os quais não teria chegado ao fim e aos quais estarei eternamente agradecido.

Ao colega Engenheiro Pedro Pinheiro pela cordialidade com que sempre se disponibilizou para prestar a suas sinceras reflexões e críticas, e pela ajuda na revisão dos textos.

Ao Professor Doutor Gabriel Pinto, por ter despertado o interesse sobre o tema da qualidade de energia elétrica, pela disponibilidade e ensinamentos que sempre demonstrou enquanto Professor.

Aos meus orientadores Professor Doutor João Luiz Afonso e Engenheiro Baltazar Peixoto, pela orientação, por todo apoio e incentivo, disponibilidade, pelo conhecimento transmitido, pelas opiniões e críticas ao longo da realização deste trabalho.

À empresa MGC Acabamentos Têxteis gostaria de agradecer pela oportunidade e por ter cedido todos os recursos necessários, bem como a todos os colaboradores que de algum modo contribuíram para a realização deste trabalho.

Desejo igualmente agradecer a todos os meus colegas do curso, em particular ao Nelson Andrade, ao Vítor Pinto, ao José Costa, ao Hugo Gomes, ao Fernando Cunha por todo o incentivo e amizade, em especial ao Manuel Silva pelo seu grande exemplo de coragem, humildade e companheirismo ao longo do curso e deste trabalho.

Um grande obrigado à Ana Oliveira pela amizade e apoio durante o curso e a realização desta Dissertação.

Por último, e não menos importante, quero agradecer à minha família e amigos pelo apoio incondicional, compreensão pelos momentos de ausência, exemplo e coragem que me deram ao longo do curso e deste trabalho, especialmente aos meus pais Fernando e Rita e aos meus irmãos Hélder e Edgar.

Este trabalho de mestrado está enquadrado no projeto de IC&DT “*Quality4Power - Enhancing the Power Quality for Industry 4.0 in the era of Microgrids*”, financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia, com a referência PTDC/EEI-EEE/28813/2017.

Resumo

A crescente mediatização dos problemas de qualidade de energia no setor elétrico e o seu potencial impacto na competitividade das empresas exige um maior esclarecimento de todas as partes com responsabilidades na área do setor elétrico, desde o produtor ao consumidor final, fabricantes de equipamentos, governo e entidades reguladoras.

O consumo de energia tem crescido durante as últimas décadas, o que tem levado ao reforço das preocupações sociais e ambientais sobre a gestão inteligente e sustentável dos recursos energéticos entre os consumidores.

Atualmente, o uso de cargas não lineares nas redes elétricas, nas indústrias e nos consumidores particulares em geral, experimentou um grande crescimento, sendo que esses tipos de cargas contribuem para a degradação da qualidade de energia elétrica. Entre outros, os problemas de qualidade de energia elétrica (QEE) contribuem para o aumento da corrente no neutro, desequilíbrios de tensões, mau funcionamento ou degradação de equipamentos, bem como para interferências em cargas mais sensíveis. Assim sendo, é importante realizar monitorizações da qualidade de energia elétrica com o objetivo de identificar as principais cargas não lineares, fazer a caracterização da qualidade de serviço técnica prestada, bem como a identificação de eventuais áreas de melhoria.

O objetivo principal deste trabalho de Dissertação de Mestrado consiste em estudar e monitorizar os parâmetros de qualidade de energia elétrica numa indústria têxtil, bem como analisar as cargas com maior consumo de energia elétrica. Para a condução da monitorização utilizou-se um analisador de qualidade de energia elétrica que oferece um conjunto extensivo de medições para verificar sistemas de distribuição de energia: correntes de fase, valores eficazes, harmónicas, tremulação da tensão, cavas de tensão, sobretensões, frequência, desequilíbrio do sistema trifásico de tensões, transientes, entre outros. Passa ainda pelos objetivos desta Dissertação conhecer as características gerais de uma central mini hidroelétrica, em particular a que se encontra com ligação ao posto de transformação da empresa de que este trabalho é foco de estudo.

Palavras-Chave: Qualidade de Energia Elétrica, Cargas Não Lineares, Consumos de Energia, Harmónicas, Indústria Têxtil

Abstract

The mediatisation of power quality problems in the electrical sector and its potential impact on the competitiveness of the companies demands a greater clarification of all the parts with responsibilities in the electrical sector, from the producer to the end user, equipment manufacturers, government and regulatory entities.

The energy consumption rate has grown during the last decades, which has led to reinforcement of social and environment concerns about the intelligent and sustainable management of energy resources among consumers.

Nowadays, the use of non-linear loads in the electric networks, in the industries and in the particular consumers in general, has experienced a great growth, therefore this type of loads causes power quality degradation. Thereby, these problems contribute to an increase of the neutral current, current unbalances, malfunction or degradation of equipment and interference in other sensitive loads. Thus, it is important to conduct a power quality monitoring aiming to identify the main non-linear loads as well as to characterize the quality of technical service provided and to identify possible areas for improvement.

The main purpose of this study is to monitor the power quality parameters in a textile industry, as well as to analyse the loads with higher consumption of electric energy. For the conduct of the monitoring a power quality analyser was used, that offers an extensive and powerful set of measurements to assess power distribution systems for instance: phase currents, harmonics, flickers, dips and swells, frequency, unbalances, power and energy parameters, inrush currents, and transients. The aim of this Dissertation is also to know the general characteristics of a mini hydro power, in particular the one that is connected to the Electrical Power Transformer Station of the company.

Keywords: Power Quality, Non-linear Loads, Energy Consumptions, Harmonics, Textile Industry.

ÍNDICE

Agradecimentos	VII
Resumo	VIII
Abstract.....	IX
Lista de Figuras.....	XV
Lista de Tabelas	XIX
Acrónimos e Siglas	XXI
Nomenclatura.....	XXIII
Capítulo 1 Introdução	1
1.1 Energia em Portugal	1
1.2 Enquadramento.....	2
1.3 A Empresa MGC Acabamentos Têxteis S.A.....	4
1.3.1 Processo Fabril.....	5
1.3.2 Preparação de Tecidos	5
1.3.3 Tinturaria de Tecidos	6
1.3.4 Acabamento de Tecidos	7
1.3.5 Secção das Malhas	8
1.4 Consumos de Energia na Empresa	8
1.4.1 Análise dos Consumos de Energia.....	10
1.4.2 Análise dos Indicadores Energéticos	12
1.5 Motivações	14
1.6 Objetivos	15
1.7 Organização da Dissertação.....	15
Capítulo 2 Qualidade de Energia Elétrica	17
2.1 Introdução.....	17
2.2 Problemas de Qualidade de Energia	18
2.2.1 Interrupção do Serviço	19
2.2.2 Variação da Amplitude da Tensão	19
2.2.3 Cavas na Tensão	20
2.2.4 Sobretensões	21
2.2.5 Desequilíbrio das Tensões	22
2.2.6 <i>Notches</i> na Tensão de Alimentação	23
2.2.7 Variação da Frequência.....	23
2.2.8 Tremulação da Tensão	23

2.2.9	Interferências.....	24
2.2.10	Tensões e Correntes com Harmónicas	24
2.2.10.1	Caracterização das Harmónicas	27
2.2.10.2	Filtros Passivos.....	28
2.2.10.3	Filtro Ativo Paralelo e Série	29
2.2.11	Baixo Fator de Potência	30
2.2.12	Transitórios	34
2.3	Características do Analisador de Energia Elétrica.....	35
2.3.1	Pinças Amperimétricas	36
2.3.2	Sondas de Corrente Flexíveis.....	36
2.3.3	Configurações e Modos de Leitura	37
Capítulo 3	Posto de Transformação	39
3.1	Introdução.....	39
3.1.1	Quadro Geral de Baixa Tensão 1	45
3.1.2	Quadro Geral de Baixa Tensão 2	45
3.2	Baterias de Condensadores	47
3.3	Qualidade de Energia no Posto de Transformação	49
3.3.1	Análise ao QGBT1.....	49
3.3.1.1	Registos de Tensão e Corrente	50
3.3.1.2	Registos de Cavas e Sobretensões	52
3.3.1.3	Registo da Frequência Fundamental da Tensão	52
3.3.1.4	Registo da Tremulação da Tensão	53
3.3.1.5	Registo do Desequilíbrio da Tensão	53
3.3.1.6	Registo de Harmónicas e THD.....	54
3.3.1.7	Registo de Potência	56
3.3.2	Análise ao QGBT2.....	60
3.3.2.1	Registos de Tensão e Corrente	61
3.3.2.2	Registos de Cavas e Sobretensões	64
3.3.2.3	Registo da Tremulação da Tensão.....	65
3.3.2.4	Registo da Frequência Fundamental da Tensão	67
3.3.2.5	Registo de Desequilíbrio da Tensão	68
3.3.2.6	Registo de Harmónicas e THD.....	69
3.3.2.7	Registo de Potência	73
3.3.3	Medição das Terras	76

3.4	Conclusões.....	78
Capítulo 4	Zona Fabril.....	81
4.1	Introdução.....	81
4.2	Cargas com Maior Consumo de Energia Elétrica.....	82
4.3	Qualidade de Energia das Cargas com Maior Consumo	83
4.3.1	Compressores de Ar Comprimido.....	83
4.3.1.1	Registos de Tensão e Corrente	84
4.3.1.2	Registos de Cavas e Sobretensões	85
4.3.1.3	Registo da Tremulação da Tensão.....	85
4.3.1.4	Registo da Frequência Fundamental da Tensão	86
4.3.1.5	Registo do Desequilíbrio da Tensão	86
4.3.1.6	Registo de Harmónicas e THD	87
4.3.1.7	Registo de Potência	89
4.3.2	ETAR.....	90
4.3.2.1	Registos de Tensão e Corrente	90
4.3.2.2	Registos de Cavas e Sobretensões	92
4.3.2.3	Registo da Tremulação da Tensão.....	92
4.3.2.4	Registo da Frequência Fundamental da Tensão	93
4.3.2.5	Registo do Desequilíbrio da Tensão	93
4.3.2.6	Registo de Harmónicas e THD	93
4.3.2.7	Registo de Potência	96
4.3.3	Râmola 1	96
4.3.3.1	Registos de Tensão e Corrente	97
4.3.3.2	Registos de Cavas e Sobretensões	98
4.3.3.3	Registo da Tremulação da Tensão.....	98
4.3.3.4	Registo da Frequência Fundamental da Tensão	98
4.3.3.5	Registo do Desequilíbrio da Tensão	99
4.3.3.6	Registo de Harmónicas e THD	99
4.3.3.7	Registo de Potência	101
4.3.4	Râmola 6.....	102
4.3.4.1	Registos de Tensão e Corrente	102
4.3.4.2	Registos de Cavas e Sobretensões	103
4.3.4.3	Registo da Tremulação da Tensão.....	104
4.3.4.4	Registo da Frequência Fundamental da Tensão.	104

4.3.4.5	Registo do Desequilíbrio da Tensão	105
4.3.4.6	Registo de Harmónicas e THD	105
4.3.4.7	Registo de Potência	107
4.3.5	Râmola das Malhas	108
4.3.5.1	Registos de Tensão e Corrente	108
4.3.5.2	Registos de Cavas e Sobretensões	109
4.3.5.3	Registo da Frequência Fundamental da Tensão	109
4.3.5.4	Registo da Tremulação da Tensão	110
4.3.5.5	Registo do Desequilíbrio da Tensão	110
4.3.5.6	Registo de Harmónicas e THD	111
4.3.5.7	Registo de Potência	113
4.4	Conclusões.....	113
Capítulo 5 Gerador de Emergência.....		115
5.1	Introdução.....	115
5.2	Análise ao Gerador de Emergência	116
5.2.1	Registos de Tensão e Corrente.....	117
5.2.2	Registo da Tremulação da Tensão	118
5.2.3	Registo da Frequência Fundamental da Tensão	119
5.2.4	Registo do Desequilíbrio da Tensão	119
5.2.5	Registo de Harmónicas e THD	119
5.2.6	Registo de Potência.....	122
5.3	Conclusões.....	122
Capítulo 6 Central Mini-Hídrica.....		123
6.1	Introdução.....	123
6.2	Características do Gerador.....	124
6.3	Produção de Energia Elétrica	126
6.4	Conclusões.....	127
Capítulo 7 Conclusão.....		129
7.1	Conclusões Gerais	129
7.2	Sugestões para Trabalho Futuro	133
Lista de Referências.....		135
Anexo 1.....		138
Anexo 2.....		142

Lista de Figuras

Figura 1.1. Evolução dos preços de eletricidade dos consumidores industriais em Portugal, Espanha e Euro Área (Fonte ERSE) [4].	1
Figura 1.2. Evolução dos preços de gás natural dos consumidores industriais em Portugal, Espanha e Euro Área (Fonte: ERSE) [4].	2
Figura 1.3. A empresa MGC Acabamentos Têxteis.	4
Figura 1.4. Consumo mensal de energia elétrica em 2017.	9
Figura 1.5. Consumo mensal de gás natural em 2017.	9
Figura 1.6 Evolução mensal do consumo de energia pela produção de tecido.	11
Figura 1.7. Repartição anual de energia em tep.	12
Figura 1.8. Evolução mensal dos indicadores energéticos CE e IC.	13
Figura 1.9. Evolução anual dos indicadores energéticos CE e IC.	14
Figura 2.1. Primeiro critério para caracterização de cava de tensão (Fonte: Diário da República) [14].	20
Figura 2.2. Segundo critério para caracterização de cava de tensão (Fonte: Diário da República) [14].	20
Figura 2.3. Correntes com elevada distorção.	25
Figura 2.4. Espectro harmónico das correntes i_1 , i_2 e i_3 .	25
Figura 2.5. Tensões de alimentação com distorção harmónica.	26
Figura 2.6. Distorção da tensão provocada pelas correntes não lineares ao circularem nas impedâncias de linha.	26
Figura 2.7. Esquema simplificado do funcionamento de um filtro passivo sintonizado.	28
Figura 2.8. Esquema simplificado do funcionamento de um FAP.	29
Figura 2.9. Esquema simplificado do funcionamento de um FAS.	30
Figura 2.10. Desfasamento entre tensão e corrente.	30
Figura 2.11. Analisador da qualidade de energia <i>Fluke</i> 434 (Fonte: <i>Fluke</i>) [31].	35
Figura 2.12. Sonda de corrente i400s (Fonte: <i>Fluke</i>) [34].	36
Figura 2.13. Sonda de corrente i430 flex (Fonte: <i>Fluke</i>) [36].	37
Figura 3.1. Regime de neutro (TT) na instalação do PT.	39
Figura 3.2. Planta do PT.	40
Figura 3.3. Cella de interrupção geral da MT.	40
Figura 3.4. Cella de interrupção da MT para os três transformadores.	41
Figura 3.5. Cella do transformador nº3.	41
Figura 3.6. Cella de interrupção e proteção do transformador nº3.	42
Figura 3.7. Relé indireto.	43
Figura 3.8. Disjuntor de pequeno volume de óleo.	43
Figura 3.9. Cella de interligação e proteção entre a central mini-hídrica e a rede.	44
Figura 3.10. Quadros gerais de baixa tensão no PT.	44
Figura 3.11. Esquema simplificado da distribuição das cargas ligadas ao QGBT1.	45
Figura 3.12. Disjuntor geral do QGBT1.	45
Figura 3.13. Esquema simplificado da distribuição das cargas ligadas ao QGBT2.	46

Figura 3.14. Baterias de condensadores de regulação automática: a) Vista exterior; b) Vista interior.	47
Figura 3.15. Grupo de condensadores danificados e fusíveis em aberto.	48
Figura 3.16. Baterias de condensadores de capacidade fixa: a) Vista exterior; b) Vista interior.	48
Figura 3.17. Monitorização aos QGBT.....	49
Figura 3.18. Formas das ondas das tensões e das correntes no QGBT1.....	50
Figura 3.19. Evolução dos valores eficazes das tensões no T1.....	50
Figura 3.20. Interrupção de energia e eventos de cavas de tensão no T1.....	51
Figura 3.21. Evolução dos valores eficazes das correntes no T1.	51
Figura 3.22. Evolução da frequência fundamental da tensão de alimentação no T1.	53
Figura 3.23. Evolução da tremulação da tensão no T1.	53
Figura 3.24. Evolução da percentagem de desequilíbrio da tensão no T1.	54
Figura 3.25. Evolução da THDv no T1.....	54
Figura 3.26. Espectro harmónico da corrente até à 50ª harmónica no T1.....	55
Figura 3.27. Evolução da THDi no T1.....	55
Figura 3.28. Espectro harmónico da corrente até à 50ª harmónica no T1.....	56
Figura 3.29. Evolução das potências médias no QGBT1.....	57
Figura 3.30. Evolução das potências médias e do FPT médio no QGBT1, durante dois dias.	57
Figura 3.31. Progresso das potências médias e do FPT ao sábado.	58
Figura 3.32. Regulador do fator de potência das baterias de condensadores.	58
Figura 3.33. Evolução das potências médias e do FPT médio durante o fim de semana.	59
Figura 3.34. Formas das ondas das tensões e correntes no QGBT2.	60
Figura 3.35. Evolução dos valores eficazes das tensões no T2.....	61
Figura 3.36. Evolução dos valores eficazes das tensões no T3.....	62
Figura 3.37. Evolução dos valores eficazes das tensões no T3, no dia 28-10.....	63
Figura 3.38. Evolução dos valores eficazes das correntes no T2.	63
Figura 3.39. Evolução dos valores eficazes das correntes no T3.	64
Figura 3.40. Evolução da tremulação da tensão no T2.	66
Figura 3.41. Progresso da tremulação da tensão no T3.....	66
Figura 3.42. Evolução da frequência fundamental da tensão de alimentação no T2.	67
Figura 3.43. Progresso da frequência fundamental da tensão de alimentação no T3.....	67
Figura 3.44. Evolução da percentagem de desequilíbrio no T2.	68
Figura 3.45. Evolução da percentagem de desequilíbrio no T3.	68
Figura 3.46. Evolução da THDv no T2.	69
Figura 3.47. Evolução da THDv no T3.....	69
Figura 3.48. Espectro harmónico da tensão até ordem 50 no T2.	70
Figura 3.49. Espectro harmónico da tensão até ordem 50 no T3.	71
Figura 3.50. Evolução da THDi no T2.....	71
Figura 3.51. Evolução da THDi da corrente nas fases do T3.....	72
Figura 3.52. Espectro harmónico da corrente até à 50ª harmónica nas fases do T2.....	72
Figura 3.53. Espectro harmónico da corrente até à 50ª harmónica nas fases do T3.....	73
Figura 3.54. Evolução da potência médias de fase no T2.	74
Figura 3.55. Evolução das potências médias e do FPT médio durante horas de vazio no T2.....	74

Figura 3.56. Evolução das potência médias e do fator de potência total médio no T3.	75
Figura 3.57. Evolução dos valores eficazes das tensões no T3.	75
Figura 3.58. Circuito de defeito entre a fase L_3 e o circuito de terras.	76
Figura 3.59. Vala onde foi encontrado o cabo interrompido de ligação à terra de serviço.	77
Figura 3.60. Vala com as chapas de cobre para o aterramento.	77
Figura 4.1. Valores percentuais da monitorização em relação ao total consumido em 2017.	82
Figura 4.2. Formas das ondas da tensão e da corrente no compressor 1.	84
Figura 4.3. Evolução dos valores eficazes das tensões no compressor 1.	84
Figura 4.4. Evolução dos valores eficazes das correntes no compressor 1.	85
Figura 4.5. Progresso da tremulação da tensão no compressor 1.	86
Figura 4.6. Evolução da frequência fundamental da tensão de alimentação no compressor 1.	86
Figura 4.7. Evolução da percentagem de desequilíbrio da tensão no compressor 1.	87
Figura 4.8. Evolução da THDv no compressor 1.	87
Figura 4.9. Espectro harmónico da tensão até à 50ª harmónica no compressor 1.	88
Figura 4.10. Evolução da THDi no compressor 1.	88
Figura 4.11. Espectro harmónico da corrente até à 50ª harmónica no compressor 1.	89
Figura 4.12. Evolução das potências médias e FPT médio no compressor 1.	89
Figura 4.13. Formas das ondas da tensão e da corrente na ETAR.	90
Figura 4.14. Progresso das tensões eficazes na ETAR.	91
Figura 4.15. Evolução dos valores eficazes das correntes na ETAR.	91
Figura 4.16. Progresso da tremulação da tensão na ETAR.	92
Figura 4.17. Evolução da frequência fundamental da tensão de alimentação na ETAR.	93
Figura 4.18. Evolução da percentagem de desequilíbrio da tensão na ETAR.	93
Figura 4.19. Evolução da THDv na ETAR.	94
Figura 4.20. Espectro harmónico da tensão até à 50ª harmónica na ETAR.	94
Figura 4.21. Evolução da THDi na ETAR.	95
Figura 4.22. Espectro harmónico da corrente até à 50ª harmónica na ETAR.	95
Figura 4.23. Evolução das potências médias e do FPT médio na ETAR.	96
Figura 4.24. Formas das ondas da tensão e da corrente na râmola 1.	96
Figura 4.25. Evolução dos valores eficazes das tensões compostas na râmola 1.	97
Figura 4.26. Evolução dos valores eficazes das correntes na râmola 1.	97
Figura 4.27. Progresso da tremulação da tensão na râmola 1.	98
Figura 4.28. Evolução da frequência fundamental da tensão de alimentação na râmola 1.	98
Figura 4.29. Evolução da percentagem de desequilíbrio da tensão na râmola 1.	99
Figura 4.30. Evolução da THDi na râmola 1.	99
Figura 4.31. Espectro harmónico da tensão até à 50ª harmónica na râmola 1.	100
Figura 4.32. Evolução da THDv na râmola 1.	100
Figura 4.33. Espectro harmónico da corrente até à 50ª harmónica na râmola 1.	101
Figura 4.34. Evolução das potências médias e do FPT médio na râmola 1.	101
Figura 4.35. Forma das ondas da tensão e corrente na râmola 6.	102
Figura 4.36. Progresso dos valores eficazes das tensões na râmola 6.	103
Figura 4.37. Evolução dos valores eficazes das correntes na râmola 6.	103

Figura 4.38. Progresso da tremulação da tensão na râmola 6.	104
Figura 4.39. Evolução da frequência fundamental da tensão de alimentação na râmola 6.	104
Figura 4.40. Evolução da percentagem de desequilíbrio da tensão na râmola 6.	105
Figura 4.41. Evolução da THDv na râmola 6.	105
Figura 4.42. Espectro harmónico da tensão até à 50ª harmónica na râmola 6.	106
Figura 4.43. Evolução da THDi na râmola 6.	106
Figura 4.44. Espectro harmónico da corrente até à 50ª harmónica na râmola 6.	107
Figura 4.45. Evolução das potências médias e do FPT médio na râmola 6.	107
Figura 4.46. Forma das ondas da tensão e da corrente na râmola das malhas.	108
Figura 4.47. Evolução dos valores eficazes das tensões na râmola das malhas.	108
Figura 4.48. Evolução dos valores eficazes das correntes de meio ciclo na râmola das malhas.	109
Figura 4.49. Evolução da frequência fundamental da tensão de alimentação na râmola das malhas.	109
Figura 4.50. Evolução da tremulação da tensão na râmola das malhas.	110
Figura 4.51. Evolução da percentagem de desequilíbrio da tensão na râmola das malhas.	110
Figura 4.52. Evolução da THDv na râmola das malhas.	111
Figura 4.53. Espectro harmónico da tensão até à 50ª harmónica na râmola das malhas.	111
Figura 4.54. Evolução temporal da THDi na râmola das malhas.	112
Figura 4.55. Espectro harmónico da corrente até à 50ª harmónica na râmola das malhas.	112
Figura 4.56. Evolução das potências médias e do FPT médio na râmola das malhas.	113
Figura 5.1. Grupo gerador de emergência.	115
Figura 5.2. Formas das ondas da tensão e da corrente no gerador.	117
Figura 5.3. Progresso dos valores eficazes das tensões no gerador.	117
Figura 5.4. Evolução dos valores eficazes das correntes no gerador.	118
Figura 5.5. Evolução da tremulação da tensão no gerador.	118
Figura 5.6. Evolução da frequência fundamental da tensão de alimentação no gerador.	119
Figura 5.7. Evolução do desequilíbrio da tensão do gerador.	119
Figura 5.8. Evolução da THDv no gerador.	120
Figura 5.9. Espectro harmónico da tensão até à 50ª harmónica no gerador.	120
Figura 5.10. Evolução da THDi no gerador.	121
Figura 5.11. Espectro harmónico da corrente até à 50ª harmónica no gerador.	121
Figura 5.12. Evolução das potências médias e do FPT médio no gerador.	122
Figura 6.1. Localização da central mini-hídrica [46].	123
Figura 6.2. Vista lateral da CMH.	124
Figura 6.3. Antigo alternador síncrono de eixo horizontal da CMH.	124
Figura 6.4. Grupo gerador da CMH.	125
Figura 6.5. Transformador da CMH.	126
Figura 6.6. Evolução mensal da produção de energia elétrica na CMH em 2017.	126

Lista de Tabelas

Tabela 1.1. Fatores de conversão de energia (Fonte: SGCIE).	10
Tabela 1.2. Fatores de conversão para PCI e FE do gás natural (Fonte: SGCIE).	11
Tabela 1.3. Consumos específicos de energia anuais.....	14
Tabela 2.1. Fabricantes de analisadores de QEE.	17
Tabela 2.2. Eventos de cavas de tensão (Fonte: Diário da República) [14].....	21
Tabela 2.3. Eventos de sobretensões (Fonte: Diário da República) [14].	22
Tabela 2.4. Valores limites das tensões harmónicas nos pontos de entrega até à ordem 25.	27
Tabela 2.5. Ordem, frequência e sequência das harmónicas.....	27
Tabela 2.6. Escalões de fator de potência (Fonte: EDP) [26].	31
Tabela 2.7. Ciclo semanal para todos os fornecimentos em Portugal Continental (Fonte: ERSE) [27].	32
Tabela 2.8. Características típicas de transitórios impulsivos (Fonte: IEEE Std 1159-2009) [29].	34
Tabela 2.9. Características típicas de transitórios oscilatórios [30].	34
Tabela 2.10. Especificações <i>Fluke</i> i400s [32].....	36
Tabela 2.11. Especificações sonda de corrente i430 flex [36].	37
Tabela 2.12. Possíveis ligações <i>Fluke</i> 434 (Fonte: <i>Fluke</i>) [32].	37
Tabela 3.1. Registo de cavas de tensão no T1.....	52
Tabela 3.2. Evolução das perdas em função do FPD [40].	60
Tabela 3.3. Registo de cavas de tensão no T2.....	65
Tabela 3.4. Registo de cavas de tensão no T3.....	65
Tabela 4.1. Registo de cavas de tensão no compressor 1.....	85
Tabela 4.2. Registo de cavas de tensão na ETAR.....	92
Tabela 5.1. Características do motor de combustão interna [43].	116
Tabela 5.2. Características do alternador síncrono [44].....	116

Acrónimos e Siglas

Acrónimo / Sigla	Significado
ARCE	Acordos de Racionalização dos Consumos de Energia
AT	Alta Tensão
BT	Baixa Tensão
BTE	Baixa Tensão Especial
CC	Corrente Contínua
CEN	<i>Comité Européen de Normalisation</i>
CENELEC	<i>Comité Européen de Normalisation Électrotechnique</i>
CMH	Central Mini-Hídrica
DDR	Dispositivos de Proteção de Corrente Residual Diferencial
DGEG	Direção Geral de Energia e Geologia
ETA	Estação de Tratamento de Águas
ETAR	Estação de Tratamento de Águas Residuais
FAP	Filtro Ativo Paralelo
FAS	Filtro Ativo Série
FE	Fatores de Emissão para Combustíveis
FPD	Fator de Potência de Deslocamento
FPT	Fator de Potência Total
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
ISP	Imposto Sobre Produtos Petrolíferos e Energéticos
IVA	Imposto sobre o Valor Acrescentado
MT	Média Tensão
PCI	Poderes Caloríficos Inferiores
Plt	<i>Long term severity flicker</i>
PREn	Planos de Racionalização dos Consumos de Energia número n
Pst	<i>Short term severity flicker</i>
PT	Posto de Transformação
QEE	Qualidade de Energia Elétrica
QF	Quadros de Força
QGBT	Quadro Geral de Baixa Tensão
QL	Quadros de Luz

RMS	<i>Root Mean Square</i>
RQS	Regulamento da Qualidade de Serviço
SCV	<i>Series VAr Compensators</i>
SGCIE	Sistema de Gestão dos Consumos Intensivos de Energia
STATCOM	<i>Static Compensator</i>
T1	Transformador 1
T2	Transformador 2
T3	Transformador 3
TCR	<i>Thyristor Controlled Reactor</i>
TSC	<i>Thyristor Switched Capacitor</i>
UPQC	<i>Unified Power Quality Conditioner</i>
UPS	<i>Uninterruptible Power Supply</i>

Nomenclatura

CE	Consumo específico	tep/t
f	Frequência fundamental da tensão de alimentação	Hz
i_1, i_2, i_3	Correntes instantâneas	A
IC	Intensidade carbónica	tCO ₂ /tep
i_C	Corrente instantânea na carga	A
IE	Intensidade energética	tep/€
i_F	Corrente instantânea no filtro ativo de potência	A
$I_{Máx.}$	Valor máximo eficaz da corrente	A
$I_{Mín.}$	Valor mínimo eficaz da corrente	A
i_S	Corrente instantânea na fonte de tensão	A
L_{NG}	Tensão entre neutro e terra	V
$P_{Méd.}$	Potência ativa média	W
$Q_{Méd.}$	Potência reativa média	VAr
R_P	Resistência da terra de proteção	Ω
R_{S1}	Resistência da terra de serviço no QGBT1	Ω
$R_{S2,3}$	Resistência da terra de serviço no QGBT2	Ω
$S_{Méd.}$	Potência aparente média	VA
$THDi$	<i>Total Harmonic Distortion on current</i>	%
$THDv$	<i>Total Harmonic Distortion on voltage</i>	%
V_c	Tensão declarada	V
V_{rd}	Tensão de referência deslizante	V
v_1, v_2, v_3	Tensões simples instantâneas	V
VAB	Valor acrescentado bruto	€
v_F	Tensão instantânea no filtro ativo de potência	V
$V_{Máx.}$	Valor máximo eficaz da tensão	V
$V_{Mín.}$	Valor mínimo eficaz da tensão	V
v_S	Tensão instantânea na fonte de tensão	V

Capítulo 1

Introdução

1.1 Energia em Portugal

Nos dias de hoje, a energia é um bem essencial à evolução da sociedade, o que bem se comprova com o aumento dos consumos energéticos das economias emergentes e o facto de os países desenvolvidos serem os maiores consumidores de energia *per capita*, consumindo duas vezes e meia mais, em comparação com a média mundial [1]. O consumo de energia constitui um peso significativo no conjunto de custos associados a qualquer indústria, sendo necessário criar e adaptar tecnologias com grande eficiência energética e que permitam obter resultados semelhantes com o menor consumo de energia possível [2]. Em termos energéticos, Portugal tem uma fraca produção de energia primária, pela inexistência de recursos naturais fósseis pelo que, está dependente das importações e por consequência, vulnerável às flutuações do mercado [3].

De acordo com o relatório de 2017 da Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos (ERSE), Portugal encontra-se entre os países europeus com um peso mais elevado da componente de taxas e impostos no preço final, excluindo o IVA [4]. A média ponderada dos preços para consumos de energia eléctrica entre 20 MWh e 500 MWh (banda mais representativa em Portugal), permite obter o preço médio global atribuído aos consumidores industriais. Na Figura 1.1 observa-se a evolução de preços sem IVA em Portugal, em Espanha e na Euro Área, onde se verificam preços inferiores em Portugal durante os últimos anos. Contudo, no segundo semestre de 2016 os preços passam a ser superiores aos de Espanha e no 1.º semestre de 2017 passam a ser também superiores aos da Euro Área.



Figura 1.1. Evolução dos preços de eletricidade dos consumidores industriais em Portugal, Espanha e Euro Área (Fonte ERSE) [4].

Relativamente ao gás natural a média ponderada dos preços para consumos de energia entre 27,8 MWh e 277,8 MWh, (banda mais representativa em Portugal), permite obter o preço médio global observado pelos consumidores industriais.

A Figura 1.2 ilustra a evolução de preços sem IVA em Portugal, em Espanha e na Euro Área, e revela que os preços em Portugal são sistematicamente superiores aos preços em Espanha. Esta tendência foi contrariada no segundo semestre de 2016, em relação à Euro Área, e no 1.º semestre de 2017, em relação a Espanha e à Euro Área [4].



Figura 1.2. Evolução dos preços de gás natural dos consumidores industriais em Portugal, Espanha e Euro Área (Fonte: ERSE) [4].

Pelos dados acima apresentados, os custos de energia envolvidos, vêm reforçar a opção pelo tema da análise da qualidade de energia e dos consumos de energia em ambiente empresarial para o presente estudo, incidindo sobre uma empresa têxtil, ramo da indústria com forte implantação na zona norte do país.

1.2 Enquadramento

Em condições normais de exploração, os consumidores de energia elétrica a partir das redes de transporte e de distribuição devem ter à sua disposição uma tensão com características aproximadamente constantes ao longo do tempo. Porém, durante a operação e exploração das redes de energia elétrica, existe um conjunto de fatores que potenciam alterações nas características nominais da onda de tensão e que, conseqüentemente, afetam o normal funcionamento de instalações, diminuindo a vida útil dos equipamentos. Os fatores responsáveis pelos distúrbios das características nominais da onda de tensão podem ter origem durante a produção de energia, ao longo da própria rede, nas instalações dos consumidores e ainda nas interligações com outras redes. A grande maioria destas causas são identificáveis, existindo atualmente soluções técnicas para a sua atenuação que podem ser implementadas nos consumidores ou nas redes [5].

A cadeia de valor do setor elétrico abrange as atividades de produção, transporte, distribuição, comercialização e o consumo de energia elétrica. Grande parte da energia elétrica é produzida nas centrais produtoras, que podem ser térmicas (queimando, por exemplo, gás natural, carvão ou resíduos), hídricas, nucleares ou ainda utilizando outros recursos renováveis como o vento, o sol, as marés ou ainda o calor terrestre. Em Portugal, a primeira fonte de energia renovável, pela oportunidade e interesse, foi a energia proveniente da água através das centrais hidroelétricas. O potencial de aproveitamento de energia das centrais mini-hídricas está distribuído por todo o território nacional, mas com maior concentração no norte e centro do país.

A energia produzida nas centrais é encaminhada para a rede de transporte, que a entrega às redes de distribuição, em níveis de tensão mais baixos, ou ainda a instalações de consumo ligadas diretamente à rede de transporte. Em Portugal continental, a rede de transporte em Alta Tensão (AT) e Muito Alta Tensão é constituída maioritariamente por linhas aéreas. As redes de distribuição são constituídas por linhas aéreas e por cabos subterrâneos, de AT mas essencialmente em Média Tensão (MT) e de Baixa Tensão (BT). Além das linhas e cabos, as redes de distribuição são ainda constituídas por subestações, postos de seccionamento, postos de transformação e equipamentos acessórios ligados à sua exploração. Por último, a atividade de comercialização assegura a venda de energia elétrica [6].

Neste trabalho será descrita a Central Mini-Hídrica (CMH) que o grupo Têxteis Manuel Gonçalves (TMG S.A.) explora e que contém uma interligação no posto de transformação (PT) da empresa Manuel Gonçalves e Carrington Acabamentos Têxteis (MGC Acabamentos Têxteis).

Garantir que haja qualidade de energia elétrica, envolve custos que, a partir de um determinado nível, se caracterizam desproporcionados para serem suportados pela generalidade dos consumidores. Assim, não é economicamente viável conceber uma rede totalmente com ausência de perturbações. Desta forma, tem-se promovido um conceito de partilha de responsabilidades entre os operadores das redes e os consumidores mais sensíveis às oscilações da qualidade de energia: os operadores têm de cumprir um nível de qualidade satisfatório para generalidade dos consumidores e os consumidores mais sensíveis estão encarregues por imunizar as próprias instalações [6].

Um dos principais objetivos para a monitorização da QEE é recolher as estatísticas da própria QEE, sobretudo para analisar o desempenho total da qualidade de energia de um sistema elétrico. Em muitos casos, a monitorização é também utilizada para avaliar a qualidade de uma rede de distribuição. Nesse sentido, é possível avaliar os contratos com cláusulas de qualidade da energia para os consumidores com problemas de qualidade de

energia. Outra consideração importante da QEE é o seu efeito na eficiência energética. Por exemplo, um sistema elétrico que contenha uma elevada distorção harmónica indica baixa qualidade da energia e perdas adicionais na distribuição dessa energia.

1.3 A Empresa MGC Acabamentos Têxteis S.A.

A empresa, apresentada na Figura 1.3, foi fundada em junho de 1963, inicialmente com o nome “Melo & Gonçalves, Lda”, tendo como sócios fundadores o Sr. Manuel Gonçalves, a Sociedade Teixeira de Melo & Filhos Lda, e o Eng.º Eurico de Melo.

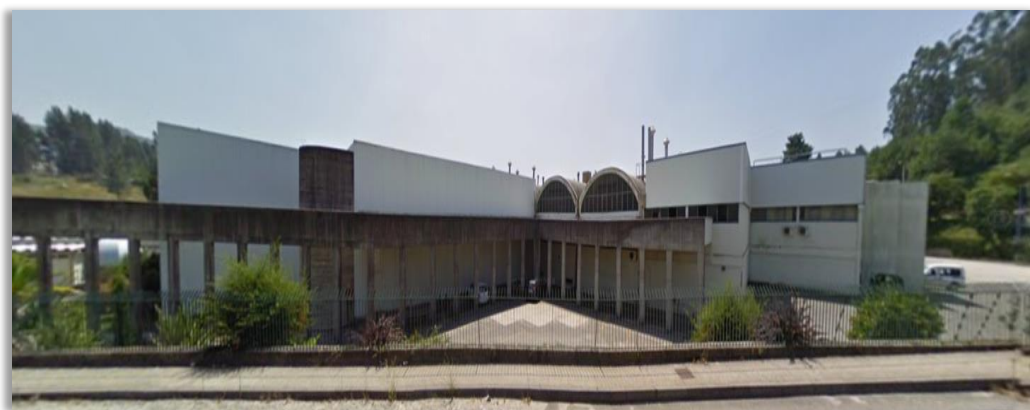


Figura 1.3. A empresa MGC Acabamentos Têxteis.

Inicialmente a sua produção destinava-se à TMG e à Somelos. Com a saída dos sócios Sociedade Teixeira de Melo & Filhos Lda e do Engº Eurico de Melo, a empresa começou gradualmente a destinar a sua produção apenas à TMG, tendo sido integrada no grupo TMG em 1973 e mudando a sua designação social para TMG-Acabamentos Têxteis S.A. em 1991.

Em agosto de 2017 a TMG Acabamentos Têxteis, S.A. e a empresa britânica Pincroft Dyeng&PintingCo Ltd formaram uma parceria industrial. Esta parceria deu origem a uma nova empresa, a MGC Acabamentos Têxteis S.A. (adiante designada por MGC AT), que continua sediada em Ronfe – Guimarães, tendo como atividade o branqueamento e tingimento de tecidos e malhas.

A empresa MGC AT dedica-se ao tratamento, químico ou mecânico, de tecidos e malhas, de forma a conferir-lhes características previamente especificadas pelo cliente em particular a cor, textura, brilho, resistência, entre outras. Atualmente, a empresa dispõe de cerca 200 colaboradores que laboram em regime de três turnos diários, permitindo à empresa um tempo disponível para produção de 24 horas por dia, 5 dias por semana.

A atividade da empresa, caracterizada como *business-to-business*, inicia-se no momento de entrega da matéria-prima (tecido ou malha) na MGC AT e termina na entrega do produto devidamente tratado e embalado à entidade subsequente da cadeia de valor. Os produtos

finalizados pela MGC AT têm como destino unidades de corte e confecção de vestuário e/ou decoração, desenhados pelas mais diversas marcas e de reconhecimento internacional.

1.3.1 Processo Fabril

O setor têxtil é definido como o conjunto de processos necessários ao fabrico de tecidos ou malhas com o intuito de fabricar vestuário ou decoração, em particular a obtenção de fibras, a tecelagem, a tinturaria, os acabamentos, a estamparia, entre outros.

Este setor serve-se, cada vez mais, de recursos tecnológicos que permitem a sua inovação e diminuir os custos incorridos com mão-de-obra.

A MGC AT encontra-se dividida em duas zonas produtivas, sendo que na primeira e principal a matéria-prima é o tecido e na segunda é a malha. Dentro dessas zonas, o processo produtivo desenrola-se em três secções: preparação, tinturaria e acabamento.

1.3.2 Preparação de Tecidos

Na preparação ocorre um tratamento físico-químico para remover impurezas dos artigos e dotar estes de propriedades que aumentam a eficiência das operações nas secções de tinturaria e acabamento. Consoante o tipo de tecido e o tipo de acabamento a que irá ser sujeito, o tecido poderá ter diferentes tipos de preparação.

As peças de tecido são rececionadas em armazém, normalmente tecido obtido por tecelagem de fio cru ou de tinta em fio. Antes das peças serem enviadas à produção, passam pela operação de enrolamento (ou bobinagem) e são agrupadas de acordo com as operações a que serão submetidas. É um trabalho que apenas necessita de força motriz, pelo que se utilizam motores elétricos, assim o vetor energético consumido nesta secção é unicamente a eletricidade.

A preparação/tratamento prévio engloba todas as operações destinadas a preparar o tecido para o tingimento e/ou o acabamento. A gasagem destina-se a eliminar as fibras soltas dos tecidos de algodão por queima direta de gás natural.

A descolagem é necessária para se remover os produtos de encolagem que obrigatoriamente tem de ser aplicados na tecelagem. Neste processo as substâncias insolúveis, o amido principalmente, são transformadas em substâncias solúveis (açúcares mais simples). Este processo confere a hidrofiliidade (capacidade de absorção de água) necessária aos tratamentos seguintes. Usualmente é realizada logo após operação de gasar,

podendo o banho de descolagem servir para apagar as possíveis fibrilas que ainda se encontram incandescentes.

A mercerização consiste na aplicação de uma solução de hidróxido de sódio em artigos de algodão, efetuada sob tensão e à temperatura ambiente. O inchamento da fibra de algodão, provocada por este tratamento, altera as características do substrato, nomeadamente o aumento da sua resistência à tração, estabilidade dimensional, melhor cobertura do algodão morto e/ou imaturo, afinidade tintorial mais elevada, isto é, pelo poder que o corante possui de rápida penetração na fibra.

O branqueamento consiste num tratamento oxidativo em que usualmente se utiliza o peróxido de hidrogénio (conhecido comercialmente como água oxigenada), para remoção do corante natural do algodão, bem como restos de cascas e outras impurezas. Para execução do tratamento descrito, procede-se à passagem do tecido por várias caixas a altas temperaturas onde se realizam as reações químicas necessárias à conclusão do processo. O banho também pode ser feito a frio por maturação.

As lavagens são efetuadas depois dos tecidos passarem pelas operações anteriores e se encontrarem impregnados de produtos químicos e por isso devem seguir diretamente para as máquinas de lavar para lhes serem retirado o excesso desses produtos e as sujidades por eles removidas.

Antes de seguir para o tingimento, o tecido passa habitualmente por uma lavagem em água quente com detergentes e em torres de secagem que consomem vapor.

1.3.3 Tinturaria de Tecidos

A principal operação realizada nesta secção é o tingimento. Consiste na aplicação de substâncias corantes ao tecido, de modo a obter uma determinada cor uniforme em toda a sua largura e comprimento. O tecido poderá ter diversos tipos de circuitos durante esta secção, sendo que esta diversidade deve-se à matéria-prima do tecido que se pretende tingir.

O tratamento prévio, como foi já referido é um fator determinante no resultado obtido na coloração. Existem três processos distintos de tingimentos: descontínuos, contínuos e semi-contínuos.

No processo descontínuo ou por esgotamento o movimento do corante em direção ao interior das fibras é provocado pela afinidade do corante. O processo de esgotamento existente na empresa consiste na utilização de máquinas *Jiggers*. O processo de tingimento consiste na passagem do tecido de um rolo para outro, passando durante esse percurso por um banho com os corantes. Nos processos semi-contínuos ou contínuos, ou ainda

foulardagem, a diferença está em que nos primeiros, o *Foulard* constitui uma máquina isolada, os *Kusters*, seguindo depois o tecido para outras máquinas para maturação, enquanto nos segundos o *Foulard* e os sistemas de fixação constituem uma única máquina.

Os processos contínuos existentes na empresa são realizados nas máquinas *Thermosol* e *Pad-Steam*. O *Thermosol* consiste na impregnação do tecido com o banho que contém o corante e auxiliares. De seguida o tecido passa por uma câmara de alta temperatura onde se dá a fase de fixação, através da queima direta de gás natural. Na empresa, este procedimento é utilizado para aplicar corantes dispersos em tecidos que contenham poliéster.

O *Pad-Steam* difere do anterior no facto de a fixação ser feita por vaporização. Na empresa, é utilizado para a aplicação de corantes de cuba e corantes sulfurosos a tecidos de algodão ou com mistura de algodão.

1.3.4 Acabamento de Tecidos

Por acabamento designa-se o conjunto de operações que têm como finalidade conceder ao tecido as propriedades desejadas durante e após confeção, nomeadamente no que respeita ao manuseamento, uso, conservação e limpeza. Os acabamentos caracterizam-se por serem fenómenos físicos ou químicos:

Nos fenómenos físicos podemos categorizar os seguintes processos/máquinas:

- A *Biancalani* é uma máquina semi-contínua, que por efeito mecânico permite obter um toque mais macio.
- A cardação tem por fim “levantar o pelo”, ou seja, fazer sobressair certo número de fibras individuais à superfície dos tecidos de forma a obter um melhor toque e uma retenção do calor, devido à camada de ar que é retido pelas fibras. Para cardar tecidos do tipo algodão, utilizam-se máquinas de cardar, onde as cardas propriamente ditas, ou poados, são pequenos rolos nos quais se encontram agulhas metálicas que “puxam” as fibras. Pode conseguir-se um efeito muito ligeiro de pelo utilizando uma espécie de lixa, numa operação designada por esmerilagem.
- Os tecidos têm normalmente tendência a encolher na lavagem, devido ao relaxamento das tensões introduzidas na fiação e sobretudo na tecelagem. Para que o encolhimento do tecido seja mínimo após confeção existem duas possibilidades: aplicam-se produtos químicos que fixam as dimensões ou que permitem ou obrigam o tecido a encolher na fase de acabamento. O método mais eficaz é processado na máquina *Sanfor* que, com uma regulação correta de temperatura e humidade, garante que as variações dimensionais dos tecidos na lavagem não ultrapassem 1 %. A essência desta máquina

é uma tela de borracha que, graças ao seu arqueamento, obriga o tecido, previamente humidificado, a comprimir-se.

Nos fenómenos químicos podemos categorizar os seguintes processos/máquinas:

- A polimerização é usada para permitir que se completem os processos químicos inerentes à aplicação de alguns produtos químicos de acabamento.
- A *ramolagem* é uma secagem, mas, dadas as características das râmolas, permite conferir ao tecido maior estabilidade dimensional e ajustes ao peso pretendido. As râmolas pelo facto de possuírem um balseiro onde é possível a aplicação de produtos químicos de acabamento, tais como amaciadores ou vários tipos de resinas sintéticas, permitem ainda obter diversos efeitos no tecido.

Quando todo o processo está concluído, o artigo têxtil passa obrigatoriamente por uma inspeção onde, se avaliam os diversos parâmetros de qualidade. Anteriormente, no tingimento, também foi realizada uma inspeção que permite corrigir o processo antes do acabamento. Este setor de inspeção ou revista só consome energia elétrica em motores que permitem o desenrolamento/enrolamento do tecido a ser examinado e medido.

1.3.5 Secção das Malhas

As próprias características que a malha tem faz com que as operações de tinturaria sejam significativamente diferentes que as operações da zona dos tecidos. Ao contrário da maioria dos processos existentes na zona dos tecidos que são realizados de forma contínua com o tecido sobre tensão, os processos da zona das malhas não são realizados sobre tensão e, nomeadamente, no *Jet* (equipamento onde ocorre o tingimento da malha) o processo é descontínuo. O tingimento no *Jet* é realizado por esgotamento, ou seja, a malha é mergulhada num banho de tingimento durante um período de tempo que tanto pode ser de alguns minutos como de várias horas. Numa primeira fase dá-se a absorção do corante na superfície da malha e só depois há a difusão do corante na malha. A introdução de reagentes auxiliares no banho de tingimento, aliado com o aumento de temperatura contribui para que o tingimento seja mais rápido e eficiente.

Os processos de acabamento da malha são idênticos aos acima referidos para os tecidos.

1.4 Consumos de Energia na Empresa

A empresa MGC AT apresenta como principais fontes de energia o gás natural e a energia elétrica que emprega nos seguintes usos finais:

- Força motriz: motores, bombas, ventiladores, compressores, entre outros;
- Geração vapor: caldeiras vapor;
- Geração de termofluido: caldeiras termofluido;
- Queima direta de gás natural, no processo produtivo.

Os seguintes dados apresentados são propriedade intelectual da empresa MGC AT, não podendo ser copiados nem reproduzidos.

Ao longo do ano de 2017 a MGC AT foi uma empresa consumidora intensiva de energia. Na Figura 1.4 apresenta-se a repartição mensal do consumo de energia elétrica em kWh durante o ano de 2017, consumindo um total de 6413,7 MWh.

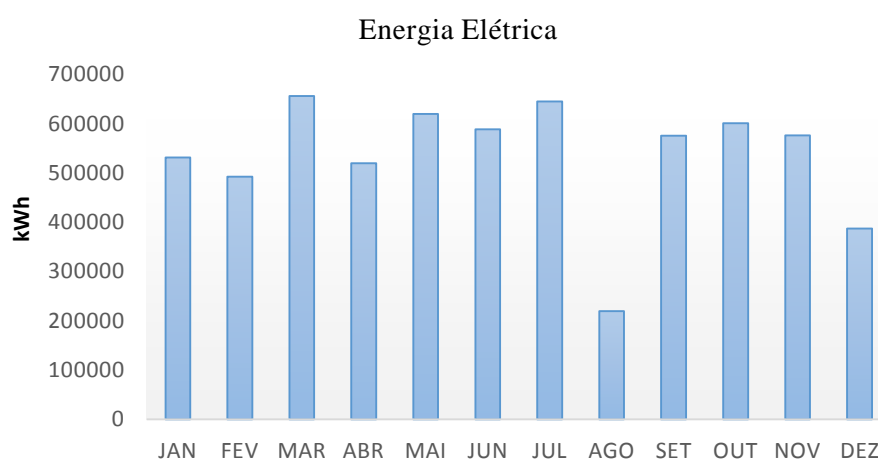


Figura 1.4. Consumo mensal de energia elétrica em 2017.

Na Figura 1.5 observa-se a repartição mensal do consumo de gás natural em m³ (metros cúbicos normalizados) ao longo do ano de 2017, totalizando 4962681 m³.

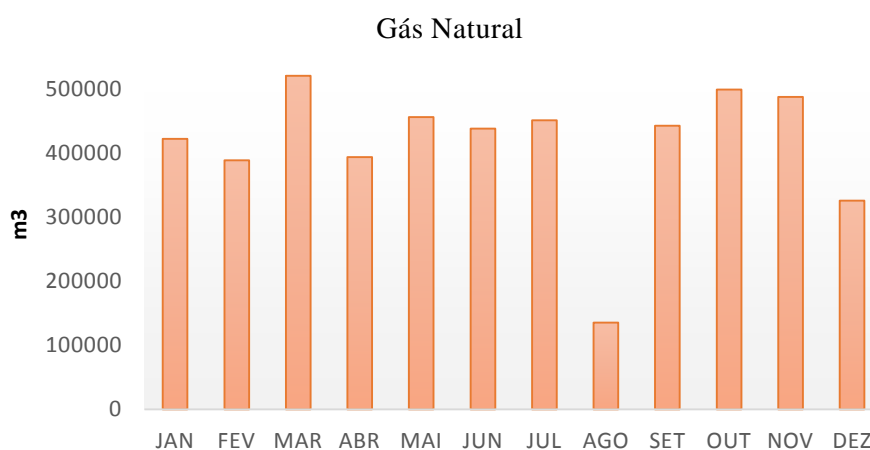


Figura 1.5. Consumo mensal de gás natural em 2017.

É de realçar um consumo de energia inferior durante os meses de agosto e dezembro devido à da empresa se encontrar parcialmente em período de férias. É também notória a evolução dos consumos de gás natural e energia elétrica com uma tendência muito semelhante ao longo dos meses.

1.4.1 Análise dos Consumos de Energia

Portugal para atingir as metas impostas pela União Europeia e para melhorar o desempenho energético, uma vez que é um dos fatores chave da sustentabilidade energética, tem vindo a adotar diversas estratégias políticas para alcançar um melhor desempenho no setor. Nesse sentido foi publicado o Decreto-Lei nº71/2008 de 15 de abril, que regulamenta o Sistema de Gestão dos Consumos Intensivos de Energia (SGCIE). Este diploma foi alterado pelo Decreto-Lei nº68-A/2015, de 30 de abril, aplicando-se às instalações consumidoras intensivas de energia com consumos superiores a 500 tep/ano. A tonelada equivalente de petróleo (tep) é a unidade de energia primária consagrada mundialmente.

O SGCIE prevê que as instalações com consumos intensivos de energia concretizem, periodicamente, auditorias energéticas que recaiam sobre as condições de utilização de energia e promovam o aumento da eficiência energética, incluindo o uso de fontes de energia renováveis. Prevê, ainda, a elaboração e execução de Planos de Racionalização dos Consumos de Energia (PREn) que é um manual de medidas que apresenta recomendações viáveis com o objetivo de possibilitar a melhoria da eficiência energética de uma instalação. Os PREn, quando aprovados, constituem Acordos de Racionalização dos Consumos de Energia (ARCE) celebrados com a Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG), associando ao seu cumprimento a obtenção de incentivos pelos operadores dessas instalações, tais como a isenção do Imposto sobre Produtos Petrolíferos e Energéticos (ISP) aplicado sobre as faturas de energia, nomeadamente eletricidade e gás natural, durante o período de 8 anos, a identificação profissional e robusta de oportunidades para redução dos custos/consumos de energia, sempre suportado por um estudo de viabilidade vinculativo, o acesso a candidaturas de financiamento proveniente dos Avisos do Fundo de Eficiência Energética (FEE) [7].

A empresa MGC AT, durante o ano de 2013, realizou uma auditoria energética de acordo com o SGCIE, da qual resultou um PREn de 2012 a 2018.

De forma a caracterizar a utilização de energia apresentada utilizam-se como fatores de conversão, os valores indicados na Tabela 1.1.

Tabela 1.1. Fatores de conversão de energia¹ (Fonte: SGCIE).

Fonte de energia	Unidade	kg _{ep} ² /unidade	GJ/unidade	kg CO _{2e}
Eletricidade ³	kWh	0,215	0,0036	0,47
Gás Natural	m ³	0,91	0,0036	-

¹ Tabela 2, Despacho 17313/2008, de 3 de junho.

² Quilograma equivalente de petróleo

³ Ponto 3.1 do Despacho 17313/2008, de 3 de junho.

Para efeitos deste Despacho e de acordo com o Anexo II da Diretiva 2006/32/CE, o valor do $\eta_{\text{elétrico}}$ é igual a 0,4, pelo que $1 \text{ kWh} = 215 \times 10^{-6} \text{ tep}$.

Para efeitos da contabilização da intensidade carbónica por emissão de gases com efeito de estufa, considera -se que o fator de emissão associado ao consumo de eletricidade é igual a $0,47 \text{ kgCO}_2/\text{kWh}$, de acordo com o estabelecido na Portaria n.º 63/2008 de 21 de janeiro, 1ª série.

Os fatores de conversão para Poderes Caloríficos Inferiores (PCI) e Fatores de Emissão para Combustíveis (FE), no caso do gás natural podem ser observados na Tabela 1.2, segundo a tabela 2 do Despacho 17313/2008, de 3 de junho.

Tabela 1.2. Fatores de conversão para PCI e FE do gás natural (Fonte: SGCIE).

Combustível	PCI (tep/t)	FE (kgCO ₂ /tep)
Gás natural ⁴	1,077	2683,7

Assim, o valor para o PCI do gás natural nas diferentes grandezas é dado por:

- $PCI_{GN} = 1,077 \text{ tep/t}$
- $PCI_{GN} = 1,077 \times 0,8404 = 0,91 \text{ kgep/m}^3$

A Figura 1.6 ilustra a evolução mensal do consumo total de energia em tep pela produção de tecido em toneladas, totalizando 5894,99 tep de energia e 5768,2 toneladas de produção.

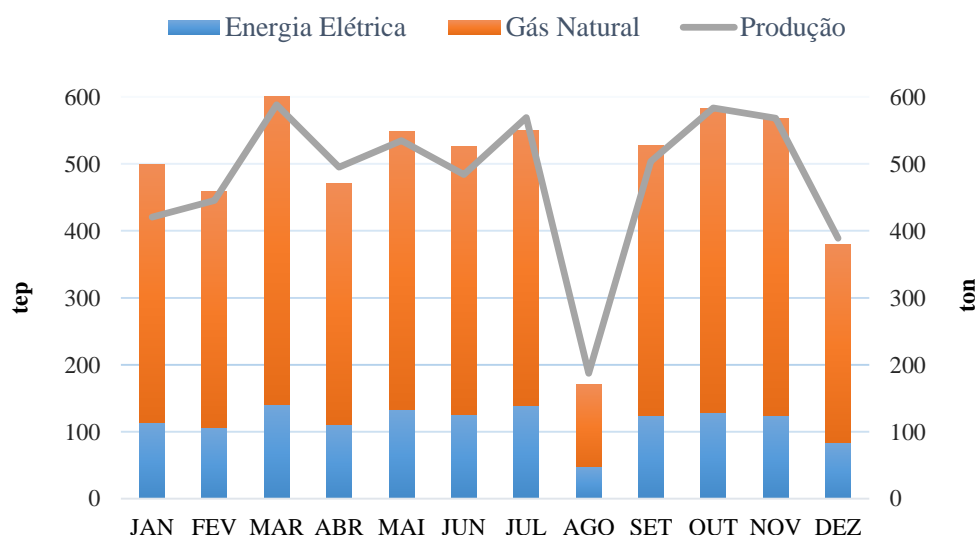


Figura 1.6 Evolução mensal do consumo de energia pela produção de tecido.

A Figura 1.7 representa a repartição anual do consumo da energia elétrica e gás natural no ano de 2017. É evidente através do gráfico que a empresa apresenta um consumo mais

⁴ Peso específico do gás natural é de $0,8404 \text{ kg/m}^3$, Despacho 17313/2008, de 3 de junho.

significativo de energia a partir do gás natural do que energia elétrica, representando mais de 75 % da energia total.

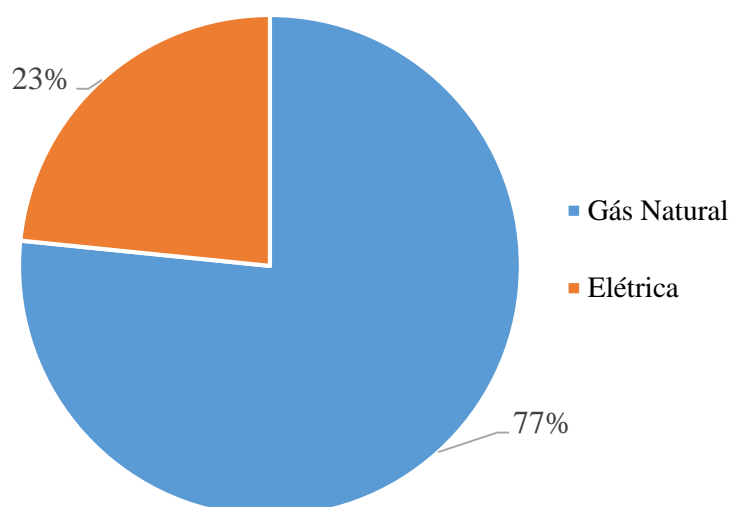


Figura 1.7. Repartição anual de energia em tep.

1.4.2 Análise dos Indicadores Energéticos

De acordo com o Decreto-Lei 71/2008 e o Despacho nº 17449/2008 os indicadores energéticos que são necessários determinar são a intensidade energética (IE), a intensidade carbónica (IC) e o consumo específico (CE). As metas para a MGC AT, sendo esta uma empresa com consumo de energia igual ou superior a 1000 tep/ano está sujeita aos seguintes valores:

- No mínimo, uma melhoria de 6 % para os indicadores de intensidade energética e consumo específico de energia, em oito anos;
- No mínimo, a manutenção dos valores históricos de intensidade carbónica.

Estas metas devem ainda ser cumpridas num prazo estabelecido de oito anos [8]. Os indicadores são assim determinados:

- Intensidade Energética

A IE é medida pela razão entre o consumo total de energia (considerando apenas 50 % da energia resultante de resíduos endógenos e de outros combustíveis renováveis) e o Valor Acrescentado Bruto (VAB) das atividades empresariais diretamente ligadas a essas instalações industriais. Devido à política de confidencialidade da empresa os valores do VAB não serão aqui citados. O valor da intensidade energética é determinado através da equação (1.1).

$$IE = \frac{\text{Consumo total de energia (tep)}}{\text{Valor Acrescentado Bruto (€)}} \quad (1.1)$$

- Intensidade Carbónica

A IC é medida pelo quociente entre o valor das emissões de gases de efeito de estufa resultantes da utilização das várias formas de energia no processo produtivo e o respetivo consumo total de energia. A meta anual é de 2,55 tCO₂/tep, sendo que o cálculo é efetuado pela equação (1.2).

$$IC = \frac{\text{Emissões de CO}_2 \text{ (tCO}_2\text{)}}{\text{Consumo total de energia (tep)}} \quad (1.2)$$

- Consumo Específico

A determinação do CE obtém-se através da divisão da energia utilizada expressa em tep, pela produção expressa em toneladas e pode ser determinado pela equação (1.3).

$$CE = \frac{\text{Consumo de energia (tep)}}{\text{Produção (t)}} \quad (1.3)$$

Na Figura 1.8 apresenta-se a evolução mensal dos indicadores energéticos: o consumo específico e a intensidade carbónica, onde se utilizou a unidade kgep em vez de tep. Na intensidade carbónica verifica-se um suave decréscimo entre janeiro e julho, enquanto entre agosto e novembro observa-se um acréscimo. Esta variação sugere que há uma ligeira redução da IC nos meses mais quentes e um pequeno aumento nos meses mais frios. Repare-se que os meses de janeiro e junho, apresentam-se com os valores mais altos do CE.

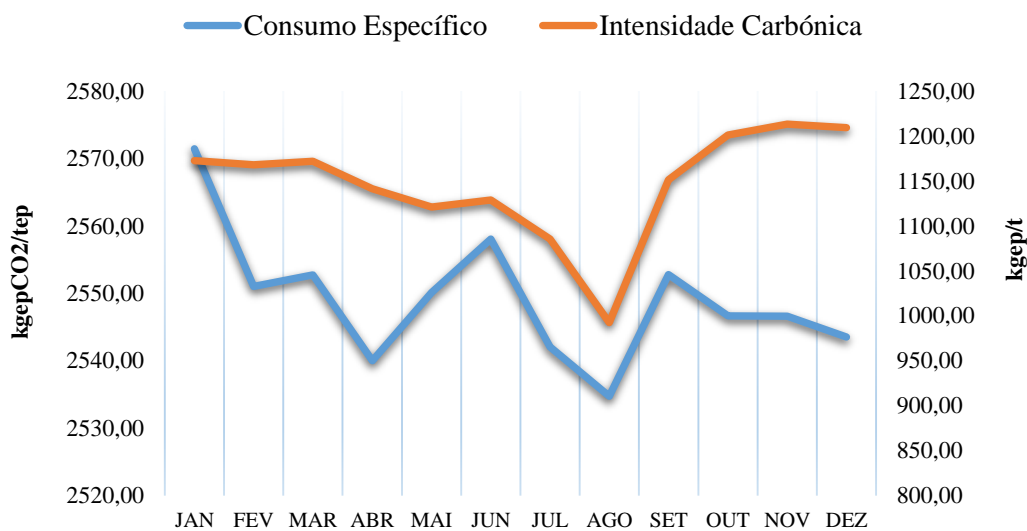


Figura 1.8. Evolução mensal dos indicadores energéticos CE e IC.

A Tabela 1.3 apresenta a evolução anual dos indicadores energéticos que são contabilizados neste trabalho para análise do cumprimento das metas estabelecidas nos ARCE.

Tabela 1.3. Consumos específicos de energia anuais.

	Ano base 2012	Ano 2013	Ano 2014	Ano 2015	Ano 2016	Ano 2017
Energia Total (tep)	3129	4029	5308	4673	5690	5895
Produção (t)	2 425,5	3 291,1	4 800,2	4 137,5	5 535	5 768,2
Consumo Específico (kgep/t)	1290	1224,3	1105,8	1129,3	1028	1022
Intensidade Carbónica (tep/tCO₂)	2,55	2,55	2,57	2,56	2,56	2,56

Na Figura 1.9 observa-se a evolução dos desvios anuais do CE de energia e da IC em relação ao ano base (2012). Conforme previsto com as metas acima referidas a empresa quase atingiu logo no primeiro ano os 6 % de melhoria no CE em relação ao ano base. Embora em 2015 tem havido um aumento de 1,8 %, em 2017 há uma redução considerável de 20,8 % em relação ao ano base. Em relação à IC não se apresentaram desvios significativos dos valores históricos.

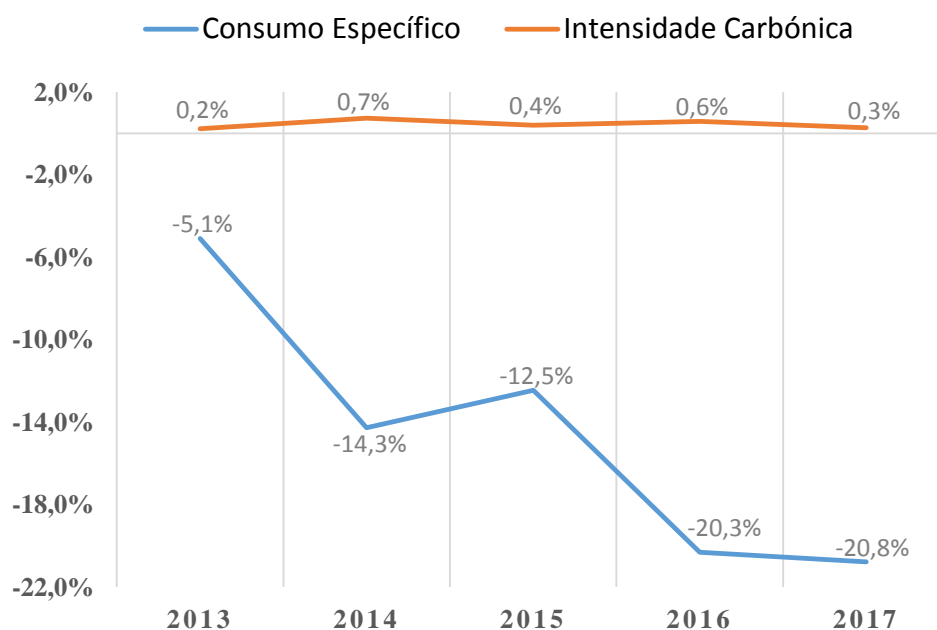


Figura 1.9. Evolução anual dos indicadores energéticos CE e IC.

1.5 Motivações

Os custos resultantes da falta de qualidade podem ser elevadíssimos, consoante o tipo de perturbação que afeta os equipamentos. De acordo com a organização *European Copper Institute*, uma pesquisa conclui que as perdas financeiras devido à má qualidade de energia somam um total de 150 mil milhões de euros por ano na União Europeia-25. E o seu impacto no resto do mundo está na mesma ordem de grandeza [9].

A empresa MGC AT apresenta como principais recursos energéticos o gás natural e a eletricidade, apresentando-se como uma grande consumidora energética. A energia elétrica por si só representa cerca de 25 % do consumo de energia total, sendo desta forma um peso avultado na administração financeira da empresa. Diminuir o consumo de energia elétrica e melhorar a qualidade do serviço da energia é, não só, uma importante medida de gestão para minimização de custos, mas também uma forma de salvaguardar o meio ambiente.

1.6 Objetivos

O trabalho proposto tem como principais objetivos fazer a análise dos consumos de energia numa indústria têxtil, bem como monitorizar e estudar o impacto dos parâmetros da qualidade de energia elétrica na fiabilidade dos equipamentos e na eficiência energética recorrendo especificamente a um analisador de QEE. O trabalho a desenvolver divide-se em:

- Recolher e analisar os dados dos consumos de energia da empresa;
- Recolher e analisar os dados dos parâmetros relativos à QEE do posto de transformação (PT) e das cargas com maior consumo de energia;
- Descrever os pontos de distribuição da instalação elétrica desde o PT até ao ponto de utilização das diferentes cargas;
- Caracterizar e analisar a QEE do gerador de emergência;
- Identificar e caracterizar os principais elementos que constituem uma mini-hídrica.
- Fazer corresponder possíveis avarias com os problemas da QEE.

Com o desenvolvimento deste trabalho pretende-se ajudar a empresa a otimizar e reduzir os consumos de energia elétrica e controlar os efeitos das suas ações na QEE.

1.7 Organização da Dissertação

Neste capítulo 1 é realizada uma introdução ao tema da energia em Portugal e são apresentados alguns indicadores dos custos da energia, retirados de estudos realizados por entidades certificadas. Neste capítulo apresenta-se também a empresa MGC AT, a análise aos seus consumos de energia e respetivos indicadores energéticos.

No capítulo 2 são apresentados os principais problemas de qualidade de energia elétrica, e quais as normas que definem os limites de qualidade. É ainda apresentado e caracterizado o analisador de qualidade de energia utilizado na conduta da auditoria.

No capítulo 3 é exibido o posto de transformação e os seus constituintes. São ainda apresentados e analisados parâmetros da qualidade energia dentro do PT, nomeadamente a monitorização nos transformadores de potência.

No capítulo 4 apresenta-se a distribuição dos quadros elétricos ao longo dos pisos da zona fabril e das cargas com maior consumo de energia elétrica durante o ano de 2017. São igualmente apresentados e analisados parâmetros da qualidade energia das cargas com maior consumo de energia elétrica.

No capítulo 5 são mostradas as principais características do gerador de emergência, assim como a análise da qualidade de energia do mesmo.

No capítulo 6 é apresentada a CMH, que faz interligação com a rede dentro do PT, exibindo os principais elementos da central.

Por fim, no capítulo 7, são apresentadas as principais conclusões e sugestões de trabalho futuro.

Capítulo 2

Qualidade de Energia Elétrica

2.1 Introdução

O conceito de qualidade de energia elétrica (QEE), ou *power quality* na literatura inglesa, foi utilizado pela primeira vez, enquanto publicação, em 1968 [10]. Nessa publicação foi apresentado um estudo, elaborado pela marinha dos Estados Unidos da América, em que foram analisadas as especificações de um equipamento eletrónico relativas à capacidade de funcionamento sob o efeito de perturbações de alimentação. O conceito de QEE tem vindo a sofrer alterações sucessivas com o progresso tecnológico. Inicialmente, quando se falava em QEE, a principal preocupação residia na continuidade de serviço, ou seja, na duração e no número de interrupções de tensão. Contudo, para além da continuidade de serviço, têm vindo a assumir importância outros parâmetros de QEE, tais como, a amplitude e a frequência fundamental da tensão, o desequilíbrio de tensões e a distorção harmónica [11].

No mercado, existem várias soluções de analisadores para QEE. Esta diversidade deve-se ao facto de existir um grande número de fabricantes destes dispositivos. Deste modo, potencia-se a diversidade de funcionalidades e os preços dos equipamentos. Na Tabela 2.1 encontram-se diversos analisadores e respetivos fabricantes.

Tabela 2.1. Fabricantes de analisadores de QEE.

Analisadores de Energia Elétrica	Fabricantes
Power Sentinel	Arbiter System
ImpedoGraph	CTLab
ION 7600	Power Measurement
RQE III RM 100	Reason
PQ Analyser 1760, FLUKE 1744, FLUKE 1745, FLUKE 434/435	Fluke
G4430 Blackbox	Elspec TD
ENCORE SERIES 61000 System, Power Visa, PowerGuide 4400, PowerXplorer PX5,	Dranetz BMI
SEL-734	Schweitzer Engineering Laboratories
PQube	Power Standards Laboratories
POWERNET PQ600	IMS

No âmbito da Comunidade Europeia, no sentido da harmonização da legislação sem a qual ficaria afetada a livre troca de bens e serviços, diversas diretivas foram publicadas no sentido de eliminar as diferenças na legislação desses Estados. Atualmente, as perturbações eletromagnéticas são tratadas também nas várias normas internacionais que abordam o tema da QEE. Para combater o aumento destas perturbações na União Europeia, organizações como a *International Electrotechnical Commission* (IEC), o *Comité Européen de Normalisation* (CEN), o *Comité Européen de Normalisation Électrotechnique* (CENELEC) e o *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE), têm elaborado normas que, entre outras, limitam o conteúdo harmónico nos sistemas elétricos.

Em Portugal, destaca-se o Regulamento da Qualidade de Serviço (RQS), sendo este o principal instrumento de regulamentação da QEE do país. O RQS estabelece padrões de qualidade no fornecimento de energia elétrica, no que respeita ao número e duração das interrupções de fornecimento e à qualidade da onda da tensão. Determina-se assim um padrão de qualidade, estabelecendo os adequados mecanismos de atuação e de monitorização, e definindo ainda as penalizações para o seu incumprimento.

É impossível manter todos os parâmetros característicos da onda de tensão invariáveis e iguais ao valor nominal, ao longo do tempo. Por este facto, é necessário definir as variações admissíveis para estes parâmetros. As normas relativas à QEE focam três aspetos fundamentais: definição de terminologia, definição das características nominais e definição de limites para as perturbações [11]. Com o surgimento da Diretiva de Conselho n° 85/374 sobre responsabilidade de produtos defeituosos, que no seu artigo 2° define a eletricidade como um produto, tornou-se obrigatório definir as suas características. Em Portugal, utiliza-se como base a NP EN 50160:2010, com termo de homologação n° 368/2010.

2.2 Problemas de Qualidade de Energia

As disposições de qualidade de serviço no setor elétrico, de natureza técnica, dizem respeito à continuidade do serviço e da QEE. Os problemas de QEE provêm de uma grande variedade de fenómenos físicos e eletromagnéticos dos sistemas elétricos. São muitos os fatores que podem afetar a QEE, destacando-se [12]:

- Fatores relacionados com a exploração da rede elétrica (gestão e funcionamento da rede, manutenção, entre outros);
- Fatores relacionados com o utilizador final (falhas na instalação, a poluição emitida para a rede, entre outros);

- Fatores independentes (fatores ambientais, fenómenos meteorológicos, danos causados por terceiros, acidentes, entre outros).

De acordo com a norma NP EN 50160, a caracterização da qualidade da onda de tensão é realizada com base na análise de fenómenos contínuos e de eventos de tensão. Para os fenómenos contínuos analisados nas redes estão estabelecidos valores limite no RQS:

- A frequência;
- O valor eficaz da tensão (*Root Mean Square- RMS*);
- A tremulação da tensão (*flicker*);
- O desequilíbrio do sistema trifásico de tensões;
- A distorção harmónica na tensão;
- As cavas de tensão (*voltage dips*);
- As sobretensões (*voltage swells*).

De seguida são apresentados alguns dos principais problemas de QEE mais frequentes nos sistemas elétricos, bem como os limites estabelecidos pelas normas que os estabelecem e caracterizam.

2.2.1 Interrupção do Serviço

Ao abrigo do n.º 1 do artigo 15.º do RQS define-se interrupção como: “A ausência de fornecimento de energia elétrica a uma infraestrutura de rede ou à instalação do cliente” [13]. O início da interrupção é o instante em que a tensão de alimentação é inferior a 5 % do valor da tensão declarada em todas as fases e o fim da interrupção é o instante em que a tensão é igual ou superior, numa das fases, a 5 % da tensão declarada. Para efeitos de determinação dos indicadores de continuidade de serviço, são consideradas as interrupções:

- Longas: duração superior a 3 minutos;
- Curtas: duração igual ou superior a 1 s e inferior ou igual a 3 minutos.

2.2.2 Variação da Amplitude da Tensão

Os valores definidos na norma NP EN 50160 para redes de (BT) devem corresponder:

- Para cada período de uma semana, 95 % dos valores eficazes da tensão médios de 10 minutos devem situar-se no intervalo $V_n \pm 10\%$;
- Para todos os períodos de 10 min, todos os valores médios de valor eficaz da tensão devem situar-se no intervalo $V_n +10\%$ e -15% .

2.2.3 Cavas na Tensão

De acordo com a alínea b) do n.º 2 do artigo 3.º do RQS, uma cava da tensão (*voltage dip*) de alimentação consiste na “diminuição brusca da tensão de alimentação para um valor situado entre 90 % e 5 % da tensão declarada, seguida do restabelecimento da tensão num intervalo de tempo entre 10 ms e 60 s” [14].

Na caracterização de uma cava utiliza-se um dos seguintes critérios:

- 1) O início ocorre quando o valor eficaz da tensão de uma ou mais fases cai repentinamente para um valor situado entre os 90 % e os 5 % da tensão declarada (V_c) e termina quando a tensão retoma um valor acima de 90 % da V_c acrescido de um valor de histerese, conforme se pode verificar na Figura 2.1.

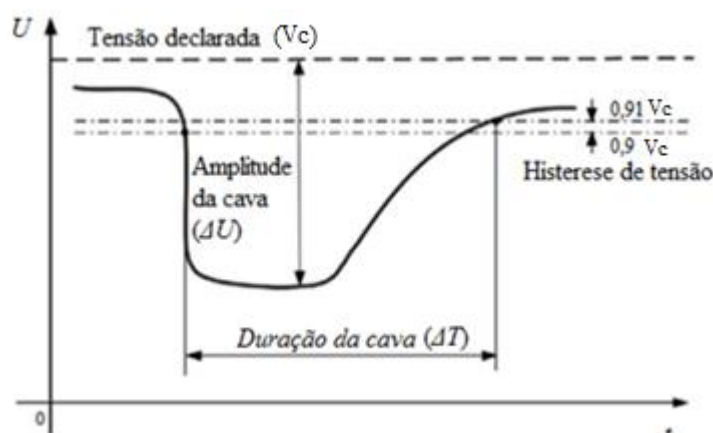


Figura 2.1. Primeiro critério para caracterização de cava de tensão (Fonte: Diário da República) [14].

- 2) A partir da Figura 2.2 verifica-se que o início ocorre quando o valor eficaz da tensão de uma ou mais fases cai repentinamente para um valor situado entre os 90 % e os 5 % da tensão de referência deslizante V_{rd} - valor eficaz da tensão calculado de forma contínua num determinado intervalo de tempo, que representa o valor da tensão antes do início de uma cava - e termina quando a tensão retoma um valor acima dos 90 % dessa tensão de referência acrescida de um valor de histerese de 1 % de V_{rd} [13,14].

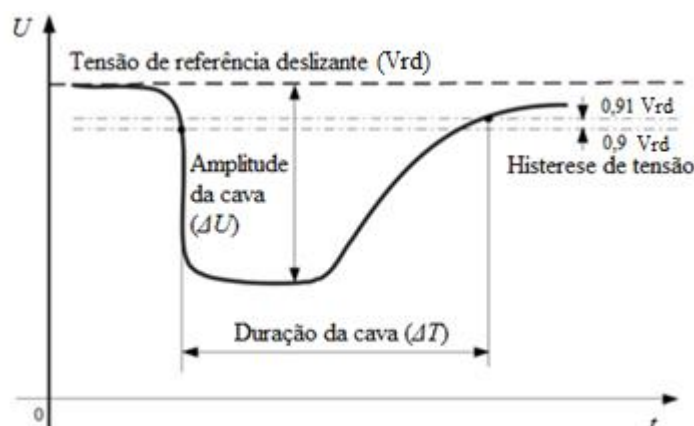


Figura 2.2. Segundo critério para caracterização de cava de tensão (Fonte: Diário da República) [14].

A Tabela 2.2 mostra o quadro de análise para cavas de tensão, onde em cada célula possuirá o número médio de eventos registados no ponto monitorizado, assim como a caracterização desses eventos relativamente à sua duração e percentagem da tensão declarada, em conformidade com a norma NP EN 50160.

Tabela 2.2. Eventos de cavas de tensão (Fonte: Diário da República) [14].

Tensão residual u	Duração t (ms)				
	$10 \leq t \leq 200$	$200 < t \leq 500$	$500 < t \leq 1000$	$1000 < t \leq 5000$	$5000 < t \leq 60000$
$90 \% > u \geq 80 \%$	Célula A1	Célula A2	Célula A3	Célula A4	Célula A5
$80 \% > u \geq 70 \%$	Célula B1	Célula B2	Célula B3	Célula B4	Célula B5
$70 \% > u \geq 40 \%$	Célula C1	Célula C2	Célula C3	Célula C4	Célula C5
$40 \% > u \geq 5 \%$	Célula D1	Célula D2	Célula D3	Célula D4	Célula D5
$5 \% > u$	Célula X1	Célula X2	Célula X3	Célula X4	Célula X5

As cavas de tensão resultam tipicamente da ocorrência de defeitos, nas redes elétricas ou nas instalações de utilização de energia, e a sua duração corresponde ao tempo a que o sistema elétrico está sujeito ao defeito. Por outro lado, as cavas de tensão podem também resultar do arranque de cargas de grande potência nas instalações do cliente, da magnetização de um grande transformador, sendo associadas ao aumento brusco de corrente absorvida da rede [14].

2.2.4 Sobretensões

As sobretensões (*voltage swells*) constituem um fenómeno típico e inerente à exploração de redes de energia elétrica e caracterizam-se por valores de tensão superiores aos que correspondem às condições normais de serviço. A duração das sobretensões nas redes situa-se entre os 10 ms e 1 minuto e corresponde ao tempo típico de eliminação dos defeitos elétricos.

Para a caracterização de uma sobretensão utiliza-se um dos seguintes critérios [13]:

- 1) O início ocorre quando o valor eficaz da tensão de uma ou mais fases aumenta subitamente para um valor situado 10 % acima da tensão declarada V_c e termina quando a tensão retoma um valor abaixo de 110 % da tensão declarada V_c , descontado de um valor de histerese de 1 % de V_c ;
- 2) O início ocorre quando o valor eficaz da tensão de uma ou mais fases aumenta subitamente para um valor situado 10 % acima da tensão de referência deslizante V_{rd} (valor eficaz da tensão existente imediatamente antes do início da cava) e termina quando a tensão retoma

um valor baixo de 110 % dessa tensão de referência descontada de um valor de histerese de 1 % de V_{rd} .

Em conformidade com a norma NP EN 50160 e para efeitos de análise devem adotar-se os períodos de agregação temporal de um e dez minutos, com a apresentação dos resultados em conformidade com a Tabela 2.3:

Tabela 2.3. Eventos de sobretensões (Fonte: Diário da República) [14].

Tensão de incremento u	Duração t (ms)		
	$10 \leq t \leq 500$	$500 < t \leq 5000$	$5000 < t \leq 60000$
$u \geq 120 \%$	Célula S1	Célula S2	Célula S3
$120 \% > u > 110 \%$	Célula T1	Célula T2	Célula T3

Vulgarmente, são causadas por operações de comutação de grandes cargas, descargas atmosféricas, descargas electrostáticas, defeitos de isolamento ou operação de elementos da rede, em particular, de disjuntores (sobretensões de manobra), sendo determinantes para a especificação dos níveis de isolamento dos equipamentos e dos respetivos dispositivos de proteção.

2.2.5 Desequilíbrio das Tensões

O desequilíbrio das tensões de alimentação ocorre quando os valores eficazes ou os ângulos de defasamento entre fases consecutivas são diferentes. Para determinar o desequilíbrio nas tensões de alimentação recorre-se ao teorema das componentes simétricas de Fortescue. A partir deste teorema, pode-se decompor um sistema elétrico trifásico em três sistemas equilibrados: componentes de sequência positiva, componentes de sequência negativa e as componentes de sequência zero. Em condições normais de exploração, para cada período de uma semana, 95 % dos valores eficazes médios de 10 minutos da componente inversa das tensões não devem ultrapassar 2 % da correspondente componente direta [14]. Este fator, em percentagem, é dado pela equação (2.1) [15].

$$FD = \frac{V_-}{V_+} \tag{2.1}$$

Em que:

FD : Fator de desequilíbrio de tensão em percentagem;

V_- : Módulo da tensão de sequência negativa;

V_+ : Módulo da tensão de sequência positiva.

2.2.6 Notches na Tensão de Alimentação

Os *notches* consistem em pequenos micro-cortes periódicos na forma de onda da tensão, que advêm quando a corrente é comutada de uma fase para outra nos aparelhos de potência. Os conversores trifásicos com tensão de saída DC são a causa mais comum dos eventos *notching* de tensão [16].

2.2.7 Variação da Frequência

Segundo a norma NP EN 50160, o valor médio da frequência fundamental da tensão, em condições normais de exploração e medido em intervalos de 10 segundos, deve estar compreendido entre os seguintes valores:

No caso de redes com ligação síncrona a redes interligadas:

- a) 50 Hz \pm 1 % (49,5 Hz - 50,5 Hz) durante 99,5 % durante um ano;
- b) 50 Hz -6 % e 4 % (47 Hz - 52 Hz) durante 100 % do seu tempo.

No caso de redes sem ligação síncrona a redes interligadas:

- c) 50 Hz \pm 2 % (49 - 501 Hz) durante 99,5 % durante um ano;
- d) 50 Hz \pm 15 % (42,5 - 57,5 Hz) durante 100 % do seu tempo.

2.2.8 Tremulação da Tensão

A tremulação (*flicker*) quantifica a flutuação de luminância de lâmpadas causada por variações de tensão de alimentação. Em determinadas frequências de repetição, amplitudes fracas são suficientes para provocar cansaço visual.

A norma IEC 61000-4-15 estabelece a classificação da tremulação de acordo com a severidade de curta duração (*long term severity flicker- Pst*) medida em intervalos de 10 min e a severidade de longa duração (*long term severity flicker- Plt*) calculada sobre uma sequência de doze valores de severidade de curta duração (*Pst*), equivalente a um intervalo de duas horas, em conformidade com a equação (2.2). A norma NP EN 50160 estabelece que em condições normais de exploração, sobre um período de uma semana a *Plt* deve ser menor ou igual a 1, durante 95 % do tempo [17][14].

$$Plt = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{12} \frac{Pst^3}{12}} \quad (2.2)$$

2.2.9 Interferências

Cada peça de equipamento elétrico/eletrónico produz alguma radiação eletromagnética. Da mesma forma, cada equipamento também é mais ou menos sensível, à radiação eletromagnética. A compatibilidade eletromagnética é definida na série IEC 61000 como: “A capacidade de um equipamento ou sistema funcionar satisfatoriamente em seu ambiente eletromagnético sem introduzir perturbações eletromagnéticas intoleráveis a qualquer coisa nesse ambiente.” Para atingir esse objetivo, o equipamento é projetado, construído e testado de acordo com os padrões para reduzir a quantidade de radiação emitida e aumentar a quantidade que pode ser tolerada.

A publicação contém várias partes, por exemplo:

- IEC 61000-1: Aplicação, definições;
- IEC 61000-2: Ambiente, níveis de compatibilidade;
- IEC 61000-3: Limites de perturbação;
- IEC 61000-4: Técnicas de teste e medição;
- IEC 61000-5: Diretrizes de instalação e mitigação;
- IEC 61000-6: padrões genéricos.

As causas mais comuns de interferências são:

- Frequência fundamental da tensão de alimentação (50 Hz);
- Conversores de eletrónica de potência (1 kHz até algumas dezenas de kHz);
- Sinais de rádio (3 kHz a 300 GHz);
- Transientes elétricos rápidos;
- Descargas electroestáticas;
- Transmissões em alta frequência (3 MHz a 30 MHz) [18].

2.2.10 Tensões e Correntes com Harmónicas

A alínea g) do n.º 2 do artigo 3.º do RQS define que a distorção harmónica é a “deformação da onda de tensão (ou de corrente) sinusoidal à frequência industrial provocada, designadamente, por cargas não lineares” [13]. Com a evolução dos componentes eletrónicos e a sua aplicação em larga escala em equipamentos de utilização final de energia, verificou-se um aumento significativo de cargas não lineares nos diferentes setores de atividade industrial, serviços e residencial. De entre os equipamentos responsáveis pela distorção harmónica, podem destacar-se os retificadores estáticos, os variadores eletrónicos de velocidade, as fontes de alimentação comutadas, os sistemas de iluminação (por exemplo

com balastro tradicional e eletrónico), os fornos de arco e de indução, entre outros. Dada a proliferação destes sistemas eletrónicos, com características de cargas não lineares, a distorção harmónica nos sistemas elétricos tem aumentado significativamente nos últimos anos, afetando a eficiência da rede de distribuição e os equipamentos de utilização final [19].

Segundo o teorema de Fourier, qualquer sinal periódico pode ser representado por uma série de sinais sinusoidais. Esses sinais designam-se por harmónicas, que são frequências múltiplas inteiras da frequência fundamental. A Figura 2.3 exhibe as formas das ondas das correntes instantâneas, num sistema trifásico afetado pelas harmónicas.

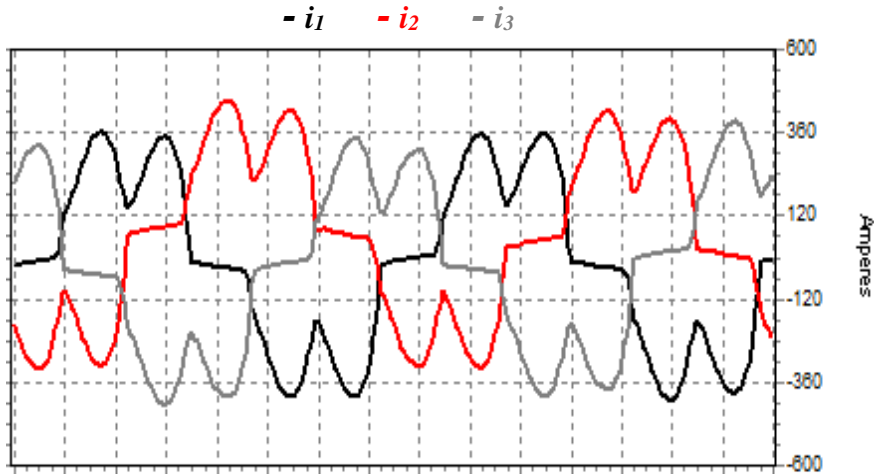


Figura 2.3. Correntes com elevada distorção.

Um método utilizado para analisar um sinal com harmónicas é recorrer à análise espectral, onde o sinal é transformado para o domínio das frequências, através da transformada rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform*). Na Figura 2.4 observa-se o espectro das correntes i_1 , i_2 e i_3 , onde é notório a contribuição individual, em percentagem, de cada harmónica.

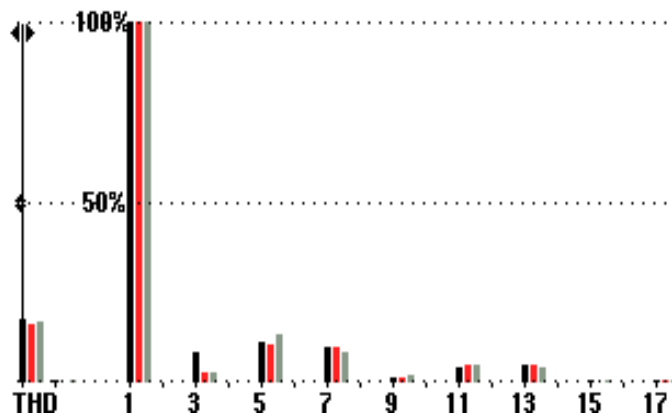


Figura 2.4. Espectro harmónico das correntes i_1 , i_2 e i_3 .

A Figura 2.5 apresenta um exemplo de tensões instantâneas distorcidas, de um sistema trifásico. Como as correntes que circulam nas linhas contêm harmónicas (i_c) e as quedas de tensão provocadas pelas harmónicas nas impedâncias das linhas fazem com que estas tensões fiquem também distorcidas, originando a chamada “poluição harmónica” [20]. Deste modo,

as cargas lineares passam também a ser alimentadas por tensões distorcidas (v_C), conforme ilustra a Figura 2.6.

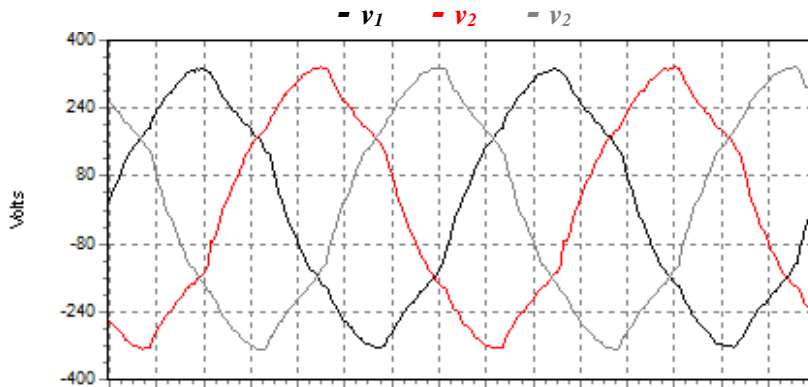


Figura 2.5. Tensões de alimentação com distorção harmónica.

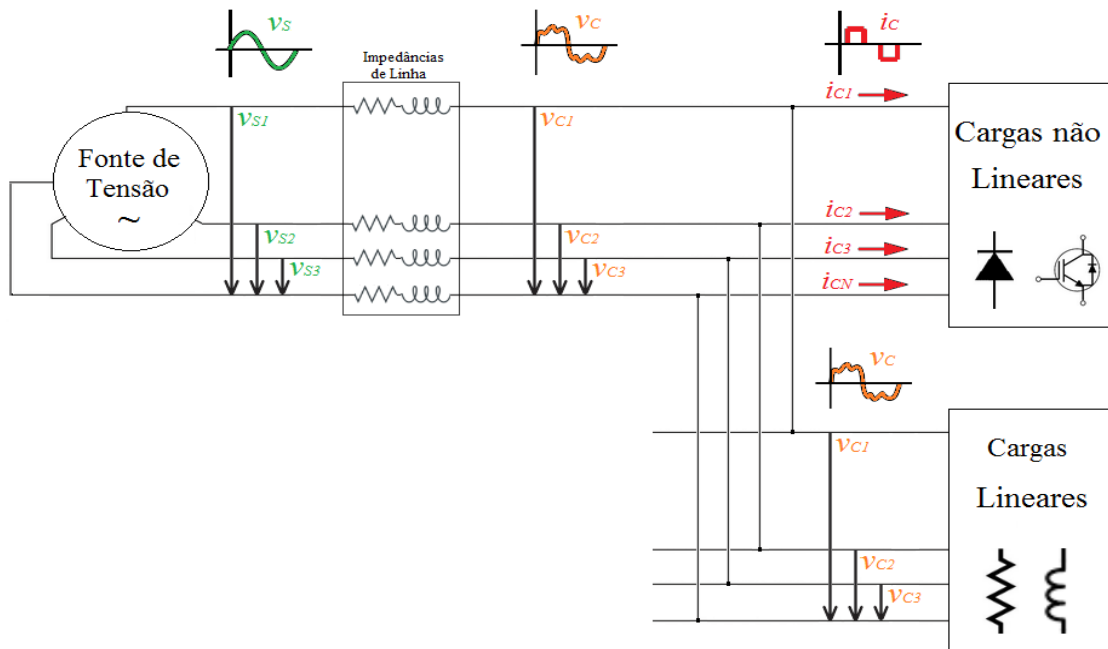


Figura 2.6. Distorção da tensão provocada pelas correntes não lineares ao circularem nas impedâncias de linha.

Como resultado da circulação de tensões e correntes com harmónicas, cargas como, por exemplo, transformadores, motores e baterias de condensadores, tendem a reduzir o seu tempo de vida útil, aumentando as perdas e podendo mesmo levar à sua destruição. Também os sistemas de medição de energia elétrica podem apresentar erros de leitura no caso de equipamentos de medição que não sejam *True RMS*, ou erros de atuação de dispositivos de proteção.

As tensões harmónicas podem ser quantificadas individualmente, pelo valor da amplitude (V_h) de uma harmónica individual (h), ou globalmente pelo valor da distorção harmónica total (*Total Harmonic Distortion- THD*). A distorção harmónica total da tensão (até à ordem 40) é determinada pela equação (2.3) [17].

$$THD_{\%} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} V_h^2}}{U_1} 100 \% \quad (2.3)$$

A norma NP EN 50160 determina que por cada período de uma semana, 95 % dos valores eficazes médios de 10 min para cada tensão harmônica, não devem exceder determinados valores de referência. Além disso, o THD da tensão de alimentação (incluindo todos as harmônicas até a ordem 40) deve ser menor ou igual a 8 %.

Tabela 2.4. Valores limites das tensões harmônicas nos pontos de entrega até à ordem 25.

Harmônicas ímpares não múltiplas de 3		Harmônicas ímpares múltiplas de 3		Harmônicas pares	
Ordem (h)	Tensão relativa	Ordem (h)	Tensão relativa	Ordem (h)	Tensão relativa
5	6 %	3	5 %	2	2 %
7	5 %	9	1,5 %	4	1 %
11	3,5 %	15	0,5 %	6 a 24	0,5 %
13	3 %	21	0,5 %	-	-
17	2 %	-	-	-	-
19	1,5 %	-	-	-	-
23	1,5 %	-	-	-	-
25	1,5 %	-	-	-	-

Nota: os valores correspondentes das harmônicas de ordem superior a 25, por serem geralmente baixos e muito imprevisíveis (devido aos efeitos de ressonância), não são indicados nesta tabela.

Como consequência da presença de frequências harmônicas nas instalações, destaca-se o aumento das perdas por correntes parasitas nos transformadores, sendo que essas perdas são proporcionais ao quadrado da frequência. Um problema ainda mais importante ocorre quando a distorção atinge valores altos e o perigo de ressonâncias entre o sistema de correção do fator de potência (capacidade equivalente dos condensadores) e a indutância equivalente da rede se tornam evidentes. A ressonância ocorre quando as reatâncias indutiva e capacitiva são iguais [21].

2.2.10.1 Caracterização das Harmônicas

As harmônicas podem ser caracterizadas pela sua ordem, frequência, fase e sequência (positiva, negativa, zero), assim como se pode verificar a sua evolução na Tabela 2.5.

Tabela 2.5. Ordem, frequência e sequência das harmônicas.

Ordem	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Frequência	50	100	150	200	250	300	350	400	450
Sequência	+	-	0	+	-	0	+	-	0

As harmónicas de sequência positiva, por exemplo, em motores eléctricos, tendem a fazer o motor girar no mesmo sentido da componente fundamental, mas com mais rapidez. Por outro lado, as harmónicas de sequência negativa provocam o efeito contrário. Em ambos os casos, o motor perde binário e sobreaquece.

Numa instalação com quatro condutores, apesar de as correntes nas três fases estarem equilibradas as harmónicas de sequência zero vão ser refletidas no condutor de neutro. Este facto acontece em todas as harmónicas múltiplas de três e ímpares incluindo a 3ª, 9ª e 15ª ordem. Desta forma, as harmónicas múltiplas de três encontram-se em fase com a fundamental criando desequilíbrio e a corrente de neutro pode atingir valores superiores ao valor das correntes nas fases. Como muitos condutores neutros foram, no passado dimensionados, com metade da secção, esta situação pode-se tornar crítica, mesmo quando os condutores de fase estão a operar bem abaixo da carga total.

2.2.10.2 Filtros Passivos

Uma solução para os minimizar o impacto das harmónicas acima mencionadas é implementar um filtro passivo sintonizado. Os filtros passivos são instalados em paralelo entre os barramentos de tensão e as cargas, promovendo um caminho de baixa impedância para a ordem harmónica sintonizada, evitando que determinadas harmónicas circulem para a fonte de tensão. A Figura 2.7 mostra o esquema simplificado do funcionamento de um filtro passivo sintonizado. Embora a corrente na fonte (i_s) não seja totalmente sinusoidal com a aplicação do filtro passivo, as harmónicas de corrente das cargas não lineares (i_H) que mais contribuem para a THDi são absorvidas pelo filtro.

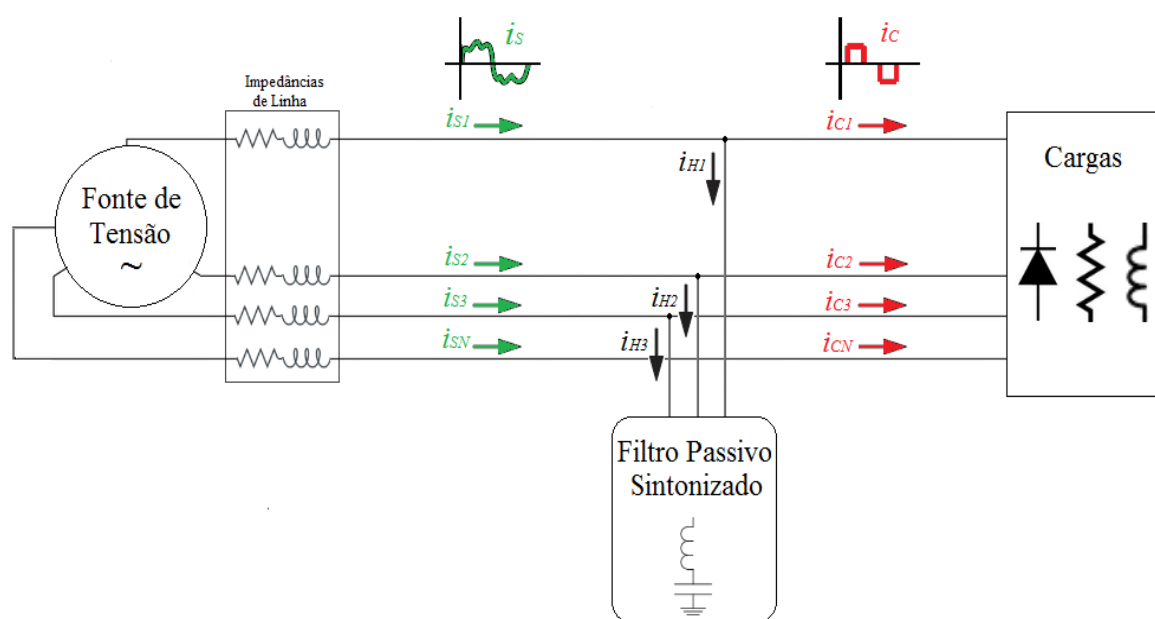


Figura 2.7. Esquema simplificado do funcionamento de um filtro passivo sintonizado.

2.2.10.3 Filtro Ativo Paralelo e Série

Outra solução para a mitigação dos problemas relacionados com harmónicas é a utilização de filtros ativos de potência. Os filtros ativos caracterizam-se pela ligação em série ou em paralelo com a rede elétrica.

Na Figura 2.8 exibe-se um esquema simplificado que ilustra o princípio de funcionamento de um filtro ativo paralelo (FAP). Recorrendo a um FAP é possível compensar as harmónicas de corrente e os desequilíbrios de corrente, através da injeção das correntes do filtro (i_F) no sistema elétrico que o mesmo está a compensar, cancelando desta forma as correntes harmónicas produzidas pelas cargas não lineares [17]. Assim, ao compensar a distorção na corrente da carga (i_C), a corrente na fonte (i_S) passa a ser sinusoidal e equilibrada. A corrente (i_C) a jusante do ponto de instalação do equipamento continua a ser distorcida e desequilibrada. Por conseguinte este FAP deve ser instalado o mais próximo possível das cargas problemáticas, limitando os problemas a uma área restrita, salvaguardando a restante instalação. O FAP pode ainda compensar o FPD da instalação e eliminar a corrente de neutro em sistemas trifásicos a quatro condutores [22].

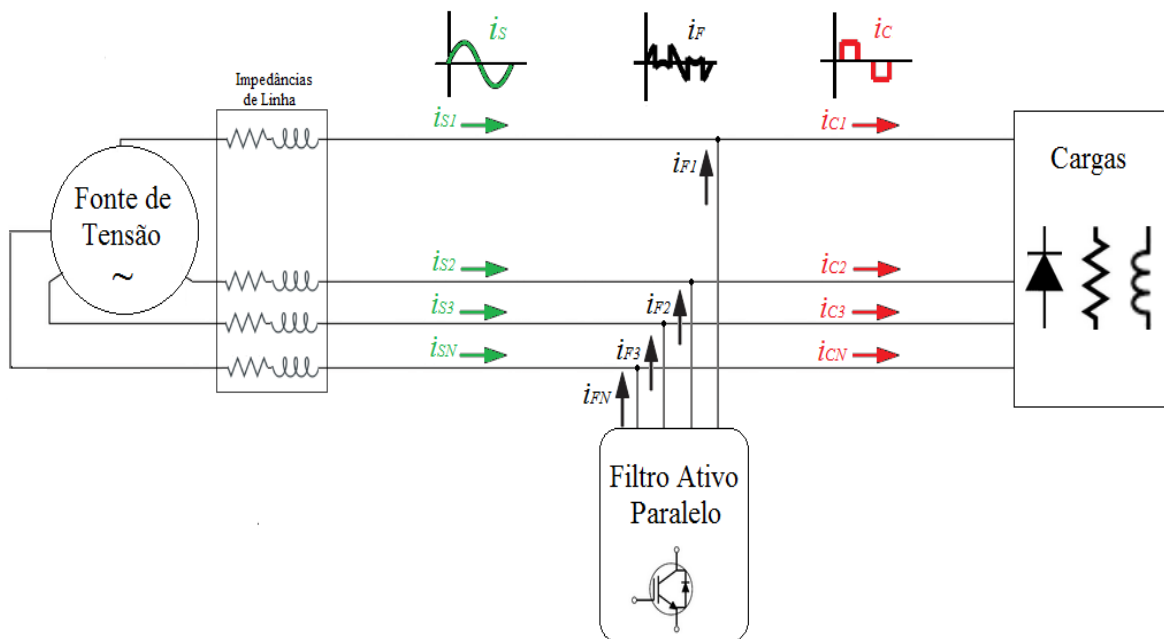


Figura 2.8. Esquema simplificado do funcionamento de um FAP.

Para minimizar os distúrbios nas tensões de alimentação, uma solução passa por utilizar filtros ativos série (FAS). Este filtro permite para além de compensar as harmónicas de tensão, suprimir as cavas de tensão, as sobretensões transitórias, a tremulação da tensão e os desequilíbrios nos sistemas trifásicos de tensão, comportando-se assim como uma fonte de tensão controlada (v_F) [22][23]. Deste modo, ao compensar as tensões da fonte (v_S), as cargas passam a ser alimentadas por uma tensão de alimentação sinusoidal e equilibrada (v_C).

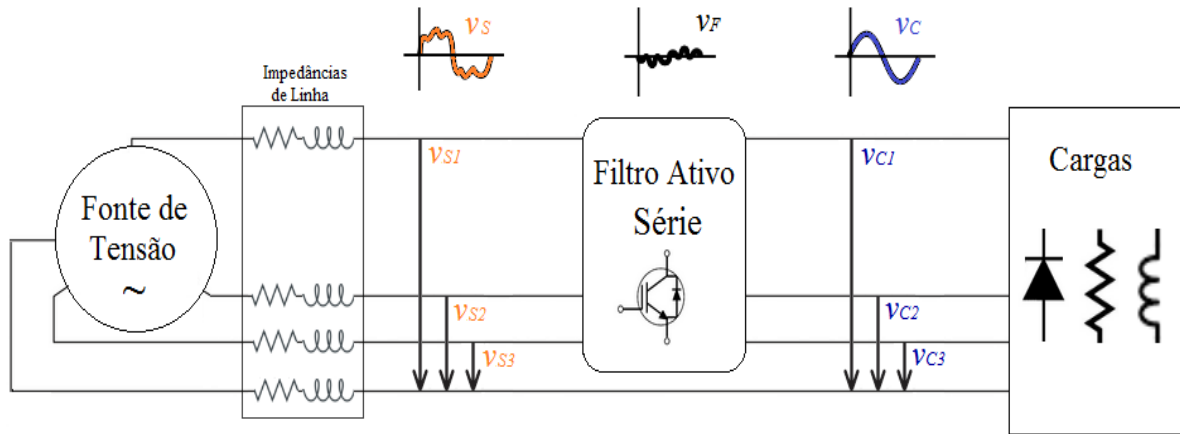


Figura 2.9. Esquema simplificado do funcionamento de um FAS.

2.2.11 Baixo Fator de Potência

Atualmente, as cargas elétricas alimentadas pelo sistema de distribuição não possuem as mesmas características elétricas quando comparadas a algumas décadas atrás, quando praticamente todas elas eram lineares como por exemplo as resistências, as indutâncias e condensadores. Nessa altura o fator de potência (FP) era definido pela relação entre a potência ativa (P) e a potência aparente (S), como mostra a equação (2.4).

$$FP = \cos \varphi = \frac{P}{S} \tag{2.4}$$

Na Figura 2.10 observa-se o desfasamento entre a tensão (v_1) e a corrente (i_1) de fase de uma carga linear resistiva e indutiva, em que é possível verificar o atraso da corrente em relação à tensão. Valores altos do FP (próximos de 1) indicam utilização eficiente da energia elétrica, enquanto valores baixos indicam o seu mau aproveitamento, além de representar uma sobrecarga para todo sistema elétrico.

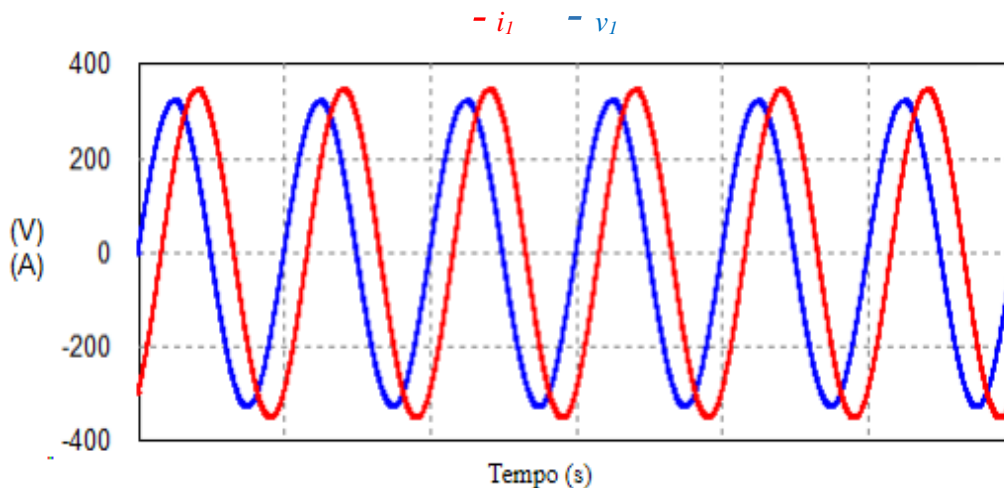


Figura 2.10. Desfasamento entre tensão e corrente.

Tal como já referido anteriormente, com desenvolvimento da eletrónica de potência e do avanço tecnológico dos dispositivos semicondutores, foram introduzidas as cargas não lineares. Assim sendo, as formas de onda deixaram de ser sinusoidais e houve a necessidade de adotar novos métodos de cálculo para o FP. Para correntes não sinusoidais (não lineares) surgiu o fator de potência total (FPT) e para as sinusoidais o fator de potência de deslocamento (FPD). O FPD é o cosseno do ângulo entre as componentes fundamentais (50 Hz) da corrente e da tensão, passando a ser a nova definição do $\cos \varphi$, conforme se observa na equação (2.5):

$$FPD = FP = \frac{P_1}{S_1} = \frac{U_1 I_1 \cos \varphi_1}{U_1 I_1} \quad (2.5)$$

Para calcular o FPT, são contabilizadas todas as harmónicas da tensão e da corrente, calculando-se a partir da equação (2.6):

$$FPT = \frac{P}{S} = \frac{P_1 + P_H}{\sqrt{S_1^2 + S_N^2}} \quad (2.6)$$

Onde:

P_H : é a potência ativa harmónica;

S_N : é a potência aparente não fundamental [17][24].

O Despacho n.º 7253/2010, de 26 de abril, aprovou o regime jurídico aplicável à faturação de energia reativa indutiva e capacitiva [25]. A correção do FPD, ou correção da energia reativa, de uma instalação oferece inegáveis vantagens. Do ponto de vista económico o Regulamento Tarifário prevê que os clientes ligados às redes de distribuição de AT e MT e os ligados às redes de distribuição de Baixa Tensão Especial (BTE) (acima de 41,4 kW), estão sujeitos à faturação de energia reativa:

- Indutiva, em períodos fora de vazio (cheias e ponta) que supere os limites dos escalões, são aplicados os respetivos fatores multiplicativos (FM) estabelecidos na Tabela 2.6.
- Capacitiva, em períodos de vazio normal e super vazio.

Tabela 2.6. Escalões de fator de potência (Fonte: EDP) [26].

1º Escalão	$0,3 < \text{tg } \varphi < 0,4$	$0,95 > \cos \varphi > 0,93$	FM = 0,33
2º Escalão	$0,4 < \text{tg } \varphi < 0,5$	$0,93 > \cos \varphi > 0,89$	FM= 1
3º Escalão	$\text{tg } \varphi > 0,5$	$\cos \varphi < 0,89$	FM= 3

Na Tabela 2.7 estão definidos os horários para o ciclo semanal, como é possível verificar, estes variam com os dias da semana, bem como com a hora legal. É de notar que a hora legal de Verão tem início no último domingo de março e a hora legal de Inverno tem início no último domingo de outubro. Os feriados nacionais para os clientes de MT com ciclo semanal são contabilizados como domingos.

Além da redução da fatura de energia elétrica, a correção do fator de potência permite ainda reduzir as perdas na rede interna da instalação, estabiliza os níveis de tensão, melhora o tempo de vida útil dos equipamentos e minimiza o investimento em transformadores e cabos [9].

Tabela 2.7. Ciclo semanal para todos os fornecimentos em Portugal Continental (Fonte: ERSE) [27].

Ciclo semanal para todos os fornecimentos em Portugal Continental			
Período de hora legal de Inverno		Período de hora legal de Verão	
De segunda-feira a sexta-feira		De segunda-feira a sexta-feira	
Ponta:	09h30/12h00 18h30/21h00	Ponta:	09h15/12h15
Cheias:	07h00/09h30 12h00/18h30 21h00/24h00	Cheias:	07h00/09h15 12h15/24h00
Vazio normal:	00h00/02h00 06h00/07h00	Vazio normal:	00h00/02h00 06h00/07h00
Super vazio:	02h00/06h00	Super vazio:	02h00/06h00
Sábado		Sábado	
Cheias:	09h30/13h00 18h30/22h00	Cheias:	09h00/14h00 20h00/22h00
Vazio normal:	00h00/02h00 06h00/09h30 13h00/18h30 22h00/24h00	Vazio normal:	00h00/02h00 06h00/09h00 14h00/20h00 22h00/24h00
Super vazio:	02h00/06h00	Super vazio:	02h00/06h00
Domingo		Domingo	
Vazio normal:	00h00/02h00 06h00/24h00	Vazio normal:	00h00/02h00 06h00/24h00
Super vazio:	02h00/06h00	Super vazio:	02h00/06h00

Os principais meios para a geração de energia reativa são:

- Alternadores síncronos;
- Compensadores síncronos (SC);
- Compensadores estáticos de VAr (SVC):
 - *Thyristor Switched Capacitor (TSC)*;
 - *Thyristor Controlled Reactor (TCR)*.

- Baterias de condensadores:
 - Capacidade fixa;
 - Regulação automática
- Compensadores síncronos estáticos (STATCOM);
- Filtros ativos de potência:
 - Filtros ativos paralelos;
 - *Unified Power Quality Conditioner* (UPQC).

Atualmente, a forma mais económica para aumentar o FPD, sobretudo se a instalação já existir, é instalar baterias de condensadores. Os condensadores apresentam as seguintes vantagens:

- Custo reduzido em relação aos compensadores síncronos e aos filtros ativos;
- Sistema de controlo pouco complexo;
- Simplicidade de instalação e manutenção;
- Capacidade de alcançar uma vasta margem de potências e diferentes perfis de carga, alimentando em paralelo, diversas combinações de componentes de potência unitária relativamente pequena.

Em baixa tensão, há basicamente, duas famílias de equipamentos para a compensação do fator de potência:

- Baterias de condensadores de capacidade fixa:

Como, habitualmente, são modulares, podem ser associados, para que se obtenha a desejada potência reativa de compensação. Sempre que a bateria está em funcionamento, é inserida a totalidade da potência, não tendo, a possibilidade de regular a mesma.

- Baterias de condensadores de regulação automática:

É usual utilizar-se uma solução em que os condensadores são agrupados por escalões controláveis individualmente. Um relé varimétrico, sensível às variações de energia reativa, comanda automaticamente a ligação dos condensadores conforme os valores da carga da instalação à obtenção do fator de potência desejado. Permite o ajuste automático da potência reativa fornecida pelo conjunto, para um determinado perfil de fator de potência pretendido. Este tipo de equipamento é instalado, habitualmente, a montante da instalação de distribuição BT, ou então num setor importante (quadro parcial) da mesma [28].

Atendendo ao efeito nefasto das harmónicas sobre as baterias de condensadores, nomeadamente o efeito de ressonância, existe a necessidade de equipar as baterias de

condensadores com filtros sintonizados para a filtragem dos mesmos, garantindo desta forma a proteção dos condensadores e o aumento do tempo de vida útil.

2.2.12 Transitórios

Os transitórios são variações muito rápidas no valor da tensão e com amplitudes que podem atingir valores da ordem das centenas aos milhares de volt. Esta perturbação pode ser caracterizada por um impulso (de qualquer polaridade) ou por uma onda oscilatória. Estas duas características definem imediatamente a forma do sinal de tensão ou corrente afetado por um transitório.

Os transitórios podem ser de dois tipos:

- Transitório impulsivo – Este tipo de transitório é caracterizado por uma alteração repentina da frequência dos sinais nominais de tensão ou de corrente (ou de ambos), pelos seus tempos de subida, tempos de descida, pela polaridade unidirecional e conteúdo espectral. As causas mais comuns a este tipo de transitórios são as descargas atmosféricas. Na Tabela 2.8 encontram-se as características típicas de transitórios impulsivos.

Tabela 2.8. Características típicas de transitórios impulsivos (Fonte: IEEE Std 1159-2009) [29].

Transitórios impulsivos	Conteúdo espectral	Duração
Nanossegundos	5 ns	< 50 ns
Microsegundos	1 μ s	50 ns – 1 ms
Milissegundos	0,1 ms	> 1ms

- Transitório oscilatório – O transitório oscilatório é análogo ao impulsivo com a distinção de que a sua polaridade oscila entre a positiva e a negativa. Os valores instantâneos de tensão ou de corrente variam rapidamente e é caracterizado pela sua amplitude, duração e conteúdo espectral. Este tipo de transitório pode surgir depois de um transitório impulsivo, depois de operações de comutação efetuadas pelo fornecedor de energia ou pela comutação de bancos de condensadores, com características típicas apresentadas na Tabela 2.9.

Tabela 2.9. Características típicas de transitórios oscilatórios [30].

Transitórios oscilatórios	Conteúdo espectral	Duração típica
Baixa frequência	<5 kHz	0,3 ms – 50 ms
Média frequência	5 kHz – 500 kHz	20 μ s
Alta frequência	0,5 MHz – 5 MHz	5 μ s

2.3 Características do Analisador de Energia Elétrica

Nos últimos anos, os avanços tecnológicos nos equipamentos elétricos, permitiu o desenvolvimento de vários sistemas capazes de medir, guardar, analisar e até disponibilizar em tempo real a informação relativa aos parâmetros e consumos de energia elétrica. Na conduta da monitorização, foi utilizado o analisador de energia *Fluke 434 Three Phase Power Quality Analyzer*, apresentado na Figura 2.11. As medições da tensão são realizadas recorrendo a pinças do tipo crocodilo e as medições de corrente são realizadas recorrendo às sondas de corrente do tipo pinça amperimétrica (*split core*) ou às sondas flexíveis. Este tipo de sondas (flexíveis) de corrente permite efetuar as medições sem interromper o circuito, o que é bastante útil em ambientes industriais.



Figura 2.11. Analisador da qualidade de energia *Fluke 434* (Fonte: *Fluke*) [31].

Os métodos de medição de qualidade de energia utilizados pelo analisador são os especificados pela norma IEC61000-4-30, sendo que a classificação do seu desempenho de medição é classe B, segundo a mesma norma. A velocidade máxima de amostragem é de 200 kS/s em cada canal simultaneamente. Para a análise dos principais parâmetros de qualidade de energia, o analisador rege-se pela norma EN50160. No que respeita à tremulação, o algoritmo por trás da medição corresponde à norma IEC 61000-4-15 e para análise das harmónicas obedece à norma IEC 61000-4-7 [32].

2.3.1 Pinças Amperimétricas

Um dos tipos de sondas de corrente que são frequentemente utilizados, são as pinças amperimétricas. A capacidade das pinças amperimétricas de medirem elevadas correntes AC, fundamenta-se na sua ação como transformador. A quantidade reduzida de corrente que chega à entrada da pinça, deve-se à relação do número de enrolamentos secundários em comparação com o número de enrolamentos primários enrolados à volta do núcleo [33]. A Figura 2.12 mostra uma pinça *Fluke i400s*, igual às utilizadas nas medições da monitorização.



Figura 2.12. Sonda de corrente i400s (Fonte: *Fluke*) [34].

Na Tabela 2.10 apresentam-se as principais características das sondas de corrente i400s, que permitem a partir de um interruptor escolher duas gamas diferentes de medição:

Tabela 2.10. Especificações *Fluke i400s* [32].

Gama de corrente	Gama de 40 A (0,5 A a 40 A) Gama de 400 A (5 A a 400 A)
Precisão básica	Gama de 40 A 2 % + 0,015 A (45-400 Hz) Gama de 400 A 2 % + 0,04 A (45-400 Hz)

2.3.2 Sondas de Corrente Flexíveis

As sondas de corrente flexíveis do tipo *Rogowski* são ideais para aplicações onde o espaço limitado torna a instalação das pinças amperimétricas tradicionais difícil ou até mesmo impossível. Este tipo de sondas têm ainda a vantagem de não padecerem de qualquer histerese magnética, pelo que não estão sujeitas a situações de saturação, nem situações de não linearidade [35]. As sondas do tipo *Rogowski* funcionam detetando o campo magnético no espaço em torno do condutor e modelado pela lei de Ampère, que é a relação entre a passagem

de corrente no condutor e o campo magnético em torno dela [33]. Na Figura 2.13 observa-se a sonda flexível utilizada em algumas das monitorizações, sobretudo com cargas em que os consumos nominais de corrente são superiores a 400 A.



Figura 2.13. Sonda de corrente i430 flex (Fonte: *Fluke*) [36].

Na Tabela 2.11 apresentam-se as principais características das sondas de corrente i430.

Tabela 2.11. Especificações sonda de corrente i430 flex [36].

Gama de Corrente	3000 A
Tensão de saída (a 1000 A, 50 Hz)	85 mV
Precisão	± 1 % da leitura (25 °C, 50 Hz)
Linearidade (10 % a 100 % da gama)	± 0,2 % da leitura

2.3.3 Configurações e Modos de Leitura

O *Fluke 434*, apresenta diversas configurações para os diferentes tipos de ligações presentes numa instalação elétrica. Na Tabela 2.12 observam-se as possíveis ligações para as diferentes configurações.

Tabela 2.12. Possíveis ligações *Fluke 434* (Fonte: *Fluke*) [32].

<i>3Ø WYE</i>	Sistema de três fases com quatro fios (estrela)
<i>3Ø DELTA</i>	Sistema de três fases com três fios (triângulo)
<i>1Ø + NEUTRAL</i>	Fase única com neutro
<i>1Ø SPLIT PHASE</i>	Fase dividida
<i>1Ø IT NO NEUTRAL</i>	Sistema de fase única com tensão de duas fases sem neutro
<i>3Ø IT</i>	Sistema de três fases sem neutro WYE
<i>3Ø HIGH LEG</i>	Sistema de quatro fios de três fases Delta com perna alta derivada no centro
<i>3Ø OPEN LEG</i>	Sistema delta aberto de três fios com 2 enrolamentos de transformador

Apesar das várias possibilidades, apenas foram as utilizadas as ligações em estrela e triângulo, uma vez que as cargas da instalação são maioritariamente trifásicas, com ou sem neutro. Após selecionar o esquema de ligações, o analisador disponibiliza as seguintes leituras:

- **Dips & Swells**

A opção *Dips & Swells* (reduções e aumentos) regista reduções, aumentos, interrupções, alterações rápidas de tensão.

- **Harmónicas**

A opção harmónica mede e regista harmónicas e inter-harmónicas até à ordem 50 e a distorção harmónica total.

- **Potência e Energia**

O modo de potência e energia regista as diferentes potências num sistema elétrico (aparente, ativa e reativa). Regista ainda o FPT e o FPD.

- **Tremulação**

A opção tremulação (*flicker*) quantifica a flutuação de luminância de lâmpadas causada por variações de tensão de alimentação. Determina a *Pst* e *Plt* que mostram a oscilação durante determinado tempo.

- **Desequilíbrios**

A opção desequilíbrios exhibe as relações de fase entre tensões e correntes. Os resultados de medição baseiam-se no componente de frequência fundamental (50 Hz), com uso de método de componentes simétricas.

- **Monitor**

A opção monitor oferece a possibilidade de armazenar vários modos de leitura em simultâneo. Regista os valores eficazes das tensões e das correntes, a frequência fundamental da tensão, o desequilíbrio do sistema trifásico de tensões, as cavas de tensão, as sobretensões, a tremulação da tensão e a distorção harmónica da tensão.

Capítulo 3

Posto de Transformação

3.1 Introdução

O posto de transformação (PT) é a instalação da empresa, onde se procede à transformação da energia elétrica de Média Tensão (MT) para Baixa Tensão (BT), sendo neste caso de tensões compostas de 15 kV para 400 V.

A instalação encontra-se ligada em regime de neutro TT (terra de serviço e terra de proteção), em todos os transformadores. A Figura 3.1 exhibe o esquema de ligações, onde o neutro é ligado à terra de serviço (N) e as massas metálicas são ligadas à terra de proteção (G), de forma a garantir a segurança de pessoas. Para este regime de neutro, os dispositivos de proteção adequados são os Dispositivos de Proteção de Corrente Residual Diferencial (DDR), que provocam uma interrupção para o primeiro defeito. Já o aterramento do neutro, tem como finalidade limitar a tensão em relação à terra durante o funcionamento, bem como permitir o correto funcionamento dos dispositivos de proteção [37].

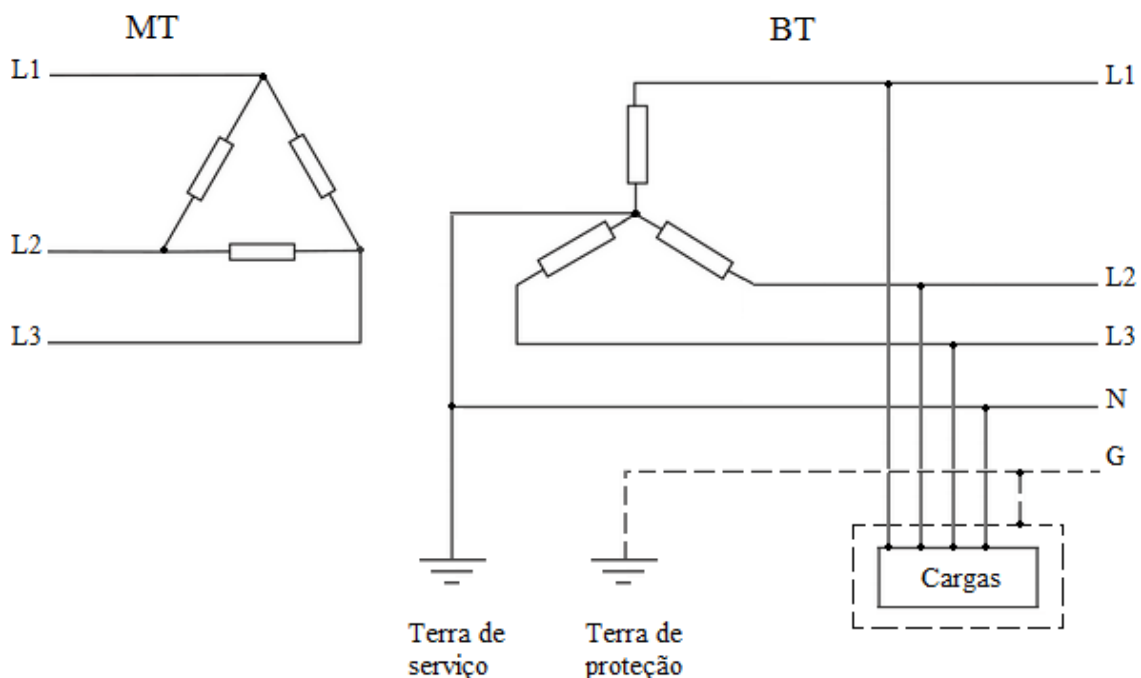


Figura 3.1. Regime de neutro (TT) na instalação do PT.

O PT é apresentado na Figura 3.2, sendo constituído por nove celas.

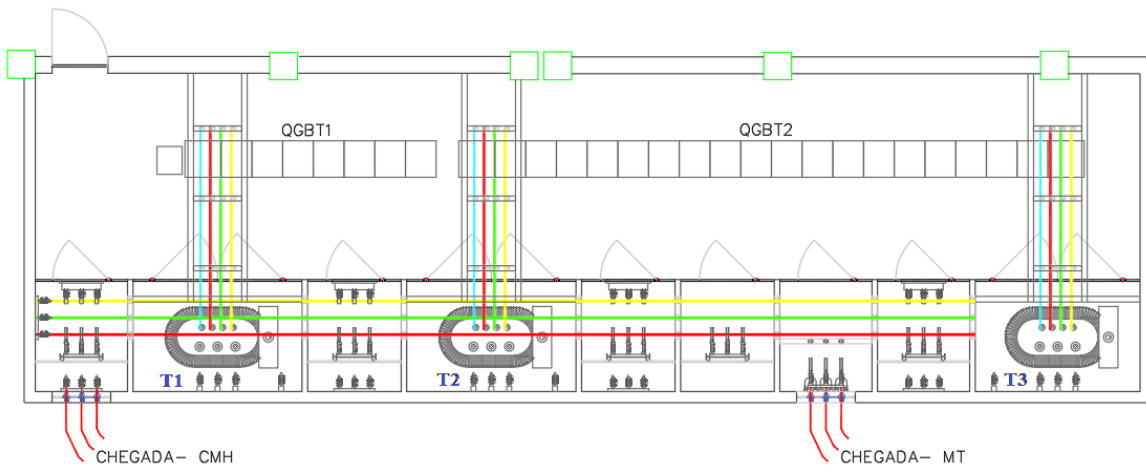


Figura 3.2. Planta do PT.

- Uma cela com um seccionador sem poder de corte (não abre o circuito em caso de defeito) vertical, na chegada da MT ao PT.

O seccionador assinalado da Figura 3.3 faz a interface entre a rede de MT e a alimentação de todo o posto de transformação, bem como da central mini-hídrica (CMH). As cores dos barramentos a vermelho, verde e amarelo, identificam as fases RST de MT, respetivamente.

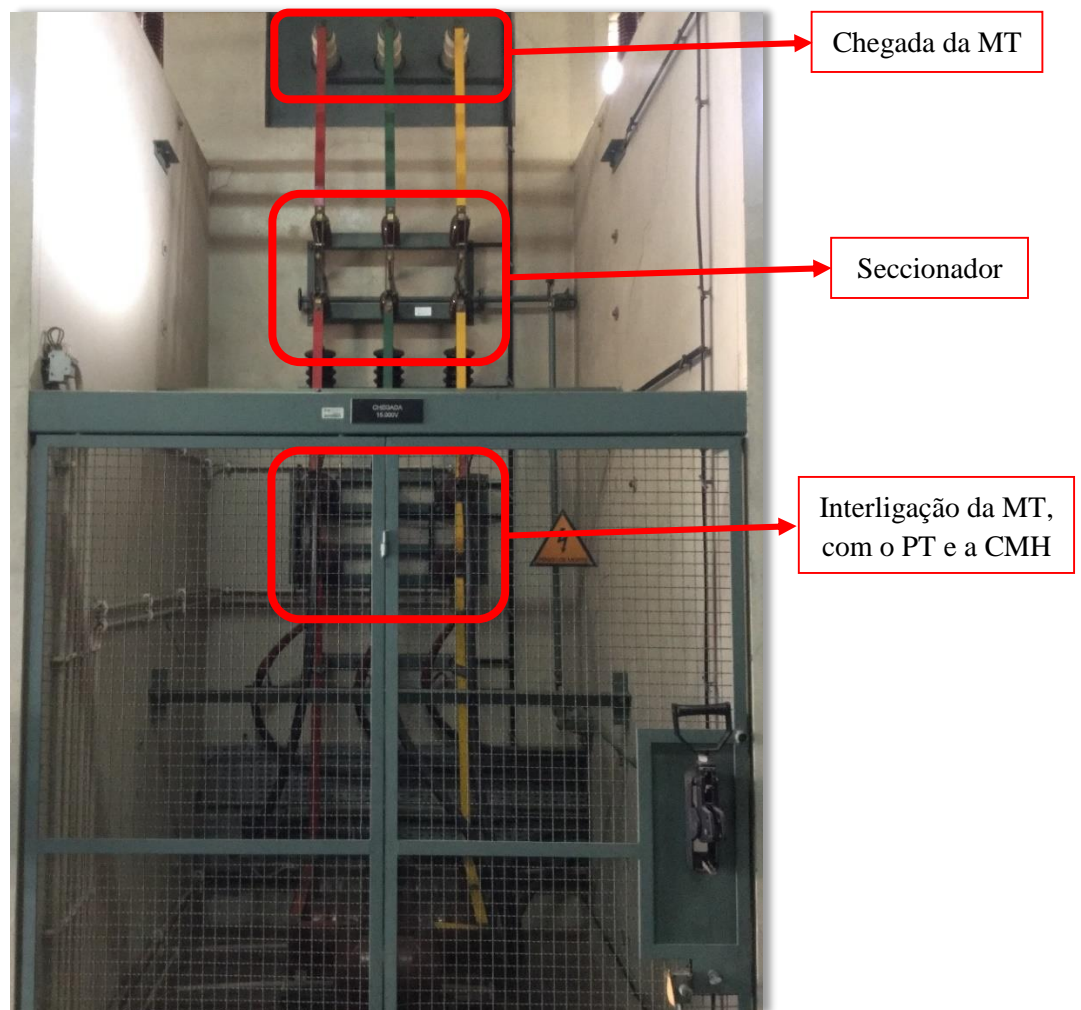


Figura 3.3. Cela de interrupção geral da MT.

- Uma cela com seccionadores sem poder de corte verticais, na alimentação geral da MT aos três transformadores, apresentada na Figura 3.4.

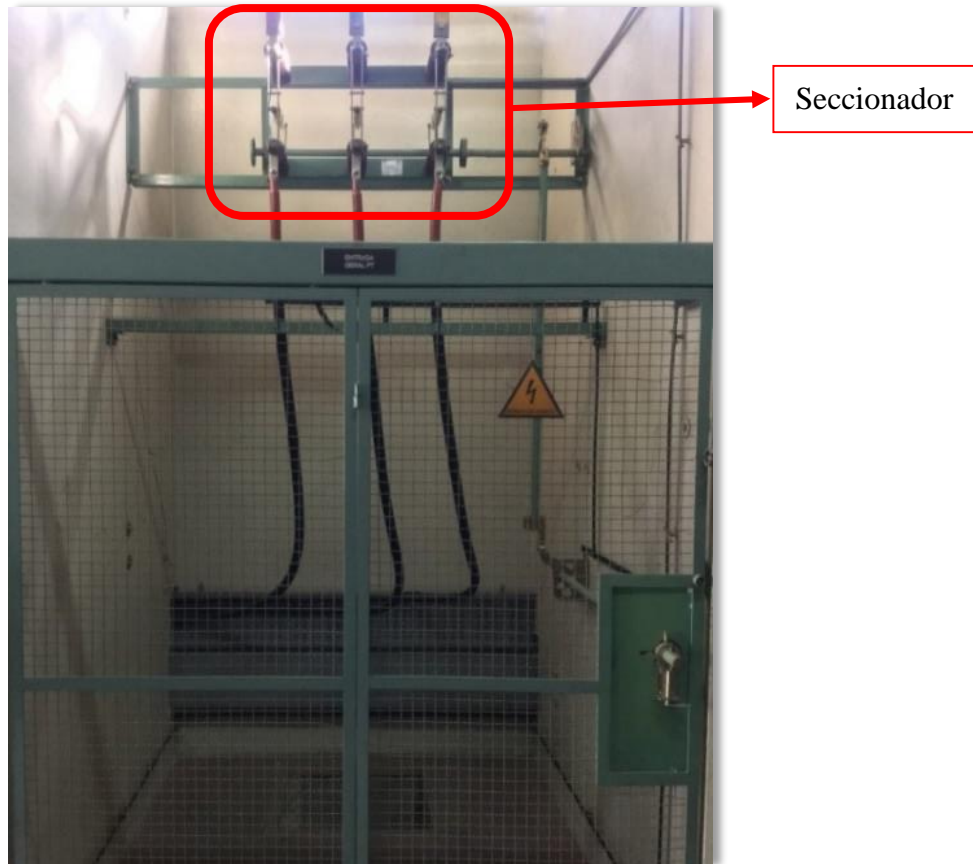


Figura 3.4. Cella de interrupção da MT para os três transformadores.

- Três celas que contêm três transformadores a óleo iguais ao da Figura 3.5, de 1600 kVA cada, perfazendo uma potência total instalada de 4800 kVA.



Figura 3.5. Cella do transformador nº3.

Os enrolamentos dos transformadores estão ligados em triângulo no primário e em estrela no secundário, conforme se apresentou na Figura 3.1. As tensões no secundário estão em avanço 30° em relação às tensões do primário, ou seja, em termos de rotação horária a ligação tem o índice 11, pelo que o pertence ao grupo Dy11. Têm ainda uma tensão de curto-circuito de 4,8 % (U_{CC}) e uma capacidade de corrente nominal por transformador do lado do primário de 61,6 A e do lado do secundário de 2309,4 A. O cálculo da impedância do transformador é determinada através da equação (3.1) [38]:

$$Z_T = \frac{U_{CC}}{S} = \frac{7680 \text{ V}}{1600 \text{ kVA}} = 4,8 \text{ m}\Omega \quad (3.1)$$

Onde:

Z_T : Impedância do transformador;

U_{CC} : Tensão de curto-circuito- 4,8 % do quadrado da tensão no secundário;

S : Potência aparente do transformador.

Assim, a corrente de curto-circuito prevista para a BT é dada por (3.2):

$$I_{2cc} = \frac{U_2}{\sqrt{3} Z_T} = \frac{400 \text{ V}}{\sqrt{3} \times 0,0048 \Omega} = 48,112 \text{ kA} \quad (3.2)$$

- Três celas com os equipamentos de seccionamento, proteção e monitorização do consumo instantâneo de corrente para cada transformador, iguais à da Figura 3.6. O relé indireto ou auxiliar apresentado na Figura 3.7 é o dispositivo que deteta irregularidades no transformador, seja por sobreintensidades, seja por correntes de defeito à terra. Tem a função de enviar ordem de abertura ao dispositivo de corte, em caso de deteção de algum defeito.



Figura 3.6. Cella de interrupção e proteção do transformador nº3.



Figura 3.7. Relé indireto.

Neste caso, os dispositivos de corte são disjuntores tripolares a pequeno volume de óleo de 800 A, iguais ao da Figura 3.8:



Figura 3.8. Disjuntor de pequeno volume de óleo.

- Uma cela com um seccionador sem poder de corte vertical entre rede e a chegada da CMH. Possui ainda relés auxiliares para a tensão máxima e mínima, intensidade máxima, frequência máxima e mínima, e corrente homopolar. Estes relés atuam um equipamento de corte em caso de falha de algum dos parâmetros. A cela descrita observa-se na Figura 3.9.

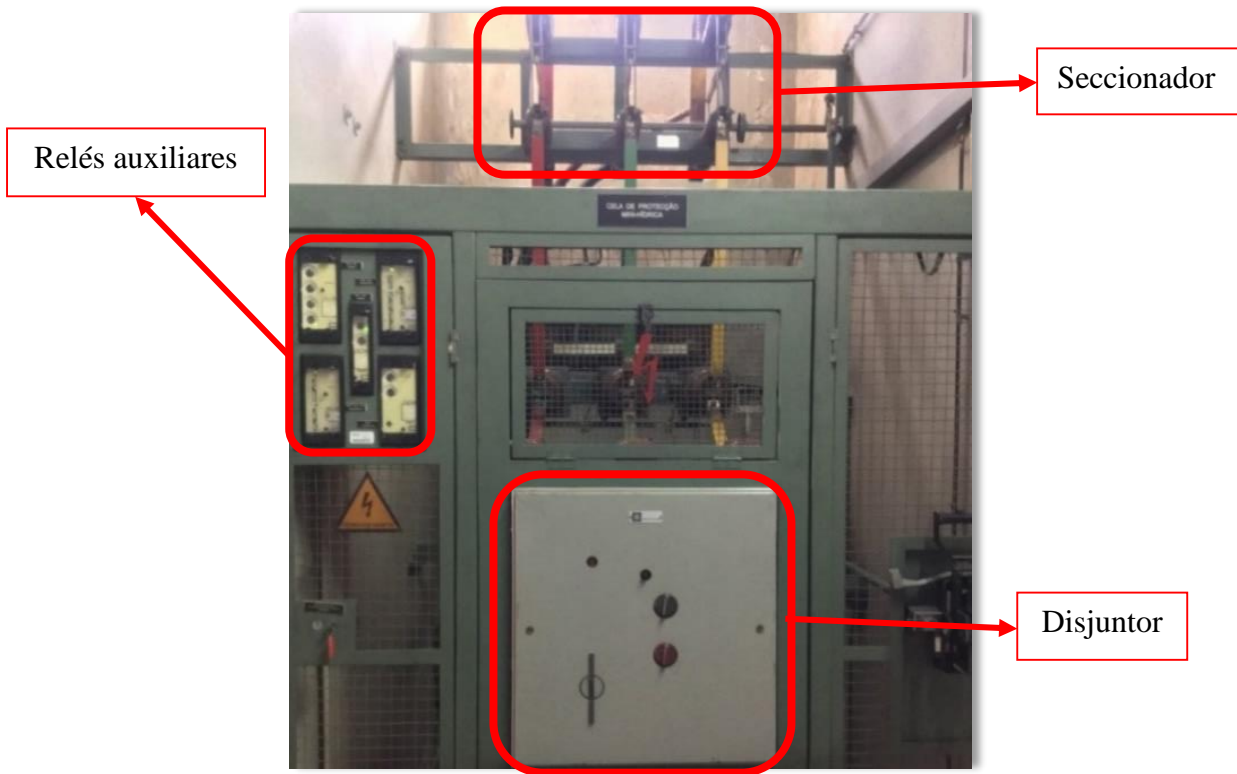


Figura 3.9. Cella de interligação e proteção entre a central mini-hídrica e a rede.

É também no PT que se situam dois Quadros Gerais de Baixa Tensão (QGBT). Um dos quadros gerais, nomeado por QGBT1, é alimentado a partir do transformador 1 (T1). O outro quadro, designado por QGBT2, é alimentado pelo paralelo dos transformadores 2 e 3 (T2 e T3). É através dos dois quadros gerais da Figura 3.10 que se efetua a distribuição e proteção das linhas para os quadros parciais situados nas várias secções da instalação.



Figura 3.10. Quadros gerais de baixa tensão no PT.

É ainda no PT que é feita a compensação da energia reativa, através de três baterias de condensadores, a fim de melhorar o fator de potência da instalação.

3.1.1 Quadro Geral de Baixa Tensão 1

O QGBT1 é composto por um quadro metálico com oito colunas, que inclui um total de doze quadros de força (QF) e dois quadros de luz (QL) para os conjuntos de cargas ilustrados no esquema simplificado da Figura 3.11.

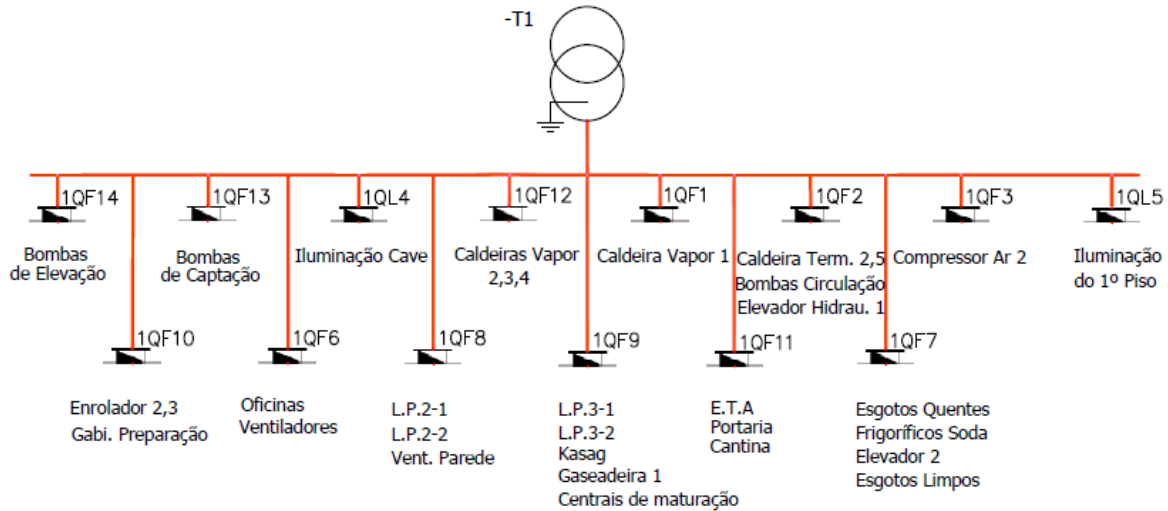


Figura 3.11. Esquema simplificado da distribuição das cargas ligadas ao QGBT1.

Para o QGBT1 está instalada uma bateria de condensadores para compensação do FPD das cargas apresentadas da Figura 3.11. Como proteção e interrupção da rede de distribuição do QGBT1 utiliza-se um disjuntor geral, com uma corrente estipulada de 2500 A e com um poder de corte de 65 kA, exibido na Figura 3.12.



Figura 3.12. Disjuntor geral do QGBT1.

3.1.2 Quadro Geral de Baixa Tensão 2

O QGBT2 é constituído por um quadro metálico com vinte colunas, que inclui um total de vinte e oito quadros de força (QF) e um quadro de luz (QL) para os conjuntos de cargas ilustrados na Figura 3.13.

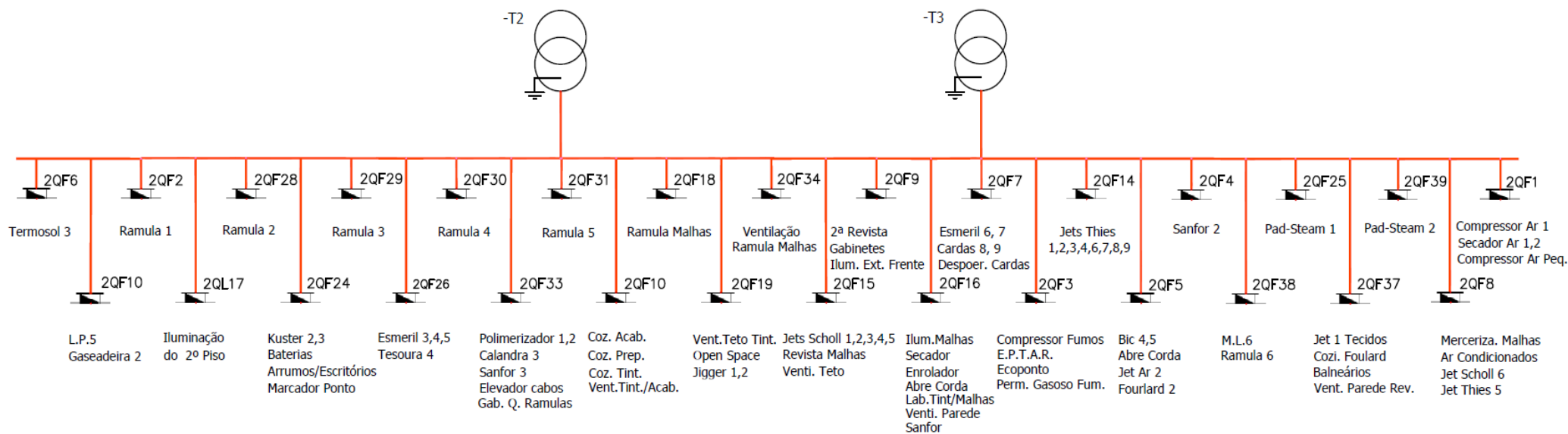


Figura 3.13. Esquema simplificado da distribuição das cargas ligadas ao QGBT2.

Para o QGBT2 estão instaladas duas baterias de condensadores e dois disjuntores gerais iguais ao do QGBT1.

3.2 Baterias de Condensadores

O excesso de consumo de energia reativa provocado pelas cargas, predominantemente indutivas da instalação fabril, é realizado por baterias de condensadores de regulação automática. A instalação dispõe no total de três baterias trifásicas de condensadores iguais à da Figura 3.14, de 400 kVAr cada, constituídas por 8 módulos de 50 kVAr.

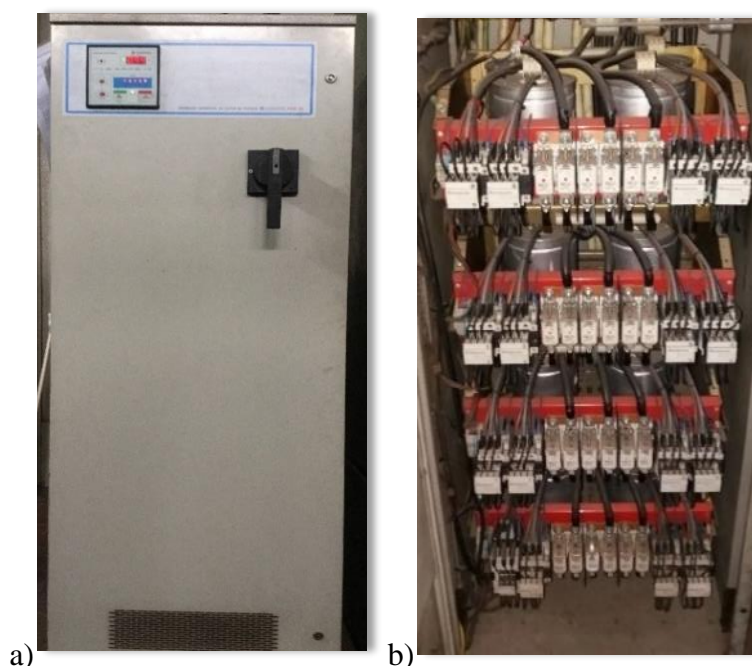


Figura 3.14. Baterias de condensadores de regulação automática: a) Vista exterior; b) Vista interior.

As baterias são controladas por um regulador com relé varimétrico, que comuta, através de contactores, os grupos de condensadores necessários em cada instante, ao ajuste mais próximo do FPD desejado. Estes contactores possuem resistências de pré-carga, que permitem atenuar os fenómenos transitórios ocorridos na manobra dos bancos de condensadores e evitar picos de corrente que podem ser 200 vezes superiores aos nominais [39]. Os valores de tensão são obtidos diretamente para o controlador e os valores de corrente são obtidos através de transformadores de intensidade. Este tipo de controlador utiliza um de transformador de intensidade na fase da linha 3 e as tensões das fases das linhas 1 e 2, com os valores das tensões v_{L1} e v_{L2} e da corrente i_{L3} , são extrapoladas todas as potências e conseqüentemente os requisitos de compensação da instalação.

De forma a diminuir perdas e evitar correntes de neutro por desequilíbrio de fases, os condensadores são ligados em triângulo. A configuração em triângulo permite o triplo da potência reativa, para a mesma capacidade dos condensadores ligados em estrela, uma vez

que a tensão aplicada aos condensadores é superior face à configuração em estrela. Por outro lado, obriga a ter condensadores aptos para suportar uma tensão superior à configuração em estrela, aumentando assim os custos dos condensadores.

Durante a auditoria verificou-se que um grupo das baterias ligadas ao QGBT2 estava com alguns dos condensadores danificados e com vários fusíveis em aberto. Estes defeitos estão assinalados pelas setas na Figura 3.15.

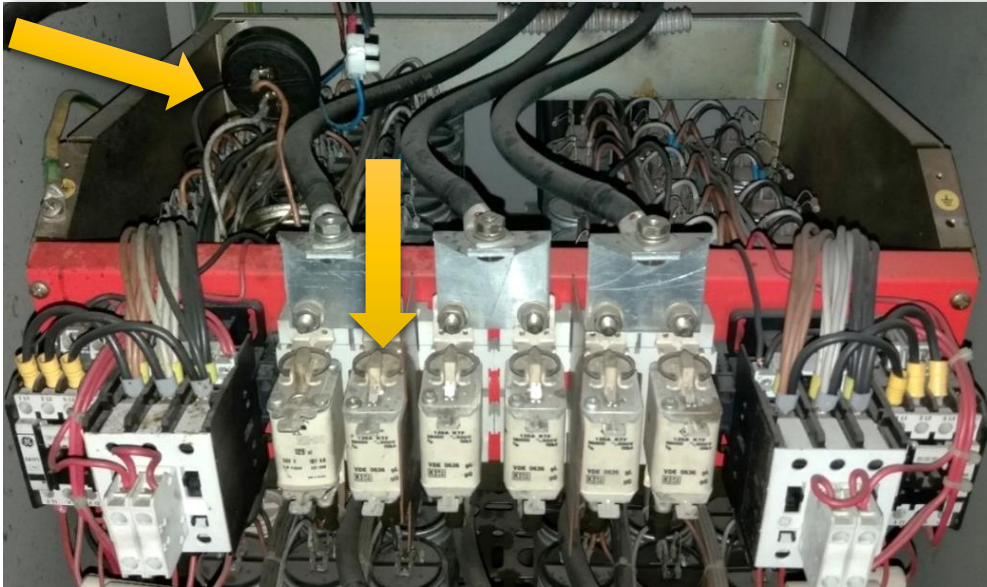


Figura 3.15. Grupo de condensadores danificados e fusíveis em aberto.

Estão instaladas também no PT, baterias de condensadores com capacidade fixa de 100 kVAr cada uma, para compensação da energia reativa indutiva provocada pelos transformadores. As baterias de capacidade fixa apresentam-se na Figura 3.16.



Figura 3.16. Baterias de condensadores de capacidade fixa: a) Vista exterior; b) Vista interior.

3.3 Qualidade de Energia no Posto de Transformação

As medições da qualidade de energia no PT foram realizadas à entrada dos QGBT, ou seja, à saída dos transformadores de potência, como se pode constatar na Figura 3.17. Após a medição efetuada, foram feitas análises aos eventos mais relevantes extraídos da aplicação *Power Log Classic (Fluke)*.



Figura 3.17. Monitorização aos QGBT.

Os dados registados pelo analisador de energia foram recolhidos durante cerca de três semanas em cada QGBT, para cada um dos seguintes modos:

- “Monitor”;
- “Harmónicas de Corrente”;
- “Potência e Energia”.

Os registos de tensão, corrente, cavas de tensão, sobretensões, tremulação da tensão, frequência, desequilíbrios de tensão e harmónicas de tensão, foram recolhidos durante o mesmo período a partir do modo “Monitor” do analisador de energia. Para os modos das “Harmónicas de Corrente” e “Potência e Energia”, utilizaram-se períodos de medição distintos.

3.3.1 Análise ao QGBT1

Para análise do QGBT1, utilizou-se o analisador no modo de leitura “Monitor” durante 7 dias da semana, com intervalos de registos de 10 min. As formas das ondas das tensões e correntes registadas, num dado momento, apresentam-se na Figura 3.18.

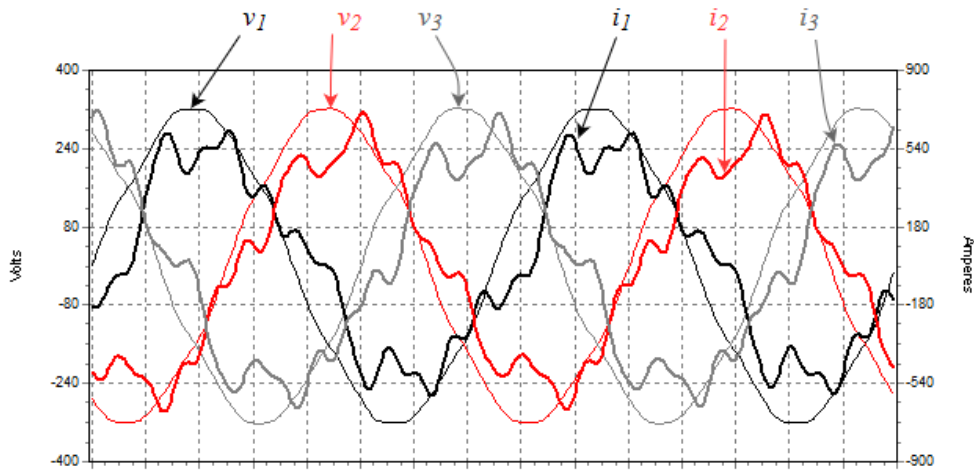


Figura 3.18. Formas das ondas das tensões e das correntes no QGBT1.

3.3.1.1 Registos de Tensão e Corrente

A Figura 3.19 apresenta a evolução temporal dos valores eficazes das tensões L_{1N} , L_{2N} e L_{3N} (valores máximos e mínimos de meio ciclo⁵), no T1. Neste período de monitorização, destaca-se uma interrupção no início do dia 10-11.

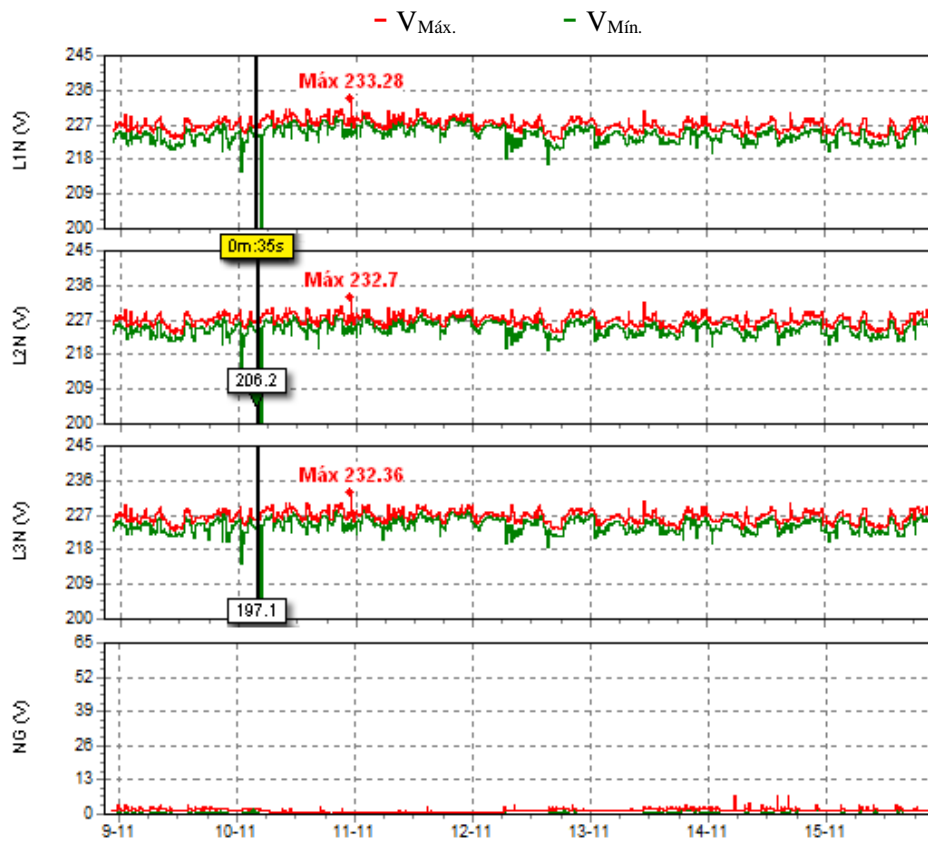


Figura 3.19. Evolução dos valores eficazes das tensões no T1.

Na Figura 3.20 observa-se com mais detalhe uma interrupção de energia com a duração de 35 s, seguida de algumas cavas de tensão ocorridas nos mesmos instantes.

⁵ O valor é medido em um ciclo, começando na passagem pelo zero e atualizado a cada meio ciclo. Esta técnica é independente para cada canal, em conformidade com a norma IEC 61000-4-30.

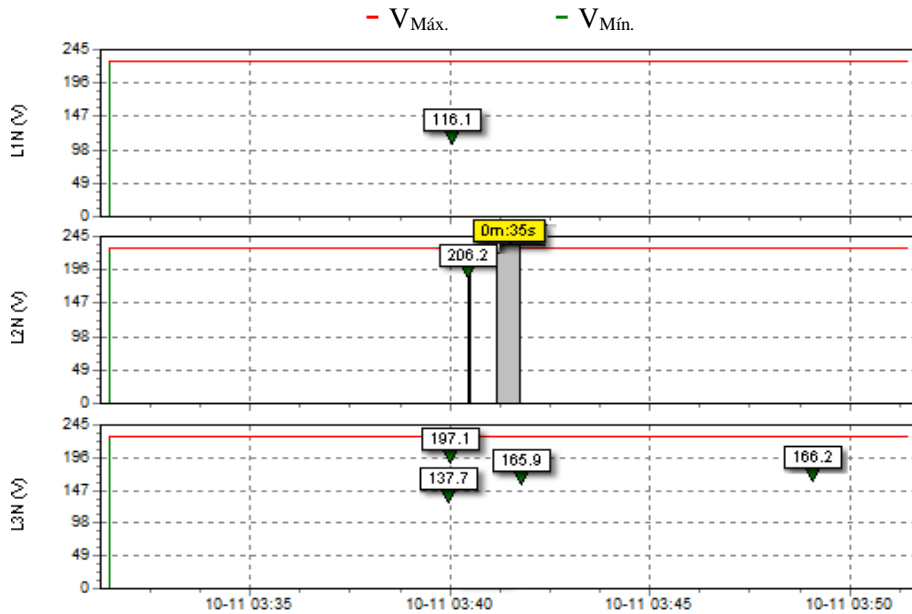


Figura 3.20. Interrupção de energia e eventos de cavas de tensão no T1.

Na Figura 3.21 apresentam-se os registos dos valores eficazes das correntes L_1 , L_2 , L_3 e N . (valores máximos e mínimos de meio ciclo), no T1. Verifica-se a existência de alguns valores máximos de corrente, sendo que os máximos registados no mesmo instante foram de 1802 A na fase L_1 , 1508 A na fase L_2 e de 1573 A na fase L_3 . O período de tempo em que as correntes nas fases permanecem praticamente constantes durante os dias 11-11 e 12-11, correspondem ao fim de semana. O valor máximo registado no condutor neutro foi de 117 A, que coincide com o momento imediatamente a seguir à interrupção de energia do dia 10-11.

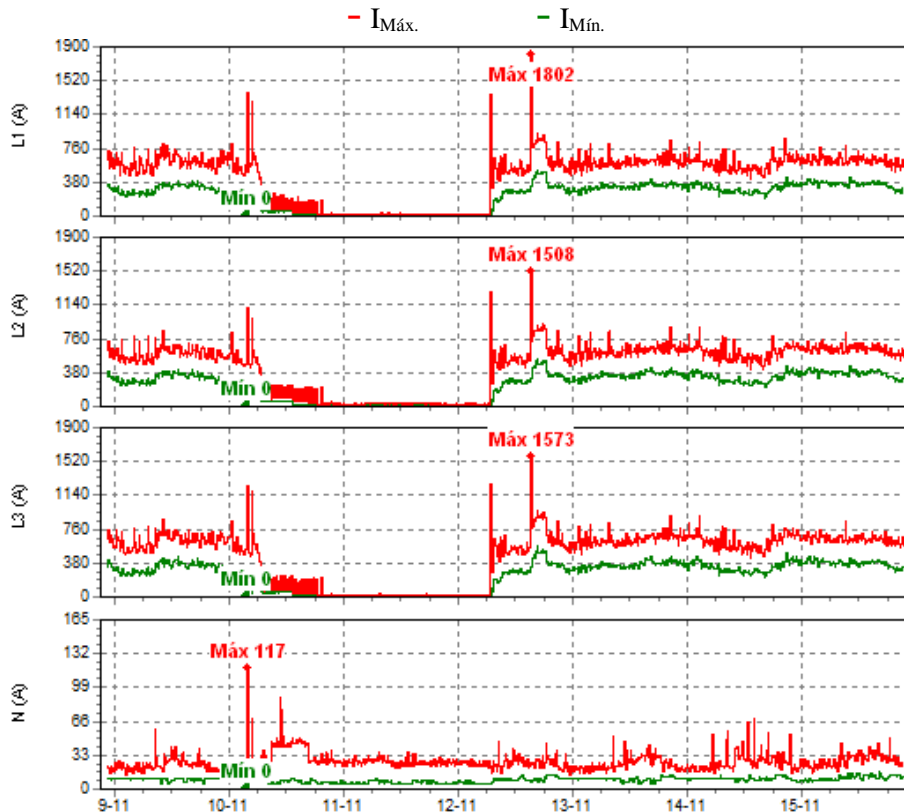


Figura 3.21. Evolução dos valores eficazes das correntes no T1.

3.3.1.2 Registos de Cavas e Sobretensões

Durante o período monitorizado, como já foi visto anteriormente na Figura 3.20, registaram-se seis cavas de tensão. A duração e percentagem das cavas observam-se na Tabela 3.1. Com uma duração de 20 ms o valor de tensão registado foi de 206,2 V na fase L_2 e com uma duração de 71 ms o valor registado foi de 197,1 V (80 % e 90 %) na fase L_3 . Com uma duração de 207 ms registou-se o valor de 165,9 V e com 223 ms o valor de 166,2 V (70 % e 80 %) na fase L_3 . Registou-se ainda uma cava de tensão com duração de 207 ms com o valor de 165,9 V na fase L_3 e por fim de 116,1 V com uma duração de 758 ms (40 % e 70 %) na fase L_3 .

Tabela 3.1. Registo de cavas de tensão no T1.

Tensão residual u	Duração t (ms)				
	$10 \leq t \leq 200$	$200 < t \leq 500$	$500 < t \leq 1000$	$1000 < t \leq 5000$	$5000 < t \leq 60000$
$90 \% > u \geq 80 \%$	2	0	0	0	0
$80 \% > u \geq 70 \%$	0	2	0	0	0
$70 \% > u \geq 40 \%$	1	1	0	0	0
$40 \% > u \geq 5 \%$	0	0	0	0	0
$5 \% > u$	0	0	0	0	0

Durante este período analisado, não se registou qualquer evento de sobretensão.

3.3.1.3 Registo da Frequência Fundamental da Tensão

A Figura 3.22 mostra a evolução temporal da frequência fundamental da tensão de alimentação, onde se verifica que a frequência atingiu um valor máximo de 50,066 Hz e um valor mínimo de 49,927 Hz. Assim, relativamente aos 50 Hz representam um desvio de +0,132 % e -0,146 %.

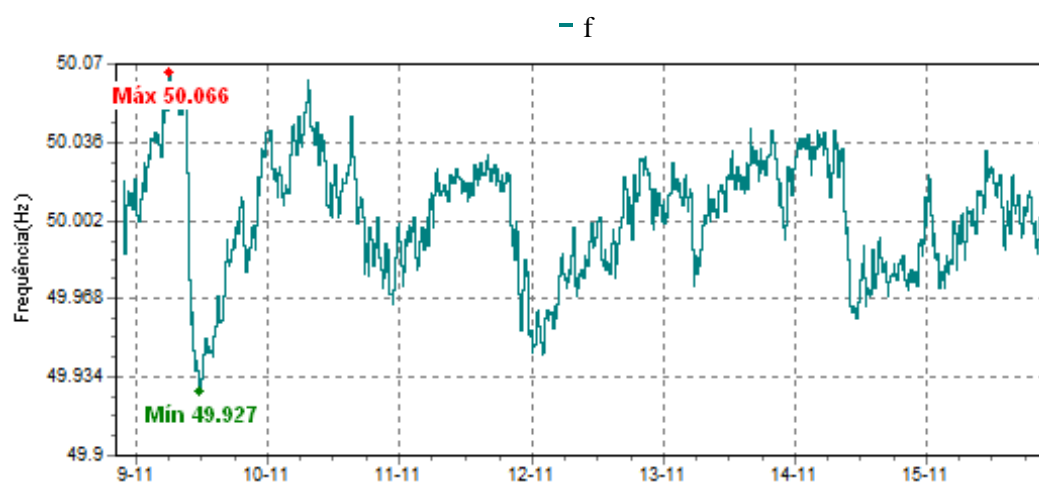


Figura 3.22. Evolução da frequência fundamental da tensão de alimentação no T1.

3.3.1.4 Registo da Tremulação da Tensão

A evolução temporal do registo da tremulação da tensão apresenta-se na Figura 3.23. Como se trata de uma oscilação *Plt* (*long-term*), esta é calculada sobre uma sequência de 12 valores de *Pst* (*short-term*) relativos a um intervalo de 2 horas, conforme visto na equação (2.2). Valores iguais a 1, indicam a probabilidade de uma lâmpada piscar, aumentando a intensidade de desconforto. Conforme se observa na Figura 3.21, registaram-se dois eventos com valores superiores a 1, um com o valor de 4,6 e outro de 7,7, correspondendo ao instante da interrupção de energia, e respetivas cavas de tensão do dia 10-11.

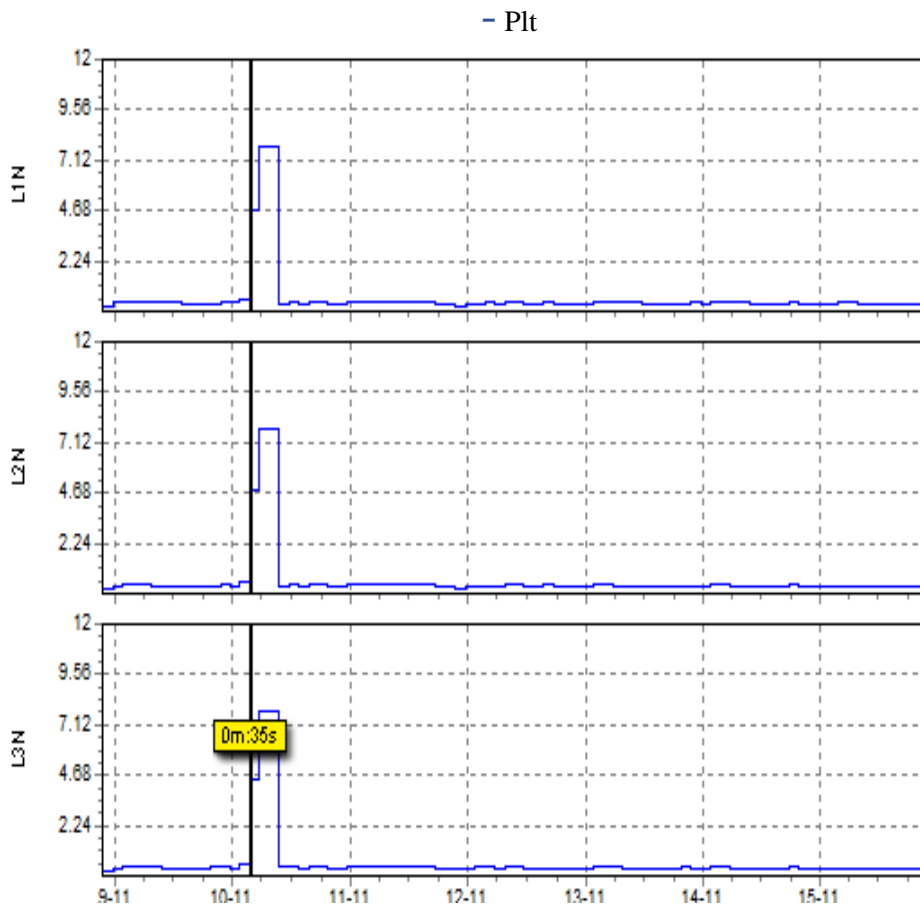


Figura 3.23. Evolução da tremulação da tensão no T1.

3.3.1.5 Registo do Desequilíbrio da Tensão

A avaliação do comportamento do desequilíbrio de tensão apresentado na Figura 3.24 é determinado com base no fator de desequilíbrio, que expressa a relação entre as componentes de sequência negativa e sequência positiva da tensão, em valores percentuais. Esta definição fundamenta-se no facto de que um conjunto trifásico de tensões equilibradas possui apenas componentes de sequência positiva. Observa-se o comportamento do fator de desequilíbrio de tensão a variar entre 0,4 % a 0,44 %.

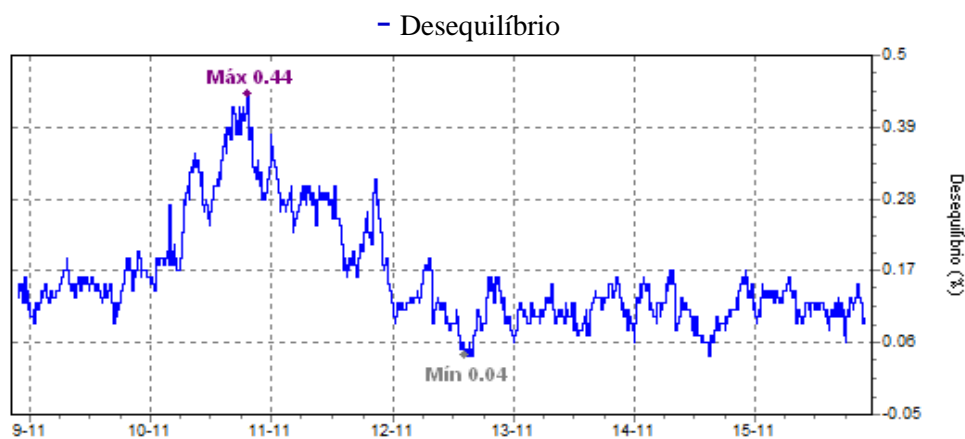


Figura 3.24. Evolução da percentagem de desequilíbrio da tensão no T1.

Durante o período analisado, a componente inversa das tensões, não ultrapassou 2 % da correspondente componente direta, em conformidade com a norma NP EN 50160.

3.3.1.6 Registo de Harmónicas e THD

Ainda no modo “Monitor” do analisador de energia, registou-se a evolução da distorção harmónica total das tensões (THDv), apresentada na Figura 3.25. Os registos indicam uma evolução análoga ao longo dos dias, apresentando valores compreendidos entre 0,9 % e os 3,45 %. É manifesto uma ligeira redução da THDv por volta das 00h00 (início de cada dia), que se mantêm com valores mais baixos até às 07h00, bem como durante o fim de semana (10-11 e 11-11). Conclui-se desta forma, que durante as horas de vazio e super vazio há efetivamente uma redução da THDv.

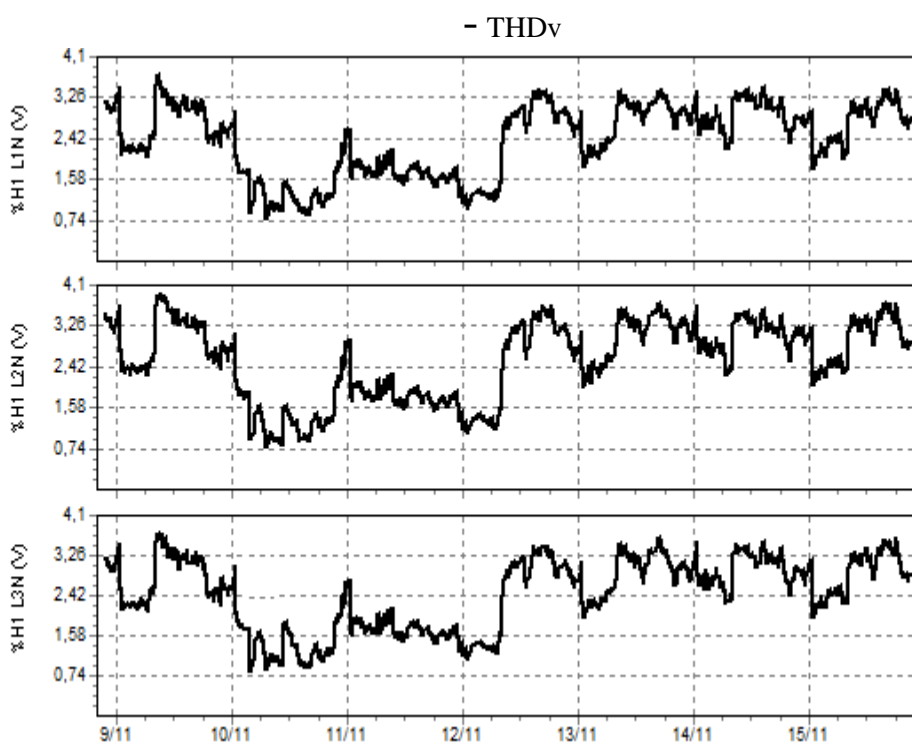


Figura 3.25. Evolução da THDv no T1.

Através da análise no domínio da frequência da Figura 3.26, nota-se que as harmónicas que mais contribuem, em média, para a THDv são as de 5ª, 7ª ordem, num total de monitorização até harmónica de ordem 50. Já a harmónica que mais contribui para a THDv é a 5ª harmónica, apresentando valores máximos de 3,09 % para a fase L_{1N} , 3,45 % para a fase L_{2N} e 3,3 % para a fase L_{3N} . A partir da harmónica de 25ª ordem, a contribuição é praticamente desprezável nas três fases.

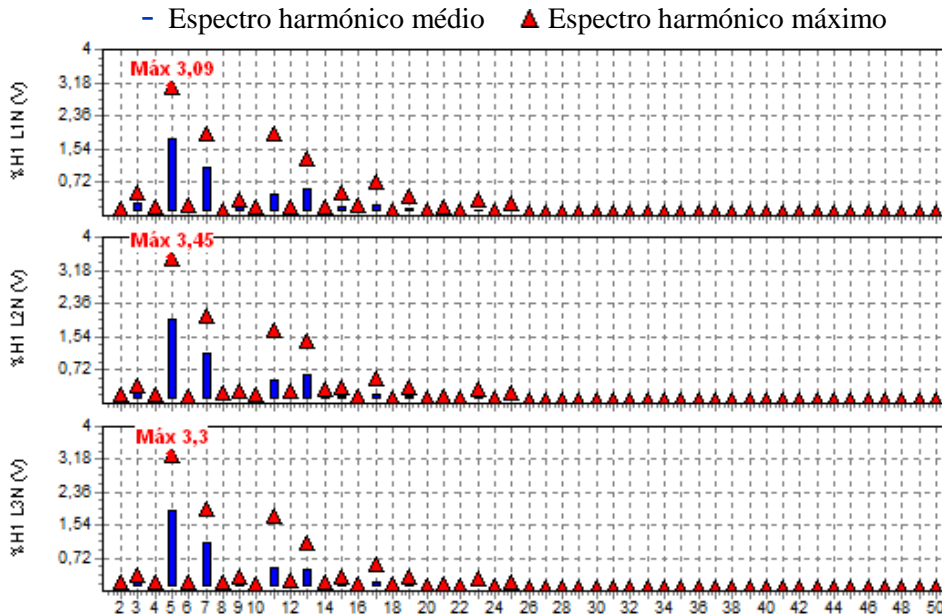


Figura 3.26. Espectro harmónico da corrente até à 50ª harmónica no T1.

Para a monitorização das harmónicas de corrente, utilizou-se o modo “Harmónicas de Corrente” conforme referido anteriormente, durante cerca de 5 dias e com intervalos de medição de 5 minutos. A Figura 3.27 exhibe a evolução temporal da distorção harmónica total da corrente (THDi) no QGBT1 nas fases L_{1N} , L_{2N} e L_{3N} .

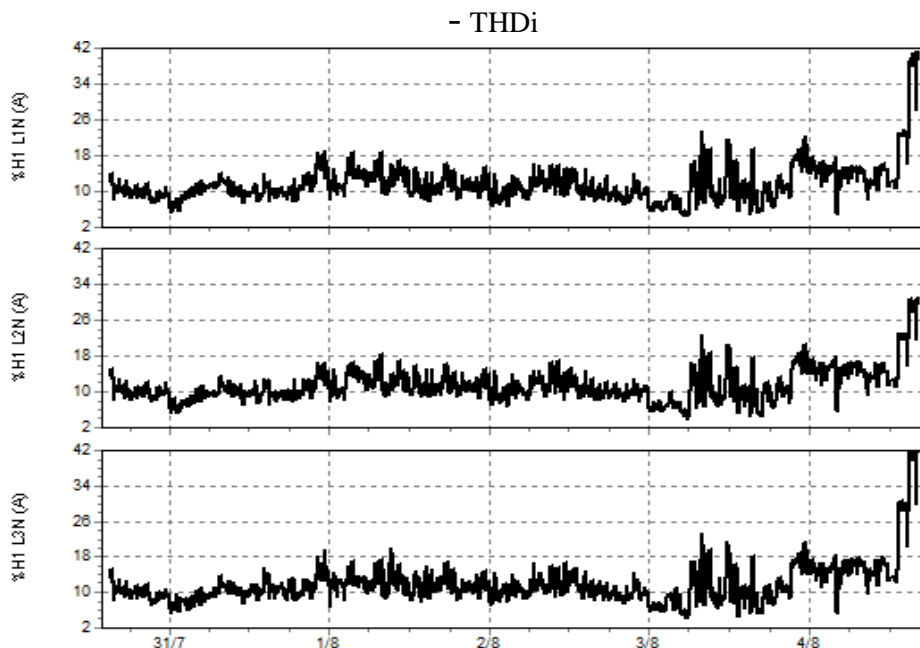


Figura 3.27. Evolução da THDi no T1.

Pela Figura 3.28 verifica-se uma contribuição mais intensificada das harmónicas de 3^a, 5^a, 7^a, 11^a e 13^a ordem, sendo que a partir da harmónica de 15^a ordem e até à 50^a ordem a influência para a THDi, é quase nula em qualquer uma das fases. Os valores máximos registados são de 26,46 % na fase L_{1N} , 21,99 % na fase L_{2N} e 28,57 % na fase L_{3N} , para a 5^a harmónica.

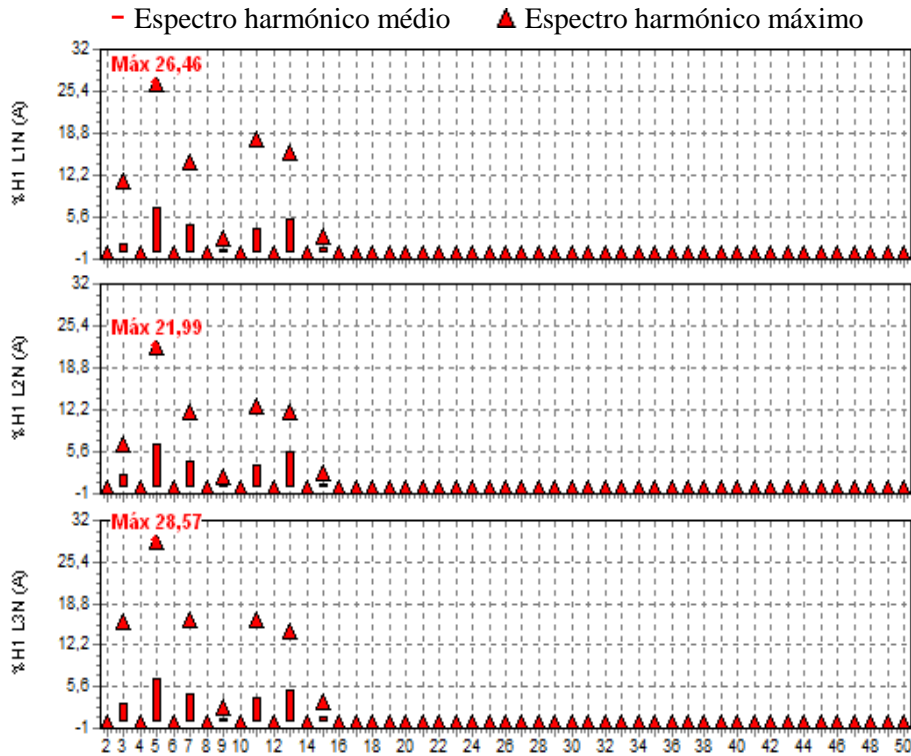


Figura 3.28. Espectro harmónico da corrente até à 50^a harmónica no T1.

3.3.1.7 Registo de Potência

A monitorização no modo “Potência e Energia” do analisador de energia no QGBT1, teve a duração de 5 dias, com intervalos entre registos de 5 minutos. A Figura 3.29 mostra a evolução temporal das potências médias (potência ativa, aparente e reativa).

Durante as horas de vazio normal e as horas de super vazio, as baterias de condensadores de compensação do fator de potência estavam programadas para desligar, de modo a não injetar energia reativa capacitiva na rede, para evitar custos adicionais na fatura de energia elétrica.

Com o intuito de perceber a contribuição das baterias de condensadores para o fornecimento de energia reativa capacitiva durante as horas de vazio, manteve-se a condição de desligar as baterias nos períodos de vazio do primeiro dia, sendo que no fim desse dia as baterias estiveram sempre ligadas. O valor máximo da $P_{Méd.}$ registado foi de 483,5 kW pelas 16h45 do dia 16/07, para a $S_{Méd.}$ o valor máximo foi de 509,5 kVA também pelas 16h45 do dia 16/07 e para $Q_{Méd.}$ o valor máximo registado foi de 283 kVAr pelas 3h45 do dia 17/07.

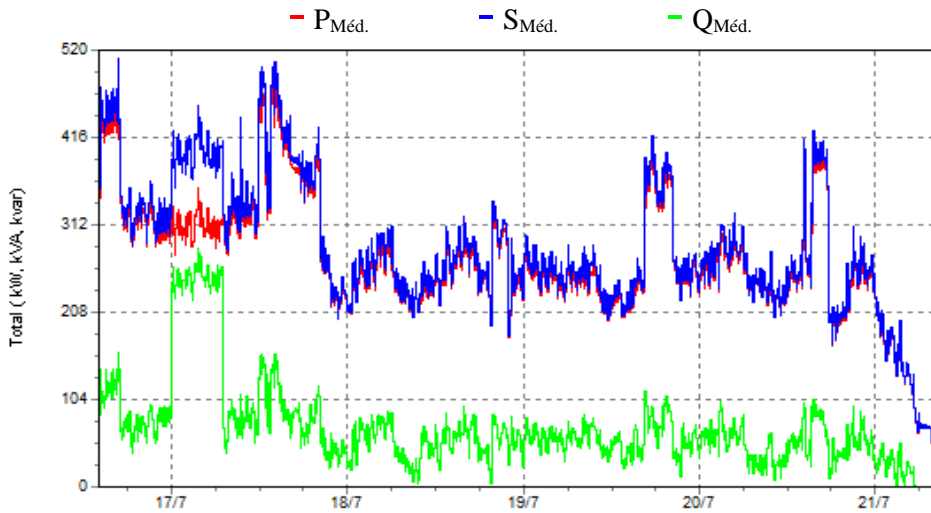


Figura 3.29. Evolução das potências médias no QGBT1.

Na Figura 3.30 observa-se a evolução das potências médias e do fator de potência total médio ($FPT_{Méd.}$), onde se verifica o momento em que as baterias desligaram durante o período de vazio (00h00 e as 7h00), e o segundo dia onde as baterias se mantiveram ligadas durante as horas de vazio. Quando as baterias foram desligadas houve um aumento repentino da potência reativa indutiva ($Q_{Méd.}$) de 83,8 kVAr para 222,6 kVAr e por conseguinte o aumento da potência aparente ($S_{Méd.}$) de 320,4 kVA para 378,2 kVA. Ainda no momento de desativação das baterias, o FPT transitou de 0,95 para 0,79, oscilando entre os 0,76 e os 0,80 ao longo do período de vazio.

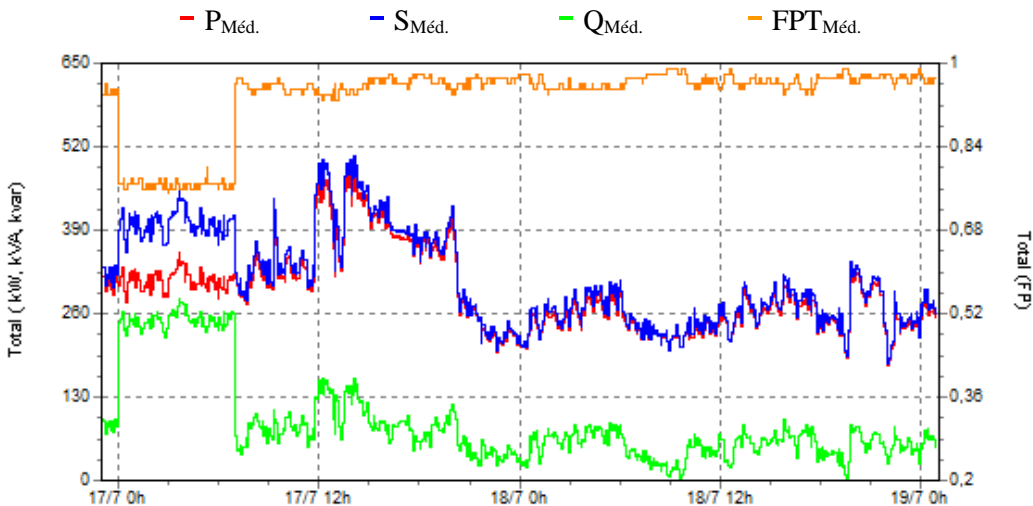


Figura 3.30. Evolução das potências médias e do $FPT_{Méd.}$ no QGBT1, durante dois dias.

Verificou-se ainda durante o período moitorizado que a potência reativa atingiu valores negativos no sábado durante as horas de vazio, conforme mostra a Figura 3.31. O valor negativo de -19,9 kVAr atingido pelas 8h10, indica que houve fornecimento de energia reativa capacitiva para a rede durante este período, ou seja, o regulador das baterias não desligou na totalidade os bancos de condensadores.

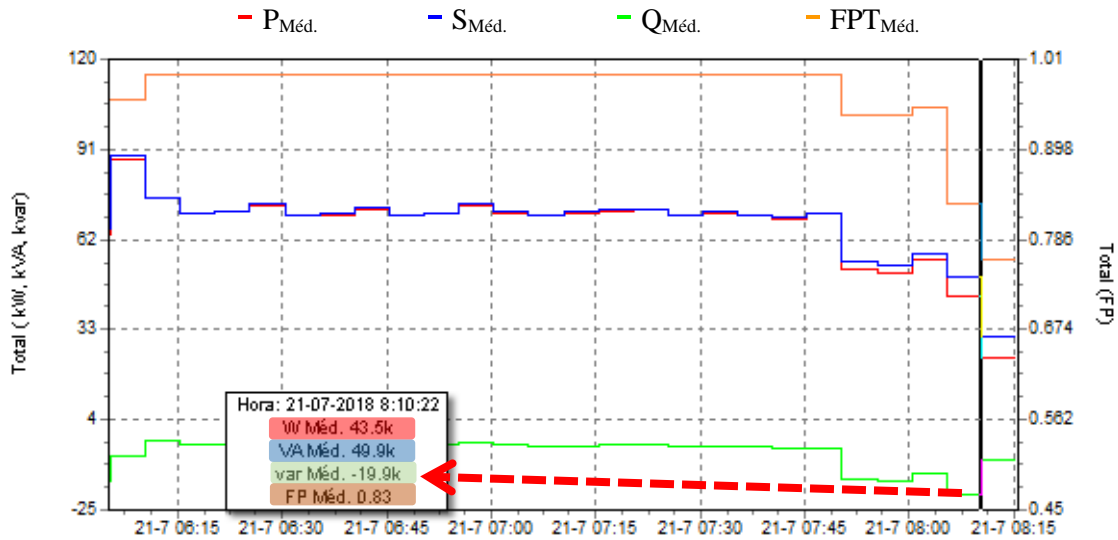


Figura 3.31. Progresso das potências médias e do FPT ao sábado.

O regulador do fator de potência permite ajustar valores de referência do FPD entre 0,80 e 0,99 indutivo e entre 0,90 e 0,99 capacitivo. Após analisar a referência do FPD do regulador da Figura 3.32, constatou-se que estava ajustada para 0,99 capacitivo. Deste modo, o regulador não iria desligar todos os bancos de condensadores de forma a não fornecer energia reativa capacitiva para rede, sempre que houvesse paragem de produção.

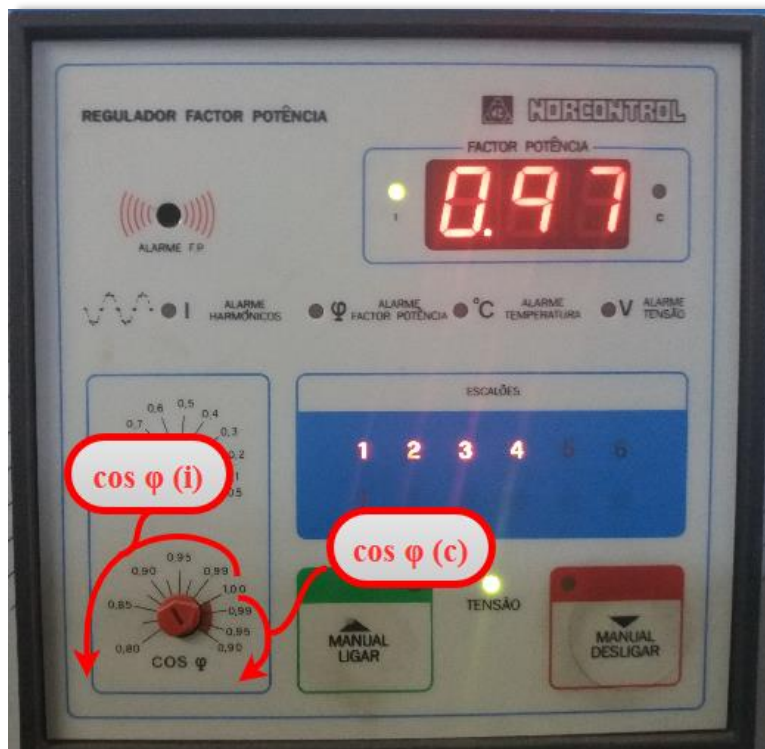


Figura 3.32. Regulador do fator de potência das baterias de condensadores.

Após o ajuste do regulador, foram recolhidos dados durante um fim de semana, onde se certifica pela Figura 3.33 que não houve injeção de energia reativa capacitiva durante os períodos de vazio.

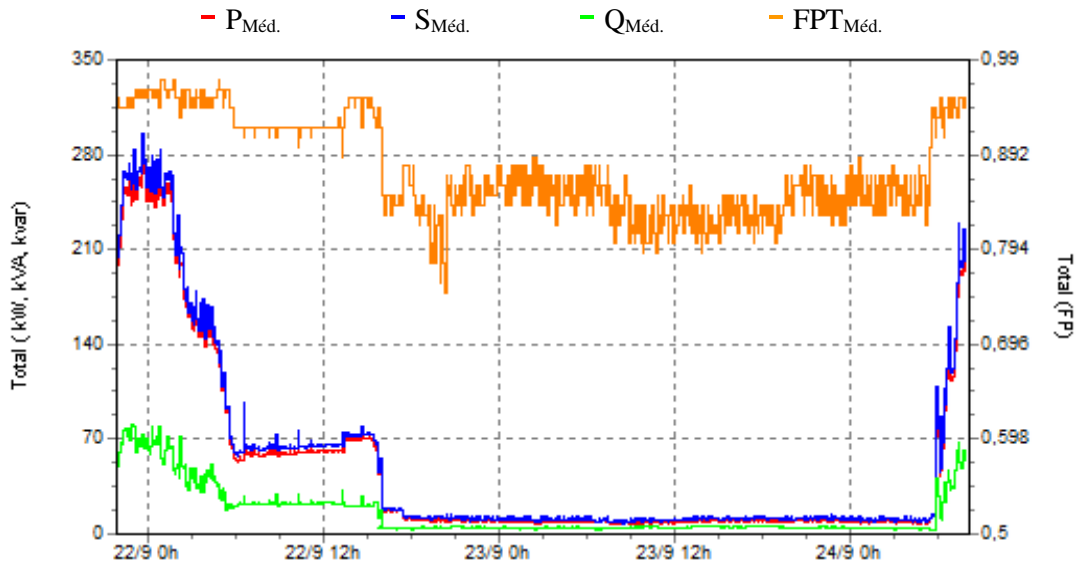


Figura 3.33. Evolução das potências médias e do FPD médio durante o fim de semana.

Quanto menor é o fator de potência, maior é o módulo da corrente e, conseqüentemente, maiores são as perdas por dissipação de calor (perdas por efeito de Joule). Conforme se pode verificar na equação (3.3), as perdas nas linhas aumentam com o quadrado da corrente:

$$Perdas = 3 R I^2 \quad (3.3)$$

Para analisar a evolução das perdas, nas barras de alimentação do QGBT e nos transformadores, em função do FPD, assumindo um sistema equilibrado e sinusoidal, considerando-se apenas os três condutores (das fases L_1 , L_2 e L_3), a resistência R (dos barramentos e dos enrolamentos dos transformadores) e V a tensão de alimentação. Nestas situações, a corrente I de cada linha, será dada pela equação (3.4):

$$I = \frac{S}{\sqrt{3} V} \quad (3.4)$$

Trabalhando as equações (3.3) e (3.4):

$$Perdas = 3 R \frac{S^2}{V^2}$$

$$Perdas = 3 R \frac{\left(\frac{P^2}{\cos^2 \varphi}\right)}{V^2}$$

Obtem-se a equação (3.5):

$$Perdas = \frac{J}{\cos^2 \varphi}, \quad J = \frac{3 R P^2}{V^2} \quad (3.5)$$

Como se observa na Tabela 3.2 a evolução da função Perdas(FPD), para um conjunto de valores de FPD ($0,5 < \text{FPD} < 1$), apresenta um crescimento muito rápido das perdas com a diminuição do FPD, traduzindo-se num aumento de perdas.

Tabela 3.2. Evolução das perdas em função do FPD [40].

FPD	φ	Perdas(FPD)
1	0	1,00 <i>J</i>
0,9	0,45	1,23 <i>J</i>
0,8	0,64	1,56 <i>J</i>
0,7	0,80	2,04 <i>J</i>
0,6	0,93	2,78 <i>J</i>
0,5	1,05	4,00 <i>J</i>

3.3.2 Análise ao QGBT2

No QGBT2, utilizou-se igualmente o analisador no modo de leitura “Monitor” durante 7 dias da semana, com intervalos de registos de 10 min. Foram monitorizados de forma independente os dois transformadores (T2 e T3), em períodos de medição diferentes.

As formas das ondas das tensões e correntes registadas, num dado momento, apresentam-se na Figura 3.34.

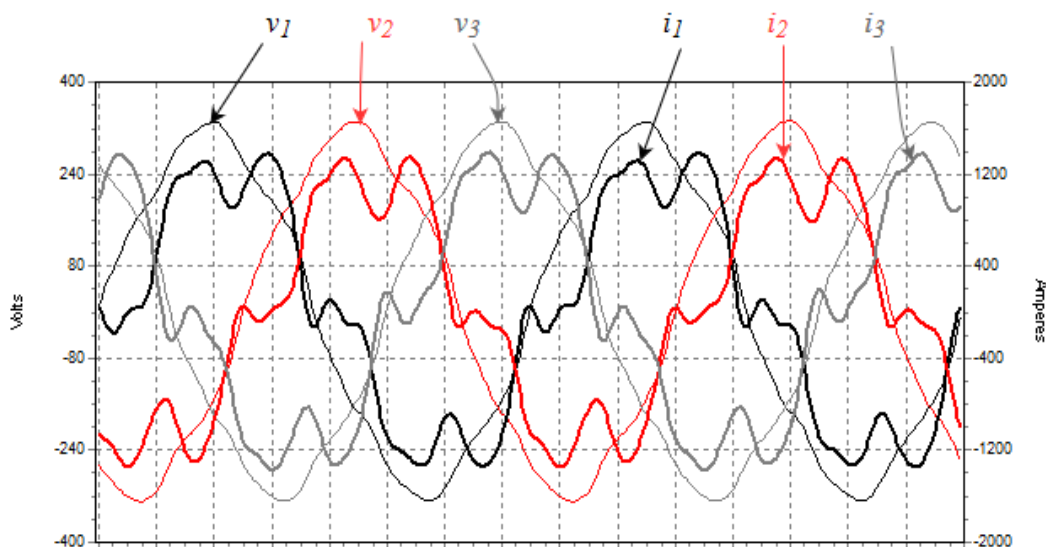


Figura 3.34. Formas das ondas das tensões e correntes no QGBT2.

Em consequência da utilização de cargas não lineares na instalação, é evidente a distorção das formas das ondas das correntes i_1 , i_2 e i_3 . Devido às quedas das tensões provocadas nas impedâncias de linha, e ao facto de circularem as correntes distorcidas nas mesmas linhas, as formas de onda das tensões v_1 , v_2 e v_3 ficam também estas distorcidas.

3.3.2.1 Registos de Tensão e Corrente

A Figura 3.35 apresenta a evolução temporal dos valores eficazes das tensões L_{1N} , L_{2N} , L_{3N} e L_{NG} (valores máximos e mínimos de meio ciclo) no T2. Durante o período monitorizado registaram-se duas interrupções de energia de curta duração, a primeira registada por volta das 17h do dia 17/11 (sábado) e a segunda interrupção registada cerca da 1h20min do dia 22/11 (quinta-feira). A primeira interrupção foi provocada pela queda de uma árvore, durante o abate da mesma, fazendo com que as linhas MT se tocassem. A segunda foi originada por fenómenos meteorológicos, durante um período de chuva e ventos intensos. A tensão entre neutro e a terra (N_G), foram obtidos valores em média de 25 V durante o período em que existiu produção fabril, já para o período em que não existiu produção fabril (17/11 e 18/11), o valor médio foi cerca de 1 V.

Conforme visto anteriormente e de acordo com o princípio de operação de um regime de neutro TT, o neutro do transformador está ligado diretamente à terra através de elétrodos de terra independentes. Como tal, a diferença de potencial entre neutro e terra é geralmente baixa. Foi sugerido a medição das terras de serviço e de proteção para tentar perceber o motivo da tensão elevada entre neutro e terra.

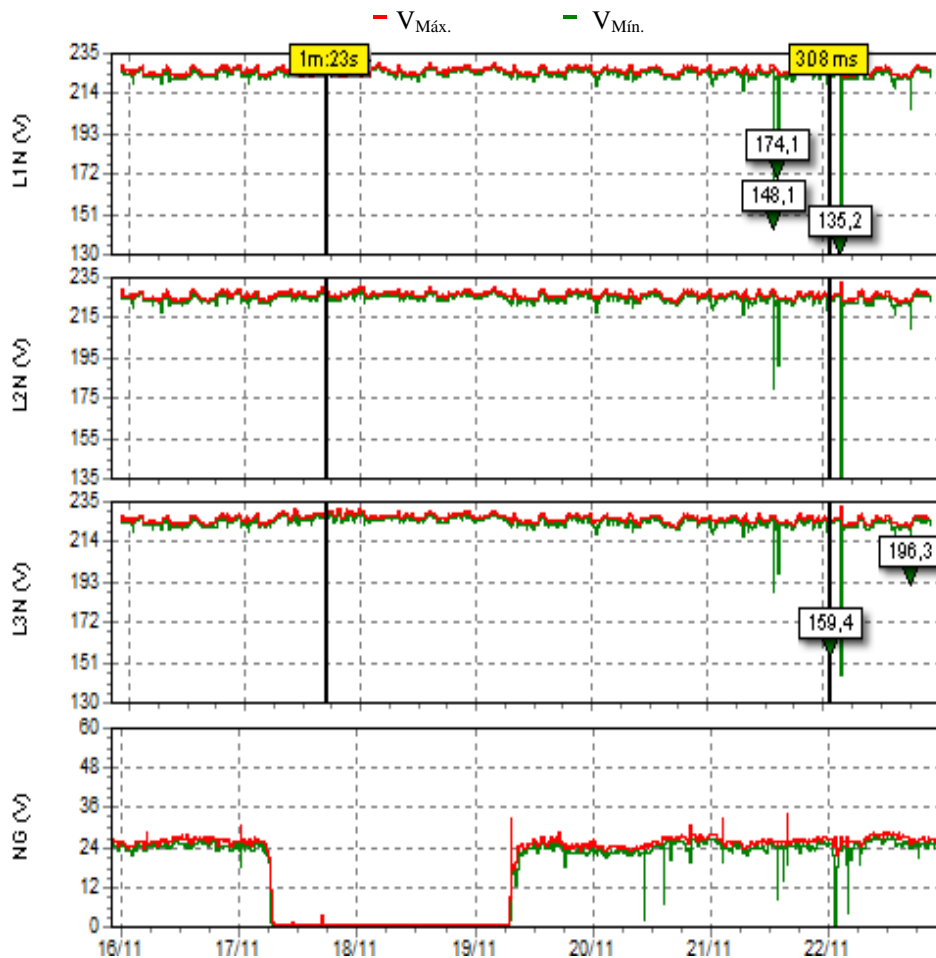


Figura 3.35. Evolução dos valores eficazes das tensões no T2.

Na Figura 3.36 observa-se a evolução temporal dos valores eficazes das tensões L_{1N} , L_{2N} , L_{3N} e L_{NG} (valores máximos e mínimos de meio ciclo), no T3.

Verifica-se uma tensão entre neutro e terra (N_G) de aproximadamente 22 V ao longo do tempo, descendo para cerca de 2 V, em média, durante a paragem da produção (fim de semana). Os valores máximos e mínimos entre fases e o neutro encontraram-se dentro dos limites regulamentados até ao dia 28-10.

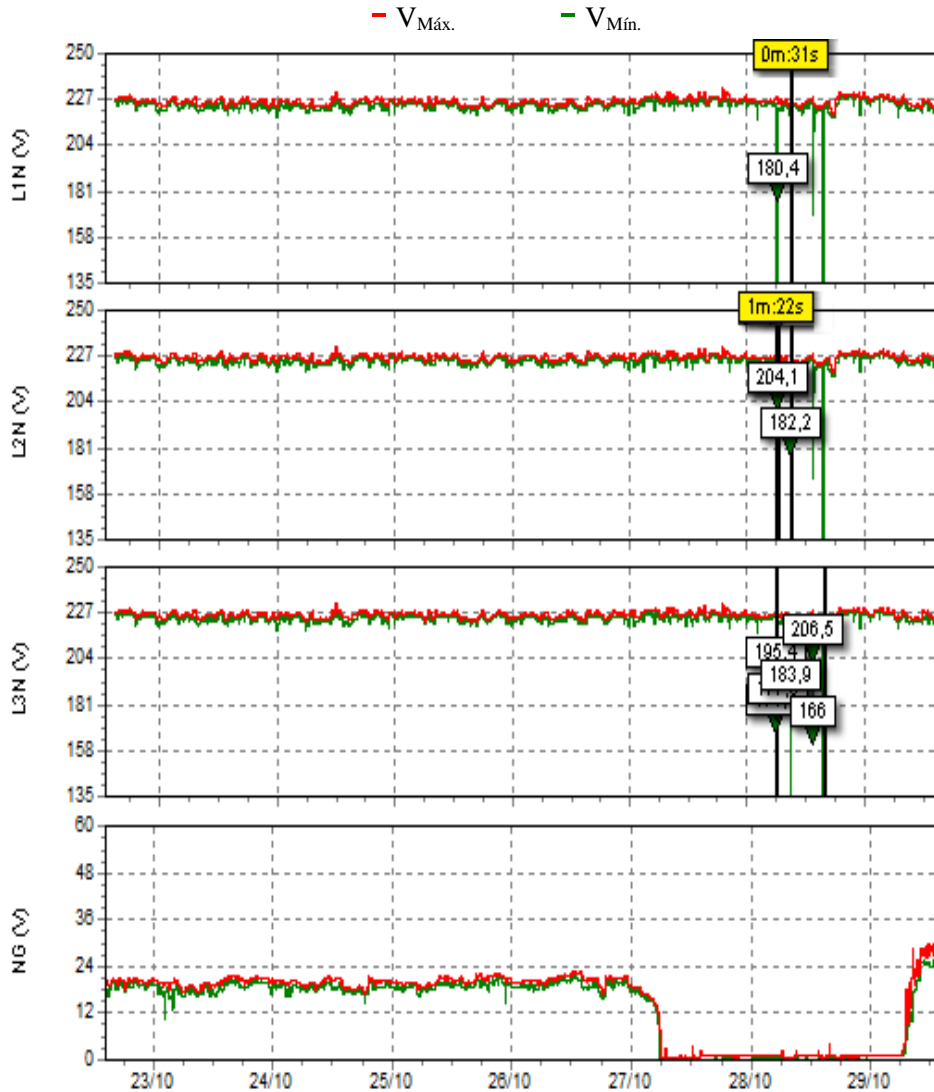


Figura 3.36. Evolução dos valores eficazes das tensões no T3.

No dia 28-10, um domingo, registaram-se interrupções de curta duração, com tempo interrupção inferior a 2 min e ainda algumas cavas de tensão, conforme se pode verificar na Figura 3.37. As causas das interrupções estão mais uma vez relacionadas com fenómenos meteorológicos, como trovoada e ventos fortes. As quatro interrupções de energia registadas tiveram a duração de 1m:22 s, de 1m:7 s, 46 s e 31 s.

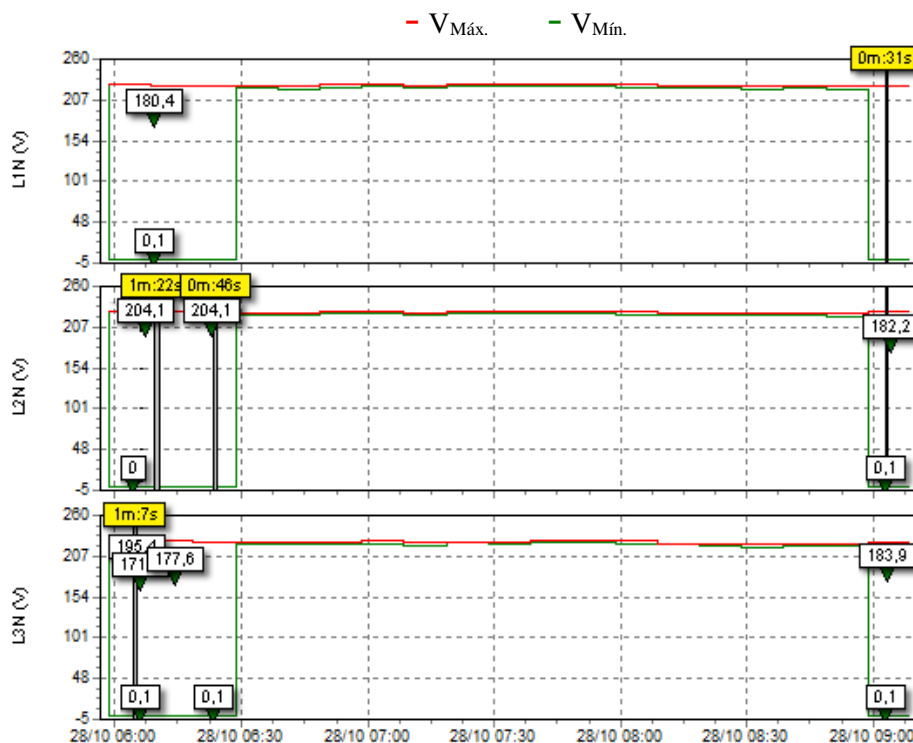


Figura 3.37. Evolução dos valores eficazes das tensões no T3, no dia 28-10.

Na Figura 3.38 apresentam-se os registos dos valores eficazes das correntes L_1 , L_2 , L_3 e N (valores máximos e mínimos de meio ciclo) no T2. Verifica-se uma evolução idêntica nas três fases, sendo que o valor máximo atingido foi de 1237 A na fase L_3 . No condutor neutro o valor máximo registado foi de 98 A, imediatamente a seguir à interrupção do dia 22/11.

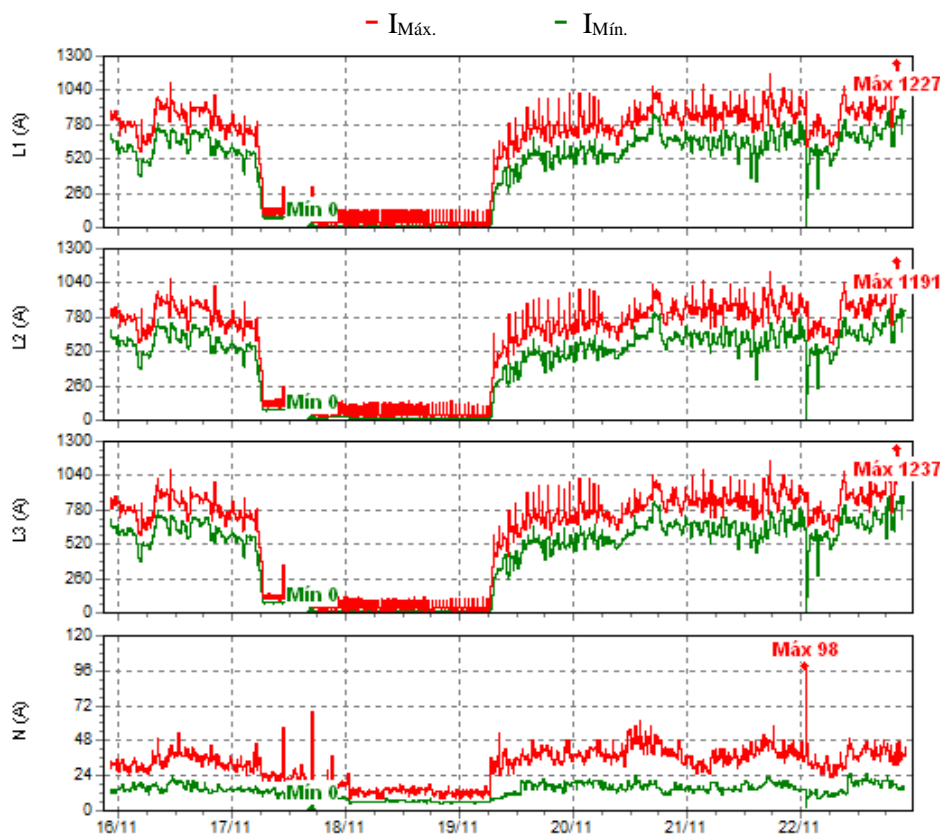


Figura 3.38. Evolução dos valores eficazes das correntes no T2.

A Figura 3.39 exibe a evolução temporal dos valores eficazes das correntes L_1 , L_2 , L_3 e N no T3 (valores máximos e mínimos de meio ciclo).

Os valores máximos registados foram de 1156 A, 1215 A e 1194 A para as fases L_1 , L_2 e L_3 , respetivamente. Já no condutor neutro o valor máximo registado foi de 92 A, correspondendo ao período em que aconteceram as interrupções de energia do dia 28-10.

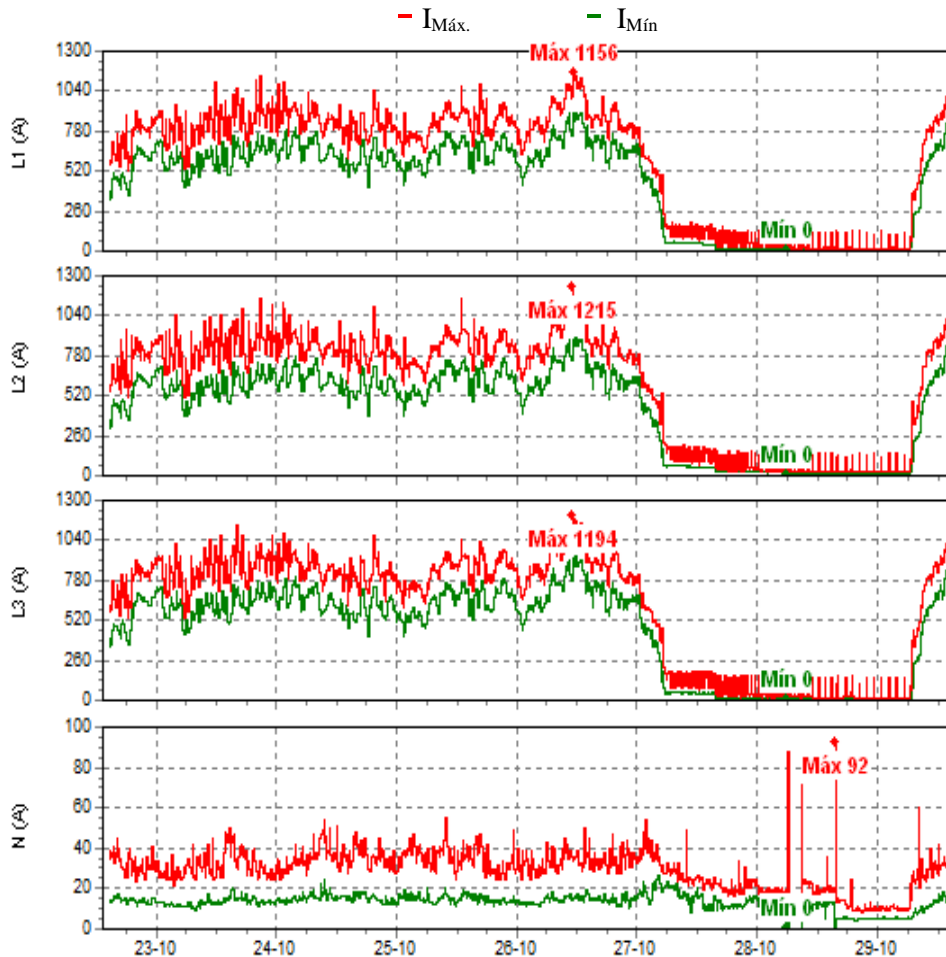


Figura 3.39. Evolução dos valores eficazes das correntes no T3.

3.3.2.2 Registos de Cavas e Sobreensões

Na Tabela 3.3 exibem-se os registos dos eventos das cavas de tensão monitorizadas no T2 e ilustradas na Figura 3.35.

Na fase L_{1N} registaram-se dois eventos entre os 40 % e os 70 % da tensão, correspondendo a 148,1 V com duração de 140 ms e 135,2 V com duração de 110 ms. Ainda na fase L_{1N} registou-se um evento com uma duração de 73 ms, com o valor de 174,1 V (80 % e os 90 %). Para a fase L_{2N} registou-se um evento entre os 80 % e os 90 % da tensão com o valor de 196,3 V, durante 80 ms, e um evento de entre 40 % e os 70 % da tensão com o valor de 159,4 V, com uma duração de 264 ms.

Tabela 3.3. Registo de cavas de tensão no T2.

Tensão residual u	Duração t (ms)				
	$10 \leq t \leq 200$	$200 < t \leq 500$	$500 < t \leq 1000$	$1000 < t \leq 5000$	$5000 < t \leq 60000$
$90 \% > u \geq 80 \%$	1	0	0	0	0
$80 \% > u \geq 70 \%$	1	0	0	0	0
$70 \% > u \geq 40 \%$	2	1	0	0	0
$40 \% > u \geq 5 \%$	0	0	0	0	0
$5 \% > u$	0	0	0	0	0

Verifica-se a partir da Tabela 3.4 os registos das cavas de tensão no T3 em conformidade com os eventos apresentados na Figura 3.37. Registaram-se três ocorrências entre os 80 % e os 90 % da tensão: com uma duração de 20 ms e outra de 40 ms de 204, 1 V na fase L_{2N} , e com duração de 40 ms e 206,5 V na fase L_{3N} .

Para o intervalo dos 70 % e 80 % da tensão residual registaram-se seis eventos: de 177,4 V com duração 50 ms, de 177,7 V com duração de 70 ms, de 183,9 V com duração de 50 ms, de 166 V com duração de 190 ms, todas na fase L_{3N} . De 182,2 V com duração 43 ms na fase L_{2N} e 180,4 V com duração 54 ms na fase L_{1N} .

Tabela 3.4. Registo de cavas de tensão no T3.

Tensão residual u	Duração t (ms)				
	$10 \leq t \leq 200$	$200 < t \leq 500$	$500 < t \leq 1000$	$1000 < t \leq 5000$	$5000 < t \leq 60000$
$90 \% > u \geq 80 \%$	3	0	0	0	0
$80 \% > u \geq 70 \%$	6	0	0	0	0
$70 \% > u \geq 40 \%$	0	0	0	0	0
$40 \% > u \geq 5 \%$	0	0	0	0	0
$5 \% > u$	0	0	0	0	0

Durante este período analisado, não se registou qualquer evento de sobretensão no QGBT2.

3.3.2.3 Registo da Tremulação da Tensão

A evolução temporal do registo da tremulação da tensão no T2 apresenta-se na Figura 3.40. Registaram-se alguns eventos com valores superiores a 1 nas três fases, estando diretamente relacionados com as interrupções de curta duração.

Os valores superiores a 1 na fase L_{1N} foram de 8,081, de 2,029, de 1,51, de 4,187 e de 2,294. Para a fase L_{2N} sucederam os valores de 8,063, de 1,239, de 4,23, e de 2,528. Para a fase L_{3N} foram de 8,065, de 1,026, de 4,49 e de 2,242.

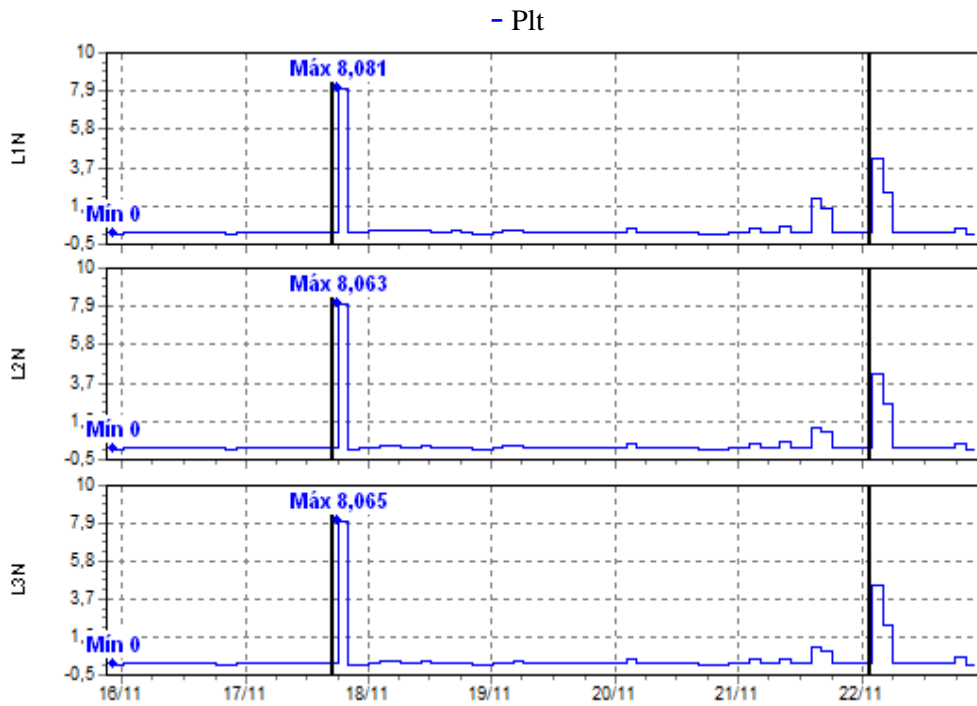


Figura 3.40. Evolução da tremulação da tensão no T2.

O progresso da tremulação da tensão no T3 encontra-se na Figura 3.41. Registaram-se quatro valores superiores a 1, com o máximo de 11,542 para a fase L_{1N} , a seguir 7,77, depois de 2,044, e por último de 7,822. Para a fase L_{2N} registou-se o valor máximo de 11,624, a seguir 7,893, depois 1,98 e 7,827. Na fase L_{3N} , o máximo registado foi de 11,637, e os restantes valores de 7,827, de 1,962 e de 7,823. Esta sequência de valores elevados surge das interrupções do dia 28-10.

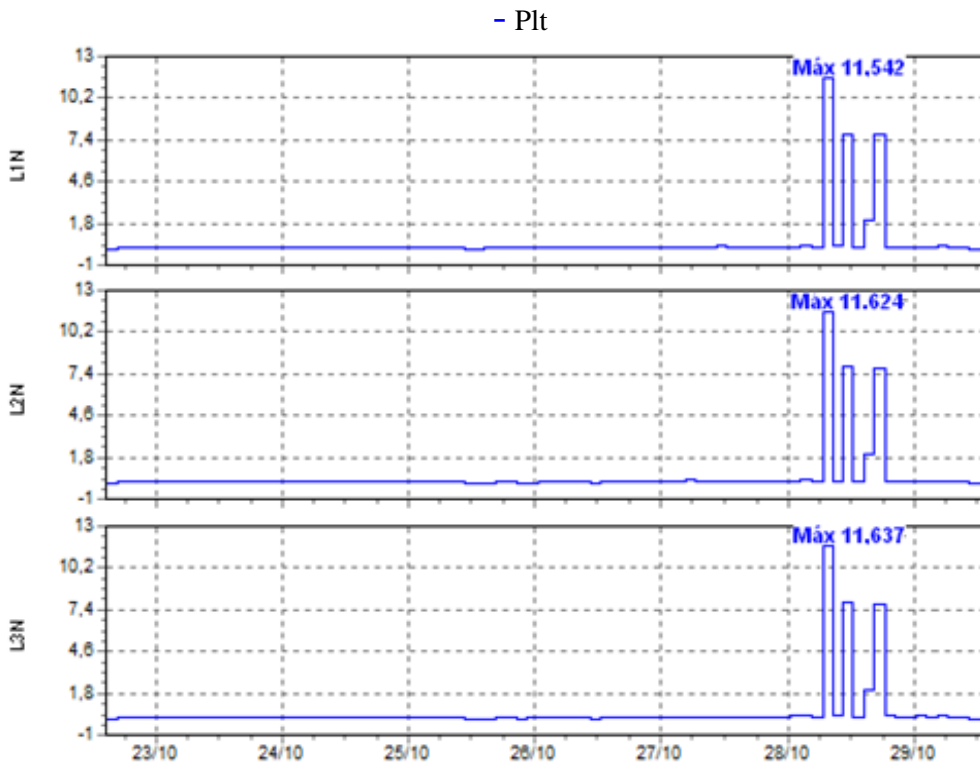


Figura 3.41. Progresso da tremulação da tensão no T3.

Durante o período monitorizado para o T3, o nível de severidade da tremulação de longa duração (P_{lt}), associado a flutuações de tensão foi inferior 1 durante 95,24 % do tempo (8 horas de 168 horas), embora as ocorrências fossem obtidas durante o período de não produção.

3.3.2.4 Registo da Frequência Fundamental da Tensão

A evolução temporal da frequência fundamental da tensão de alimentação do T2, exhibe-se na Figura 3.42. Através do gráfico observa-se que a frequência registada atingiu um valor máximo de 50,081 Hz e um valor mínimo de 49,925 Hz, representando um desvio de +0,162 % e -0,15 % em relação aos 50 Hz, respetivamente.

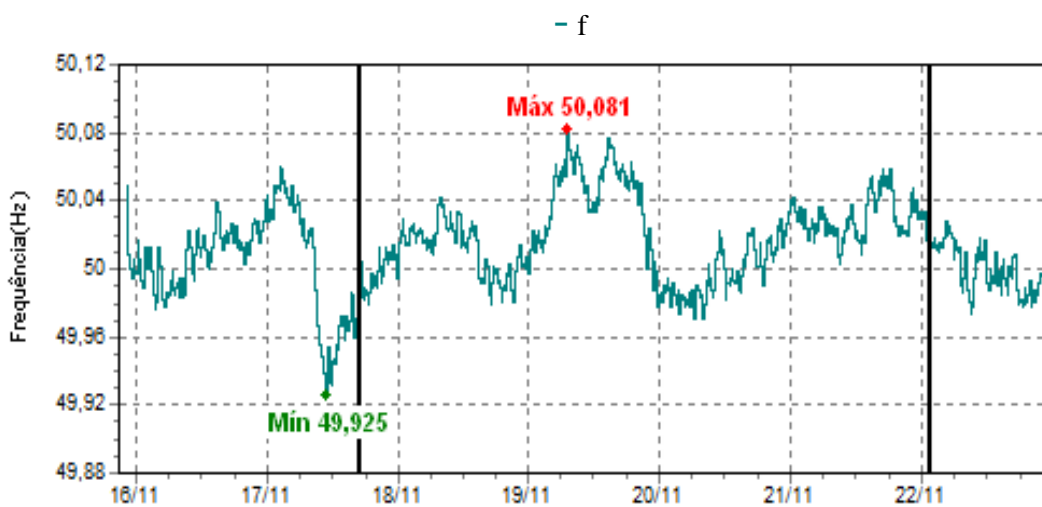


Figura 3.42. Evolução da frequência fundamental da tensão de alimentação no T2.

O progresso da frequência fundamental da tensão de alimentação do T3, apresenta-se na Figura 3.43. Verifica-se que a frequência registada alcançou um valor máximo de 50,086 Hz e um valor mínimo de 49,924 Hz, reproduzindo um desvio de +0,172 % e -0,152 % relativamente aos 50 Hz.

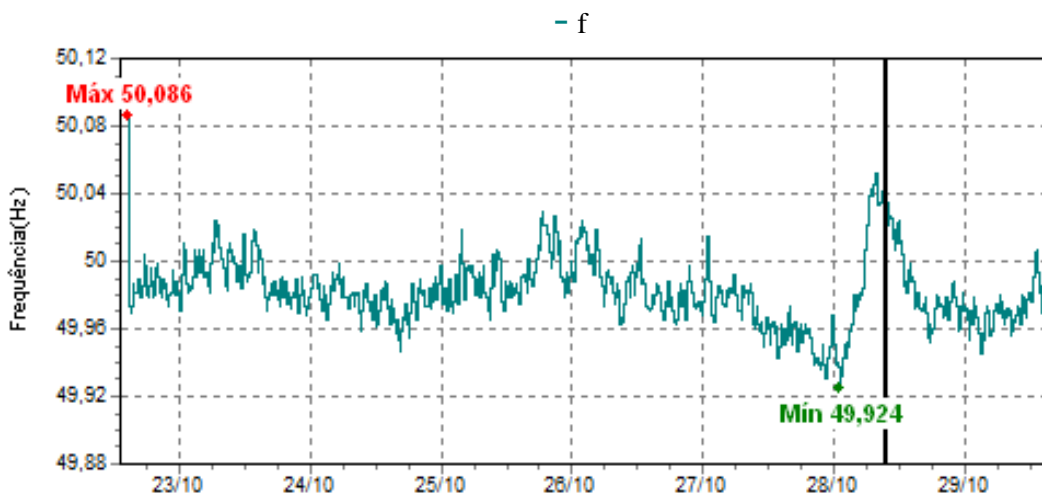


Figura 3.43. Progresso da frequência fundamental da tensão de alimentação no T3.

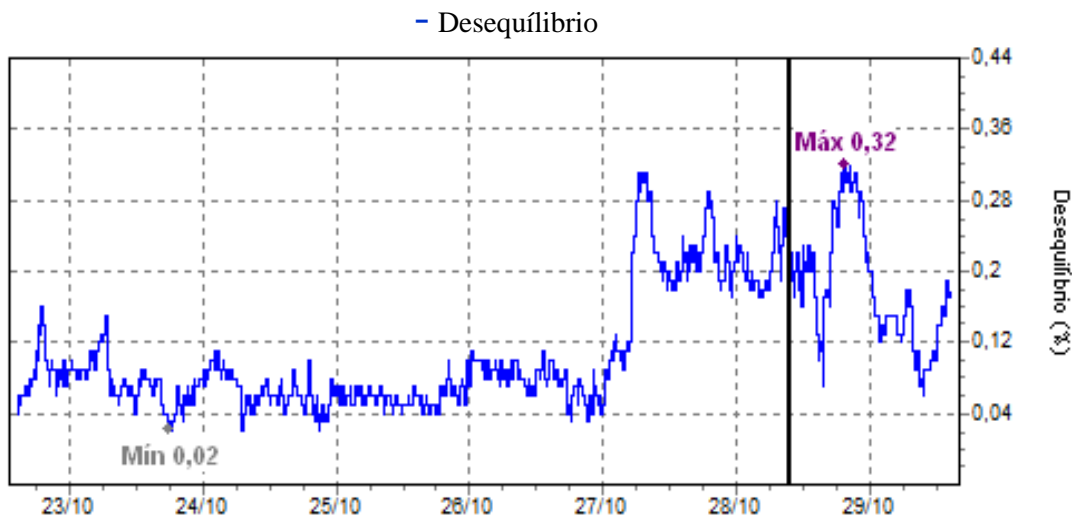
Em suma, a oscilação da frequência ao longo do período monitorizado em ambos os transformadores (T2 e T3), esteve dentro dos limites estabelecidos pela norma NP EN50160.

3.3.2.5 Registo de Desequilíbrio da Tensão

A avaliação do comportamento do desequilíbrio de tensão do T2 é apresentada na Figura 3.44. Observa-se um fator de desequilíbrio de tensão variando na ordem de 0,02 % a 0,81 %, sendo que houve um maior desequilíbrio com o fim da produção (17/11 e 18/11), voltando a diminuir novamente com o retomar da produção.



Na Figura 3.45 apresenta-se a tendência do fator de desequilíbrio da tensão no T3 ao longo do tempo, onde verifica-se uma variação entre 0,02 % a 0,32 %. Verificou-se um aumento significativo do desequilíbrio por volta das 5h30 do dia 27-10 (sábado), coincidente também com o fim da produção fabril. Este aumento prolongou-se até ao novo início de produção no dia 29-10 (pelas 06h00 de segunda-feira).



3.3.2.6 Registo de Harmónicas e THD

A Figura 3.46 mostra a evolução da THDv no T2, ao longo de 7 dias. Os registos indicam uma evolução semelhante entre fases ao longo dos dias, apresentando valores compreendidos entre 2,8 % e os 5,76 %.



Figura 3.46. Evolução da THDv no T2.

Na Figura 3.47 observa-se a evolução da THDv nas fases do T3. De modo análogo ao T2, os registos indicam uma evolução idêntica ao longo dos dias, apresentando uma variação de valores entre 1,1 % e 6,03 %.



Figura 3.47. Evolução da THDv no T3.

Também no QGBT2 se verifica a diminuição da THDv dentro das horas de vazio (00h00 - 7h00), assim como acontece com o QGBT1.

A partir da análise no domínio da frequência dos gráficos da Figura 3.48 verifica-se que as harmónicas que mais contribuem, em média, para a THDv no T2 são a de 5ª e a de 7ª ordem. A harmónica que mais contribui para a TDHv é a 5ª harmónica, apresentando valores máximos de 5,14 % para a fase L_{1N} , 5,33 % para a fase L_{2N} e 5,24 % para a fase L_{3N} . A partir da harmónica de 25ª ordem, os valores registados são muito próximos de zero, nas três fases.

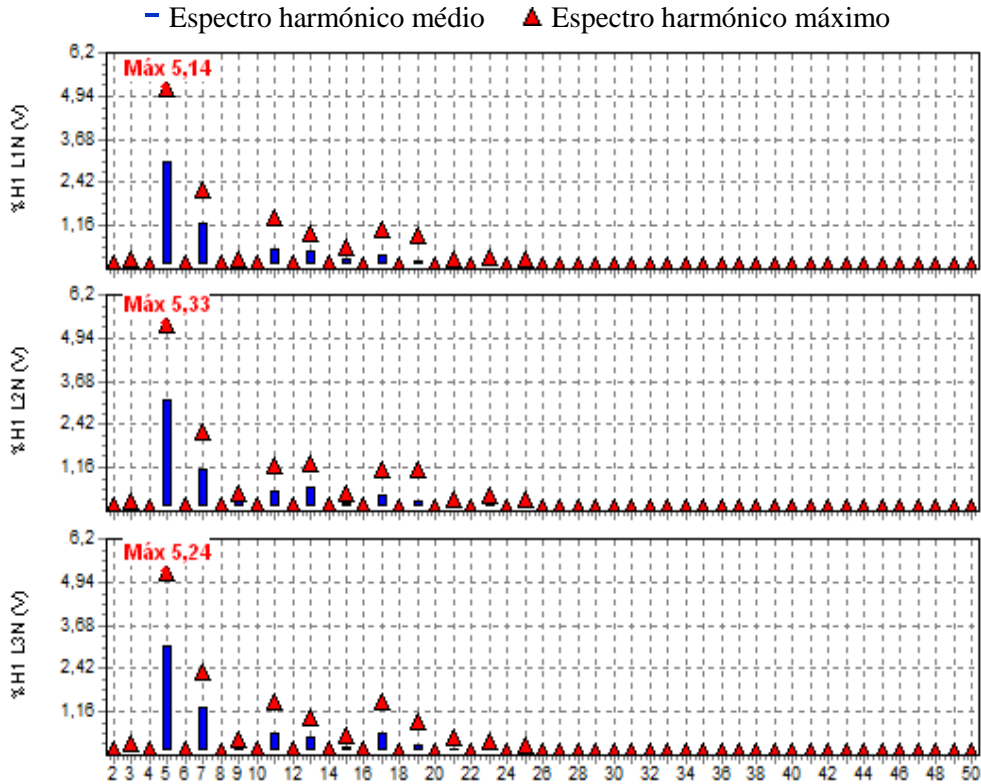


Figura 3.48. Espectro harmónico da tensão até ordem 50 no T2.

Com base no espectro harmónico da THDv individual da Figura 3.49, verifica-se que as harmónicas mais influentes, em média, para a THDv no T3 são a 5ª e a 7ª ordem, tal como no T2. Apresentando-se como mais contributiva para a THDv a 5ª harmónica, com valores máximos para o período monitorizado de 5,54 % para a fase L_{1N} , 5,5 % para a fase L_{2N} e 5,43 % para a fase L_{3N} . De modo similar ao registo no T2, a partir da harmónica de 25ª ordem, os valores registados são praticamente nulos, nas três fases, pelo que pouco contribuem para a THDv.

Para a monitorização das harmónicas de corrente, utilizou-se o modo “Harmónicas de Corrente”, durante 5 dias, com intervalos de medição de 5 minutos. A Figura 3.50 exhibe a evolução temporal da THDi na saída do T2. Observa-se uma evolução mais desequilibrada entre fases durante o dia 21/1, por se tratar de um domingo, apresentando uma maior

distorção na fase L_{3N} . Este fenómeno deve-se ao facto de existir um maior conjunto de cargas monofásicas que estão ligadas nessa fase, tais como iluminação de presença, computadores.

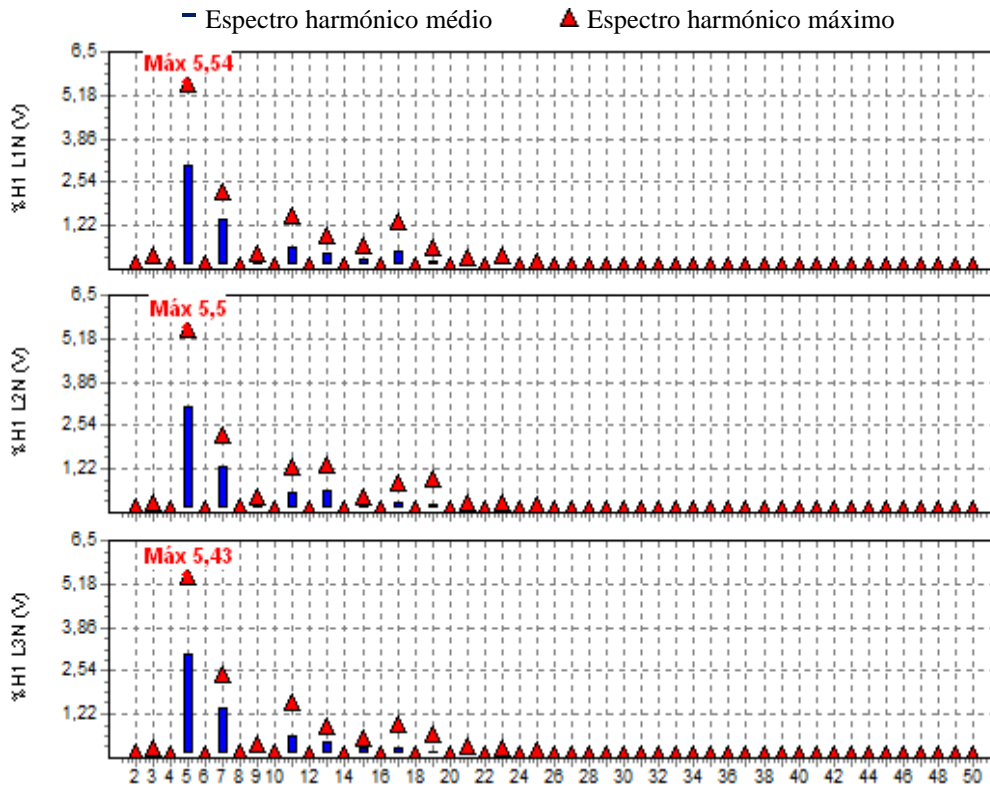


Figura 3.49. Espectro harmónico da tensão até ordem 50 no T3.

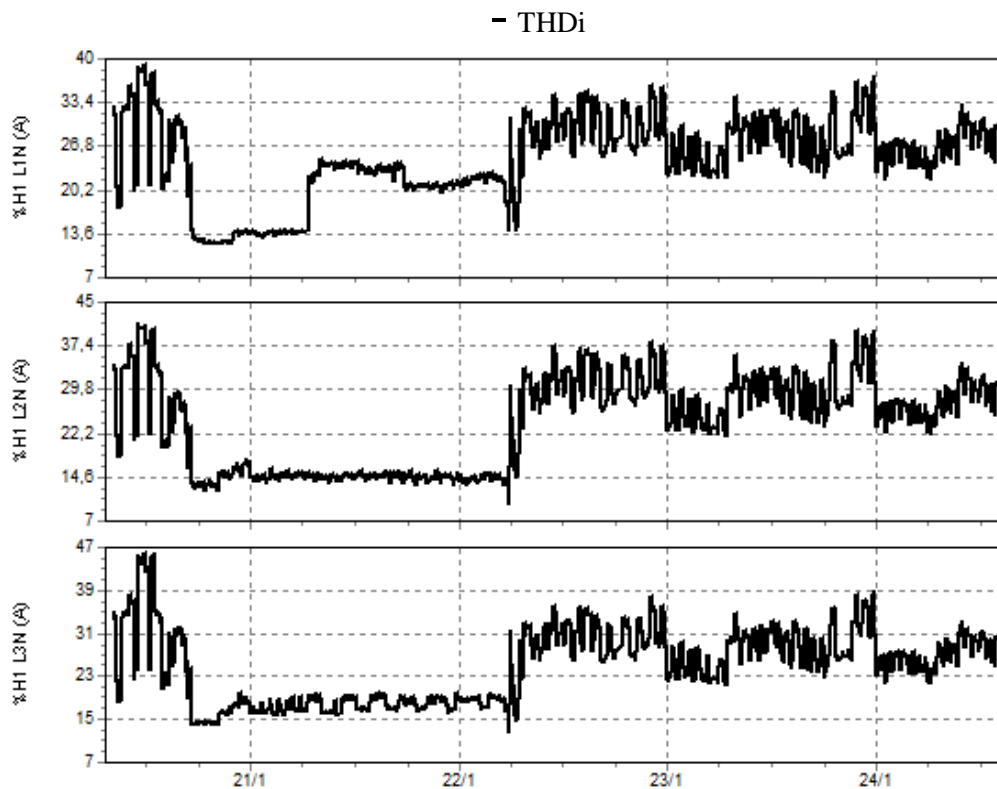


Figura 3.50. Evolução da THDi no T2.

Na Figura 3.51 apresenta a evolução temporal da THDi no T3, onde se observa uma evolução idêntica da distorção harmónica da corrente entre fases.

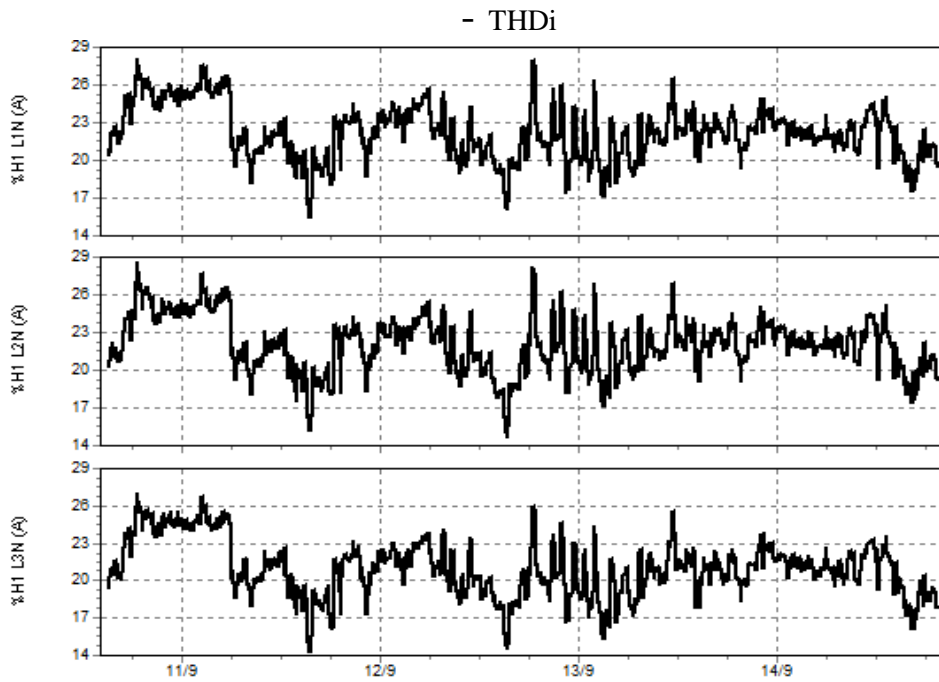


Figura 3.51. Evolução da THDi da corrente nas fases do T3.

Através da Figura 3.52 verifica-se uma contribuição também mais acentuada por parte das harmónicas de 3^a, 5^a, 7^a, 11^a e 13^a ordem no T3, sendo que a partir da harmónica de 15^a ordem e até à 50^a ordem os valores são quase desprezáveis em qualquer uma das fases. Os valores máximos registados são da 5^a harmónica de 36,13 % na fase L_{1N} , 38,15 % na fase L_{2N} e 38,15 % na fase L_{3N} . A Figura 3.52 permite ainda observar a presença de componentes harmónicas triplas (3^a, 9^a, 15^a ordem), com contribuição mais significativa da componente de 3^a ordem.

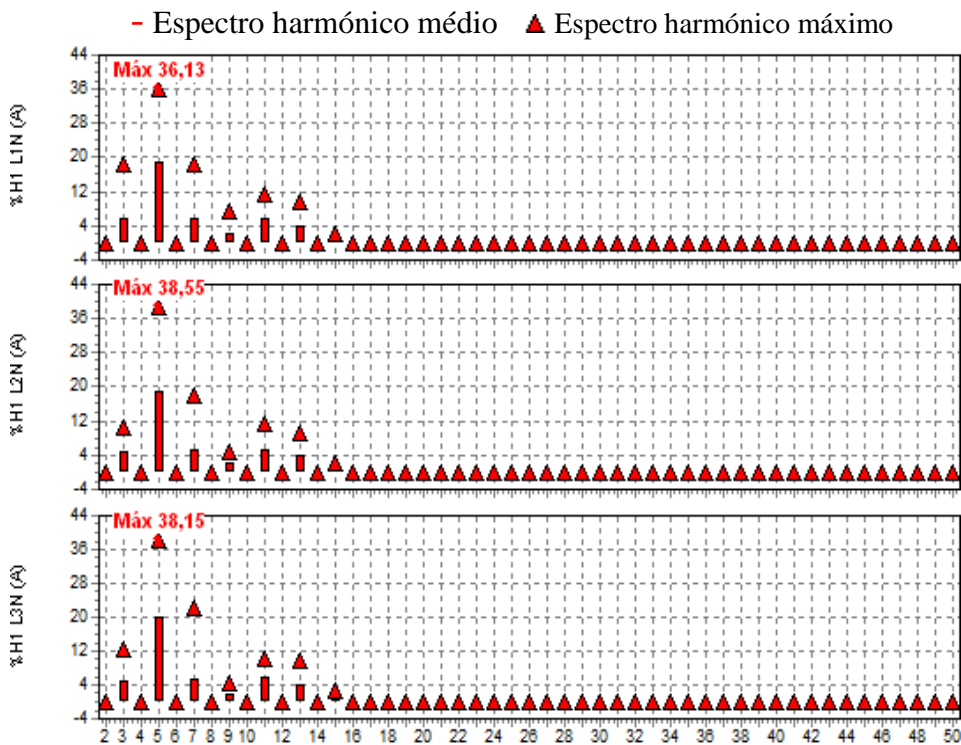


Figura 3.52. Espectro harmónico da corrente até à 50^a harmónica nas fases do T2.

Na Figura 3.53 observa-se o espectro harmónico em relação à fundamental, no T3. Verifica-se uma contribuição mais acentuada por parte das harmónicas de 3^a, 5^a, 7^a, 11^a e 13^a, com uma contribuição partir da harmónica de 15^a ordem e até à 50^a ordem também não existe grande influência para a THDi, em qualquer uma das fases. Os valores máximos registados são na 5^a harmónica de 26,76 % na fase L_{1N} , 27,07 % na fase L_{2N} e 25,83 % na fase L_{3N} . Observar-se a presença de componentes harmónicas triplas (3^a, 9^a, 15^a ordem), com contribuição mais significativa da componente de 3^a ordem.

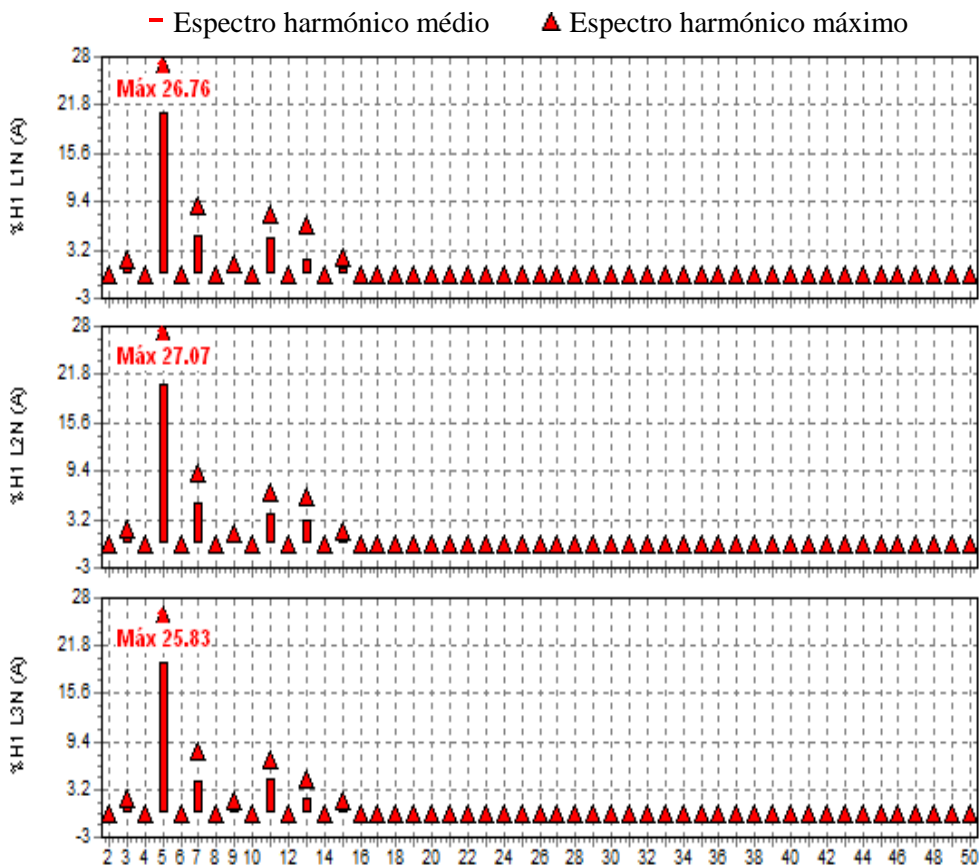


Figura 3.53. Espectro harmónico da corrente até à 50^a harmónica nas fases do T3.

3.3.2.7 Registo de Potência

A monitorização no modo “Potência e Energia” do analisador de energia no QGBT2, teve a duração de 5 dias, com intervalos entre registos de 5 minutos. Foram analisados durante diferentes períodos os secundários dos transformadores 2 e 3.

A Figura 3.54 retrata a evolução temporal das potências médias: ativa ($P_{Méd.}$), aparente ($S_{Méd.}$), reativa ($Q_{Méd.}$) e do fator de potência total médio ($FPT_{Méd.}$) no T2. A $P_{Méd.}$ máxima registada foi 663,7 kW pelas 9h49 do dia 25/1, a $Q_{Méd.}$ máxima registada foi de 273,6 kVAR pelas 00h45 do dia 26/1 e na $S_{Méd.}$ o valor máximo registado foi de 695,9 kVA também pelas 9h49 do dia 25/1.

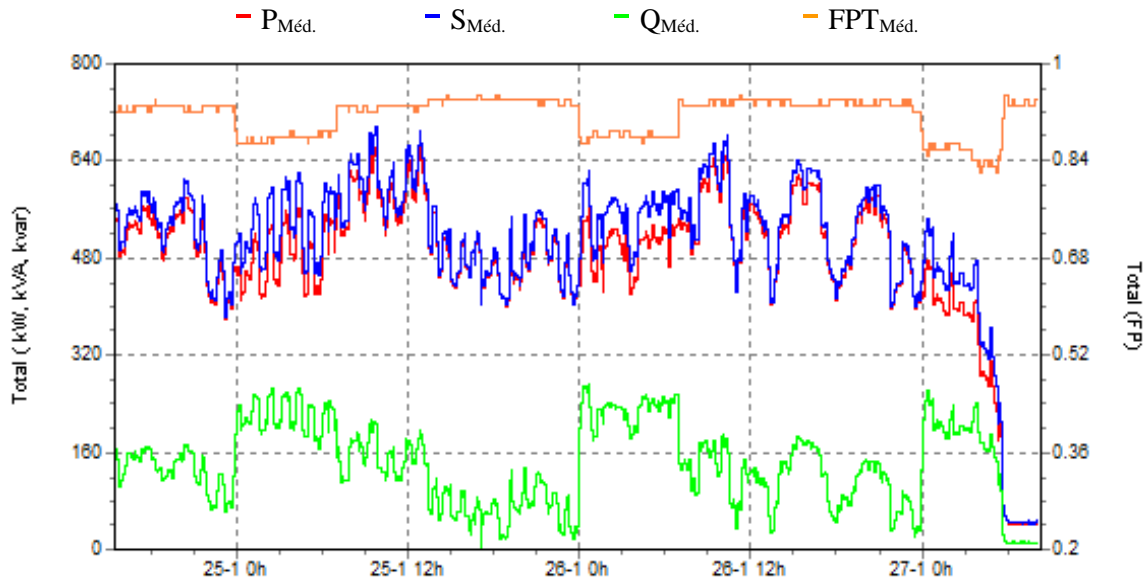


Figura 3.54. Evolução da potência médias de fase no T2.

Tal como no QGBT1, as baterias de condensadores desligaram durante as horas de vazio conforme se verifica na Figura 3.55, aumentando desta forma a potência reativa média ($Q_{Méd.}$) e por conseguinte a potência aparente média ($S_{Méd.}$).

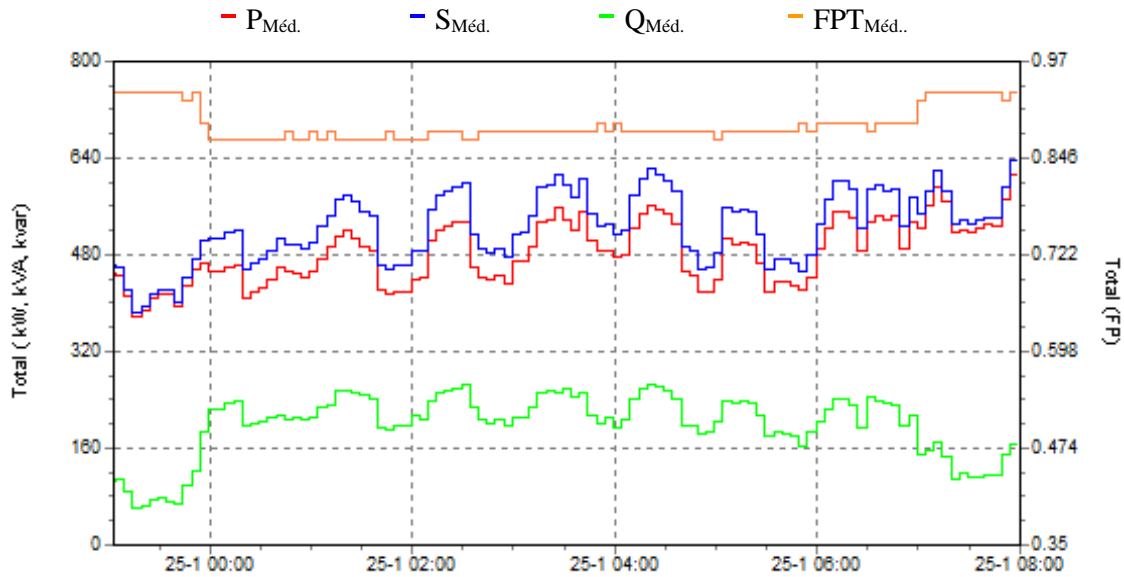


Figura 3.55. Evolução das potências médias e do FPT médio durante horas de vazio no T2.

Na Figura 3.56 apresenta a evolução temporal das potência médias e do fator de potência total médio T3, onde a referência do regulador das baterias de condensadores já se encontrava ajustado, não sendo desta forma desligadas durante as horas de vazio. Os 2 primeiros dias (6-10 e 7-10) referem-se ao período de fim de semana, onde não se verificou produção fabril, já os restantes são dias da semana com uma produção regular. No dia 11-10, observa-se ainda duas descidas repentinas das potências.

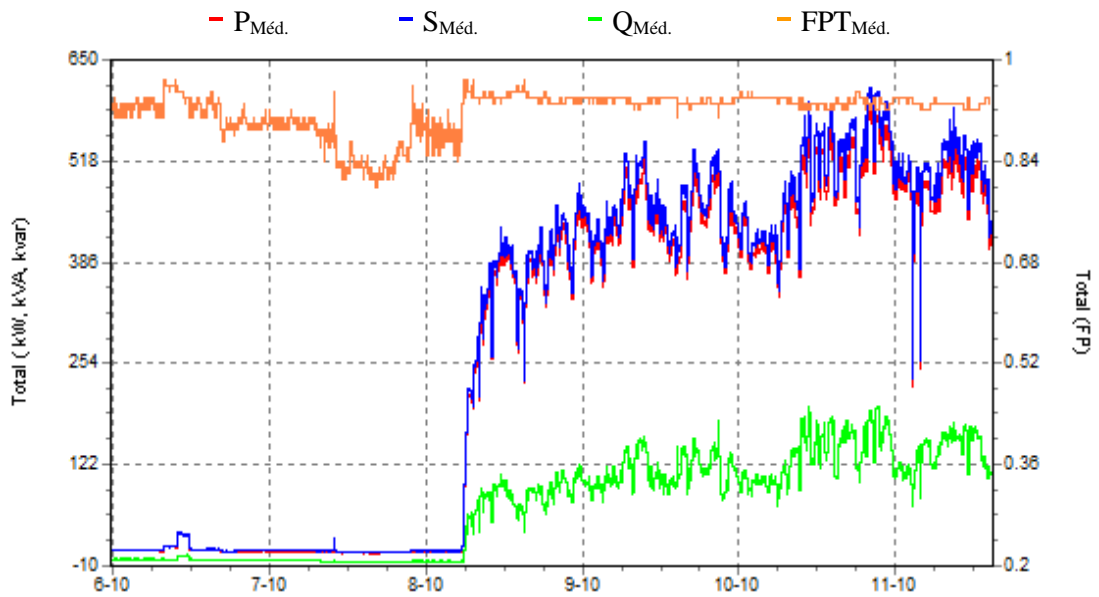


Figura 3.56. Evolução das potências médias e do fator de potência total médio no T3.

A Figura 3.57 mostra a evolução dos valores eficazes das tensões de fase (L_{1N} , L_{2N} e L_{3N}) no T3, durante o período em que as potências obtiveram as duas descidas repentinas. Estas descidas dos valores das tensões, foram provocadas por interrupções do serviço na rede devido a descargas atmosféricas que aconteceram nesse dia.

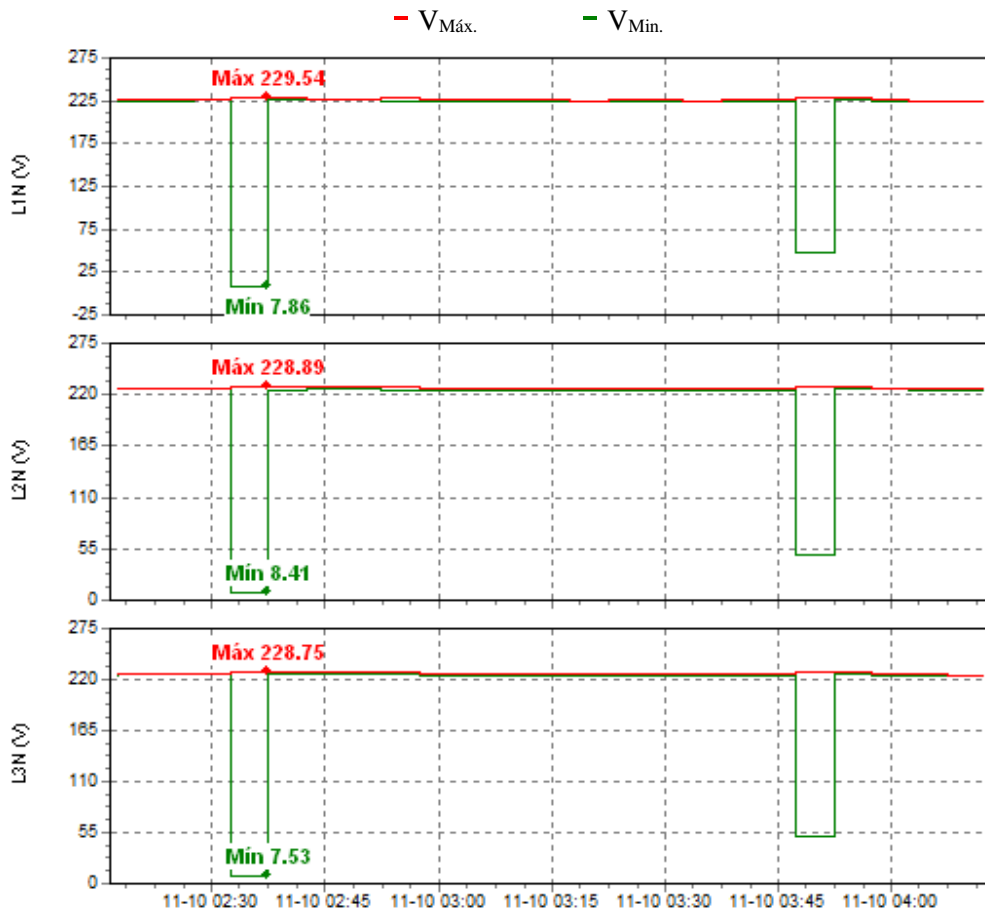


Figura 3.57. Evolução dos valores eficazes das tensões no T3.

3.3.3 Medição das Terras

Durante uma inspeção preventiva ao PT, efetuaram-se as medições das resistências de terra (serviço e proteção). Os valores registados foram de $1,7 \Omega$ para a terra de proteção (R_P), $3,24 \Omega$ para a terra de serviço (R_{S1}) do transformador 1 e 689Ω para a terra de serviço dos transformadores 2 e 3 ($R_{S2,3}$). Relatos da equipa de manutenção afirmam que nos ultimamente, sempre que existia um defeito à terra, por exemplo, um motor elétrico com uma das bobinagens com passagem à massa, o dispositivo de ação diferencial não atuava. A Figura 3.58 ilustra a situação referida anteriormente em que a fase L_3 está em contacto direto com a carcaça do motor, surgindo uma diferença de potencial entre as fases L_{1_GN} e L_{2_GN} e a terra de 400 V, provocando desta forma anomalias noutros equipamentos mais sensíveis em diversos locais da zona fabril.

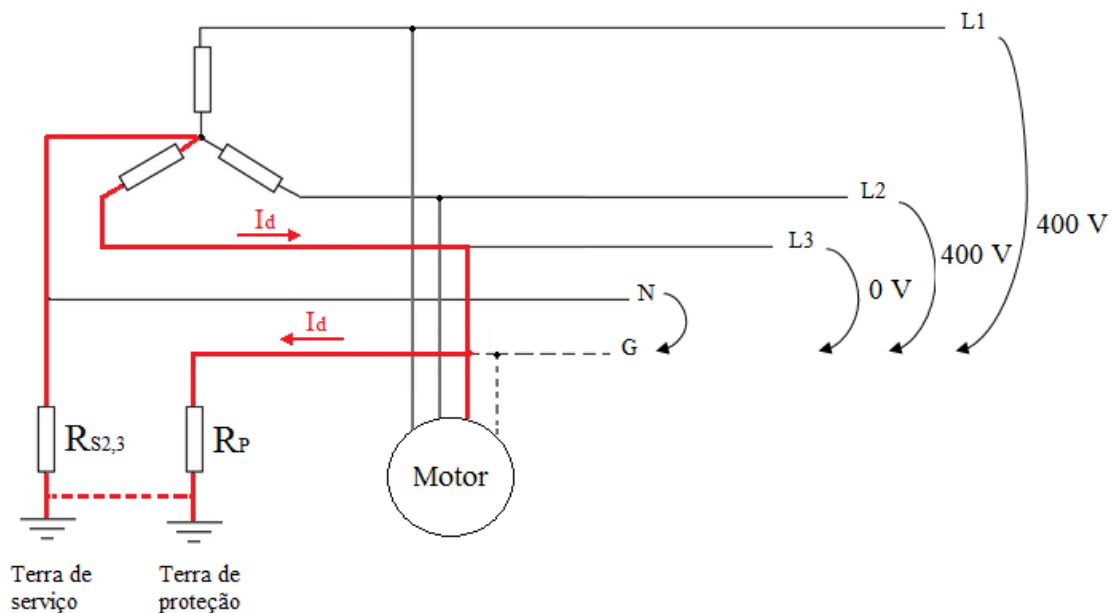


Figura 3.58. Circuito de defeito entre a fase L_3 e o circuito de terras.

O valor aproximado da corrente de defeito I_d , pode ser calculada pela expressão (3.6), dividindo a tensão simples pela soma das resistências de terra de serviço $R_{S2,3}$ e da terra de proteção R_P , desprezando a impedância de linha entre o defeito e o ponto de ligação à terra de serviço.

$$I_d = \frac{U_s}{R_{S2,3} + R_P} = \frac{230 \text{ V}}{689 \Omega + 1,7 \Omega} \approx 333 \text{ mA} \quad (3.6)$$

Como o DDR só irá atuar quando a corrente de defeito atingir o valor da corrente diferencial residual (cujo valor usado na maioria das máquinas é $I_{An} = 500 \text{ mA}$), devido à alta resistência da terra de serviço ($R_{S1,2}$) os dispositivos com valores de correntes diferenciais superiores à corrente de defeito, não irão atuar.

Para compreender a razão do valor elevado da resistência da terra de serviço, abriu-se uma vala onde se encontrava enterrado o cabo, com uma secção de 90mm^2 , que interliga as varetas de terra ao neutro dos transformadores. A cerca de um metro de distância da primeira vareta, encontrou-se o cabo interrompido junto a um tubo de saneamento, que foi instalado como se pode observar na Figura 3.59. Portanto, o mais provável é que o cabo terá sido ferido ou até mesmo partido pelas máquinas que abriram a vala, aquando a instalação dos tubos de saneamento.



Figura 3.59. Vala onde foi encontrado o cabo interrompido de ligação à terra de serviço.

Após identificar a origem do defeito, decidiu-se utilizar chapas de cobre para realizar um novo aterramento da terra de serviço, conforme mostra a Figura 3.60.



Figura 3.60. Vala com as chapas de cobre para o aterramento.

Já com o novo aterramento concluído o valor medido da resistência da terra de serviço do QGBT2 foi de 12,3 Ω . Em caso defeito, a corrente I_d calculada pela expressão (3.7), será cerca de 16,4 A e os DDR irão atuar com normalidade.

$$I_d = \frac{U_s}{R_{S1,2} + R_P} = \frac{230 \text{ V}}{12,3 \Omega + 1,7 \Omega} \approx 16,4 \text{ A} \quad (3.7)$$

3.4 Conclusões

Uma vez que a ligação dos primários dos transformadores é feita em triângulo, as correntes harmónicas de sequência zero (3^a, 9^a, 15^a, etc), por estarem em fase, ficam a circular apenas nos enrolamentos em triângulo. Desta forma, essas correntes harmónicas não circulam para o lado da rede.

Existe a possibilidade de os condensadores no PT se terem danificado pela interação das correntes harmónicas ou até por excesso de temperatura uma vez que não existe climatização dentro do PT. Uma vez que durante o período analisado não se registou qualquer evento de sobretensão, não terá sido uma causa muito provável para o rebentamento dos condensadores. Com as baterias de condensadores desligadas durante o período de vazio, verificava-se uma diminuição do FPT, causando um aumento das correntes nas linhas e das respetivas perdas por efeito de joule nos transformadores. Ainda que os três transformadores estejam sobredimensionados para a instalação elétrica geral, uma redução do FPT provoca também uma redução da capacidade dos transformadores.

As ocorrências da continuidade de serviço em ambos os QGBT foram as interrupções de curta duração. Não obstante, interrupções de serviço, mesmo que de curta duração causam prejuízos significativos no processo produtivo, uma vez que algumas das máquinas trabalham em regime contínuo, podendo danificar algumas dezenas de metros tecido/malha. A causa mais comum para estes acontecimentos foram os fenómenos atmosféricos.

As diversas ocorrências de cavas de tensão deram-se sobretudo nos momentos em que ocorreram as interrupções do serviço.

Durante as semanas monitorizadas conclui-se que os valores eficazes médios de 10 min no QGBT1 e QGBT2, situaram-se no intervalo de 207 V a 253 V ($\pm 10\%$), em conformidade a norma NP EN 50160.

A THD da tensão de alimentação em ambos os QGBT, foi inferior a 8 % em todas as fases, estando de acordo com a normalização. Conclui-se pelos espectros das harmónicas da tensão e da corrente que a 5^a harmónica é a mais contributiva para a THD_v e para a THD_i em ambos os QGBT. No QGBT1, a THD_v não apresentou valores máximos superiores 3,5 %, já

no QGBT2 a 5ª harmónica apresentou valores máximos entre 5,14 % e 5,54 %. Em média, 95 % dos valores da 5ª harmónica, durante uma semana, foram inferiores aos 6 % estipulados pela norma.

Verificou-se um ligeiro aumento de desequilíbrio das tensões de alimentação em períodos de não produção fabril, eventualmente causado pelo desequilíbrio da distribuição das cargas monofásicas. Constatou-se que durante o período monitorizado, 95 % dos valores médios de 10 minutos da componente inversa não ultrapassaram 2 % da correspondente componente direta, no QGBT1 e no QGBT2, conforme está estipulado pela normalização.

Na análise da tremulação da tensão de alimentação para o período de uma semana, a P_{lt} não foi superior a 1, durante 95 % do tempo, em qualquer um dos QGBT. Os valores registados superiores a 1 aconteceram na sequência das interrupções de curta duração.

Em suma, não se verificaram desvios significativos dos parâmetros referentes à QEE no PT de acordo com a norma NP EN 50160.

Um dos possíveis motivos para a elevada tensão entre neutro e terra era alta impedância da resistência da terra de serviço. Com realização do novo aterramento, ficou novamente assegurada a segurança de pessoas e bens, através da atuação normal dos dispositivos de proteção. Outra possibilidade para existir um valor elevado na tensão entre neutro e terra é que em algumas máquinas em que não existe o condutor neutro, utiliza-se o condutor da terra de proteção para referenciar o neutro dos transformadores 400-230 V. Este tipo de ligações em regimes de neutro TT não deve ser feita, pois altera as características da instalação.

Capítulo 4

Zona Fabril

4.1 Introdução

De acordo com o documento das Regras Técnicas das Instalações Elétricas de Baixa Tensão (RTIEBT), uma instalação elétrica é caracterizada por um conjunto de equipamentos elétricos relacionados, com vista a uma determinada aplicação, possuindo características coordenadas [41]. Devido à complexidade e tamanho da zona fabril da empresa, esta é constituída por vários quadros elétricos parciais ao longo do complexo fabril e dispõe de uma infraestrutura constituída por quatro pisos (Anexo 1), adiante designados por pisos 0, 1, 2 e 3. Conforme visto no capítulo anterior, os quadros parciais estão divididos em dois grupos, os Quadros de Força (QF) e Quadros de Luz (QL), que são abastecidos pelos dois quadros gerais de baixa tensão (QGBT) existentes no posto de transformação (PT). Os quadros parciais são identificados pela origem da alimentação, ou seja, para os quadros parciais que saem do QGBT1, tem a designação de 1QFx ou 1QLx, para os quadros parciais alimentados do QGBT2, são denominados por 2QFx ou 2QLx, em que x é o número de cada quadro.

De seguida será apresentada a divisão das cargas pelos diferentes pisos. No Anexo 2 encontram-se os organogramas correspondentes aos quadros parciais e sua origem de derivação (QGBT1 ou QGBT2).

- **Piso 0**

O piso 0 é constituído maioritariamente pelos serviços de apoio à produção das malhas e tecidos. É onde se encontram os compressores de ar, as caldeiras de vapor e termofluido, a Estação de Tratamentos de Águas Residuais (ETAR), a casa da soda e ainda os armazéns de acessórios e produtos químicos.

- **Piso 1**

É no piso 1 que estão situados os armazéns de receção e expedição dos tecidos, a secção de preparação de tecido, as oficinas de manutenção, as bombas de captação de água (do rio), as bombas de elevação de água fria, o gerador de emergência e o PT.

- **Piso 2**

No piso 2 encontram-se a grande maioria dos equipamentos de produção fabril. Estão situadas neste piso as secções de tinturaria e acabamento de tecido, a secção das malhas,

o laboratório de ensaios, a sala de informática, e no exterior a Estação de Tratamento da Água (ETA) captada do rio.

- **Piso 3**

No piso 3 estão instaladas as cozinhas de preparação dos banhos para as diferentes secções, o *open space* onde estão reunidos os serviços administrativos e planificação, e o laboratório de controlo de qualidade.

4.2 Cargas com Maior Consumo de Energia Elétrica

O conhecimento da utilização da energia é o primeiro passo para uma utilização mais eficiente das fontes de energia disponíveis e para a identificação de potenciais medidas de uma utilização racional de energia. Deste modo, a empresa faz a monitorização da energia através de um sistema de gestão de energia que permite recolher constantemente os dados essenciais à efetiva gestão de energia. Para obtenção dos dados utilizam-se contadores e analisadores de energia elétrica, que monitorizaram 86,5 % das cargas em 2017. Dos 86,5 % de dados recolhidos pelo sistema de gestão de energia, destacam-se as cargas apresentadas na Figura 4.1.

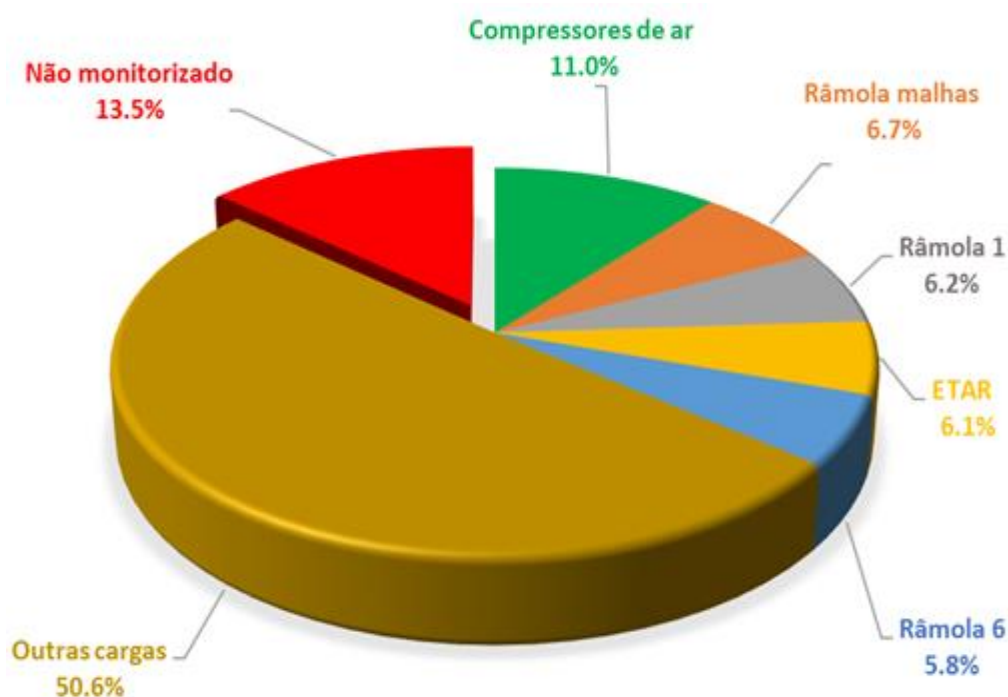


Figura 4.1. Valores percentuais da monitorização em relação ao total consumido em 2017.

Com base nos dados no gráfico acima serão feitas as análises aos parâmetros da qualidade de energia elétrica (QEE) às cargas destacadas, pelo que contribuem 36 % do consumo total da empresa.

4.3 Qualidade de Energia das Cargas com Maior Consumo

As medições aos parâmetros da QEE das cargas com maior consumo, foram realizadas à saída dos quadros parciais que alimentam as respetivas das cargas. Tal como no PT, efetuaram-se análises aos eventos mais relevantes extraídos da aplicação *Power Log Classic*. Para cada carga, os dados registados pelo analisador de energia foram recolhidos durante três dias, e utilizou-se um dia para cada um dos seguintes modos:

- “Monitor”;
- “Harmónicas de Corrente”;
- “Potência e Energia”.

Uma vez mais os registos de tensão, corrente, cavas de tensão, sobretensões, tremulação da tensão, frequência, desequilíbrios de tensão e harmónicas de tensão, foram recolhidos durante o mesmo período a partir do modo “Monitor” do analisador de energia. Para os modos das “Harmónicas de Corrente” e “Potência e Energia”, assim como no PT também se utilizaram períodos de medição diferentes.

4.3.1 Compressores de Ar Comprimido

Os sistemas de ar comprimido são transversais a qualquer a indústria, devido à multifuncionalidade de aplicações, segurança e limpeza. Por outro lado, os elevados custos da sua produção, representaram em 2017, 11 % do consumo de energia elétrica total da empresa. A empresa MGC AT dispõe de três compressores de ar comprimido, com potências distintas. A do compressor 1 é de 150 kW, a do compressor 2 é de 132 kW e a do compressor 3 é de 37 kW. O compressor 1 funciona como compressor piloto, sendo muito raramente apoiado pelo compressor 2. Já o compressor 3 apenas é utilizado em situações em que há apenas produção parcial de máquinas ou em períodos de manutenção ao fim de semana ou férias.

O compressor aqui analisado é o nº1 por se tratar do que mais horas de trabalho possui anualmente. Trata-se de um compressor volumétrico rotativo do tipo parafuso, e utiliza variação eletrónica de velocidade para ajustar a velocidade do motor do compressor em função da pressão de referência e do valor atual da pressão.

As formas das ondas da tensão e da corrente numa das fases registadas em um determinado instante, apresentam-se na Figura 4.2.

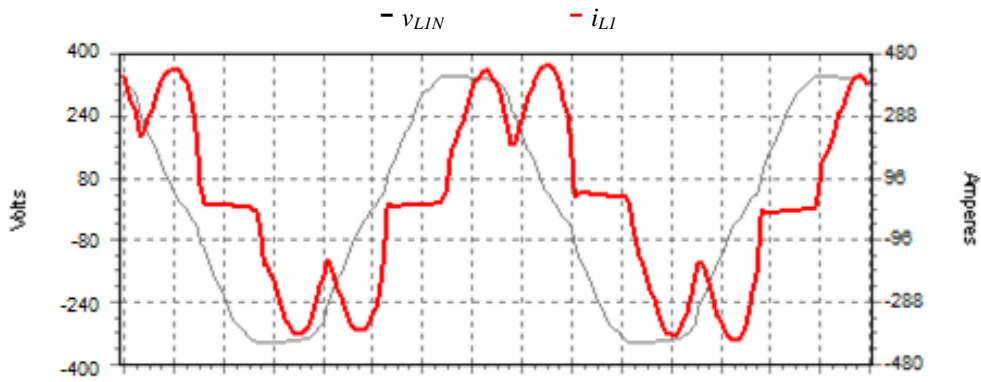


Figura 4.2. Formas das ondas da tensão e da corrente no compressor 1.

4.3.1.1 Registos de Tensão e Corrente

A Figura 4.3 exibe a evolução temporal dos valores eficazes máximos e mínimos das tensões compostas L_{12} , L_{23} e L_{32} , no compressor 1. Registou-se um evento de uma cava de tensão entre as fases L_{12} e uma variação da tensão entre os 379 V e os 396 V.

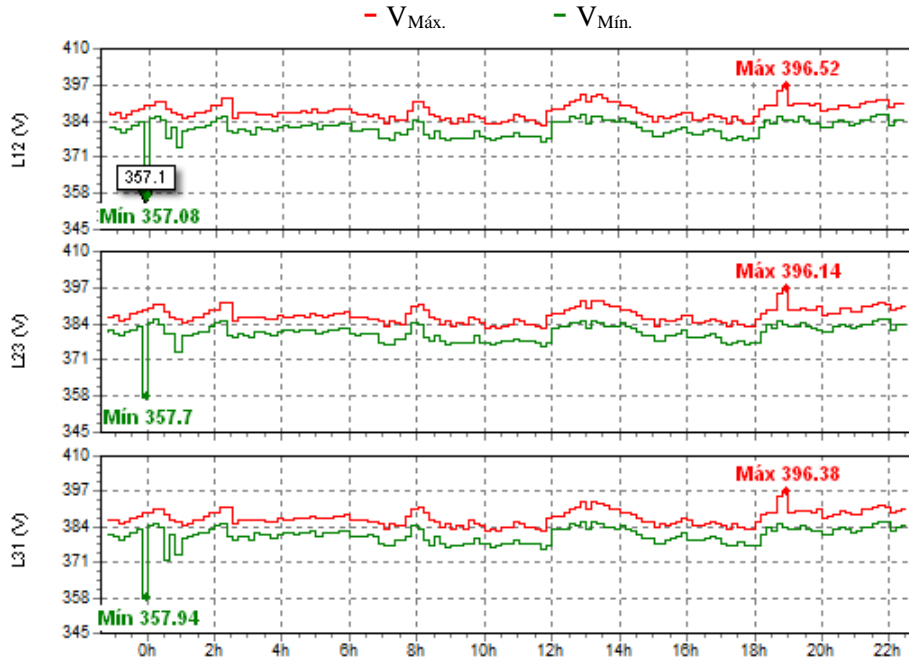


Figura 4.3. Evolução dos valores eficazes das tensões no compressor 1.

Na Figura 4.4 apresentam-se os registos dos valores máximos e mínimos eficazes das correntes L_1 , L_2 e L_3 , no compressor 1. Observa-se uma evolução aproximadamente constante entre os valores máximos e mínimos ao longo do tempo, isto porque, apesar do compressor utilizar um variador eletrónico de velocidade, a referência do controlador é dada em regime carga vazio. O regime de controlo do variador de velocidade possui este comportamento porque o variador de velocidade foi adaptado no compressor posteriormente à sua instalação. Portanto, a referência para o regime de carga corresponde ao valor máximo e a referência para o regime de vazio corresponde ao valor mínimo durante cada intervalo de medição (10 min).

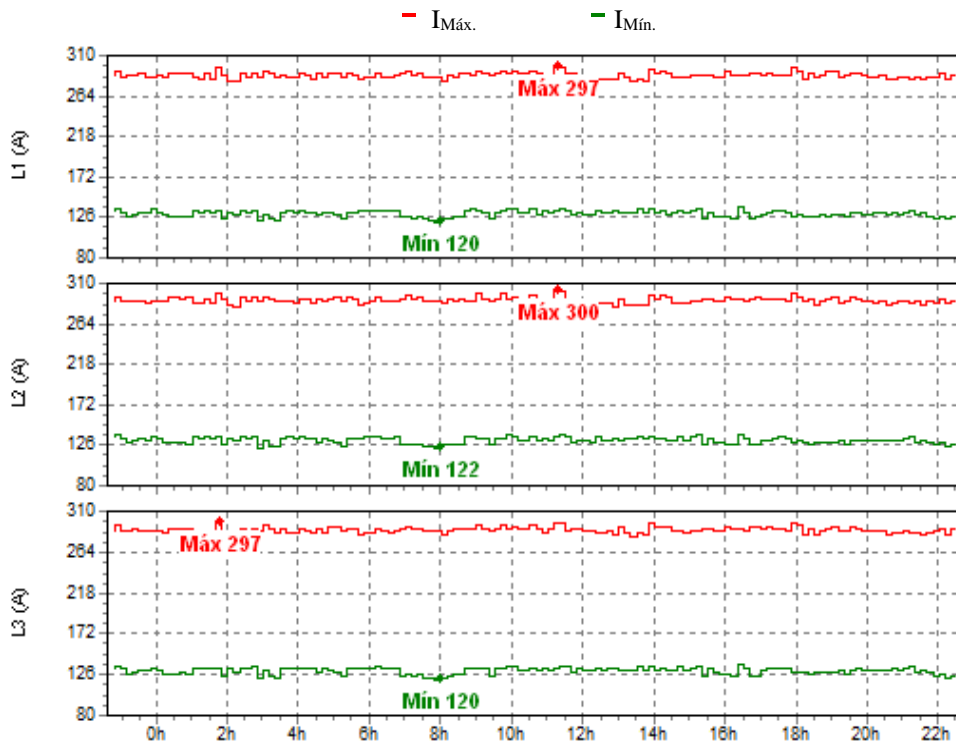


Figura 4.4. Evolução dos valores eficazes das correntes no compressor 1.

4.3.1.2 Registos de Cavas e Sobretensões

O evento da cava de tensão da Figura 4.3 encontra-se representado na Tabela 4.1. Com uma duração de 43 ms o valor de tensão registado foi de 357,1 V (80 % e os 90 %).

Tabela 4.1. Registo de cavas de tensão no compressor 1.

Tensão residual u	Duração t ms				
	$10 \leq t \leq 200$	$200 < t \leq 500$	$500 < t \leq 1000$	$1000 < t \leq 5000$	$5000 < t \leq 60000$
$90 \% > u \geq 80 \%$	1	0	0	0	0
$80 \% > u \geq 70 \%$	0	0	0	0	0
$70 \% > u \geq 40 \%$	0	0	0	0	0
$40 \% > u \geq 5 \%$	0	0	0	0	0
$5 \% > u$	0	0	0	0	0

Não se registou qualquer evento de sobretensão durante o período monitorizado

4.3.1.3 Registo da Tremulação da Tensão

O progresso do registo da tremulação da tensão no compressor 1 apresenta-se na Figura 4.5. O valor máximo registado entre as fases L_{12} foi de 0,569, de 0,551 nas fases L_{23} e 0,568 nas fases L_{31} , não apresentando valores superiores a 1 durante o período amostrado.

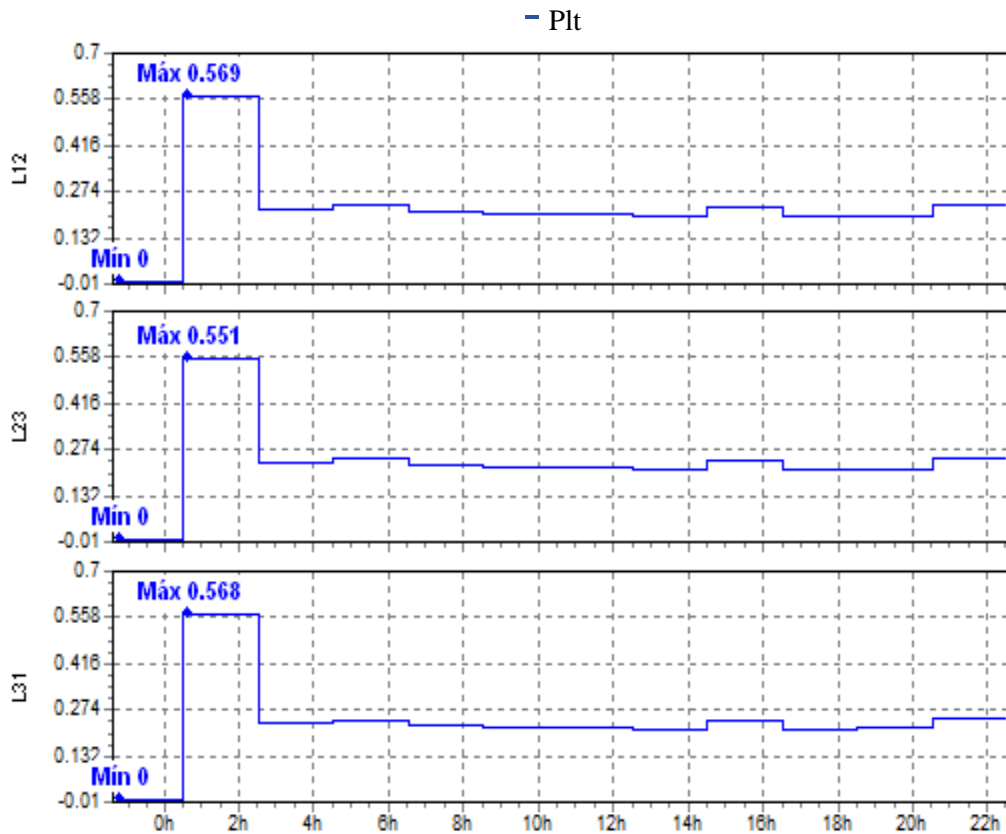


Figura 4.5. Progresso da tremulação da tensão no compressor 1.

4.3.1.4 Registo da Frequência Fundamental da Tensão

A evolução da frequência fundamental da tensão de alimentação exibe-se na Figura 4.6. A partir do registo observa-se que a frequência atingiu um valor máximo de 50,097 Hz e um valor mínimo de 49,93 Hz. Essa variação corresponde a +0,194 % e -0,154 %, em relação aos 50 Hz.

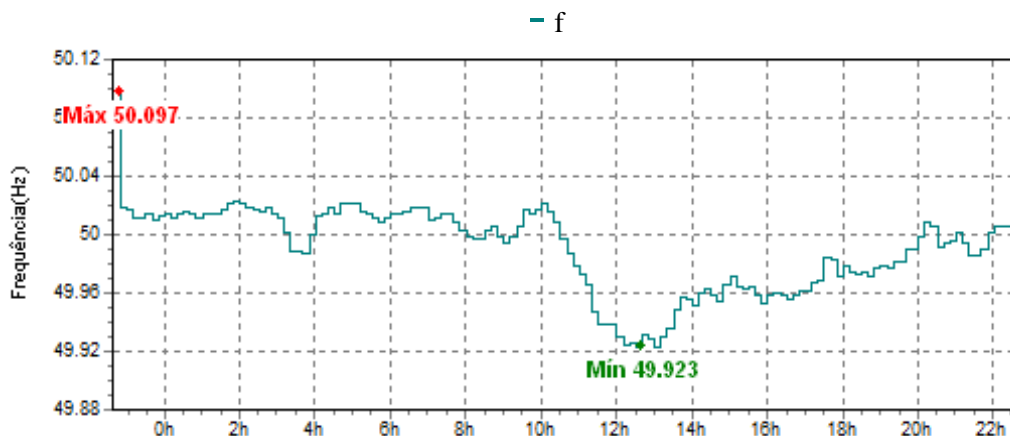


Figura 4.6. Evolução da frequência fundamental da tensão de alimentação no compressor 1.

4.3.1.5 Registo do Desequilíbrio da Tensão

A evolução temporal da avaliação do comportamento do desequilíbrio de tensão no compressor 1 é exposta na Figura 4.7, apresentando o valor máximo de 0,17 %.

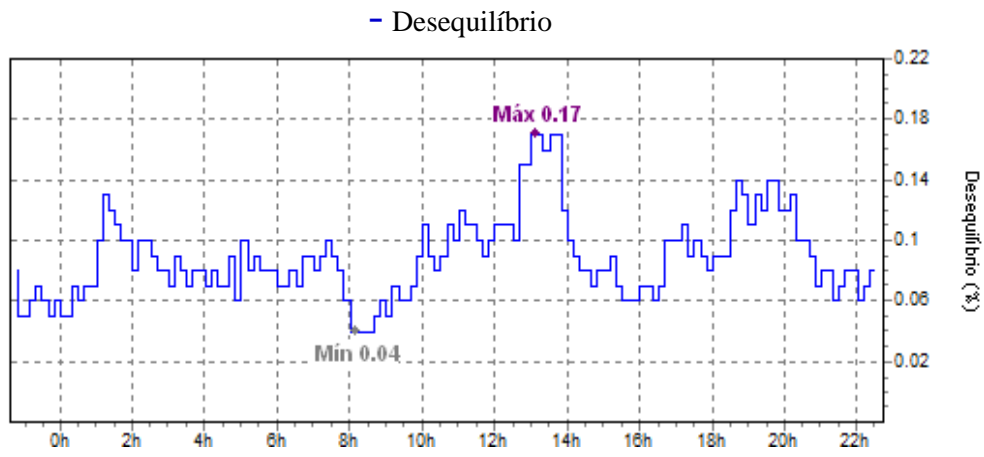


Figura 4.7. Evolução da percentagem de desequilíbrio da tensão no compressor 1.

4.3.1.6 Registo de Harmónicas e THD

A partir da Figura 4.8 observa-se a evolução da distorção harmónica total das tensões (THDv) nas fases L_{12} , L_{21} e L_{31} , no compressor 1. Os registos mostram uma evolução semelhante entre fases ao longo do dia, variando entre os 5,19 % e os 7,48 %.

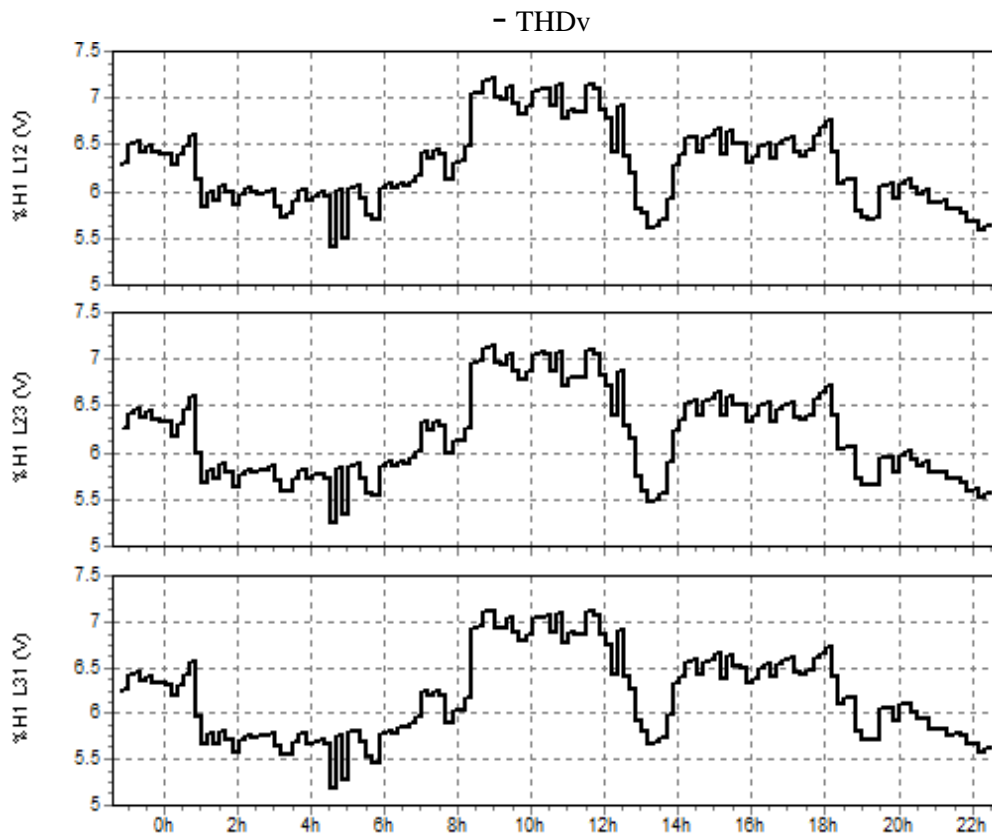


Figura 4.8. Evolução da THDv no compressor 1.

Na Figura 4.9 vê-se o espectro harmónico das tensões compostas L_{12} , L_{21} e L_{31} no compressor 1. É a 5ª harmónica que mais contribui para a THDv, apresentando o valor máximo de 6,29 % entre as fases L_{12} , 6,3 % entre as fases L_{21} e 6,24 % entre as fases L_{31} .

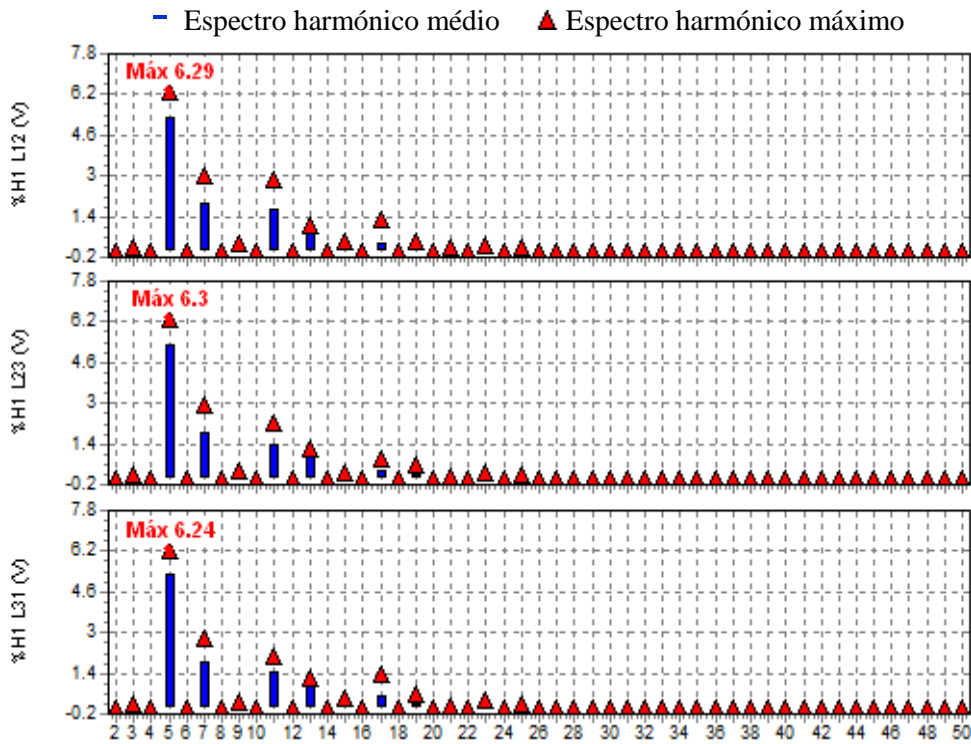


Figura 4.9. Espectro harmónico da tensão até à 50ª harmónica no compressor 1.

No modo “Harmónicas de Corrente” do analisador, monitorizou-se evolução da THDi nas fases no compressor 1, conforme apresenta a Figura 4.10. Nota-se um progresso idêntico em ambas as fases, com valores compreendidos entre 32,7 % e 41,7 %.

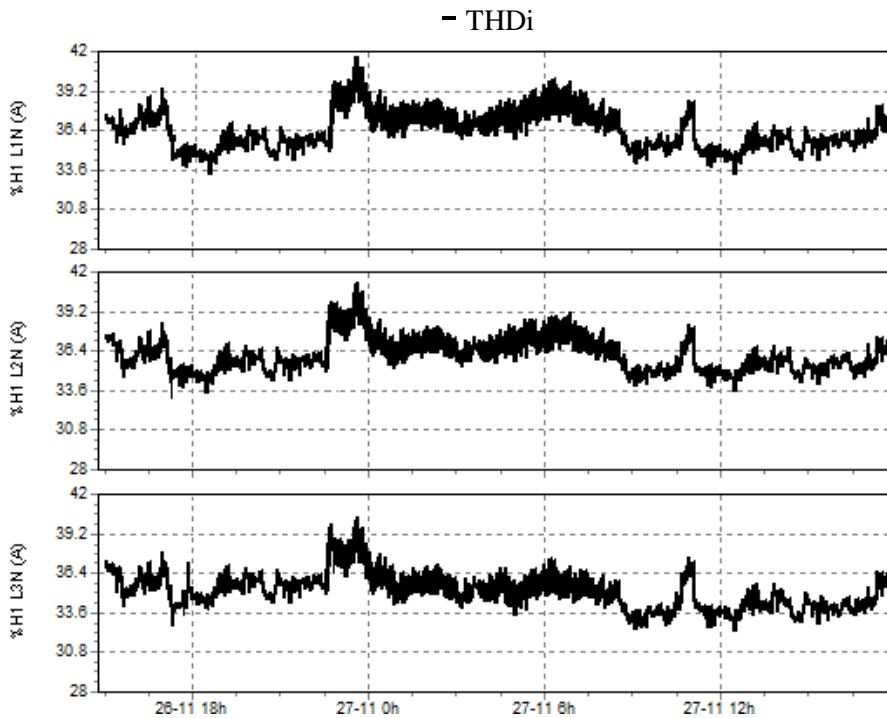


Figura 4.10. Evolução da THDi no compressor 1.

A partir do espectro hamónico da corrente da Figura 4.11, confere-se que a harmónica que mais influencia a THDi, em média, é a 5ª harmónica com um valor máximo de 38,65 % na fase L_1 , 38,22 % na fase L_2 e 37,22 % na fase L_3 .

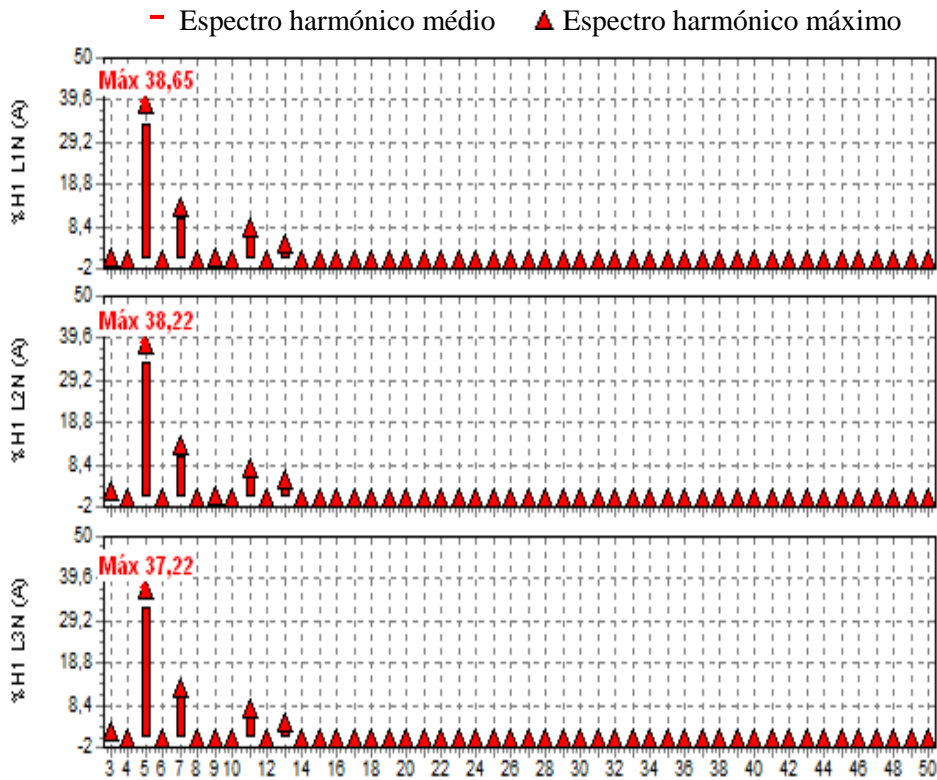


Figura 4.11. Espectro harmónico da corrente até à 50ª harmónica no compressor 1.

4.3.1.7 Registo de Potência

A Figura 4.23 exibe a evolução temporal das potências totais médias, bem como do fator de potência total médio no compressor 1. Observa-se que no início do registo o compressor encontrava-se desligado, apresentando uma oscilação inicial do $FPT_{Méd.}$, eventualmente por causa da fonte comutada do variador e durante a restante monitorização foi aproximadamente 0,9. Para a $P_{Méd.}$ o valor registado em média, foi de 140 kW, para a $Q_{Méd.}$ foi de 42 kVAr e para a $S_{Méd.}$ foi de 146 kVA.

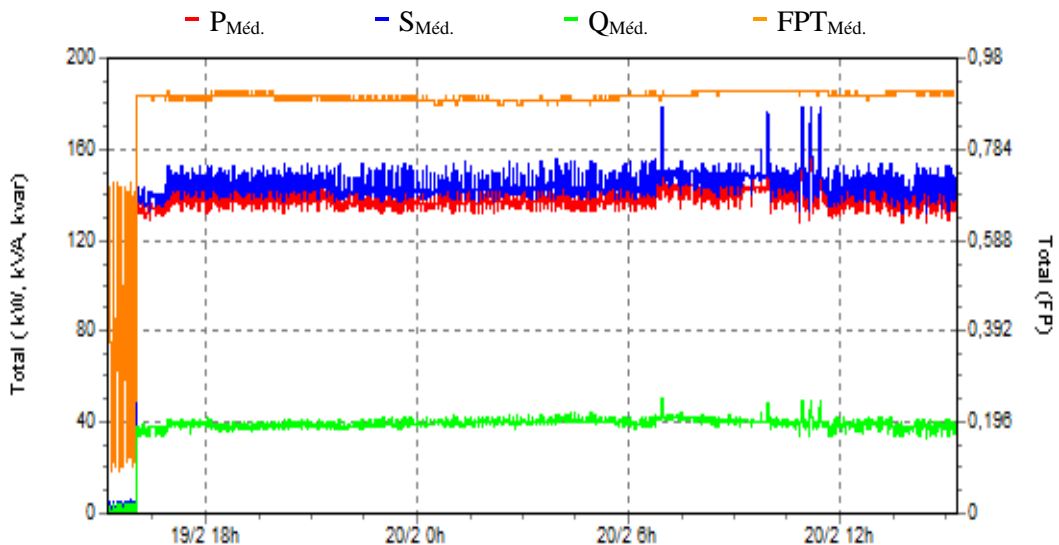


Figura 4.12. Evolução das potências médias e FPT médio no compressor 1.

4.3.2 ETAR

A indústria têxtil gera consideráveis volumes de águas residuais. É, portanto, responsável pela produção de efluentes líquidos que necessitam de tratamento antes de serem novamente reutilizados. A função da ETAR é precisamente tratar os efluentes líquidos libertados durante a produção fabril. A neutralização da lixívia cáustica e da soda, que estão na origem da alcalinidade, é obtida pela ação do CO_2 , derivado dos gases de fumo gerados nas caldeiras. Enquanto o pH dos efluentes líquidos for superior a 9,6, estes circulam em circuito fechado num reator misturando-os com os gases dos fumos. Quando o pH atinge valores inferiores a 9,5, os efluentes são libertados para o coletor que os recolhe e envia para a uma empresa de tratamento de águas residuais.

Os equipamentos de maior consumo da ETAR são os de força motriz. Possui dois motores de 75 kW para os compressores de fumos, que podem trabalhar em simultâneo ou independentes, conforme o nível do tanque e do valor do pH. Tem ainda um motor de 18,5 kW que bombeia os efluentes líquidos, sempre que existe nível suficiente no tanque. As formas das ondas da tensão e da corrente numa das fases a um determinado momento, são exibidas na Figura 4.13.

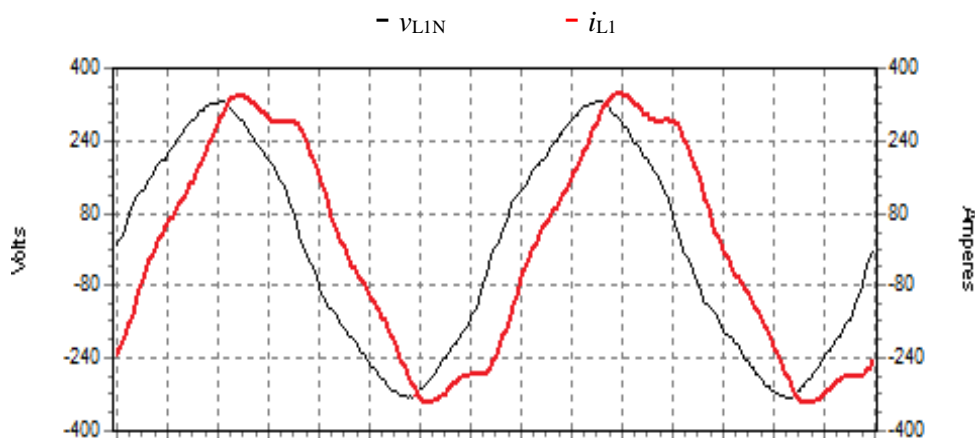


Figura 4.13. Formas das ondas da tensão e da corrente na ETAR.

4.3.2.1 Registos de Tensão e Corrente

A Figura 4.14 exhibe a evolução temporal dos valores eficazes das tensões simples L_{1N} , L_{2N} e L_{3N} , capturados na ETAR. Notam-se algumas descidas dos valores mínimos atingidos nas tensões das fases, ocorrendo dois eventos de cavas de tensão, durante essas descidas do valor da tensão. O valor máximo registado foi de 226,18 V na fase L_{1N} e o valor mínimo foi de 202,83 na fase L_{3N} .

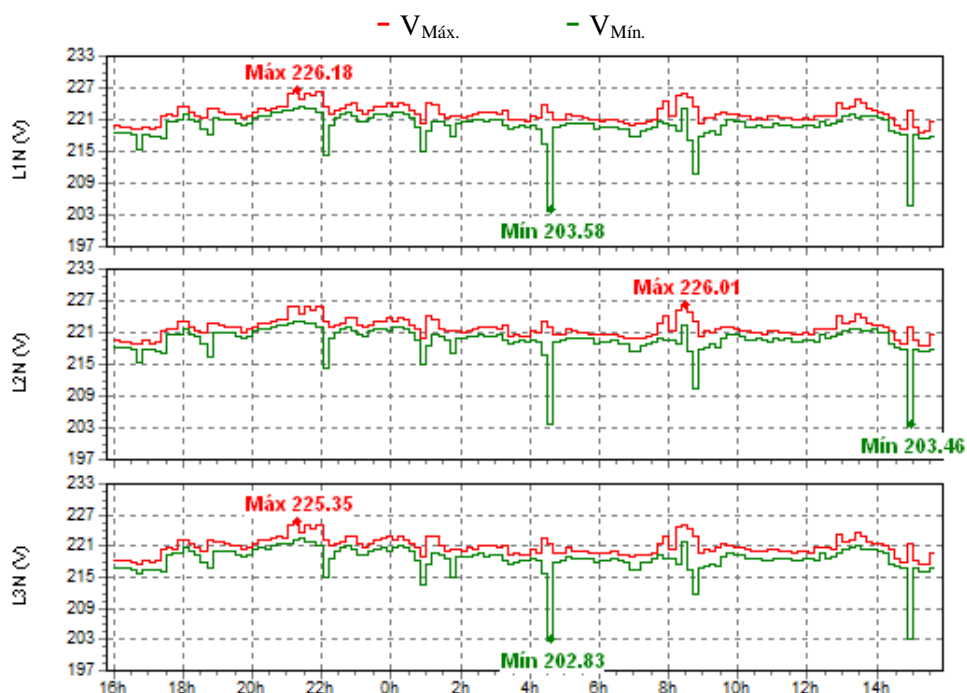


Figura 4.14. Progresso das tensões eficazes na ETAR.

Na Figura 4.15 apresentam-se os valores eficazes das correntes L_1 , L_2 , L_3 e N , registados na ETAR. Observam-se alguns valores superiores 1000 A nas três fases, provocados pelo arranque estrela-triângulo dos motores dos compressores, explicando também as descidas do valor mínimo da tensão nas fases da Figura 4.14. No condutor neutro o valor máximo registado foi de 7 A.

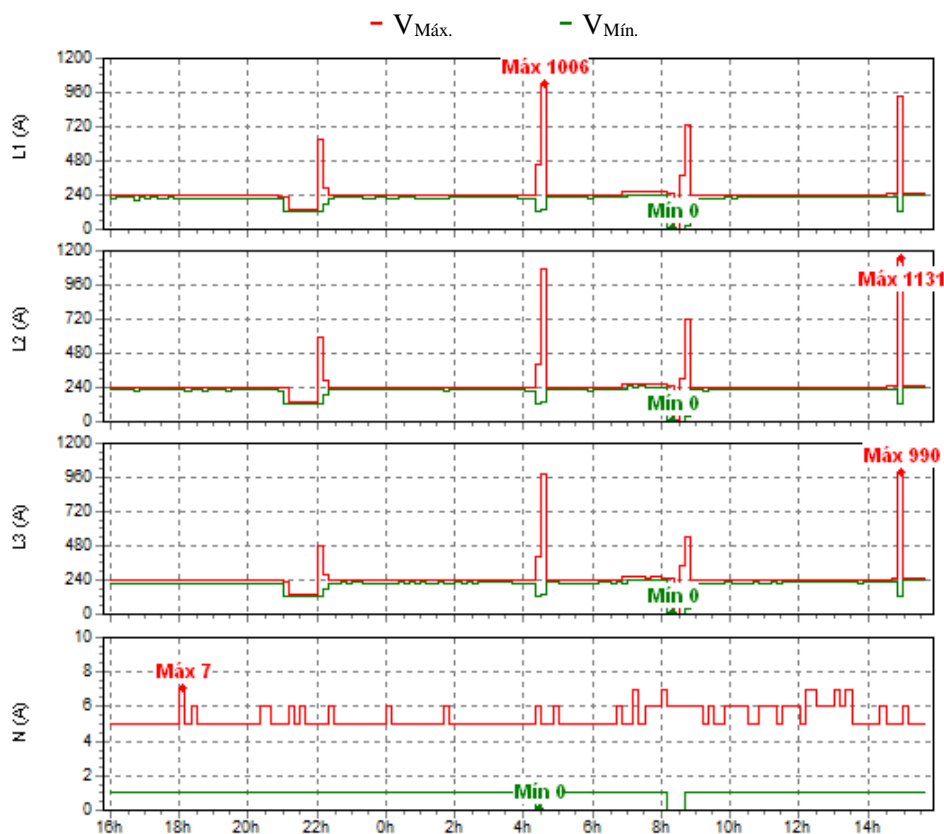


Figura 4.15. Evolução dos valores eficazes das correntes na ETAR.

4.3.2.2 Registos de Cavas e Sobretensões

Conforme visto anteriormente na Figura 4.14, registaram-se duas cavas de tensão. A duração e percentagem das cavas de tensão observam-se na Tabela 4.2. Com uma duração de 666 ms o valor de tensão registado foi de 202,8 V na fase L_{2N} , e com uma duração de 1 s e 90 ms o valor registado foi de 203,2 V na fase L_{3N} .

Tabela 4.2. Registo de cavas de tensão na ETAR.

Tensão residual u	Duração t (ms)				
	$10 \leq t \leq 200$	$200 < t \leq 500$	$500 < t \leq 1000$	$1000 < t \leq 5000$	$5000 < t \leq 60000$
$90 \% > u \geq 80 \%$	0	0	1	1	0
$80 \% > u \geq 70 \%$	0	0	0	0	0
$70 \% > u \geq 40 \%$	0	0	0	0	0
$40 \% > u \geq 5 \%$	0	0	0	0	0
$5 \% > u$	0	0	0	0	0

Mais uma vez, durante a amostragem, não se registou qualquer evento de sobretensão.

4.3.2.3 Registo da Tremulação da Tensão

O progresso da tremulação da tensão na ETAR apresenta-se na Figura 4.16. Não existiram registos de eventos com valores superiores a 1 nas três fases, sendo o máximo registado nas fases L_{12} e L_{23} de 0,212 e 0,205 na fase L_{31} .

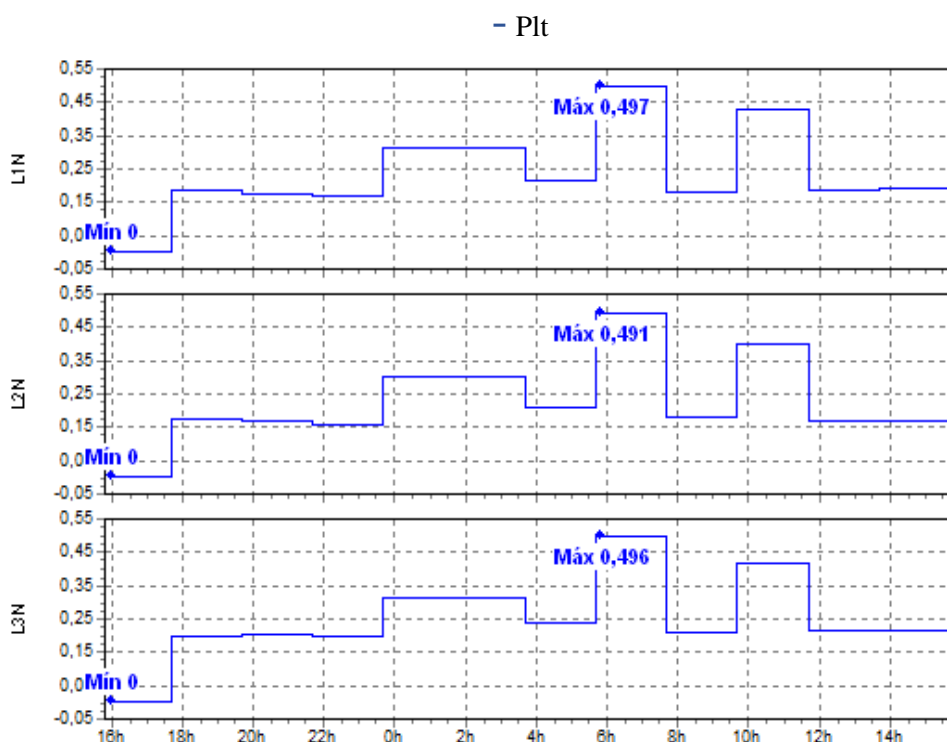


Figura 4.16. Progresso da tremulação da tensão na ETAR.

4.3.2.4 Registo da Frequência Fundamental da Tensão

A evolução da frequência fundamental da tensão de alimentação exibe-se na Figura 4.17. Observa-se que a frequência atingiu um valor máximo de 50,063 Hz correspondendo a uma variação de +0,126 % e um valor mínimo de 49,973 Hz correspondendo a um desvio - 0,054 %, relativamente aos 50 Hz.

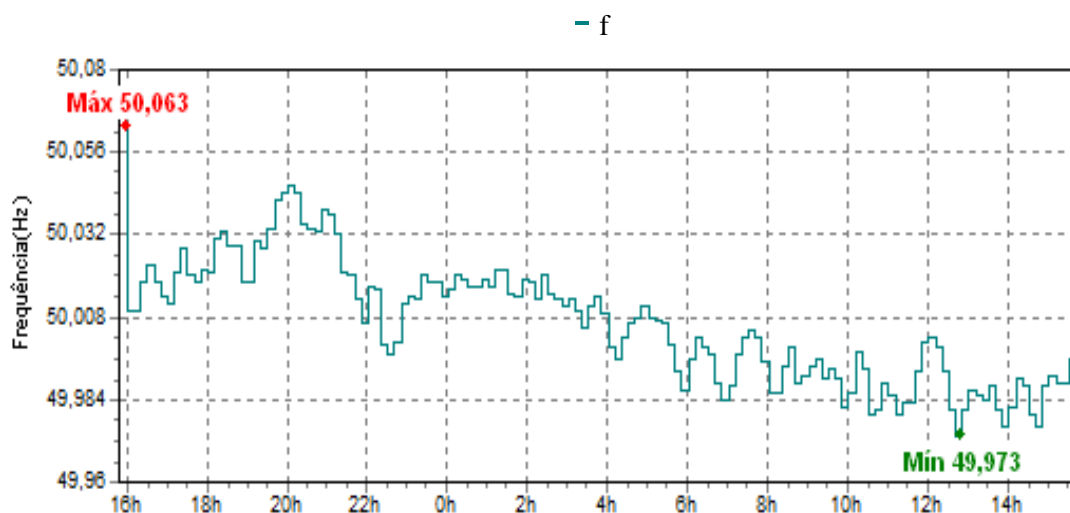


Figura 4.17. Evolução da frequência fundamental da tensão de alimentação na ETAR.

4.3.2.5 Registo do Desequilíbrio da Tensão

Na Figura 4.18 exibe-se o progresso da avaliação do comportamento do desequilíbrio de tensão, apresentando o valor máximo foi de 0,2.

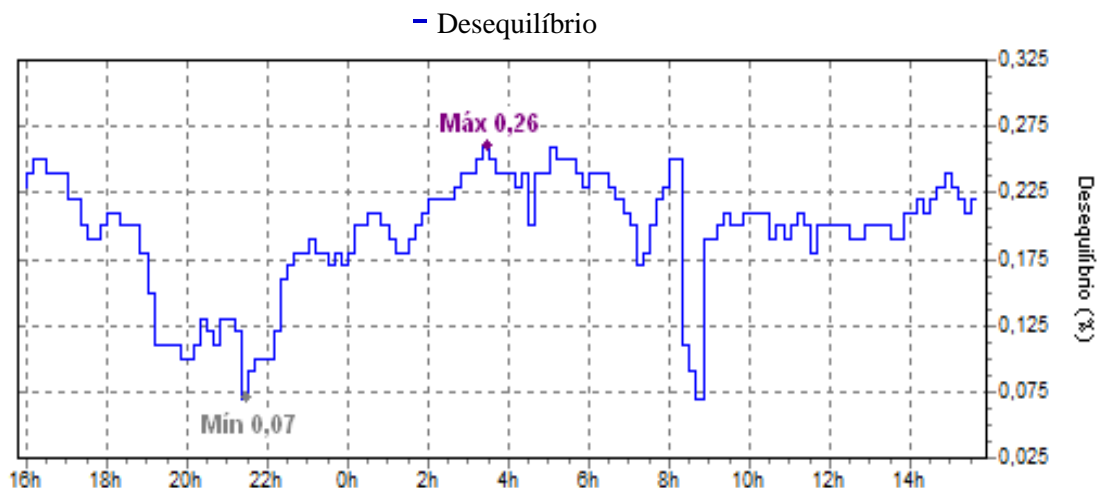


Figura 4.18. Evolução da percentagem de desequilíbrio da tensão na ETAR.

4.3.2.6 Registo de Harmónicas e THD

A partir da Figura 4.19 observa-se a evolução da THDv nas fases L_{1N} , L_{2N} e L_{3N} . A THDv foi sempre inferior a 6 % nas três fases ao longo do tempo monitorizado.

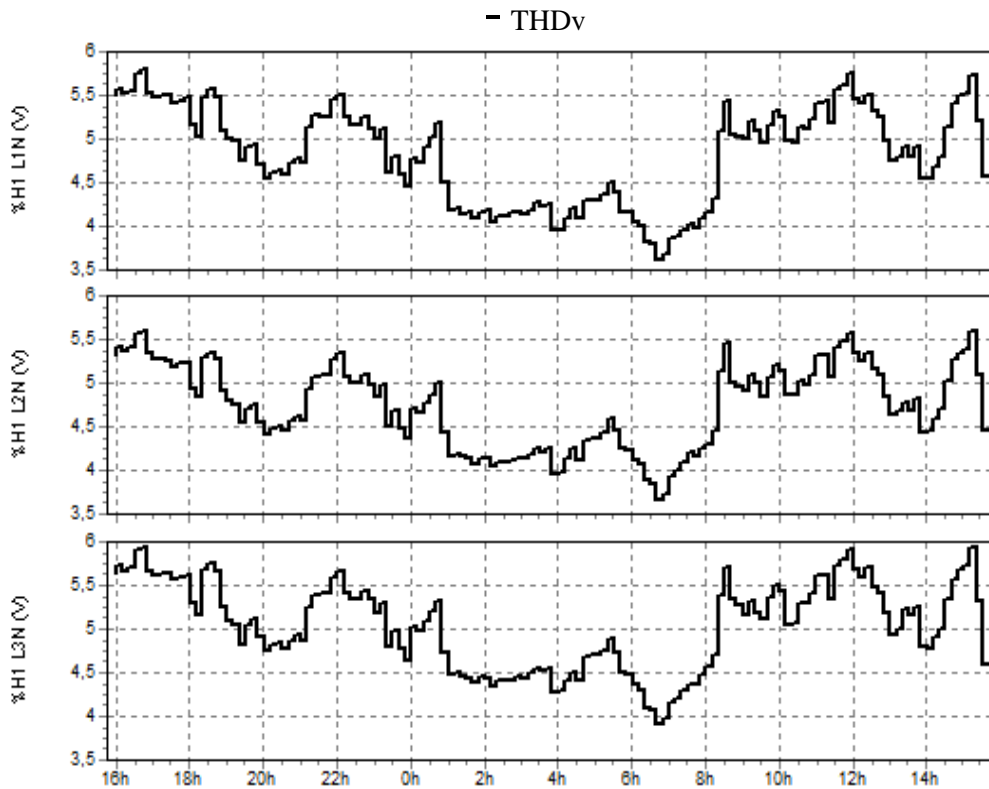


Figura 4.19. Evolução da THDv na ETAR.

Através da análise do espectro harmónico da Figura 4.20 verifica-se que as harmónicas que mais contribuem, em média, para a THDv são as de 5ª e de 7ª ordem. Já a harmónica que mais contribui para a THDv é a 5ª harmónica, apresentando valores máximos de 5,06 % para a fase L_{1N} , 4,96 % para a fase L_{2N} e 5,16 % para a fase L_{3N} .

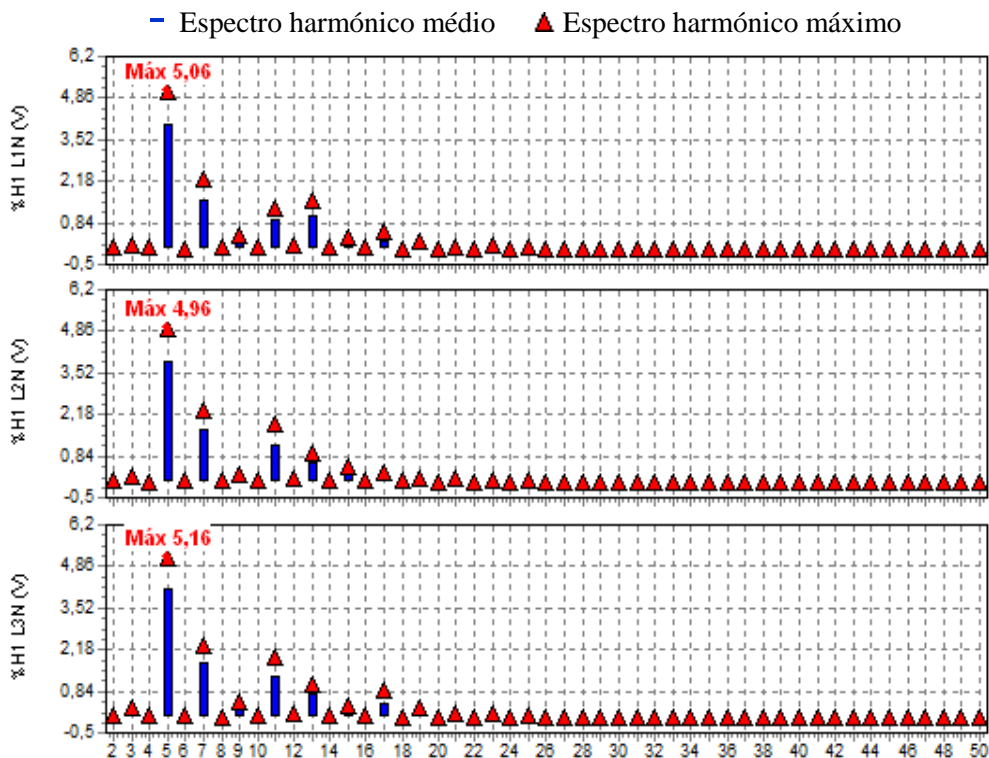


Figura 4.20. Espectro harmónico da tensão até à 50ª harmónica na ETAR.

No modo “Harmónicas de Corrente” do analisador de energia, monitorizou-se evolução do THDi nas fases da ETAR durante um dia, conforme se apresenta na Figura 4.21. Os valores registados estão compreendidos entre os 6 % e os 10 %.

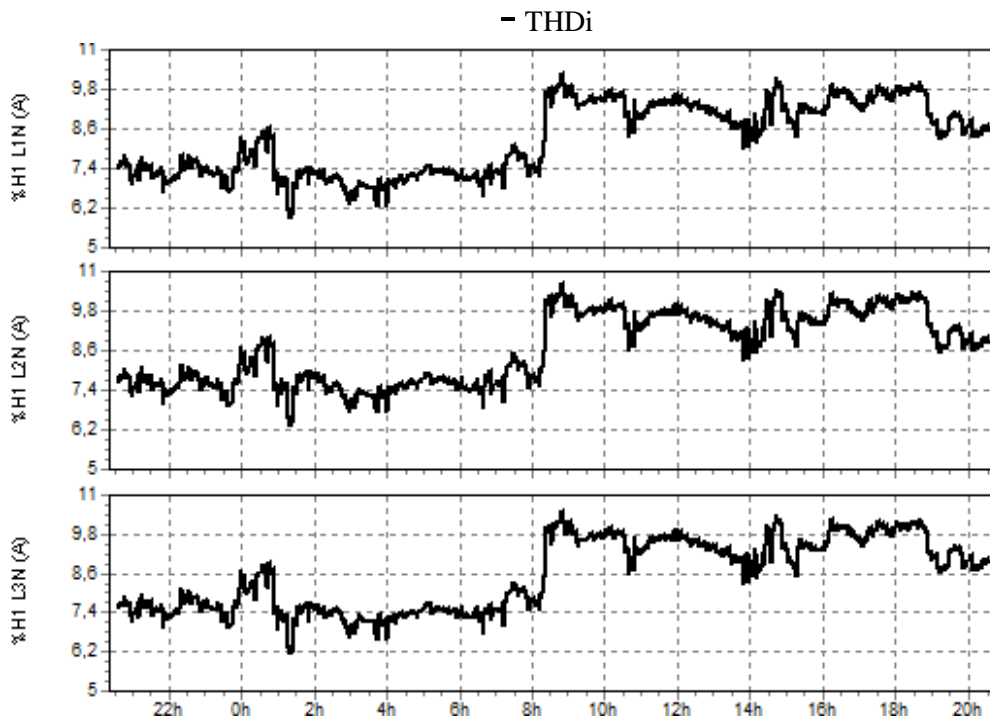


Figura 4.21. Evolução da THDi na ETAR.

A partir do espectro hamónico da corrente da Figura 4.22, confere-se que a harmónica que mais influencia a THDi, em média, é a 5ª harmónica com um valor máximo de 10,08 % na fase L_{1N} , 10,46 % na fase L_{2N} e 10,3 % na fase L_{3N} .

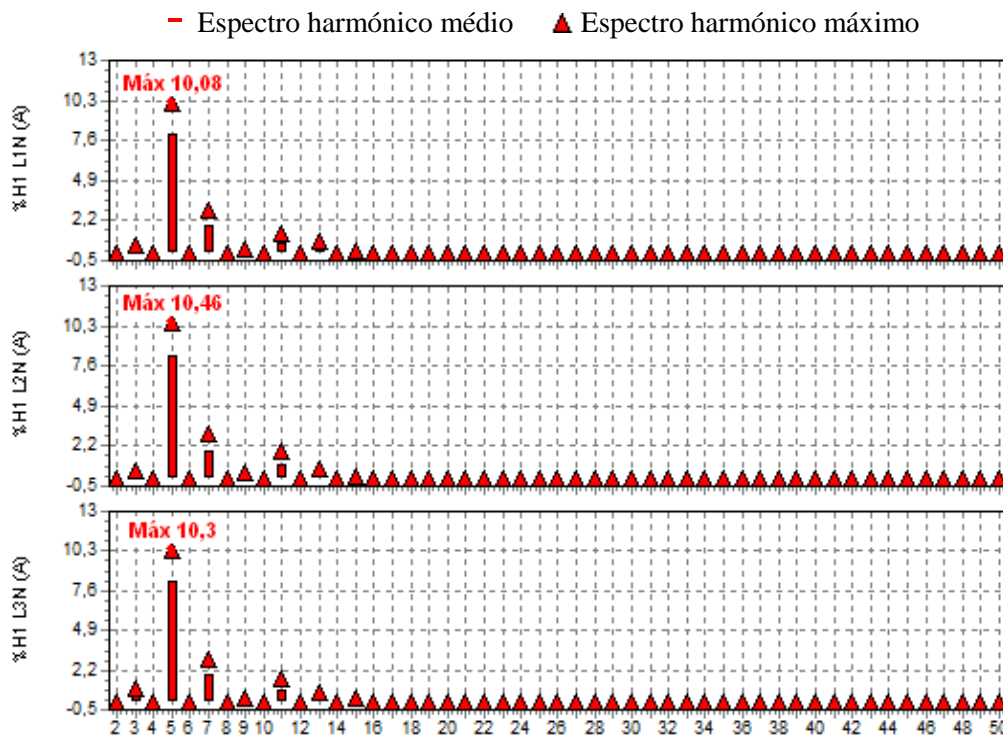


Figura 4.22. Espectro harmónico da corrente até à 50ª harmónica na ETAR.

4.3.2.7 Registo de Potência

A Figura 4.23 mostra a evolução temporal das potências totais médias, bem como do fator de potência total médio na ETAR. Observa-se que durante a maior parte do tempo monitorizado, trabalharam simultaneamente os dois motores de 75 kW, o que indica que o pH dos efluentes esteve na maioria do tempo com valores superiores a 9,5. O $FPT_{Méd.}$ alcançou valores médios próximos de 0,81. A $P_{Méd.}$ registou em média 127 kW, a $Q_{Méd.}$ foi em média 91 kVAr e a $S_{Méd.}$ registada foi em média 156 kVA, ao longo do tempo amostrado.

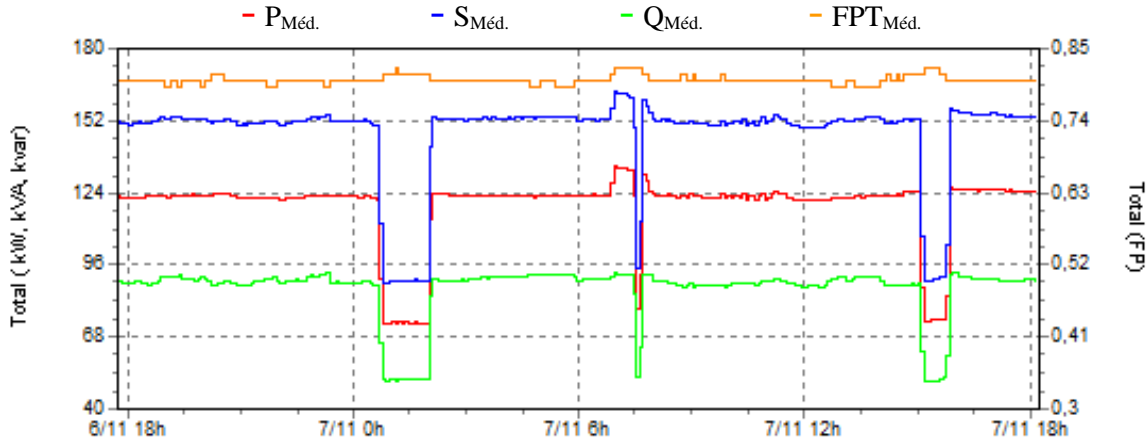


Figura 4.23. Evolução das potências médias e do FFP médio na ETAR.

4.3.3 Râmola 1

A râmola 1 pode ser utilizada para secar, dar estabilidade, termofixar, endireitar tramas e dar diferentes acabamentos químicos ao tecido. A râmola utiliza na sua grande maioria motores elétricos que efetuam o transporte do tecido ao longo da máquina, bem como realizam a ventilação na estufa de forma a uniformizar a temperatura da mesma. É assim constituída por os 86 motores elétricos, totalizando 377 kW de potência instalada. Tanto para o transporte de tecido como para a ventilação utilizam-se variadores eletrónicos de velocidade para o controlo de velocidade dos motores. Na Figura 4.24 exibem-se as formas das ondas da tensão e da corrente a um determinado instante.

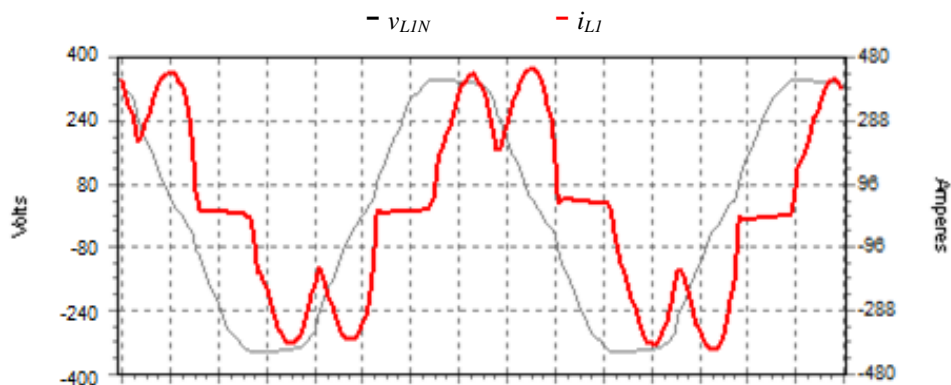


Figura 4.24. Formas das ondas da tensão e da corrente na râmola 1.

4.3.3.1 Registos de Tensão e Corrente

A Figura 4.25 mostra a evolução temporal dos valores eficazes das tensões compostas L_{12} , L_{23} e L_{31} , que foram registados na râmola 1. Durante o período monitorizado não se registou qualquer evento anormal relevante, tendo-se registado uma variação da tensão entre os 377 V e os 395 V.

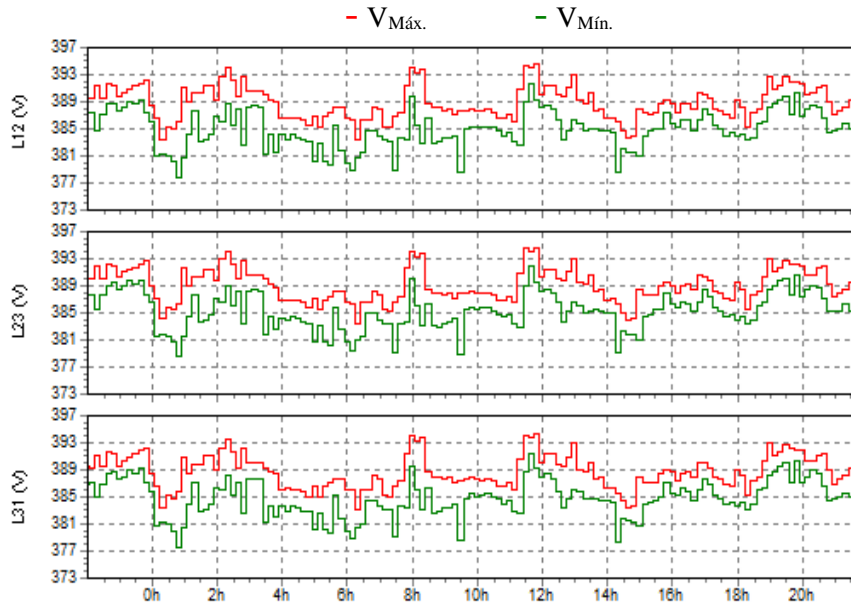


Figura 4.25. Evolução dos valores eficazes das tensões compostas na râmola 1.

Na Figura 4.26 apresentam-se os registos dos valores eficazes das correntes L_1 , L_2 e L_3 na râmola 1, onde se verifica uma distribuição aproximadamente equilibrada das cargas pelas três fases. Observam-se algumas oscilações entre os valores máximos e mínimos, causadas por alterações de processo e *setup*, obrigando a desligar o quadro geral da máquina. A corrente máxima registada foi de 339 A na fase L_1 , 325 A na fase L_2 e 328 A na fase L_3 .

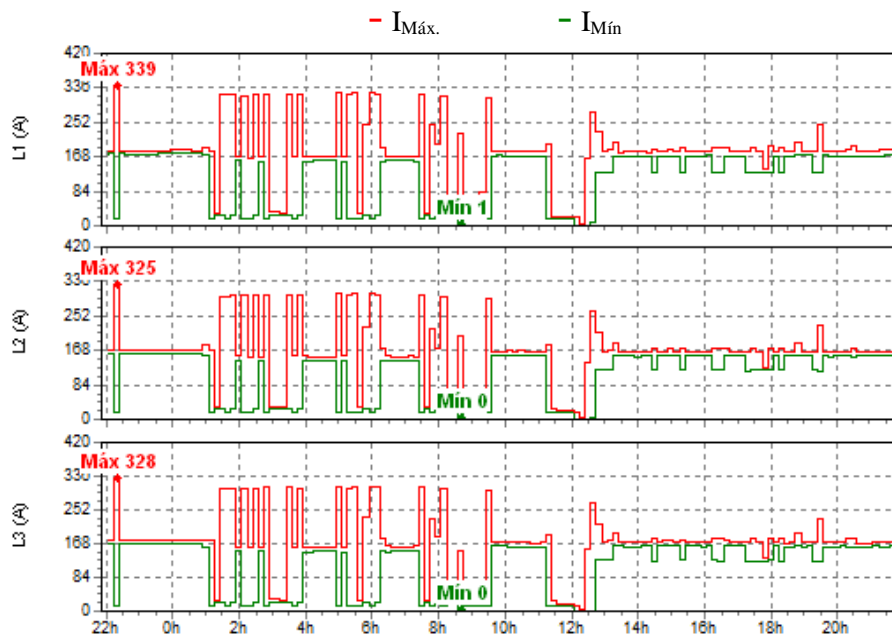


Figura 4.26. Evolução dos valores eficazes das correntes na râmola 1.

4.3.3.2 Registos de Cavas e Sobreensões

Durante o dia monitorizado não se registaram quaisquer eventos de cavas de tensão nem de sobreensões.

4.3.3.3 Registo da Tremulação da Tensão

A evolução temporal do registo da tremulação da tensão na râmola das malhas apresenta-se na Figura 4.27. Não existiram registos de eventos com valores superiores a 1 nas três fases, sendo o máximo registado entre as fases L_{12} de 0,184, entre as fases L_{23} de 0,19 e 0,186 entre as fase L_{31} .

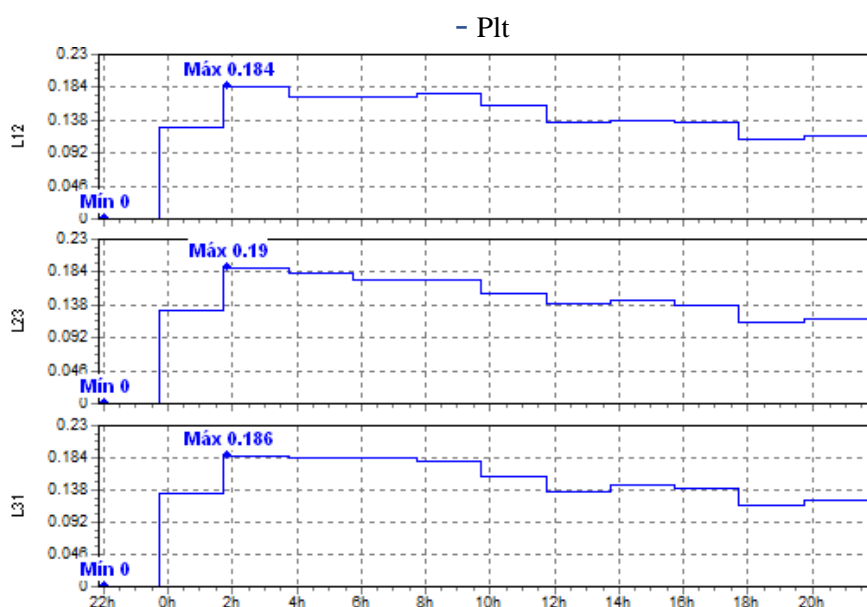


Figura 4.27. Progresso da tremulação da tensão na râmola 1.

4.3.3.4 Registo da Frequência Fundamental da Tensão

A evolução temporal da frequência fundamental da tensão de alimentação exibe-se na Figura 4.28, onde se verifica que a frequência atingiu um valor máximo de 50,059 Hz e um valor mínimo de 49,938 Hz, representando um desvio de +0,118 % e -0,124 % em relação aos 50 Hz.

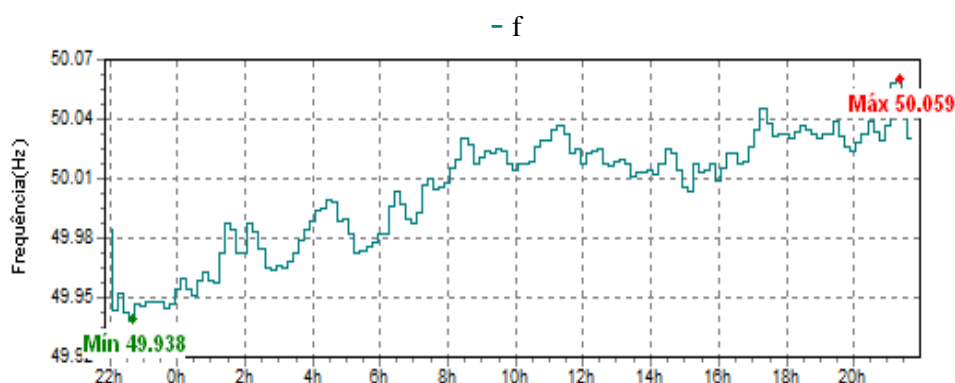


Figura 4.28. Evolução da frequência fundamental da tensão de alimentação na râmola 1.

4.3.3.5 Registo do Desequilíbrio da Tensão

A avaliação do comportamento do desequilíbrio de tensão na râmola das malhas apresenta-se na Figura 4.29. Observa-se um fator de desequilíbrio de tensão variando na entre 0,02 % e 0,14 %, estando assim em conformidade com as normas.

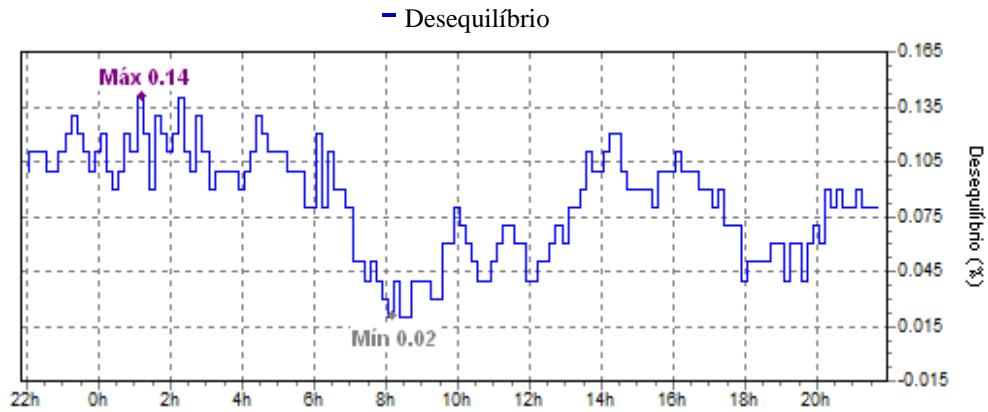


Figura 4.29. Evolução da percentagem de desequilíbrio da tensão na râmola 1.

4.3.3.6 Registo de Harmónicas e THD

A Figura 4.30 mostra a evolução da THDv na râmola 1. Os registos indicam uma evolução análoga entre fases ao longo do dia, apresentando uma redução dos valores da THDv, coincidente com as diminuições de corrente da Figura 4.26, variando entre os 3,97 % e os 6,85 %.

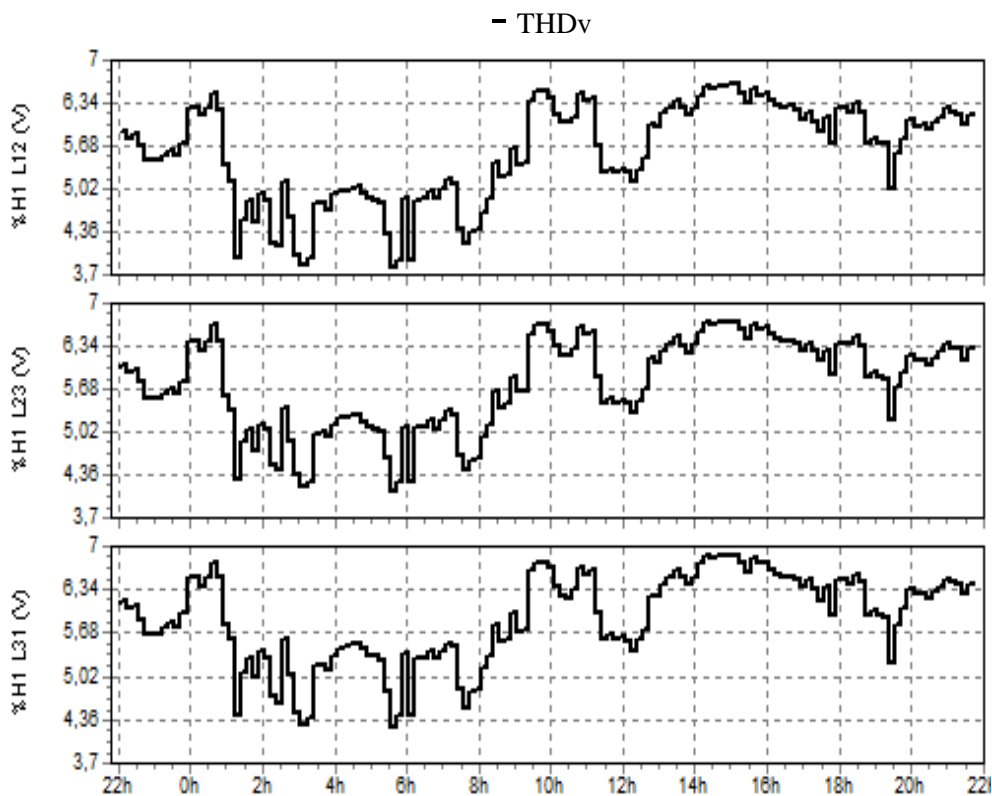


Figura 4.30. Evolução da THDi na râmola 1.

A partir do espectro harmónico da Figura 4.31 verifica-se que a harmónica que mais contribui, em média, para a THDv na râmola 1 é a de 5ª ordem. Os valores máximos são de 5,82 % entre as fases L_{12} , 5,96 % entre as fases L_{21} e 6 % entre as fases L_{31} .

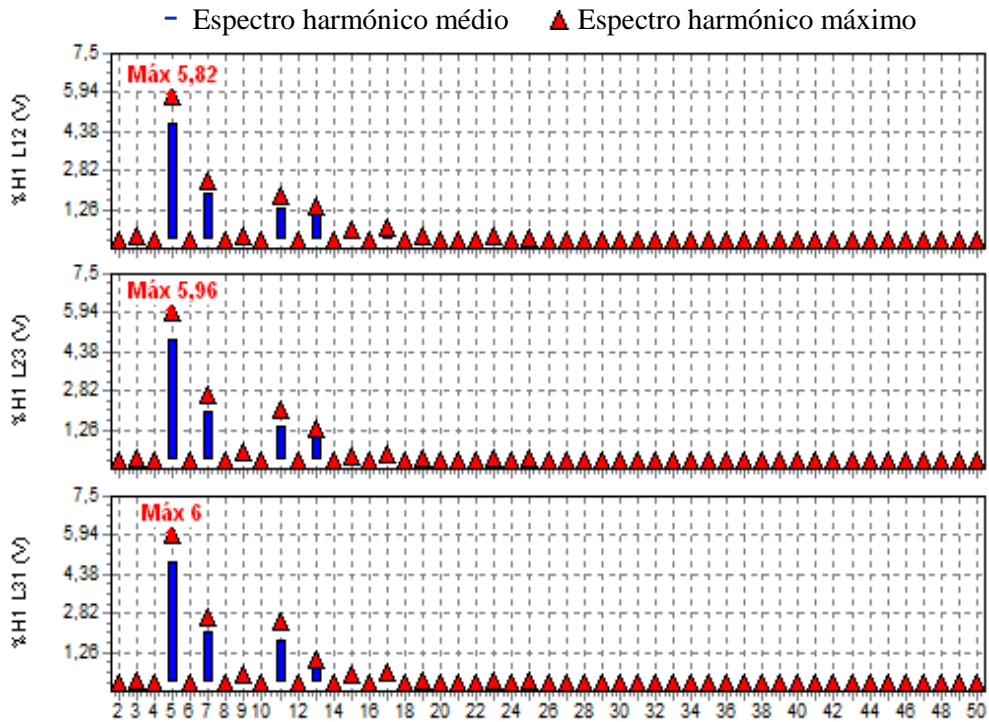


Figura 4.31. Espectro harmónico da tensão até à 50ª harmónica na râmola 1.

Já no modo “Harmónicas de Corrente” do analisador de energia, monitorizou-se evolução do THDi nas fases da râmola 1, conforme mostra Figura 4.32. Durante o período analisado a THDi oscilou entre os 28 % e os 48 %.

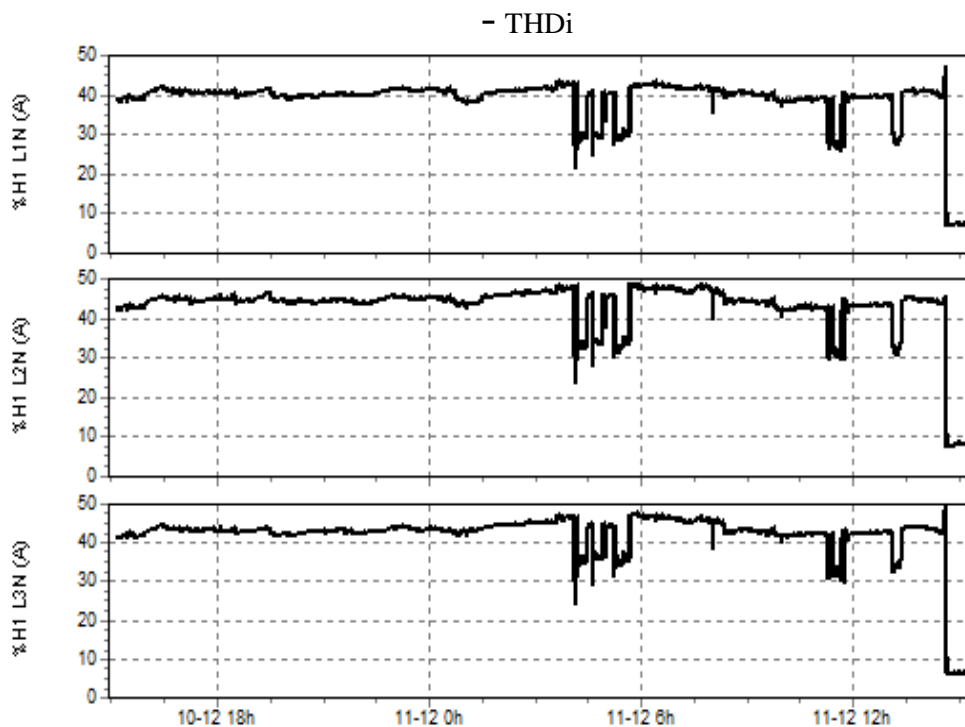


Figura 4.32. Evolução da THDv na râmola 1.

O espectro harmónico da Figura 4.33 mostra que a harmónica que mais contribui, em média, para a THDi na râmola 1 é a de 5ª ordem. Os valores máximos são de 50,05 % para a fase L_{1N} , 44,6 % para a fase L_{2N} e 53,58 % para a fase L_{3N} .

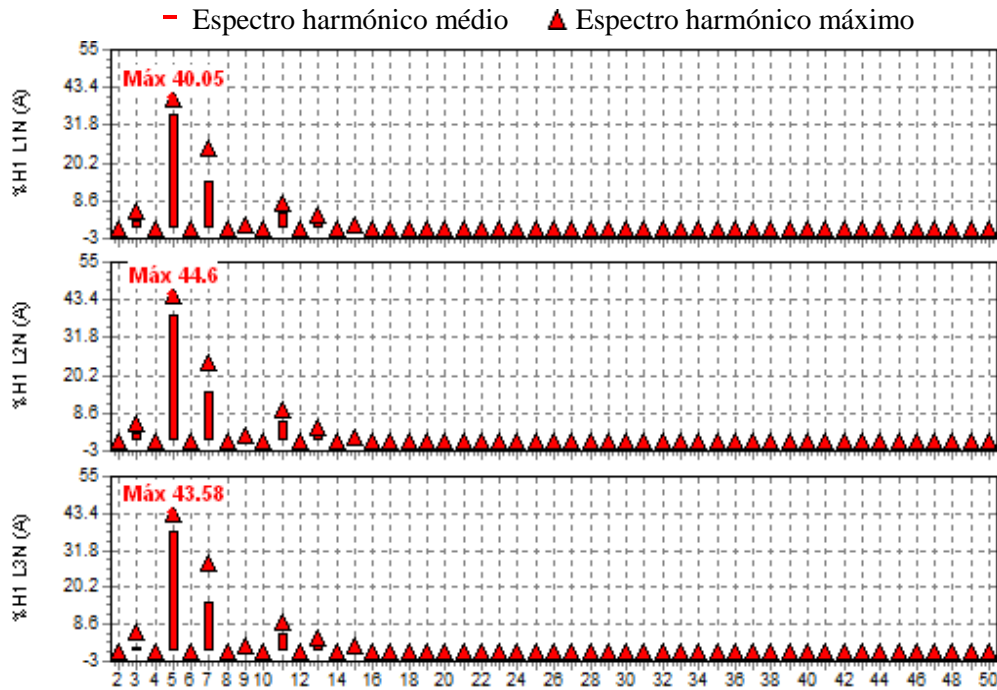


Figura 4.33. Espectro harmónico da corrente até à 50ª harmónica na râmola 1.

4.3.3.7 Registo de Potência

A partir da Figura 4.34 observa-se a evolução das potências totais médias e do fator de potência total médio na râmola 1. Verificam-se os instantes entre os regimes de produção e *setup* da râmola através das oscilações das potências. Observam-se ainda as alterações dos processos e parâmetros produtivos, como por exemplo a velocidade do transporte do tecido e a velocidade dos ventiladores, através dos diferentes valores médios das potências, sendo que o valor máximo da $P_{Méd.}$ foi de 96,9 kW, o da $Q_{Méd.}$ foi de 55,6 kVAr e o da $S_{Méd.}$ foi de 112 VA.

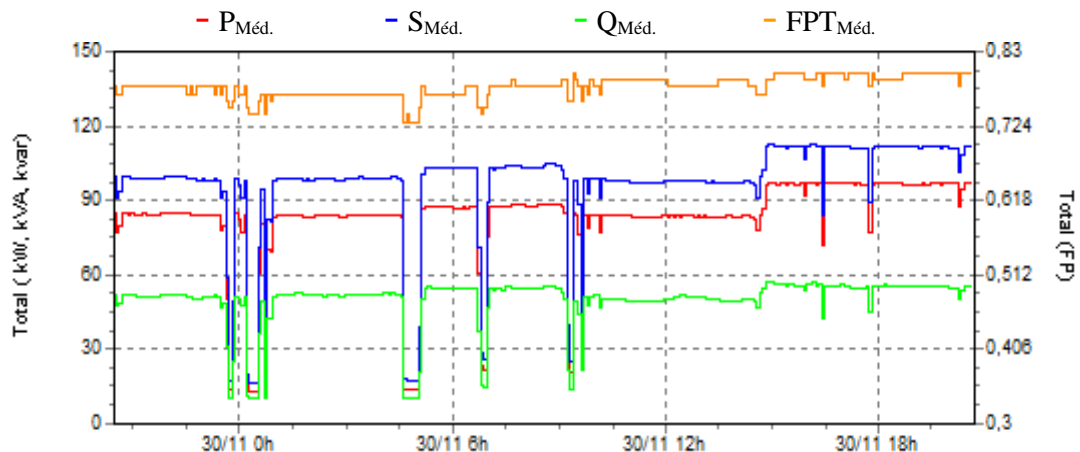


Figura 4.34. Evolução das potências médias e do FPT médio na râmola 1.

4.3.4 Râmola 6

A râmola 6, tal como a râmola 1, utiliza na sua grande maioria motores elétricos que efetuam o transporte do tecido ao longo da máquina, bem como realizam o trabalho de ventilação na estufa de forma a uniformizar a temperatura da mesma. É composta por 82 motores e dispõe de uma potência total instalada de 333kW. Assim como a râmola 1, tanto para o transporte de tecido como para a ventilação utilizam-se variadores eletrónicos de velocidade para o controlo de velocidade de cada motor. As formas das ondas da tensão e da corrente num determinado instante na râmola 6, exibem-se na Figura 4.35.

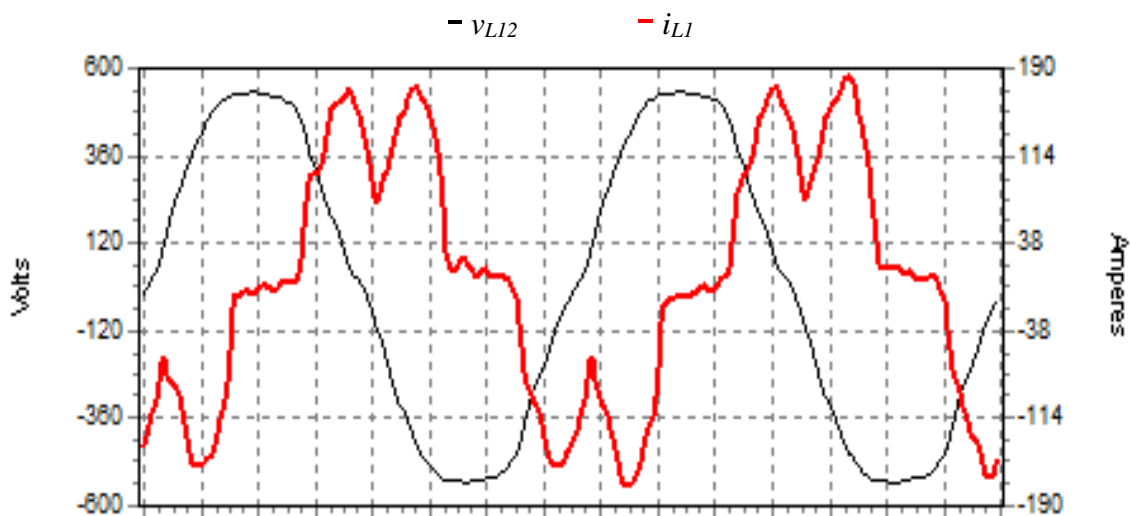


Figura 4.35. Forma das ondas da tensão e corrente na râmola 6.

4.3.4.1 Registos de Tensão e Corrente

A Figura 4.36 mostra a evolução temporal dos registos de meio ciclo, dos valores máximos e mínimos das tensões eficazes L_{12} , L_{23} e L_{32} , na râmola 6. Existe uma variação da tensão das fases L_{12} entre os 377,98 V e os 394,9 V, para as fases L_{23} entre os 378,2 e os 394,84 e por fim entre as fases L_{31} , uma variação os 377,96 V e os 394,9 V.

Na Figura 4.37 apresentam-se os registos dos valores máximos e mínimos das correntes eficazes de meio ciclo L_1 , L_2 e L_3 , na râmola 6. Verifica-se uma evolução aproximadamente constante entre os valores máximos e mínimos, havendo um aumento repentino das correntes por volta das 23h30, voltando a descer pelas 5h30. Este aumento de corrente, aconteceu devido alteração do *setpoint* da velocidade dos ventiladores, passando dos 80 % para os 100 %, e novamente dos 100 % para os 80 %. Com este aumento de 20 % no *setpoint* da velocidade, o valor da corrente aumentou cerca de 35 %, mostrando aqui a não linearidade deste tipo de cargas (ventiladores).

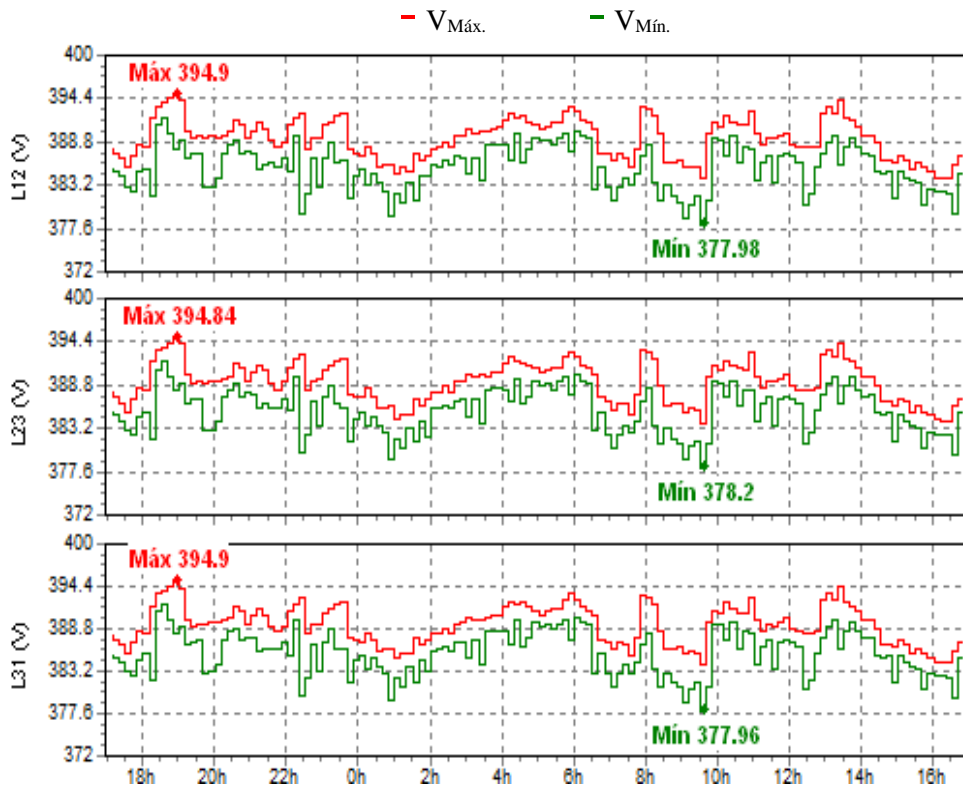


Figura 4.36. Progresso dos valores eficazes das tensões na râmola 6.

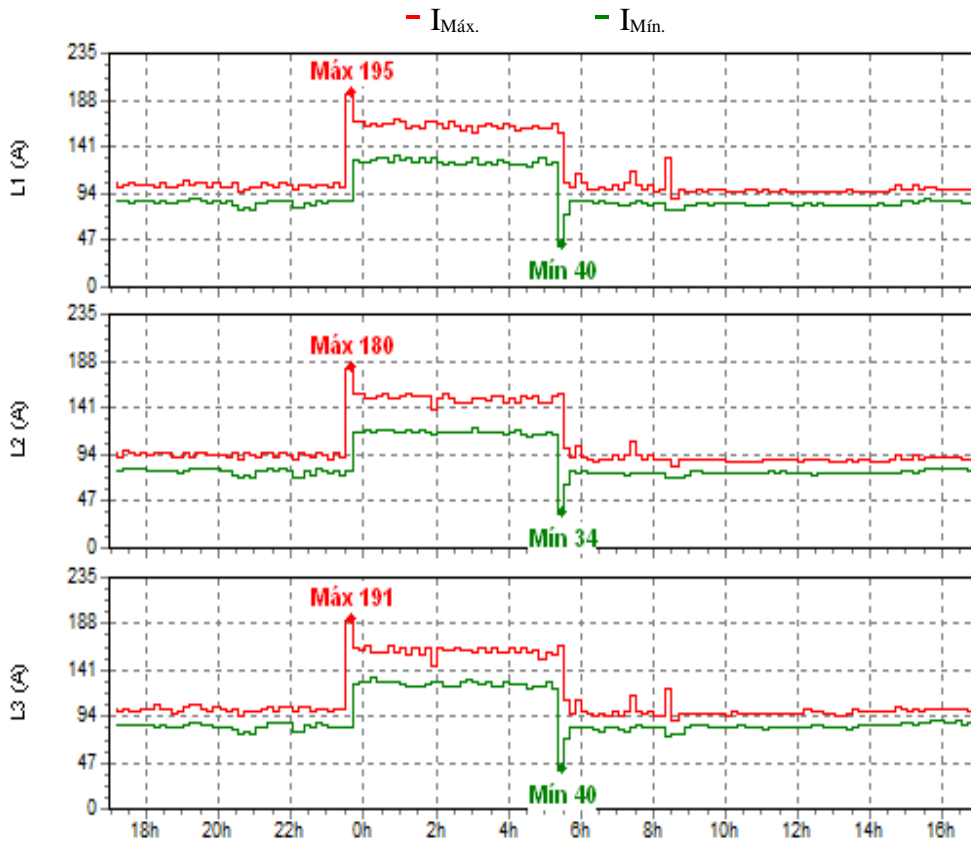


Figura 4.37. Evolução dos valores eficazes das correntes na râmola 6.

4.3.4.2 Registos de Cavas e Sobretensões

Durante o dia monitorizado não se registaram eventos de cavas nem de sobretensões.

4.3.4.3 Registo da Tremulação da Tensão

A evolução temporal do registo da tremulação da tensão na râmola 6, exhibe-se na Figura 4.38. Não se registaram eventos com valores superiores a 1 nas três fases, sendo o máximo registado entre as fases L_{23} e L_{31} de 0,21 e 0,221 entre as fases L_{21} .

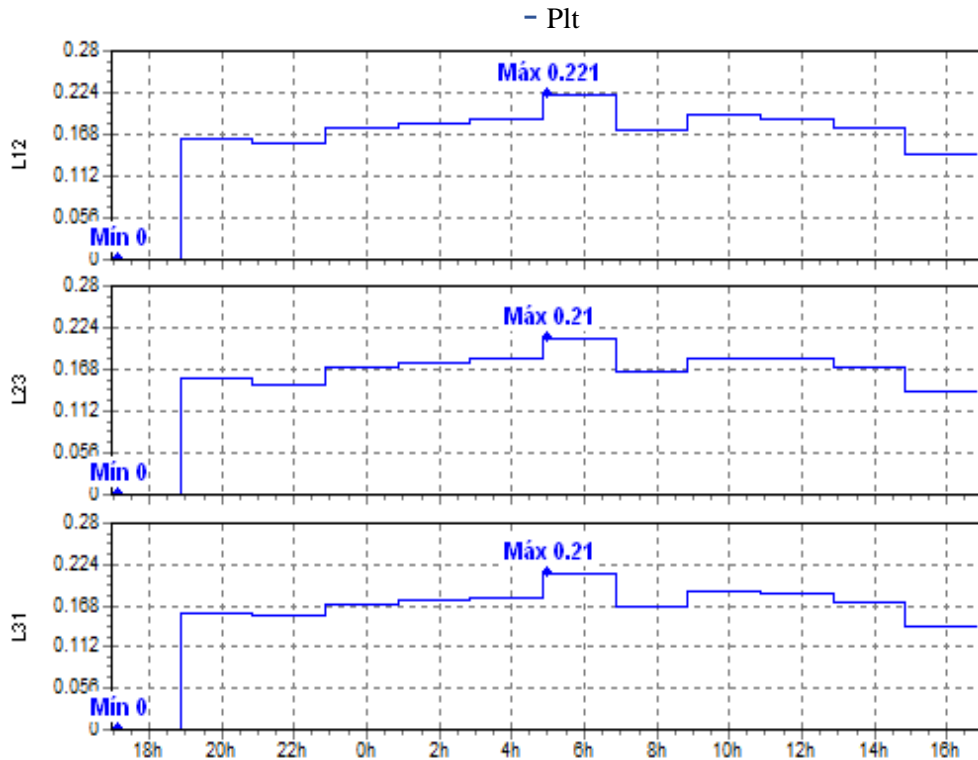


Figura 4.38. Progresso da tremulação da tensão na râmola 6.

4.3.4.4 Registo da Frequência Fundamental da Tensão.

A Figura 4.39 expõe a evolução temporal da frequência fundamental da tensão de alimentação, onde se verifica que a frequência atingiu um valor máximo de 50,07 Hz e um valor mínimo de 49,97 Hz, representando um desvio de +0,14 % e -0,06 % em relação aos 50 Hz, respetivamente.

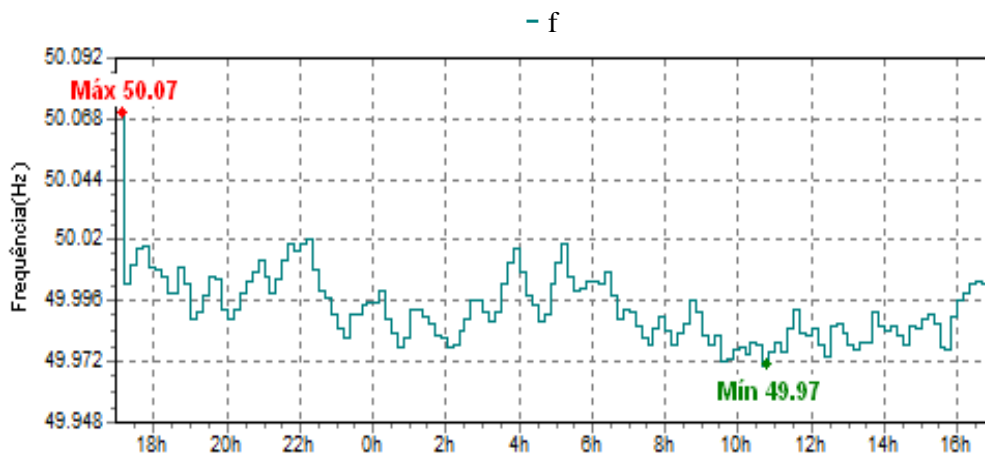


Figura 4.39. Evolução da frequência fundamental da tensão de alimentação na râmola 6.

4.3.4.5 Registo do Desequilíbrio da Tensão

A evolução do comportamento do desequilíbrio de tensão na râmola 6 apresenta-se na Figura 4.40. Observa-se um fator de desequilíbrio de tensão variando na ordem de 0,02 % a 0,1 %, estando assim em conformidade com as normas.

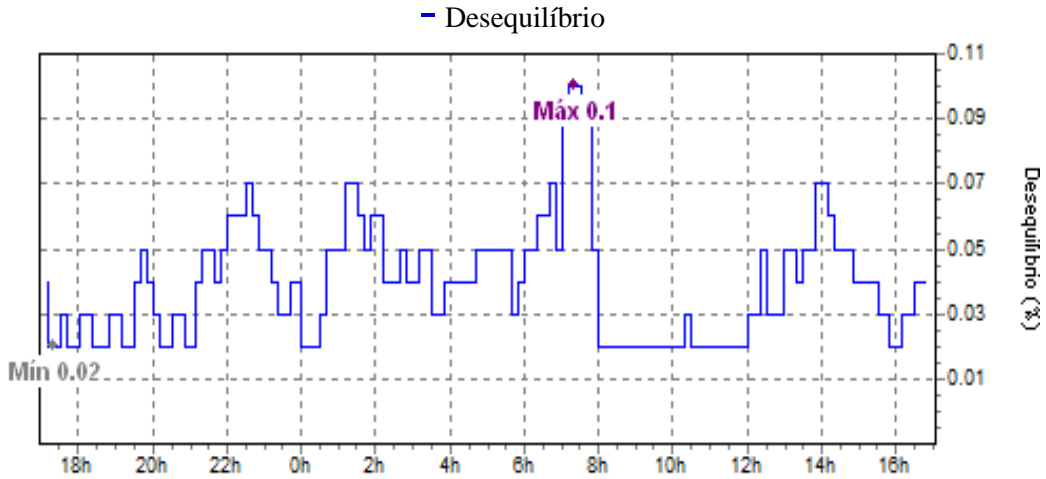


Figura 4.40. Evolução da percentagem de desequilíbrio da tensão na râmola 6.

4.3.4.6 Registo de Harmónicas e THD

A Figura 4.41 mostra a evolução da THDv na râmola 6. Os registos indicam uma evolução bastante semelhante entre fases ao longo do dia, apresentando uma redução dos valores da THDv entre a 1h e as 8h20, variando entre os 3,56 % e os 5,73 %.

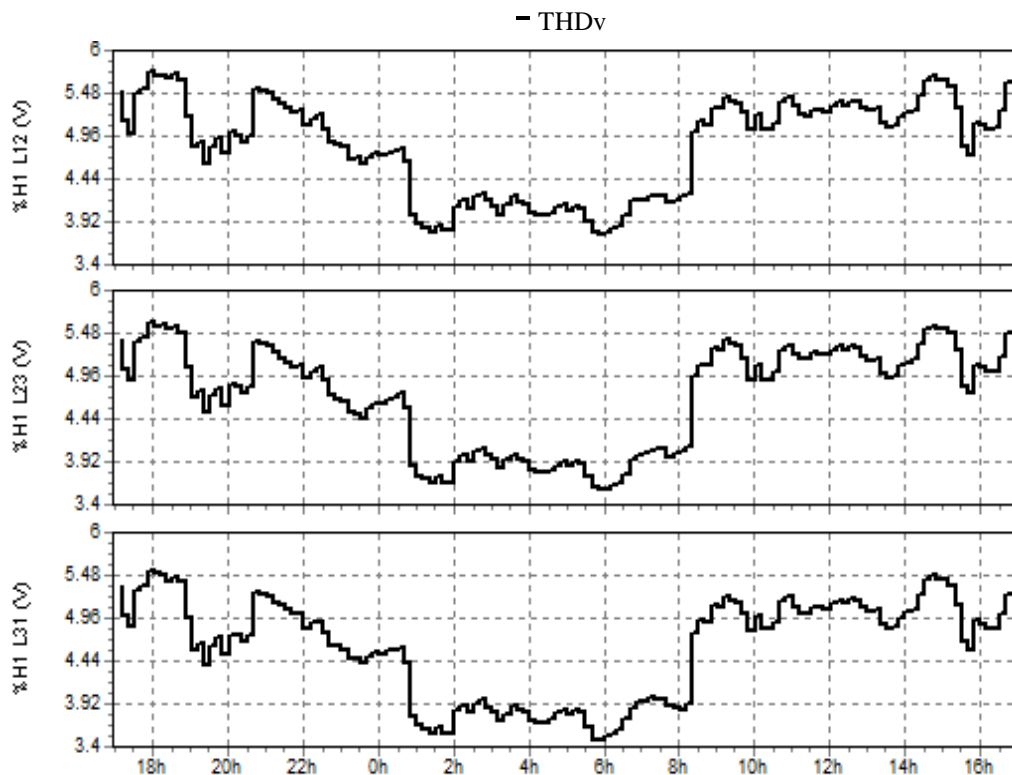


Figura 4.41. Evolução da THDv na râmola 6.

A partir do espectro harmónico da Figura 4.42 verifica-se que a harmónica que mais contribui, em média, para a THDv na râmola 6 é a de 5ª ordem. Os valores máximos são de 6,82 % entre as fases L_{12} , 6,58 % entre as fases L_{21} e 6,52 % entre as fases L_{31} .

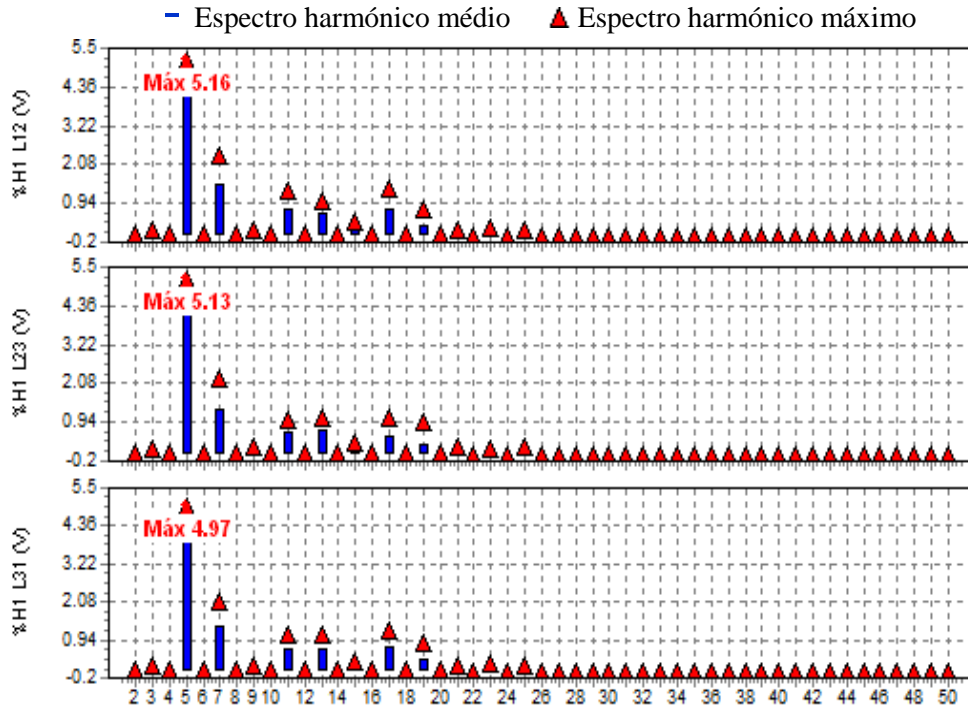


Figura 4.42. Espectro harmónico da tensão até à 50ª harmónica na râmola 6.

Com o analisador de energia no modo “Harmónicas de Corrente”, monitorizou-se evolução do THDi nas fases da râmola 6, conforme se verifica na Figura 4.43, apresentando valores compreendidos entre 28,09 % e os 40,52 % nas três fases.

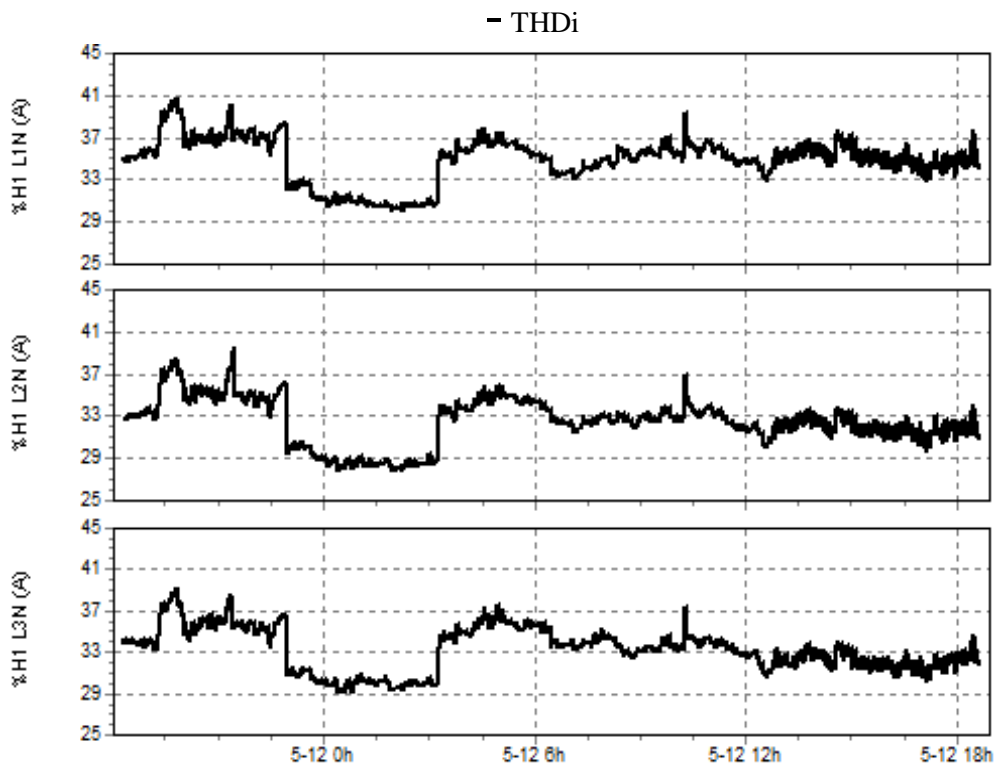


Figura 4.43. Evolução da THDi na râmola 6.

O espectro harmónico da Figura 4.44 indica que a harmónica que mais contribui, em média, para a THDv na râmola 6 é a de 5ª ordem. Os valores máximos são de 38,07 % para a fase L_{1N} , 35,64 % para a fase L_{2N} e 36,52 % para a fase L_{3N} .

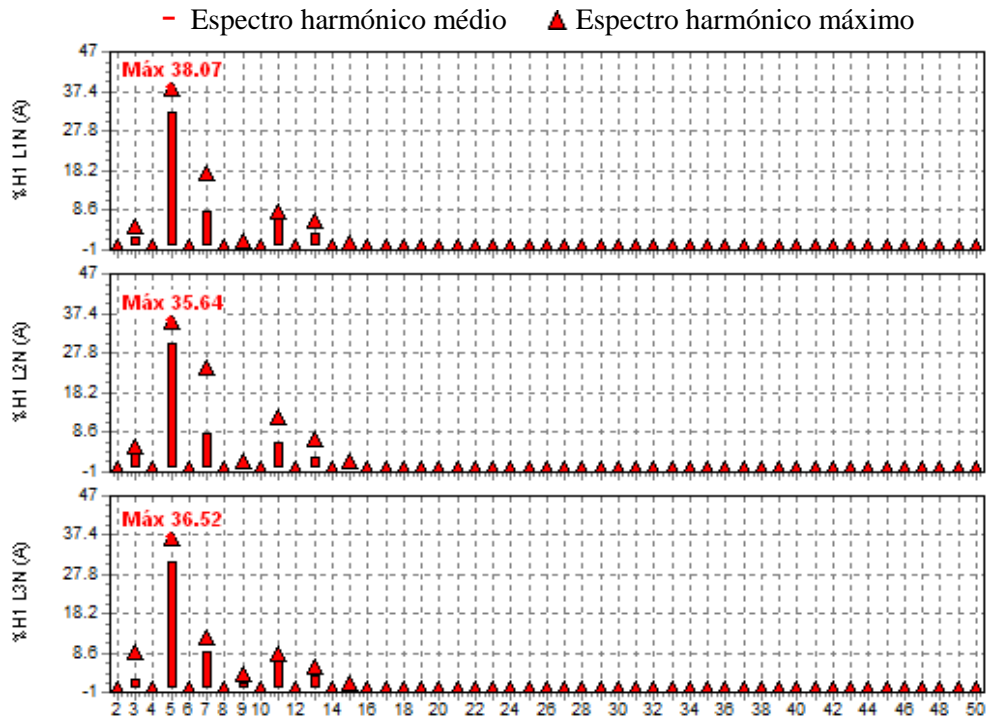


Figura 4.44. Espectro harmónico da corrente até à 50ª harmónica na râmola 6.

4.3.4.7 Registo de Potência

A partir da Figura 4.45 observa-se a evolução das potências totais médias e do fator de potência total médio na râmola 6. É possível observar que a máquina produziu em regime praticamente contínuo, existindo uma alteração do processo produtivo por volta das 22h20. Nas primeiras horas de monitorização a $P_{Méd.}$ foi aproximadamente de 57 kW, a $Q_{Méd.}$ foi cerca 16,8 kVar, a $S_{Méd.}$ foi de 59,5 VA e o $FPT_{Méd.}$ foi de 92,5. Nas restantes horas de monitorização a $P_{Méd.}$ foi sensivelmente de 68,2 kW, a $Q_{Méd.}$ foi 17,7 kVar, a $S_{Méd.}$ foi de 69,4 VA e o $FPT_{Méd.}$ foi de 93,5.

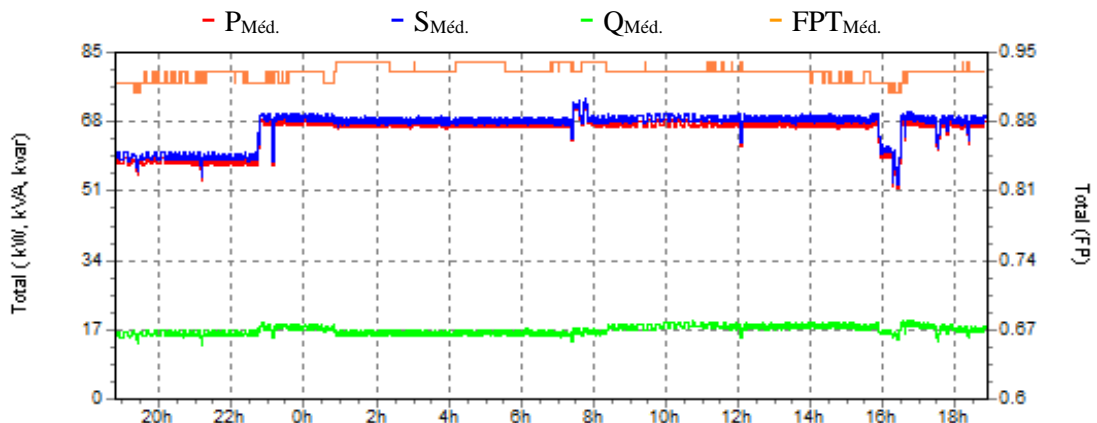


Figura 4.45. Evolução das potências médias e do FPT médio na râmola 6.

4.3.5 Râmola das Malhas

A râmola das malhas pode também ser utilizada para secar, dar estabilidade, termofixar, acertar o peso, a largura e a humidade. A râmola das malhas, tal como as dos tecidos, utiliza na sua grande maioria motores elétricos que efetuam o transporte do tecido ao longo da máquina e realizam a ventilação dentro da estufa. É, portanto, constituída por 73 motores elétricos, perfazendo 212 kW de potência instalada. De mesmo modo que as râmolas apresentadas anteriormente, tanto para o transporte de tecido como para a ventilação utilizam-se variadores eletrónicos de velocidade para o controlo de velocidade dos motores. Na Figura 4.46 observam-se as formas das ondas da tensão e da corrente num dado instante na râmola das malhas.

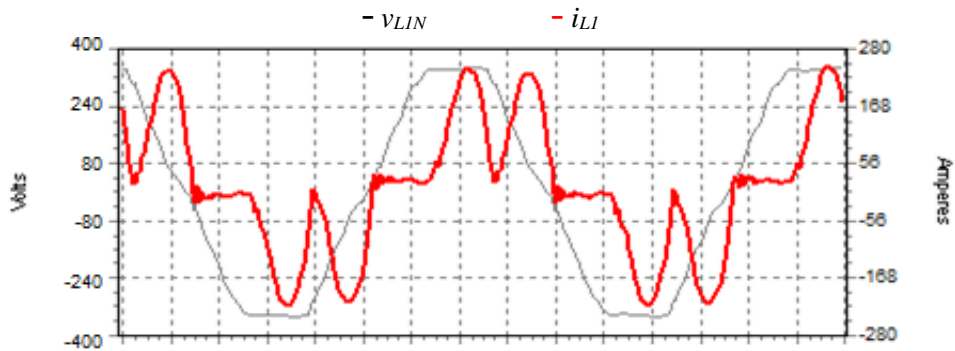


Figura 4.46. Forma das ondas da tensão e da corrente na râmola das malhas.

4.3.5.1 Registos de Tensão e Corrente

A Figura 4.47 exhibe a evolução temporal dos valores eficazes das tensões compostas L_{12} , L_{23} e L_{31} , na râmola das malhas. Durante o período amostrado não se destacou qualquer evento irregular, tendo-se registado uma variação da tensão entre os 377,76 V e os 395,2 V.

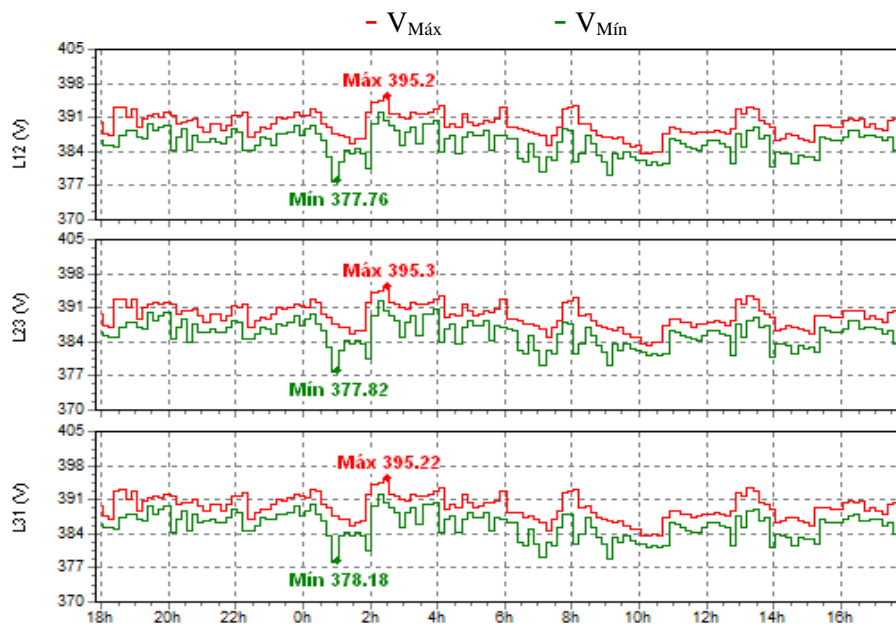


Figura 4.47. Evolução dos valores eficazes das tensões na râmola das malhas.

Na Figura 4.48 apresentam-se os registos dos valores eficazes das correntes L_1 , L_2 e L_3 na râmola das malhas, onde se verifica uma distribuição equilibrada das cargas pelas três fases.

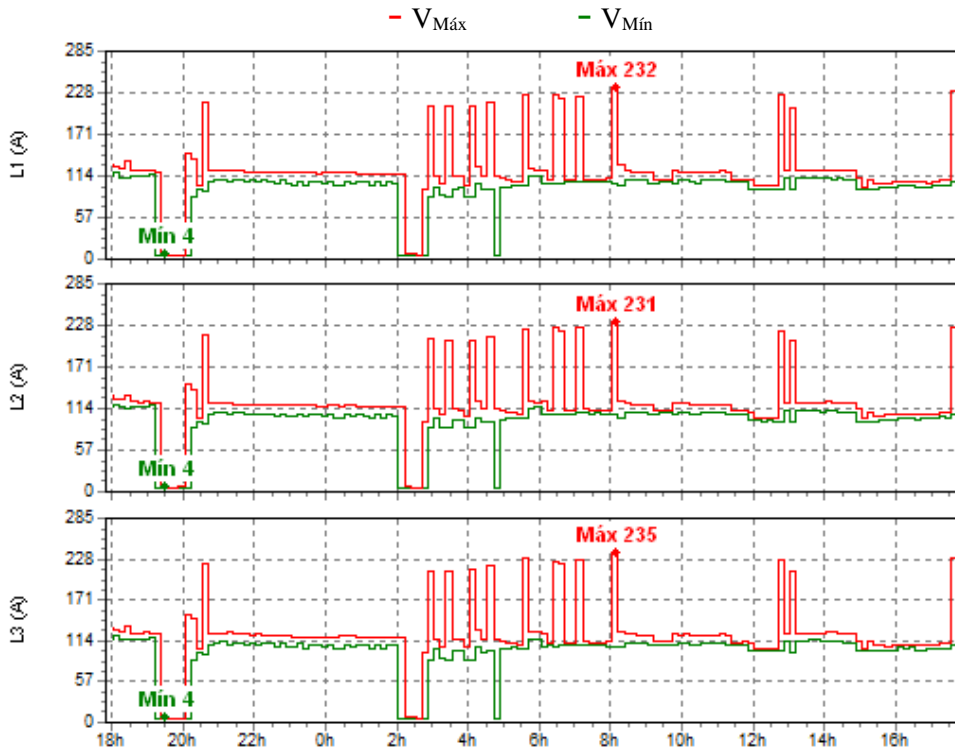


Figura 4.48. Evolução dos valores eficazes das correntes de meio ciclo na râmola das malhas.

4.3.5.2 Registos de Cavas e Sobretensões

Durante o dia monitorizado não se registaram eventos de cavas, nem de sobretensões.

4.3.5.3 Registo da Frequência Fundamental da Tensão

A Figura 4.49 mostra a evolução temporal da frequência fundamental da tensão de alimentação. Observa-se que o valor máximo registado foi de 50,022 Hz e o valor mínimo foi de 49,954 Hz, representando um desvio de +0,044 % e -0,092 % em relação aos 50 Hz.

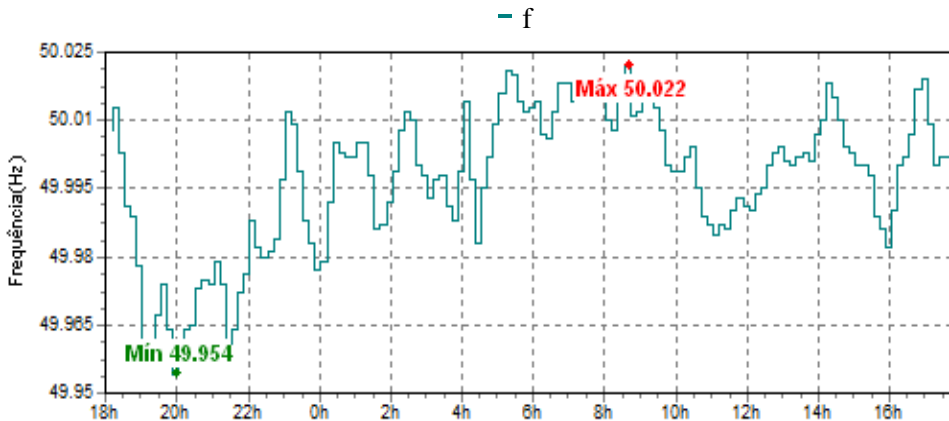


Figura 4.49. Evolução da frequência fundamental da tensão de alimentação na râmola das malhas.

4.3.5.4 Registo da Tremulação da Tensão

A evolução temporal do registo da tremulação da tensão na râmola das malhas apresenta-se na Figura 4.50. Não existiram registos de eventos com valores superiores a 1 nas três fases, sendo o máximo registado entre as fases L_{12} e L_{23} de 0,212 e 0,205 entre as fases L_{31} .

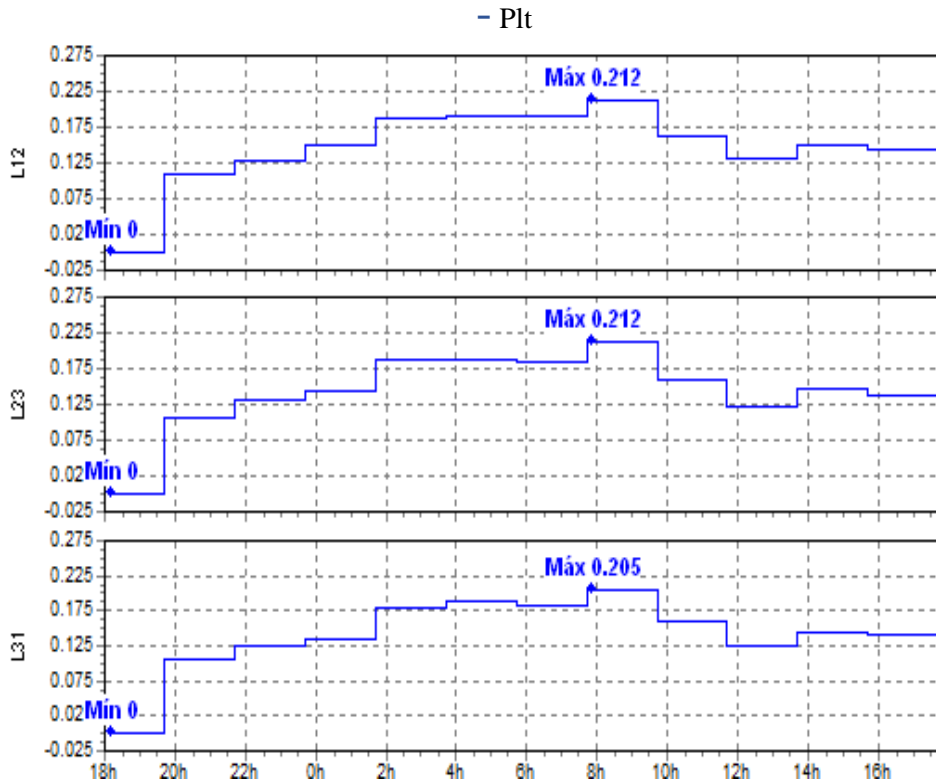


Figura 4.50. Evolução da tremulação da tensão na râmola das malhas.

4.3.5.5 Registo do Desequilíbrio da Tensão

A avaliação do comportamento do desequilíbrio de tensão na râmola das malhas apresenta-se na Figura 4.51. Observa-se um fator de desequilíbrio de tensão variando na ordem de 0,02 % a 0,12 %.

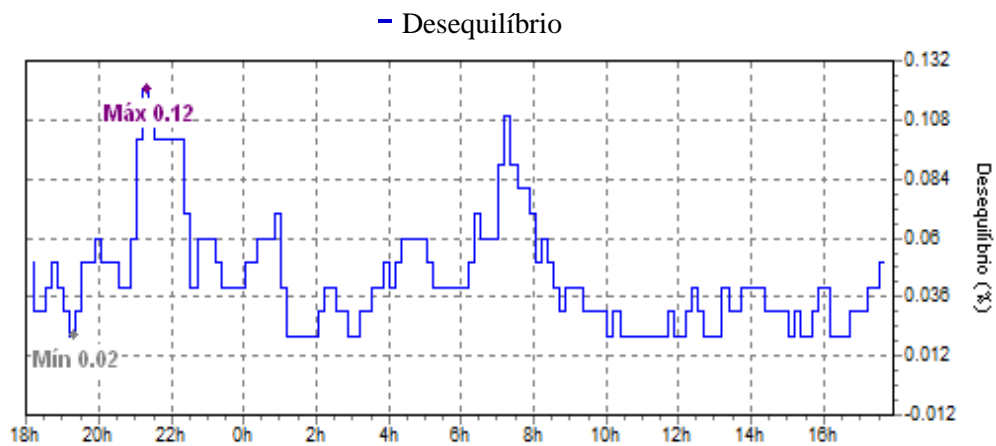


Figura 4.51. Evolução da percentagem de desequilíbrio da tensão na râmola das malhas.

4.3.5.6 Registo de Harmónicas e THD

A Figura 4.52 mostra a evolução da distorção harmónica total das tensões na râmola das malhas. Os registos apresentando algumas reduções dos valores da THDv nos momentos de *setup* da máquina entre processos, bem como uma suave redução durante as horas de vazio, variando assim entre os 3,71 % e os 7,48 %.

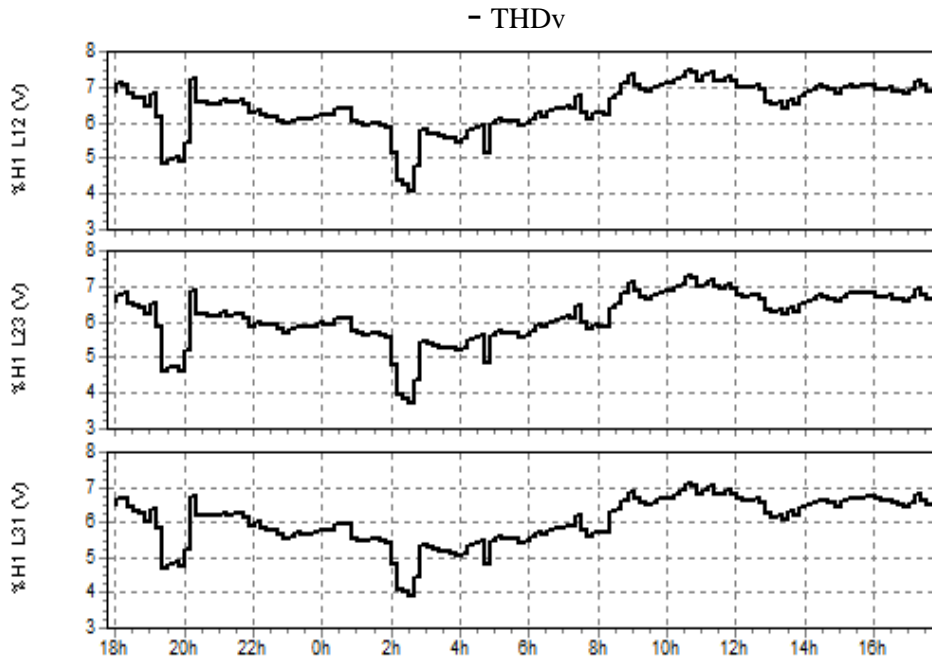


Figura 4.52. Evolução da THDv na râmola das malhas.

A partir do espectro harmónico da Figura 4.53 verifica-se que a harmónica que mais contribui, em média, para a THDv na râmola das malhas é a de 5ª ordem. Os valores máximos são de 6,82 % entre as fases L_{12} , 6,58 % entre as fases L_{21} e 6,52 % entre as fases L_{31} .

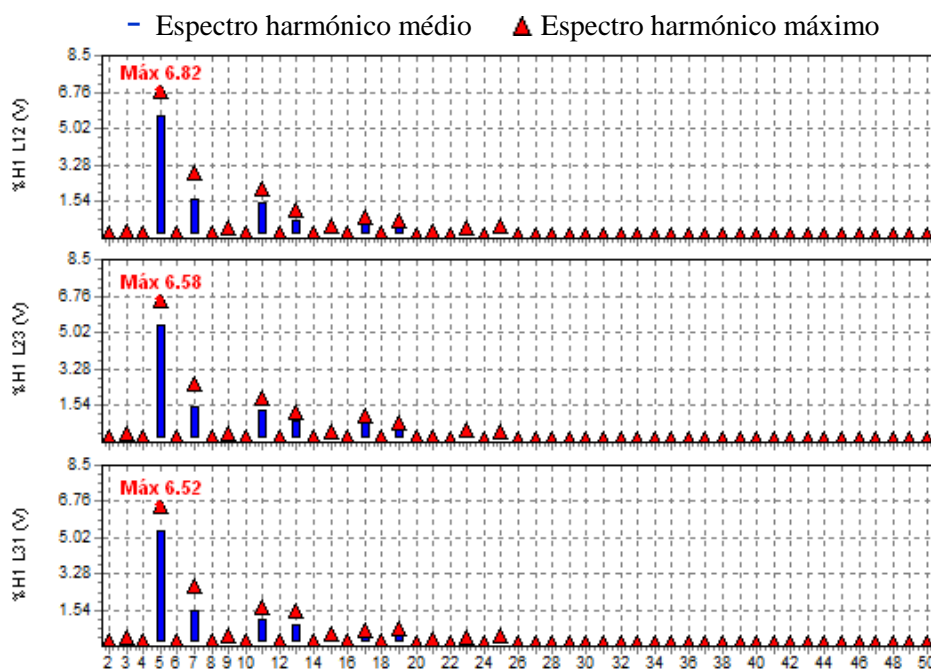


Figura 4.53. Espectro harmónico da tensão até à 50ª harmónica na râmola das malhas.

A evolução da THDi nas fases da râmola das malhas exibe-se na Figura 4.54, apresentando valores compreendidos entre 18 % e os 110 % nas três fases. Os valores máximos atingidos devem-se a momentos de *setup* da máquina, causado eventualmente pelo *standby* conversores eletrónicos. Embora a THDi atinja valores acima dos 100 %, os valores eficazes da corrente nesses instantes são de tal forma reduzidos, que causam uma baixa perturbação na instalação elétrica.

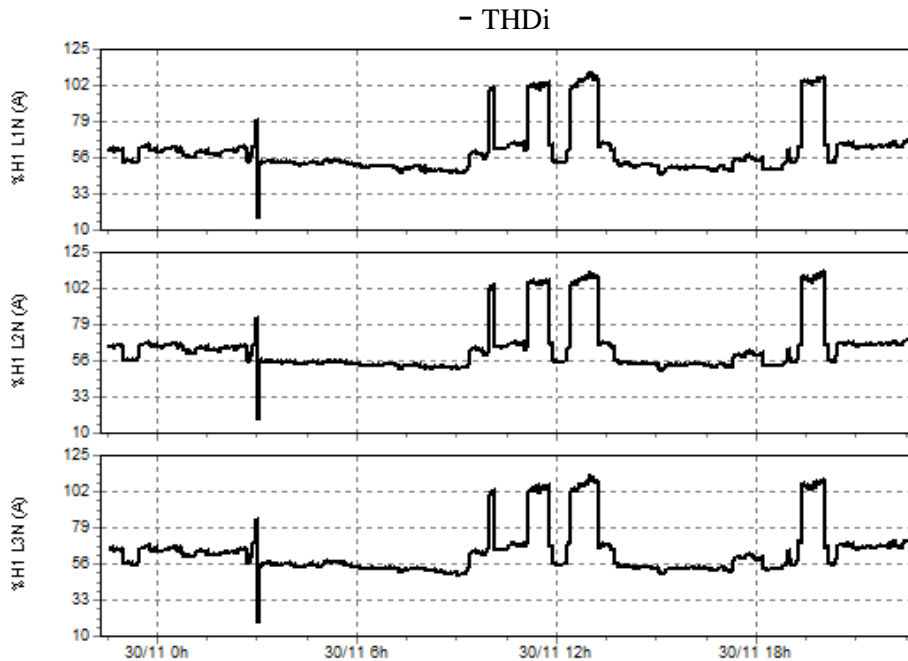


Figura 4.54. Evolução temporal da THDi na râmola das malhas.

O espectro harmónico da Figura 4.55 mostra que a harmónica que mais contribui, em média, para a THDi na râmola das malhas é a de 5ª ordem. Os valores máximos são de 67,04 % para a fase L_{1N} , 71,11 % para a fase L_{2N} e 69,09 % para a fase L_{3N} .

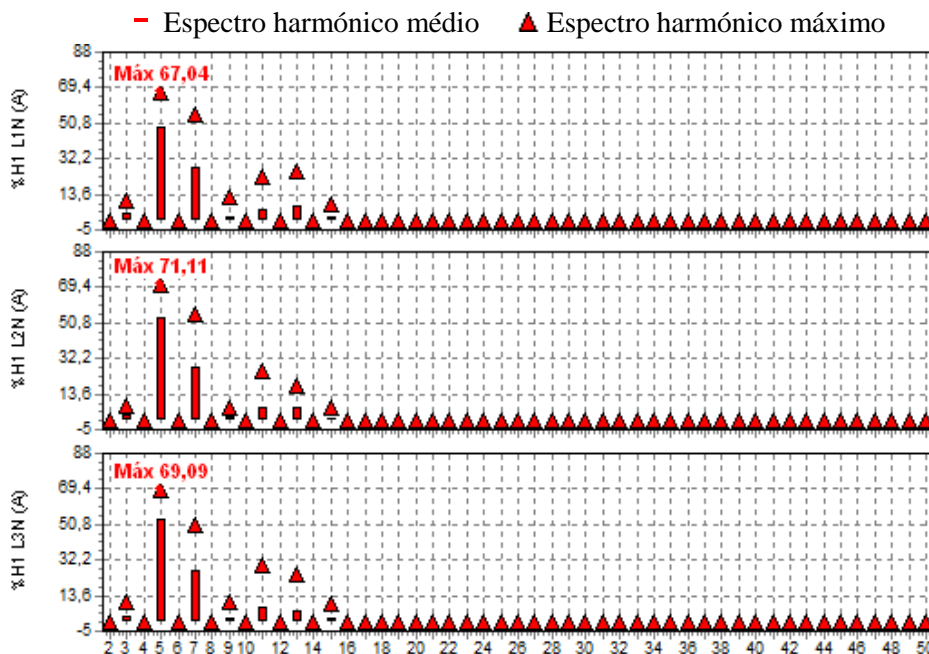


Figura 4.55. Espectro harmónico da corrente até à 50ª harmónica na râmola das malhas.

4.3.5.7 Registo de Potência

A partir da Figura 4.56 observa-se a evolução da $P_{Méd.}$, da $Q_{Méd.}$, da $S_{Méd.}$ e do $FPT_{Méd.}$ na râmola das malhas. Compreendem-se os momentos de produção e *setup* da râmola através das reduções e aumentos das potências, acontecendo com mais frequência a partir das 16h do 29/11. Observa-se também alterações dos processos produtivos através dos diferentes valores médios das potências, sendo que o valor máximo da $P_{Méd.}$ foi de 87 kW, o da $Q_{Méd.}$ foi de 16 kVAr e o da $S_{Méd.}$ foi de 89,2 VA.

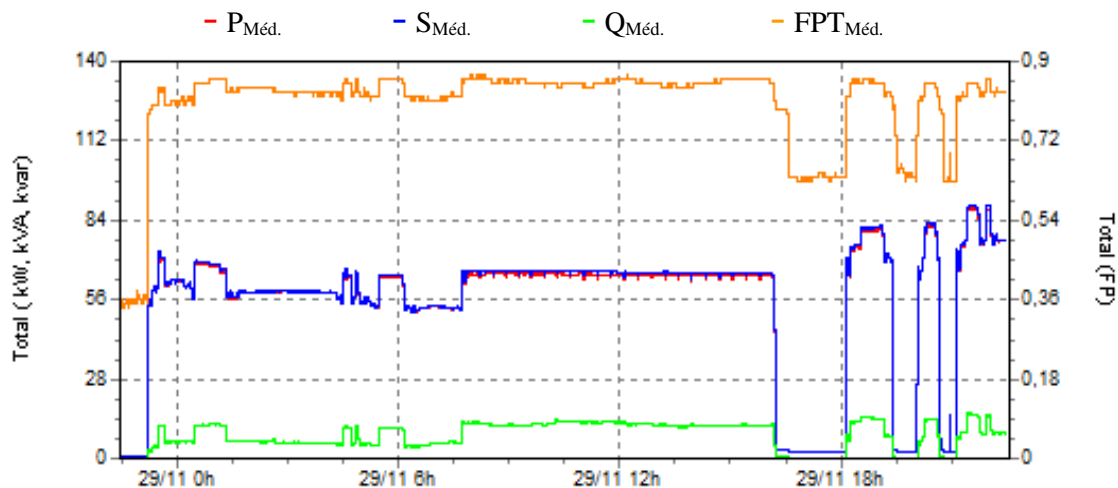


Figura 4.56. Evolução das potências médias e do FPT médio na râmola das malhas.

4.4 Conclusões

A distribuição da energia elétrica ao longo da instalação fabril é efetuada por um complexo e enorme conjunto de quadros parciais, tendo sido feito durante este presente trabalho o levantamento e a atualização das cargas neles ligadas.

Conforme foi visto ao longo deste capítulo, as cargas com maior potência instalada nas máquinas aqui apresentadas são os motores elétricos. Quando alimentados por variadores eletrónicos de velocidade é evidente uma possível redução de energia consumida, bem como uma redução da corrente de arranque dos mesmos. No entanto, as correntes distorcidas geradas pelos conversores eletrónicos poluem consideravelmente a rede elétrica, aumentando desta forma a distorção nas tensões. Como a ETAR foi a única carga aqui analisada que não dispõe de variadores eletrónicos de velocidade para os motores, a THD na corrente das três fases foi inferior a 10 %, enquanto nas restantes máquinas foi quase sempre superior a 30 %. É também bastante claro verificar este facto a partir das formas das ondas das correntes apresentadas ao longo deste capítulo nas diferentes máquinas. Conclui-se que a harmónica que mais contribuiu para a THD da corrente foi a de 5ª ordem, para todas as cargas. Durante os períodos monitorizados não se registaram eventos críticos relacionados com a

continuidade do serviço, frequência e tremulação da tensão, cavas e sobretensões. Constatou-se que durante o tempo amostrado, a componente inversa das tensões não ultrapassou os 2 % da correspondente componente direta, nas cargas monitorizadas, conforme está estipulado pela normalização.

Capítulo 5

Gerador de Emergência

5.1 Introdução

Durante as últimas décadas desenvolveram-se um conjunto de ações normativas na área da segurança contra incêndios em edifícios que pretendem prevenir a ocorrência e a propagação dos incêndios. Como tal, tornou-se obrigatória a existência de fontes de energia de emergência, que garantam a alimentação de energia elétrica a equipamentos e instalações, mesmo em caso de falha ou corte da alimentação da rede, conforme o Decreto-Lei n.º 224/2015 (Segurança Contra Incêndios em Edifícios). Tal poderá ser feito com recurso a grupos eletrogéneos ou a fontes de alimentação ininterrupta por tempo limitado (UPS) [42]. Um grupo eletrogéneo ou grupo gerador é um equipamento que a partir do acoplamento entre um motor de combustão interna e um alternador, converte a energia mecânica em energia elétrica.

Existe um grupo gerador de emergência nas instalações da MGC AT, exibido na Figura 5.1, que está localizado no exterior, junto ao PT. Este equipamento destina-se a fornecer energia à iluminação de emergência, ao grupo de bombas da rede de incêndios, à central de incêndios e à sala de informática, em caso de falha da energia da rede ou em períodos de manutenção no PT.



Figura 5.1. Grupo gerador de emergência.

O grupo gerador é constituído por um motor de combustão interna com as características da Tabela 5.1.

Tabela 5.1. Características do motor de combustão interna [43].

Fabricante	Modelo	Potência	Nº de cilindros	Velocidade	Combustível
John Deere	4045HF158	100 kVA	4	1500 rpm	Diesel

É também constituído por um alternador síncrono trifásico de polos salientes, sem escovas, com excitação independente através com um regulador automático de tensão (AVR). As principais características apresentam-se na Tabela 5.2.

Tabela 5.2. Características do alternador síncrono [44].

Fabricante	Modelo	Potência	Frequência	Tensão	Rendimento	Nº de polos	FP D
NSM AC Generators	SG2 225D	105 kVA	50 Hz	400 V	89,5 %	4	0,8

Faz igualmente parte do grupo gerador um painel de controlo que monitoriza a falha de energia da rede, habilitando o arranque do gerador. Monitoriza ainda os valores eficazes das tensões e correntes, a frequência, o nível do combustível, a tensão da bateria, entre outros.

5.2 Análise ao Gerador de Emergência

A monitorização à qualidade de energia do gerador de emergência realizou-se durante a manutenção preventiva ao PT. As cargas que estiveram ativas durante a monitorização foram as luzes de emergência e a sala de informática. Utilizou-se o analisador de energia, durante 1 hora, para cada um dos seguintes modos:

- “Monitor”;
- “Harmónicas de Corrente”;
- “Potência e Energia”.

Tal como sucedido anteriormente, os registos de tensão, corrente, cavas de tensão, sobretensões, tremulação da tensão, frequência, desequilíbrios de tensão e harmónicas de tensão, foram recolhidos durante o mesmo período a partir do modo “Monitor” do analisador de energia. Já para os modos das “Harmónicas de Corrente” e “Potência e Energia”, utilizaram-se períodos de monitorização diferentes. As formas da onda da tensão e da corrente numa das fases à saída do gerador são exibidas na Figura 5.2.

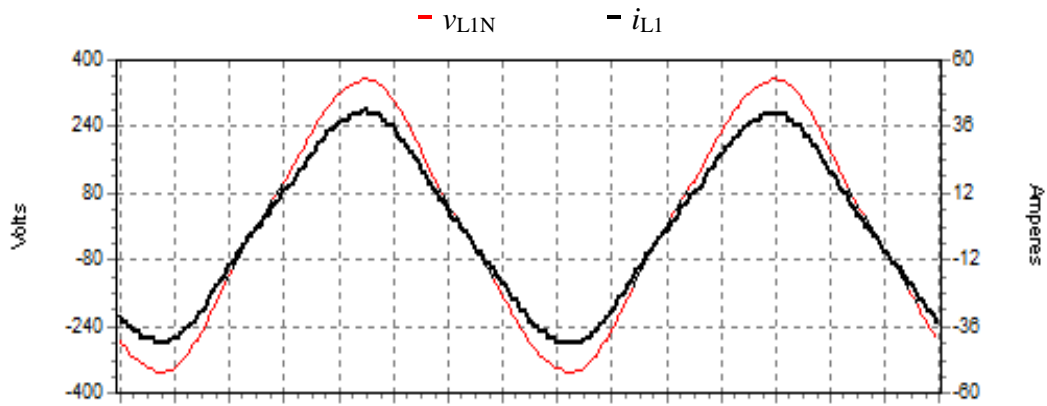


Figura 5.2. Formas das ondas da tensão e da corrente no gerador.

5.2.1 Registos de Tensão e Corrente

A Figura 5.3 mostra a evolução temporal dos registos dos valores eficazes das tensões L_{1N} , L_{2N} e L_{3N} , à saída do gerador de emergência. Observa-se que os valores das tensões entre as 3 fases e o neutro estão de acordo com os valores estipulados, apresentando uma pequena variação entre o valor máximo e o valor mínimo.

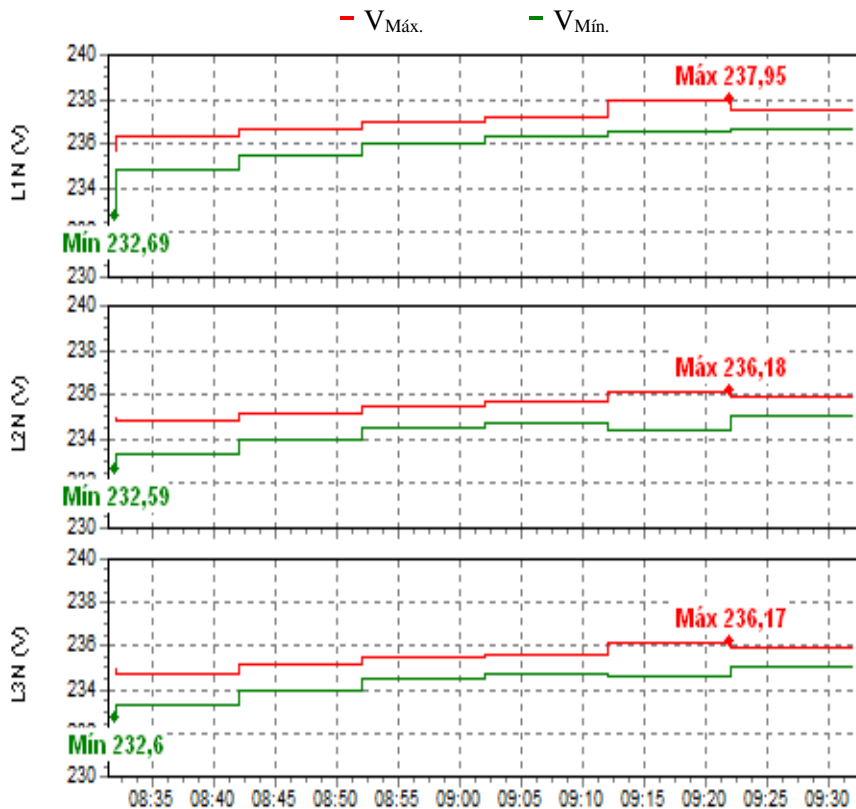


Figura 5.3. Progresso dos valores eficazes das tensões no gerador.

Na Figura 5.4 exibem-se os registos dos valores eficazes das correntes eficazes L_1 , L_2 , L_3 e N . Nota-se a existência de um grande desequilíbrio das cargas ligadas entre as três fases, originando variação da corrente no neutro entre os 19,07 A e os 23,7 A.

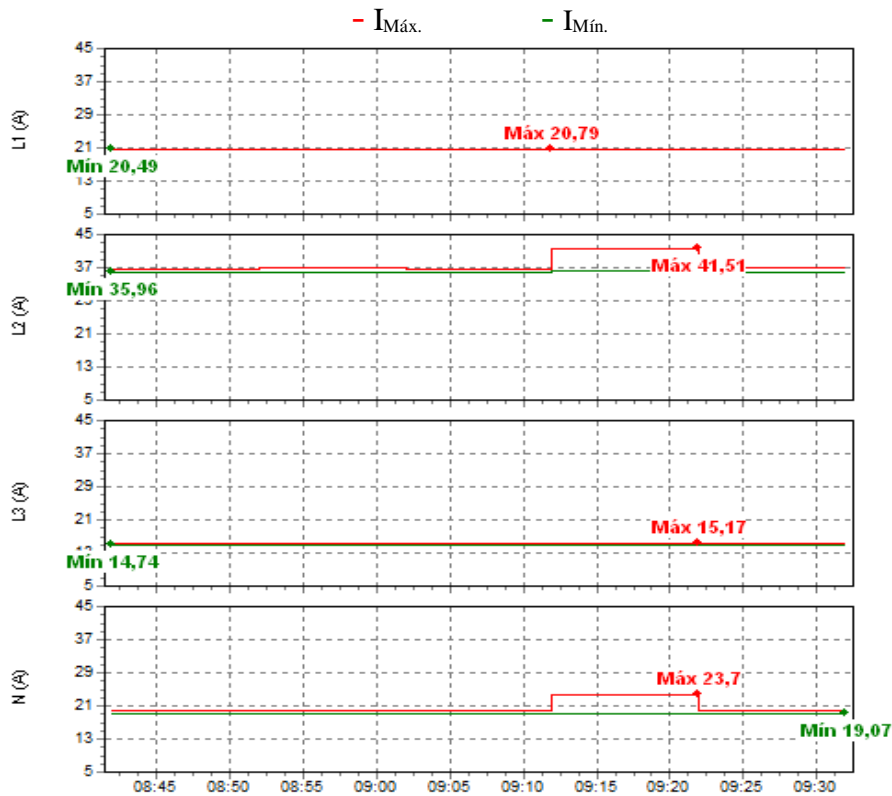


Figura 5.4. Evolução dos valores eficazes das correntes no gerador.

5.2.2 Registo da Tremulação da Tensão

A evolução temporal da tremulação da tensão no gerador apresenta-se na Figura 3.23. Como o intervalo de tempo analisado foi cerca de uma hora, a tremulação aqui apresentada caracteriza-se por *Pst* de severidade de curto prazo (medido em 1 min) para um rápido *feedback*. Não existiram registos de eventos com valores superiores a 1 nas três fases, sendo o máximo registado na fase L_{2N} de 0,242.

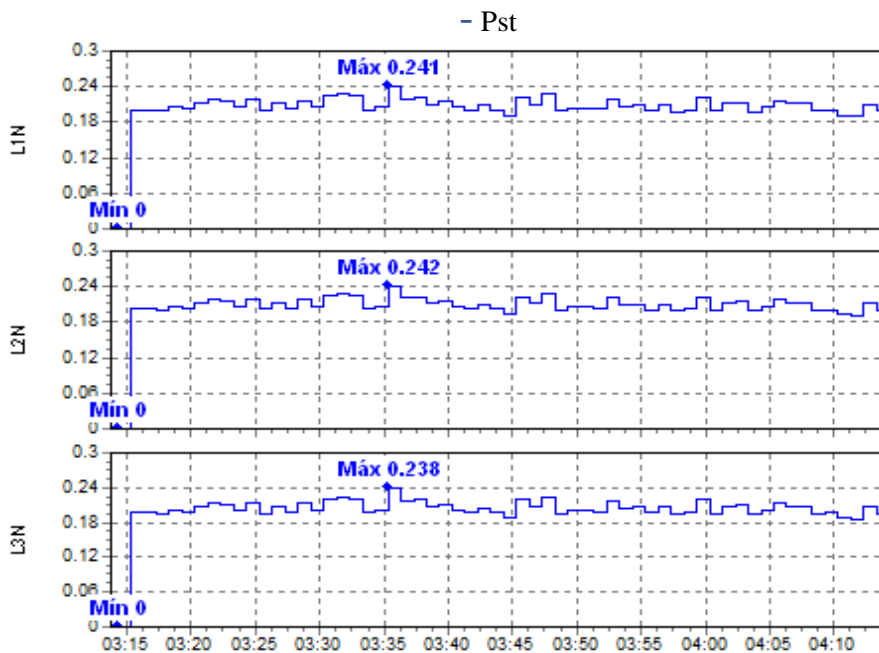


Figura 5.5. Evolução da tremulação da tensão no gerador.

5.2.3 Registo da Frequência Fundamental da Tensão

A Figura 5.6 mostra a evolução temporal da frequência fundamental da tensão de alimentação do gerador. Verifica-se que a frequência atingiu um valor máximo de 52,347 Hz e um valor mínimo de 52,322 Hz, apresentando uma variação entre os 4,44 % e 4,84 %, em relação aos 50 Hz.

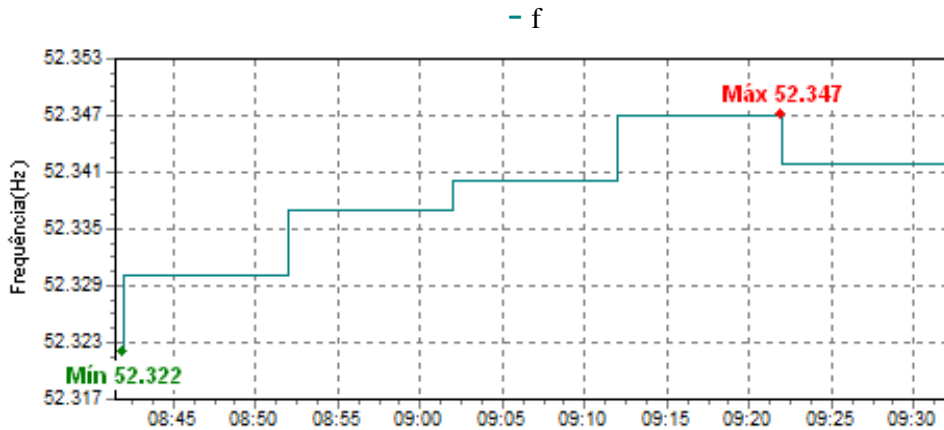


Figura 5.6. Evolução da frequência fundamental da tensão de alimentação no gerador.

5.2.4 Registo do Desequilíbrio da Tensão

A evolução do desequilíbrio de tensão no gerador é apresentada na Figura 5.7. O fator de desequilíbrio mostra que a componente inversa das tensões, apresentou o valor máximo de 0,64 %.

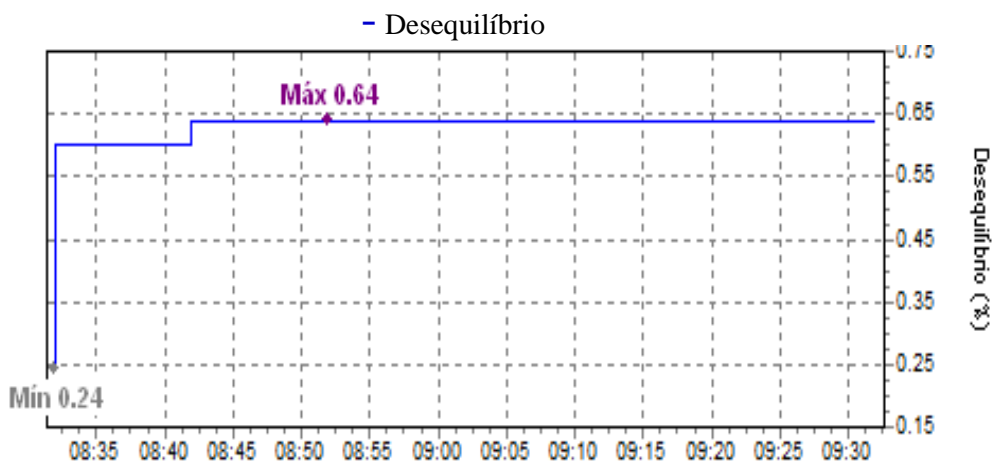


Figura 5.7. Evolução do desequilíbrio da tensão do gerador.

5.2.5 Registo de Harmónicas e THD

A Figura 5.8 exhibe a evolução da distorção harmónica total da tensão (THDv) nas fases do gerador. O registo da THDv apresenta um valor médio de 8,7 % ao longo do tempo monitorizado, revelando uma elevada distorção na tensão.

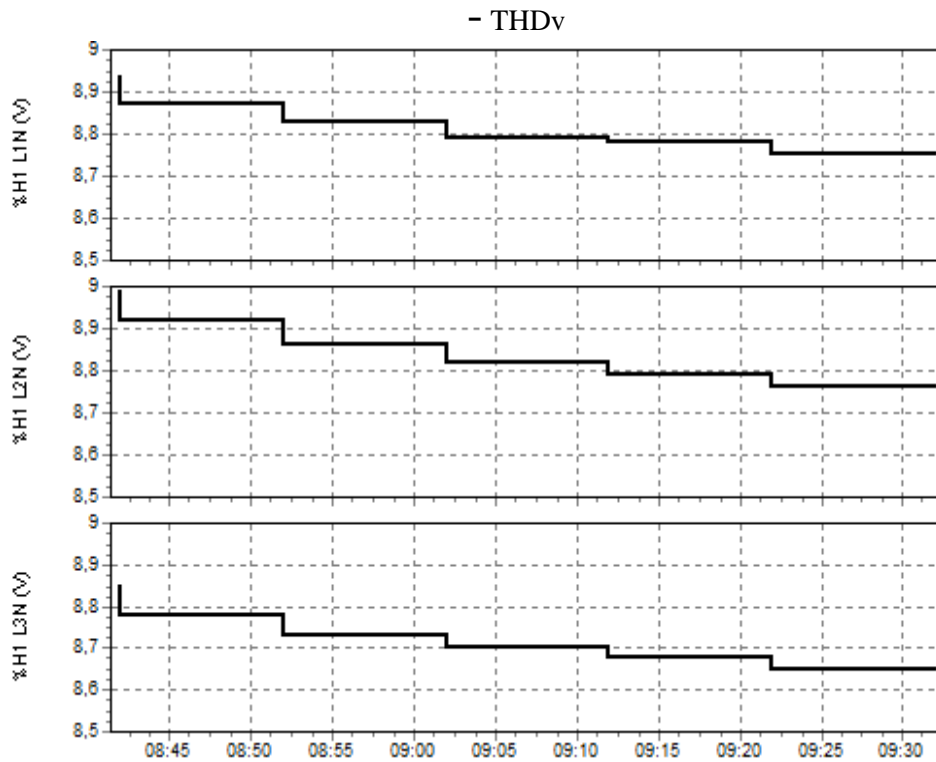


Figura 5.8. Evolução da THDv no gerador.

O espectro harmónico da tensão do gerador até à ordem 50ª apresenta-se na Figura 5.9. É evidente que a harmónica que mais contribui para a THDv é a 3ª harmónica, apresentando um valor máximo de 8,92 % na fase L_{IN} .

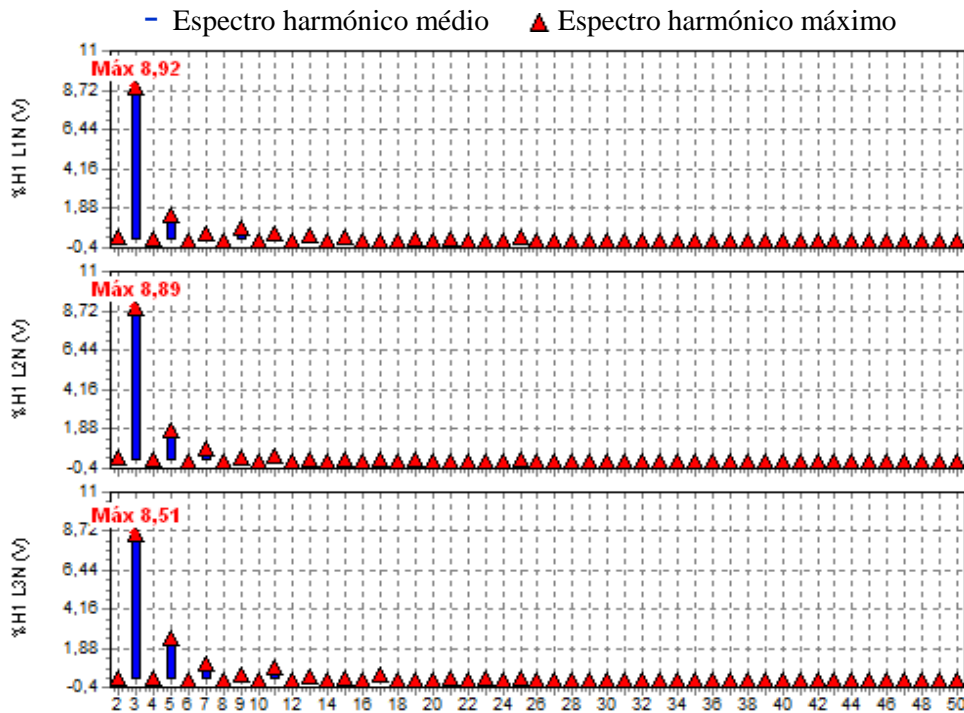


Figura 5.9. Espectro harmónico da tensão até à 50ª harmónica no gerador.

A Figura 5.10 exhibe a evolução da distorção harmónica total da corrente (THDi) nas fases do gerador. O registo da THDv apresenta um valor médio de 9 % na fase L_{IN} , e um valor médio de 7 % para as restantes fases ao longo do tempo monitorizado.

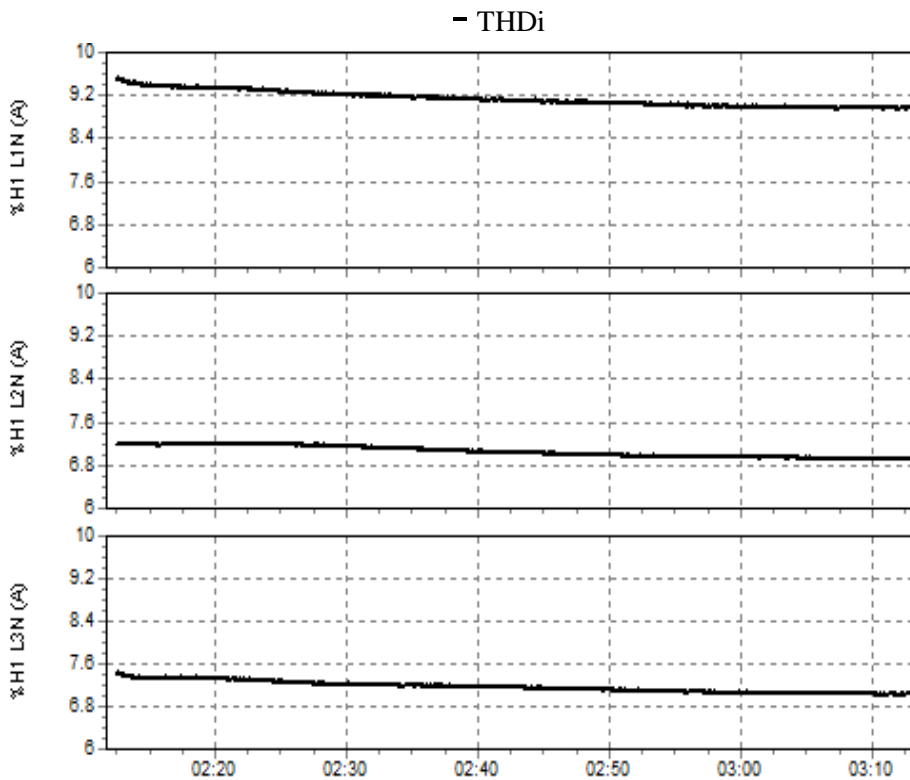


Figura 5.10. Evolução da THDi no gerador.

O espectro harmónico da corrente no gerador até à ordem 50ª apresenta-se na Figura 5.11. É visível que a harmónica que mais contribui para a THDv é a 3ª harmónica, apresentando um valor máximo de 9,03 % na fase L_{1N} .

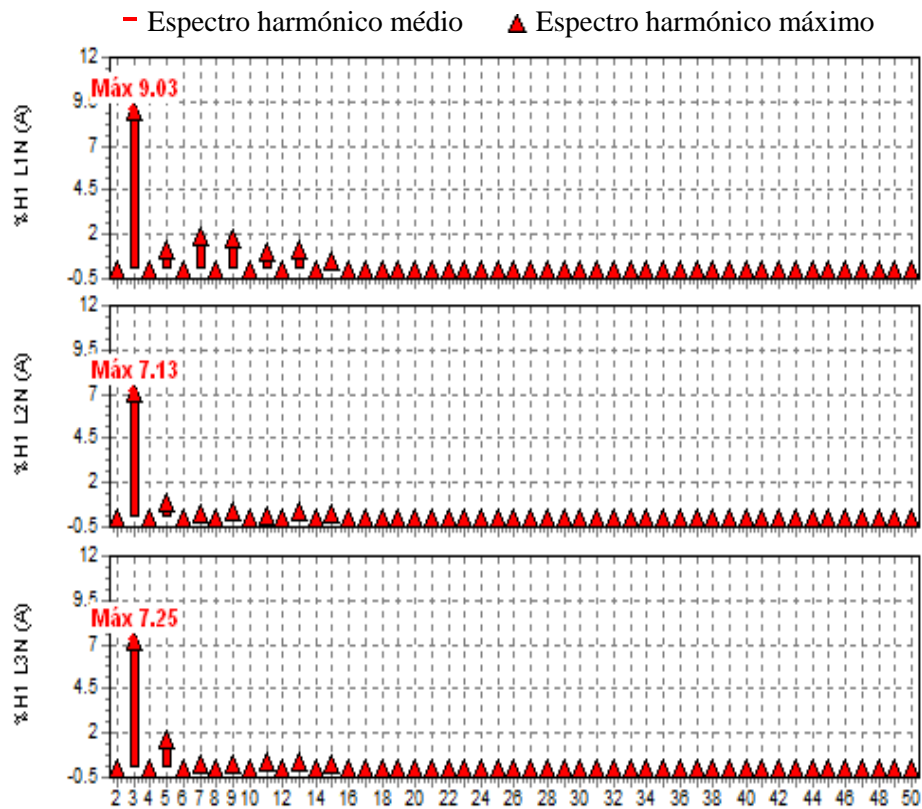


Figura 5.11. Espectro harmónico da corrente até à 50ª harmónica no gerador.

5.2.6 Registo de Potência

A monitorização da evolução das potências médias no gerador de emergência exhibe-se na Figura 5.12. Em média, verificou-se para a potência ativa total o valor de 18,1 kW, para a potência aparente o valor de 18,58 kVA, para potência reativa o valor de negativo de - 2,5 kVAr indica que o $FPT_{Méd.}$ de aproximadamente 0,98, é capacitivo.

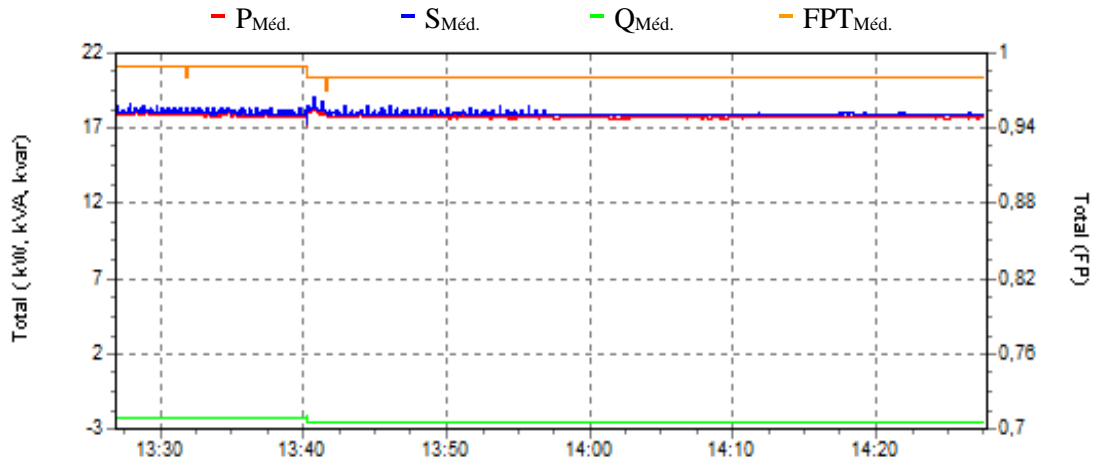


Figura 5.12. Evolução das potências médias e do FPT médio no gerador.

5.3 Conclusões

O grupo gerador é um sistema de apoio essencial em caso da falha de energia, garantindo a segurança de bens e pessoas através das luzes de emergência e dos sistemas de segurança contra incêndios. Pode ainda salvaguardar a continuidade dos sistemas informáticos ligados por várias horas, uma vez que as UPS existentes apenas garantem energia durante algumas dezenas de minutos.

Comparativamente com a norma NP EN50160 os valores eficazes da tensão estiveram dentro dos limites estipulados. A THD da tensão apresentou em média, valores acima dos 8 % estabelecidos pela norma, com uma contribuição significativa das harmónicas de 3ª ordem, que também estão consideravelmente acima dos 5 % estabelecidos pela norma. É presumível que este fenómeno seja manifestado pelas cargas serem monofásicas.

A frequência monitorizada foi sempre superior a 1 % em relação aos 50 Hz, atingido um valor máximo 4,84 %, não respeitando durante o intervalo medido a normalização.

É notório a partir da evolução das correntes que há um desequilíbrio na distribuição das cargas pelas três fases, que consequentemente apresenta uma THDi diferente em cada fase.

Capítulo 6

Central Mini-Hídrica

6.1 Introdução

A produção de energia elétrica nas centrais hídricas tem como base a transformação da energia potencial gravítica contida num volume de água, retida em albufeira, em energia cinética, por meio de um desnível ou de uma queda de água. Esta energia é transferida para as pás das turbinas, fazendo-as mover, transformando assim a energia cinética da água, em energia mecânica. A energia mecânica é então convertida em energia elétrica através do alternador [45]. Deste modo, tira-se partido de um recurso da natureza e integralmente renovável.

Idealmente, e desprezando as perdas, a potência que se pode obter de uma queda de água depende do desnível e do caudal, conforme se constata na equação (6.1).

$$P = g q h \quad (6.1)$$

Onde:

P - Potência disponível (kW);

g - Aceleração gravítica (m/s^2);

q - Caudal de água (m^3/s);

h - Altura da queda de água (m).

A central mini-hídrica (CMH) aqui apresentada é designada por Central dos Infernos, tendo iniciado a produção de energia em 1913. Situa-se na freguesia de Ronfe, na linha de água do Rio Ave conforme mostra a Figura 6.1.



Figura 6.1. Localização da central mini-hídrica [46].

Na Figura 6.2 está ilustrada a vista lateral da CMH, onde se observam os principais elementos da central.

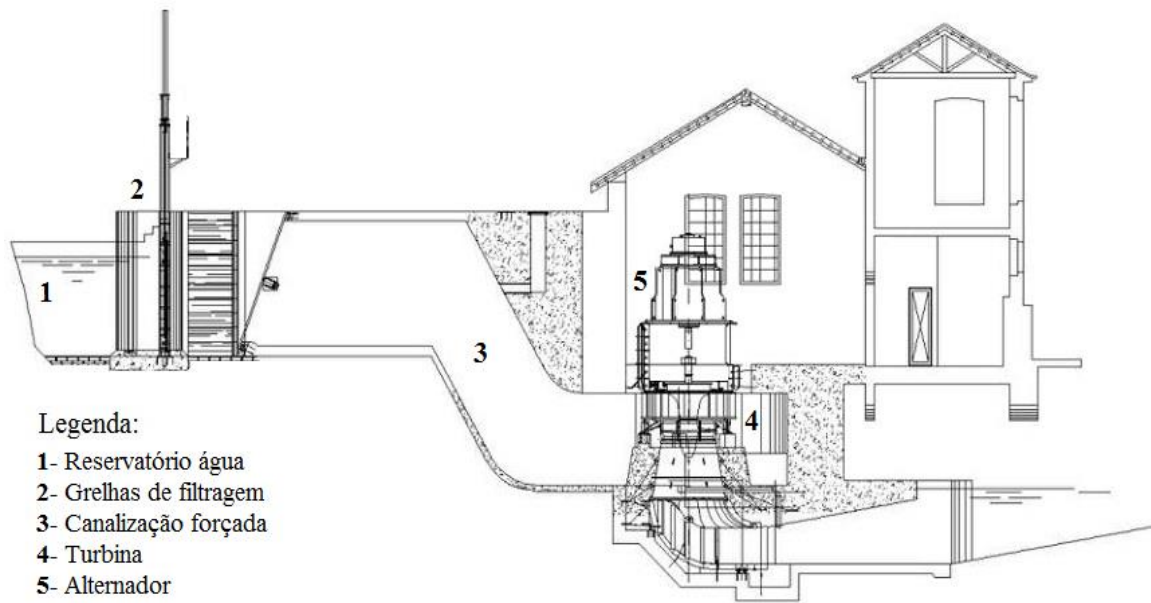


Figura 6.2. Vista lateral da CMH.

6.2 Características do Gerador

Inicialmente quando foi construída, possuía uma potência instalada de 438 kW, utilizava dois alternadores síncronos de eixo horizontal e com turbinas do tipo Francis. Na Figura 6.3 observa-se um dos alternadores referidos, que se encontra em exposição dentro da central.



Figura 6.3. Antigo alternador síncrono de eixo horizontal da CMH.

Em 2006, os dois alternadores foram substituídos pelo alternador exibido na Figura 6.4. Trata-se de um alternador vertical síncrono com uma potência nominal de 1,1 MVA. A potência máxima que pode ser obtida pelo gerador é determinada como visto anteriormente pela equação (2.4). Considerando as características da CMH de 6,2 m de queda de água, um caudal de água de $11,7 \text{ m}^3/\text{s}$ e o seu rendimento de 91,3 % a potência será de 649 kW, conforme se afirma pela expressão (6.2).

$$P = 9,8 \times 11,7 \times 6,2 \times 0,913 = 649 \text{ kW} \quad (6.2)$$



Figura 6.4. Grupo gerador da CMH.

Assim, como já referido previamente, as turbinas hidráulicas convertem a energia cinética da água em movimento rotativo, para acionar o alternador. A turbina utilizada na CMH é uma turbina de reação, ou seja, o movimento deve-se às diferenças de pressão entre a entrada e a saída da água de dentro da turbina. Também designada por turbina do tipo Axial ou Kaplan é utilizada em centrais de baixo desnível, admitindo esta em particular um caudal máximo de $19 \text{ m}^3/\text{s}$ e caudal mínimo de $1,9 \text{ m}^3/\text{s}$. As turbinas Kaplan instaladas têm as pás ajustáveis, o que permite controlar o fluxo e a potência gerada, maximizando o rendimento do sistema. Possui um tempo de entrada em funcionamento de aproximadamente 2 minutos, desde o momento em que a turbina começa a girar até o alternador entrar na velocidade de sincronismo.

A tensão gerada pelo alternador de 700 V é depois elevada para os 15 kV pelo transformador da Figura 6.5. Depois de passar pelos equipamentos de corte e proteção é realizado o transporte pelas linhas de transmissão até ao PT da MGC AT, onde é interligada à rede, conforme visto anteriormente.



Figura 6.5. Transformador da CMH.

6.3 Produção de Energia Elétrica

Segundo o relatório de monitorização agrometeorológica e hidrológica em Portugal continental, o período de abril a setembro de 2017 foi extremamente seco, com valores mensais da quantidade de precipitação sempre inferiores ao valor médio. O mês de setembro de 2017 foi mesmo classificado como extremamente seco, sendo o mês mais seco desde 1931. O valor médio de precipitação foi de 2,0 mm, sendo o valor normal do período 1971-2000, de 42,1 mm [47]. Este período de seca extrema condiciona como se verá de seguida a produção de energia elétrica na CMH.

A partir da Figura 6.6 verifica-se a evolução da produção de energia ao longo de 2017. É evidente através da tendência da produção de energia que durante as estações de inverno e primavera houve uma produção de energia bem mais elevada do que durante as restantes estações. O valor mínimo de energia produzida foi de 49,314 MWh no mês de agosto e o valor máximo de energia produzida foi de 506,625 MWh no mês de fevereiro, produzindo um total de 2106,761 MWh ao longo do ano.

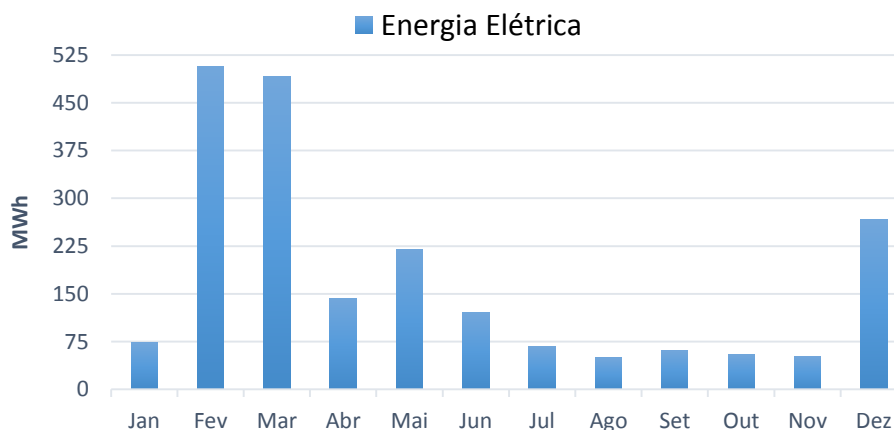


Figura 6.6. Evolução mensal da produção de energia elétrica na CMH em 2017.

6.4 Conclusões

A energia hidroelétrica é uma fonte de energia renovável, limpa que não produz gases com efeito de estufa nem outros agentes poluentes. Adicionalmente, é uma tecnologia duradoura, robusta e os sistemas podem durar décadas sem grandes investimentos.

As centrais hídricas permitem também que Portugal possa alcançar compromissos e metas internacionais, em particular as estabelecidas no Protocolo de Quioto, no Acordo de Paris e na legislação comunitária. Adicionalmente, é uma tecnologia duradoura e robusta e os sistemas podem durar décadas grandes investimentos.

Por outro lado, durante os meses de baixa precipitação as centrais ficam condicionadas à produção de energia devido aos volumes de água reduzidos armazenados nas albufeiras, podendo até ter um impacto económico negativo no custo da energia. O impacto ecológico de uma CMH é mínimo, no entanto atacam os ecossistemas, podem também levar à destruição de terras férteis à agricultura, da fauna, incluindo os habitats naturais de animais.

Capítulo 7

Conclusão

7.1 Conclusões Gerais

No Capítulo 1 apresentou-se a evolução dos custos de energia elétrica e do gás natural para os consumidores industriais em Portugal, em comparação com os custos de energia da zona euro. Portugal apresentou-se no primeiro semestre de 2017 com o custo de energia elétrica superior à média europeia, invertendo a tendência de custos inferiores das últimas décadas. Para o gás natural os custos superiores das últimas décadas, aproximaram-se da média dos países europeus no segundo semestre de 2016, invertendo a tendência no primeiro semestre de 2017, onde o custo foi inferior. Exibiram-se os consumos de energia da empresa MGC Acabamentos Têxteis, nomeadamente da energia elétrica e do gás natural ao longo do ano de 2017. Apresentaram-se os indicadores energéticos (consumo específico e intensidade carbónica) que são necessários para avaliar o desempenho da empresa, para o cumprimento das metas e da obtenção de incentivos pelos operadores da instalação, em particular a isenção do imposto sobre produtos petrolíferos e energéticos nas faturas de energia, no âmbito do Acordo de Racionalização dos Consumos de Energia. Conforme as metas desse acordo, tendo como ano base 2012, a empresa quase atingiu no primeiro ano a meta dos 6 % de melhoria no consumo específico (5,1 %). Durante o ano de 2017, o consumo específico de energia atingiu uma melhoria de 20,8 % relativamente ao ano base. Manteve ainda desvios poucos significativos dos valores históricos de intensidade carbónica ao longo dos últimos anos.

No Capítulo 2 apresentaram-se os principais problemas de qualidade de energia elétrica (QEE), como, por exemplo, a variação da amplitude da tensão, harmónicas de tensão e de corrente, baixo fator de potência, interferências, desequilíbrios de tensão. De forma a contrariar o aumento destas perturbações e com o surgimento da Diretiva de Conselho nº 85/374, a eletricidade é definida como um produto e tornou-se obrigatório definir as suas características. Em Portugal, utiliza-se como base a norma portuguesa EN 50160 que define os limites aceitáveis que garantem a qualidade do serviço.

As causas da falta de QEE podem estar relacionadas com a própria exploração da rede elétrica, isto é, pela gestão e funcionamento da rede e manutenção. Podem ainda relacionarem-se com falhas nas instalações dos consumidores finais, tais como o arranque de grandes cargas, curto-circuitos, poluição emitida para a rede (harmónicas de corrente,

interferências), ou, a fatores ambientais, fenómenos meteorológicos e acidentes. Apresentaram-se também as principais características e potencialidades do analisador de energia utilizado na conduta da monitorização dos parâmetros da QEE, o *Fluke 434*.

No Capítulo 3 foram exibidos os principais constituintes do posto de transformação (PT), explicando a sua principal função e a forma como estes estão organizados e interligados. Foi também realizada a análise à QEE no secundário dos três transformadores existentes. Das interrupções de curta duração registadas, as principais causas foram as más condições atmosféricas, mas também uma por acidente durante o abate de árvores junto às linhas de média tensão.

Verificou-se que as baterias de condensadores eram desligadas durante os períodos de vazio e super vazio, de forma a não pagar energia reativa fornecida (capacitiva). Além disso, observou-se também que haviam condensadores danificados e fusíveis em aberto num dos grupos das baterias de condensadores.

A distorção harmónica total da tensão (THDv) registada no quadro geral de baixa tensão 1 (QGBT1) não ultrapassou os 3,45 % nas três fases, já no quadro geral de baixa tensão 2 (QGBT2) a THDv máxima registada foi de 5,76 %, também nas três fases. Constatou-se assim, que durante o período monitorizado a THDv nos dois QGBT foi sempre inferior a 8 %, correspondendo ao limite máximo estabelecido pela NP EN50160.

Durante a monitorização ao QGBT2 registou-se uma tensão anormal entre neutro e terra, cerca de 25 V durante o regime de produção, o que não seria de esperar uma vez que o esquema de neutro é TT (terra de serviço e terra de proteção) em elétrodos independentes. Após a medição da terra de serviço do QGBT2, concluiu-se que o valor da resistência da terra de serviço era de tal forma elevado que alguns problemas que surgiam sempre que havia uma passagem direta entre uma das fases e a terra, os equipamentos de ação diferencial não atuavam.

Em ambos os QGBT, foi notório o desequilíbrio de cargas durante o fim de semana (paragem de produção), refletindo-se tanto na distorção harmónica da corrente, quer no aumento do desequilíbrio das tensões, como também na corrente de neutro.

No Capítulo 4 apresentou-se a zona fabril da empresa, a forma como está caracterizada e como são distribuídos os quadros elétricos pelos diferentes pisos. Realizou-se a análise aos parâmetros da QEE das cargas com maior consumo de energia elétrica durante o ano de 2017: os compressores de ar comprimido, a râmola das malhas, a râmola 1, a estação de tratamento de águas residuais (EPTAR) e a râmola 6.

No Capítulo 5, apresentou-se o grupo gerador de emergência existente na instalação da empresa. Este equipamento é de grande importância em caso de falha de energia, garantindo

a continuidade dos serviços informáticos, a alimentação das luzes de emergência e do sistema de segurança contra incêndios. Realizou-se ainda a monitorização à QEE no quadro de distribuição da energia do gerador. Durante o período monitorizado verificou-se um desequilíbrio considerável das cargas pelas três fases. É na fase L_2 que estão ligadas a maioria das cargas (monofásicas) e na fase é L_3 que se encontram menos cargas ligadas. Comparativamente com a norma NP EN50160 os valores eficazes da tensão no gerador estiveram dentro dos limites estipulados. A THDv apresentou em média, valores ligeiramente superiores aos 8 %. A harmónica com mais contribuição foi a de 3ª ordem, com valores médios de 8,7 %, pelo que está consideravelmente acima dos 5 % também determinados pela norma. Foi ainda registada em média, uma frequência fundamental da tensão gerada fora dos limites estabelecidos, variando entre os 4,44 % e 4,84 % acima dos 50 Hz.

No Capítulo 6 exibiu-se a central mini-hídrica (CMH) que faz interligação no PT da empresa. As pequenas centrais hidroelétricas representam uma alternativa à utilização de combustíveis fósseis e não contribuem para as emissões de gases de efeito estufa ou outros poluentes atmosféricos. Durante o ano de 2017, classificado como um ano de seca extrema em alguns meses, foi evidente redução da produção de energia durante os meses de baixa precipitação.

A principal limitação encontrada na realização desta Dissertação de Mestrado consistiu em utilizar apenas um analisador de energia ao longo das monitorizações. Desde modo não foi possível, por exemplo, monitorizar os dois transformares ligados em paralelo e que alimentam o QGBT2 simultaneamente, analisar todos os parâmetros da QEE apresentados para o mesmo período.

Em seguida são listadas as principais conclusões obtidas com o trabalho realizado:

- Os encargos com energia são transversais a qualquer indústria representando um peso significativo nas despesas totais das empresas.
- Os custos associados aos consumos de energia apresentados, afetados pelos problemas de QEE, podem diminuir a competitividade da empresa face a outras empresas em outros países europeus, onde os custos de energia de energia elétrica são inferiores.
- A superação das metas dos indicadores energéticos só foi alcançada devido ao cumprimento das medidas elaboradas no plano de racionalização dos consumos de energia. Algumas das medidas implementadas foram: a instalação de um permutador de calor ar-água nas râmolas, iluminação eficiente e motores de alto rendimento.
- As baterias de condensadores desligavam de acordo com os períodos de vazio para evitar fornecimento de energia reativa, todavia, não havia essa necessidade porque eram os reguladores das baterias que tinham um ajuste incorreto.

- Com o desligar das baterias de condensadores durante as horas de vazio, as perdas por efeito de Joule nos barramentos dos QGBT e nos transformadores aumentavam significativamente com a diminuição do FPD.
- Apesar de serem identificados condensadores danificados e fusíveis interrompidos, estes não afetavam de forma significativa o normal funcionamento da correção do FPD.
- Como os reguladores das baterias de condensadores não monitorizam as três fases, podem em determinados momentos existirem ajustes incorretos do FPD, uma vez que as cargas não estão 100 % equilibradas.
- As interrupções do serviço mesmo que de curta duração, causam prejuízos significativos no processo produtivo, uma vez que algumas das máquinas trabalham em regime contínuo, podendo danificar algumas dezenas de metros tecido/malha ou até mesmo incendiar a matéria prima dentro das estufas das râmolas.
- Constatou-se que maioria da potência instalada nas máquinas corresponde aos os motores elétricos, e que quando alimentados por variadores eletrónicos de velocidade possibilita uma redução da energia consumida, assim como uma redução da corrente de arranque dos motores. Porém, as correntes distorcidas geradas pelos conversores eletrónicos ao circularem pelas linhas poluem consideravelmente a rede elétrica da empresa, aumentando desta forma a THDv.
- De todas as cargas analisadas, a ETAR foi a única que não revelou uma THDi superior a 10 % durante o período amostrado, isto porque não são utilizados conversores eletrónicos de potência na alimentação dos motores. No entanto a variação da THDv na ETAR foi similar à da râmola 1 variando entre os 4 % e os 6 % aproximadamente, e onde a râmola 1 apresentou registos da THDi na ordem dos 40 %.
- Apesar de em alguns momentos, a THDi na râmola das malhas ter atingido valores acima dos 100 %, causado eventualmente pelo *standby* dos conversores eletrónicos, não provocou muita perturbação na rede uma vez que a máquina se encontrava em *setup*, e os valores eficazes das correntes seriam insignificantes.
- Conclui-se que apesar do baixo conteúdo harmónico da corrente na ETAR, comparativamente com o da râmola 1, as tensões de alimentação são igualmente distorcidas. Ou seja, as tensões já vêm distorcidas da fonte de tensão.
- Para reduzir a THDi uma solução será recorrer à instalação de filtros passivos sintonizados para as harmónicas de corrente de 5ª ordem, pois é esta a harmónica que mais contribui para a distorção harmónica nos dois QGBT, assim como nas restantes cargas analisadas. Outra solução a implementar é a instalação de filtros ativos de potência, nomeadamente filtros ativos paralelos. Em suma, os filtros ativos paralelos

compensam de forma contínua e flexível a distorção harmónica, ao passo que os filtros passivos apenas filtram as harmónicas para as quais foram previamente sintonizados. Quando as tensões de alimentação têm distorção harmónica, os filtros passivos absorvem valores elevados de corrente, nas frequências harmónicas para as quais estão sintonizados. Podem ainda ocorrer fenómenos de ressonância entre o filtro passivo e as outras cargas ligadas à rede, com efeitos inesperados [48]. Por outro lado, os filtros ativos apresentam um sistema de controlo mais complexo e custos superiores devido a um maior uso de componentes, nomeadamente os conversores de potência.

- A causa para o elevado valor da impedância de terra de serviço estava na interrupção do cabo que interliga o neutro do QGBT2 aos eléctrodos de terra. Com a realização de um novo aterramento ficou garantido o correto funcionamento dos dispositivos de protecção em caso de defeito, e novamente assegurada a protecção de pessoas e bens.
- Feita a análise aos parâmetros apresentados da QEE, conclui-se que não existiram desvios significativos no PT, de acordo com a NP EN 50160.
- Conclui-se que durante o período amostrado, as cargas com maior consumo de energia eléctrica também não registaram eventos fora dos limites estabelecidos pela norma.
- É presumível que a elevada THDv no gerador, com uma contribuição relevante da harmónica de 3ª ordem, seja manifestada pelas cargas monofásicas estarem desequilibradas. Deste modo, será benéfico para o gerador realizar o equilíbrio das cargas pelas três fases.
- Ao analisar a produção de energia eléctrica conclui-se que a produção de energia eléctrica na CMH tem uma componente aleatória associada sobretudo à precipitação.
- A elaboração deste estudo em ambiente industrial permitiu uma maior aproximação à realidade profissional, correspondendo a um enriquecimento pessoal e uma grande mais-valia profissional.

7.2 Sugestões para Trabalho Futuro

A análise e inspeção da QEE tanto no PT como nas cargas monitorizadas permitiu identificar possíveis melhorias tanto dos equipamentos como na instalação:

- Para a instalação eléctrica geral será necessário atualizar esquemas eléctricos através de desenho assistido por computador, a partir dos organogramas atualizados do Anexo 2.
- Realizar o estudo do impacto que tem o FPD das cargas aqui apresentadas, bem como das restantes cargas, nomeadamente as mais distantes do PT. Isto, irá permitir

compreender a necessidade (custo/benefício) de compensar o FPD localmente, evitando assim perdas por efeito de joule na cablagem entre as respetivas cargas e o PT.

- Monitorizar os parâmetros da QEE das restantes cargas, se possível com mais do que um analisador de energia, de forma a obter diferentes registos para o mesmo período de monitorização e em locais diferentes.

Lista de Referências

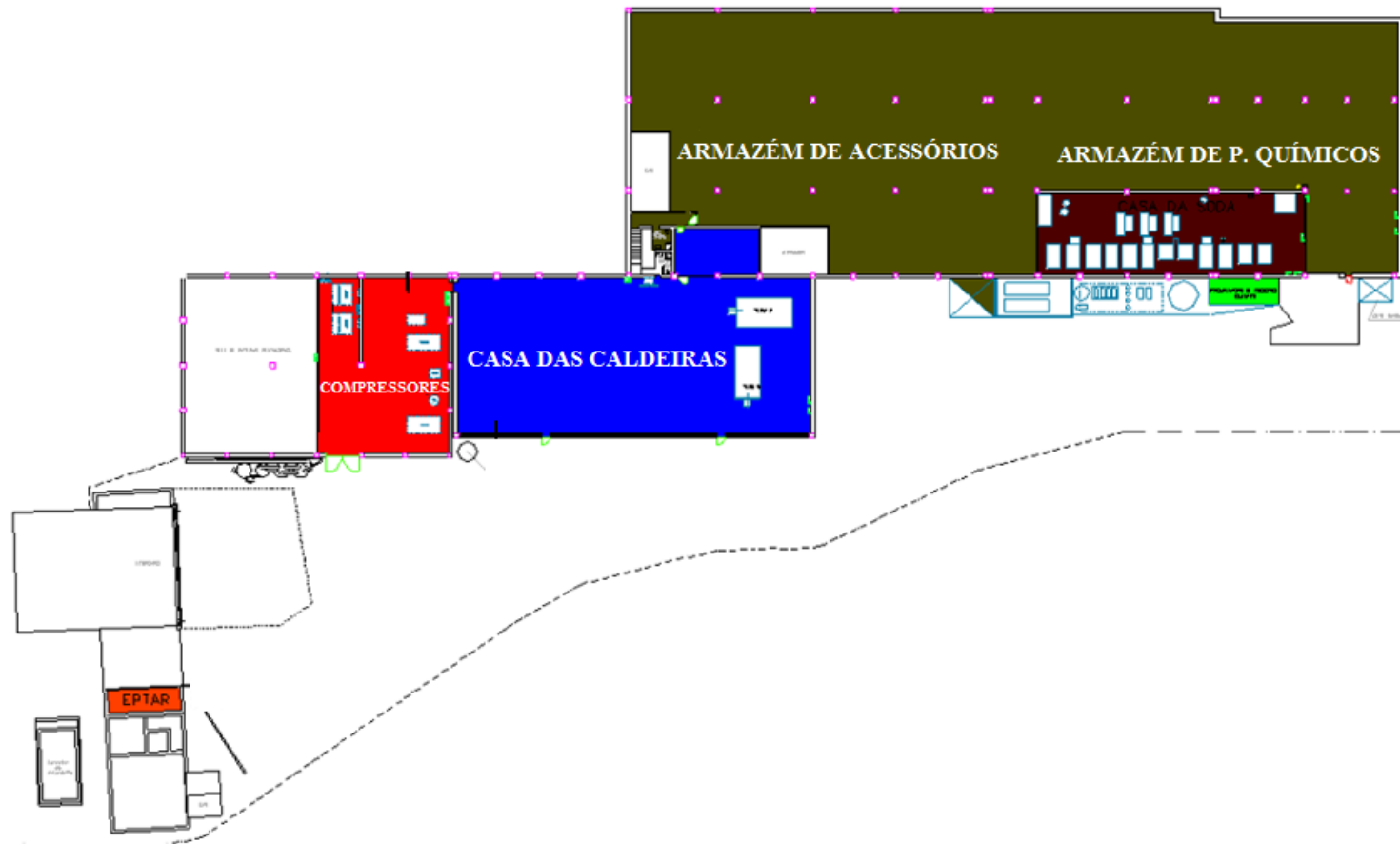
- [1] The World Bank, “Energy use (kg of oil equivalent per capita)”. [Em linha]. Disponível em: <https://data.worldbank.org/indicador/EG.USE.PCAP.KG.OE?end=2015&start=1960>. [Acedido: 25-Fev-2018].
- [2] M. João e L. Ramos, “Modelo Energético da Somelos Acabamentos”, Dissertação do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica- Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2011. <https://hdl.handle.net/10216/63294>.
- [3] DGEG, “Fatura Energética Portuguesa 2017”, Nº 34, 2018. [Em linha]. Disponível em: <http://www.dgeg.gov.pt/>. [Acedido: 24-Mai-2018].
- [4] ERSE, “Resumo Informativo- Comparação Preços Eurostat”, 2017. [Em linha]. Disponível em: http://www.erse.pt/PT/imprensa/destaques/2017/Comunicados/resumo_informativo_eurostat_2017.pdf. [Acedido: 18-Mar-2018].
- [5] ERSE, “Qualidade de Serviço”, 2017. [Em linha]. Disponível em: <http://www.erse.pt/pt/electricidade/qualidadedeservico/Paginas/default.aspx>. [Acedido: 18-Mar-2018].
- [6] ERSE, “Relatório da Qualidade De Serviço do Setor Elétrico”, 2016. [Em linha]. Disponível em: http://www.erse.pt/pt/electricidade/qualidadedeservico/relatoriodaqualidadedeservico/Documents/Relatório_QS_SE-2016.pdf. [Acedido: 18-Mar-2018].
- [7] ADENE, “SGCIE - Enquadramento e Objetivos”. [Em linha]. Disponível em: <http://sgcie.publico.adene.pt/SGCIE/Paginas/Enquadramento.aspx>. [Acedido: 04-Abr-2018].
- [8] ADENE, “SGCIE- Metas”, 2016. [Em linha]. Disponível em: <http://sgcie.publico.adene.pt/SGCIE/Paginas/Metas.aspx>. [Acedido: 20-Mai-2018].
- [9] L. Energy, “Poor Power Quality costs European business more than € 150 billion a year”, European Power Quality Survey. pp. 1–2, 2007.
- [10] M. H. J. Bollen, “Understanding power quality problems : voltage sags and interruptions”, IEEE Press. ISBN: 9780780347137, 2000.
- [11] EDP, “Manual da qualidade da energia eléctrica”, 2005. [Em linha]. Disponível em: <https://www.edpdistribuicao.pt/pt/qualidade/documentacao/Pages/qualidadedeEnergiaEletrica.aspx>. [Acedido: 12-Jun-2018].
- [12] Infocontrol, “A importância da monitorização da qualidade da energia”. [Em linha]. Disponível em: <https://www.infocontrol.pt/artigos-tecnicos/monitorizacao-da-qualidade-da-energia/>. [Acedido: 11-Jun-2018].
- [13] D. da República, “Regulamento de Qualidade de Serviço do Setor Elétrico”, Regulamento n.º 455/2013, 2013. [Em linha]. Disponível em: http://www.erse.pt/pt/electricidade/regulamentos/qualidadedeservico/Documents/DR_Regulamento_455-2013-RQS.pdf. [Acedido: 08-Mai-2018].
- [14] D. da República, “Regulamento da Qualidade de Serviço do Setor Elétrico e do Setor do Gás Natural”, Regulamento n.º 629/2017, 2017. [Em linha]. Disponível em: <https://dre.pt/application/conteudo/114385023>. [Acedido: 30-Abr-2018].
- [15] M. Sen Kurt, M. E. Balci, e S. H. E. A. Aleem, “Algorithm for estimating derating of induction motors supplied with under / over unbalanced voltages using response surface methodology”, pp. 1–7, 2017.
- [16] P. Eduardo Almeida Xavier, “Analisador da Qualidade de Energia Baseado em DSP”, Dissertação de Mestrado- Universidade Técnica de Lisboa, 2011.

- [17] José Gabriel Oliveira Pinto, “Nova Topologia de UPQC sem Transformadores para Compensação de Problemas de Qualidade de Energia Elétrica”, Tese de Doutoramento em Engenharia em Eletrónica e de Computadores. Universidade do Minho, 2011. <http://hdl.handle.net/1822/19822>.
- [18] M. Kaur, S. Kakar, e D. Mandal, “Electromagnetic interference”, 2011 3rd International Conference on Electronics Computer Technology, vol. 4. DOI: 10.1109/ICECTECH.2011.5941844. ISSN: 0970-9185, pp. 1–5, 2011.
- [19] RQS e ERSE, “Manual de boas práticas para a manutenção de postos de transformação de cliente”, 2015. [Em linha]. Disponível em: http://campanhaqualidadeservico.erse.pt/files/iniciativas/1/Manual_Boas_Praticas_Manutenc_ao_PTC.pdf. [Acedido: 29-Abr-2018].
- [20] L. Afonso e J. S. Martins, “Qualidade da energia eléctrica”, Revista o Electricista, nº 9, 3º trimestre. DOI: 10.1109/COBEP.2009.5347593, pp. 66–71, 2004.
- [21] ABB, “Power factor correction and harmonic filtering in electrical plants”, Technical Application Papers. [Em linha]. Disponível em: https://d2z8ufzpcqvblm.cloudfront.net/sites/www.voltimum.co.uk/files/fields/attachment_file/gb/flipbooks/others/K/201201119822.pdf. [Acedido: 23-Set-2018].
- [22] J. L. Afonso, J. G. Pinto, e H. Gonçalves, “Active Power Conditioners to Mitigate Power Quality Problems in Industrial Facilities”, em Power Quality Issues, DOI: 10.5772/53189, 2013.
- [23] J. S. Martins, C. Couto, e J. L. Afonso, “Qualidade de Energia Elétrica”, 3º Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia. DOI: 10.1109/COBEP.2009.5347593. ISBN: 9781424433698, p. 14, 2003.
- [24] Iberdrola, “Manual de Boas Práticas Energéticas”. [Em linha]. Disponível em: https://www.iberdrola.pt/02sicb/gc/prod/en_US/aboutus/docs/MANUAL_BOAS_PRACTICAS.pdf. [Acedido: 30-Abr-2018].
- [25] ERSE, “Parte E”, Despacho n.º 12605/2010, 2010. [Em linha]. Disponível em: http://www.erse.pt/pt/legislacao/diplomas/Documents/Tarifas_e_Precos/Despacho_12605_2010.pdf. [Acedido: 03-Mai-2018].
- [26] EDP Distribuição, “Manual de ligações à rede elétrica de serviço público”, Guia técnico e logístico de boas práticas, 2018. [Em linha]. Disponível em: https://www.edpdistribuicao.pt/pt/profissionais/EDP_Documents/EDPDistribuição_Manual_Ligações_à_Rede_2018_9ª_edição.pdf. [Acedido: 05-Nov-2018].
- [27] ERSE, “Ciclo semanal para todos os fornecimentos em Portugal Continental”. [Em linha]. Disponível em: <http://www.erse.pt/pt/electricidade/tarifaseprecos/periodoshorarios/Paginas/CicloSemanalTodosFornecPtCont.aspx>. [Acedido: 25-Set-2018].
- [28] F. M. Pimentel De Oliveira, “Análise da Qualidade de Energia Elétrica em Edifícios de Serviços e Comércio”, Dissertação de Mestrado- Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2016.
- [29] IEEE, “Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality”, Ieee Std1159-2009. DOI: 10.1109/IEEESTD.2009.5154067, pp. 1–6.
- [30] J. N. M. Costa, “Sistema de monitorização da qualidade e consumo de energia elétrica”, Dissertação de Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores- Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2014.
- [31] Fluke Corporation, “Analisador de Energia Fluke 434 Série II”. [Em linha]. Disponível em: <https://www.fluke.com/pt-pt/produto/testes-eletricos/analísadores-de-qualidade-de-energia/medidores-de-qualidade-de-energia-trifásica/fluke-434-series-ii>. [Acedido: 13-Set-2018].

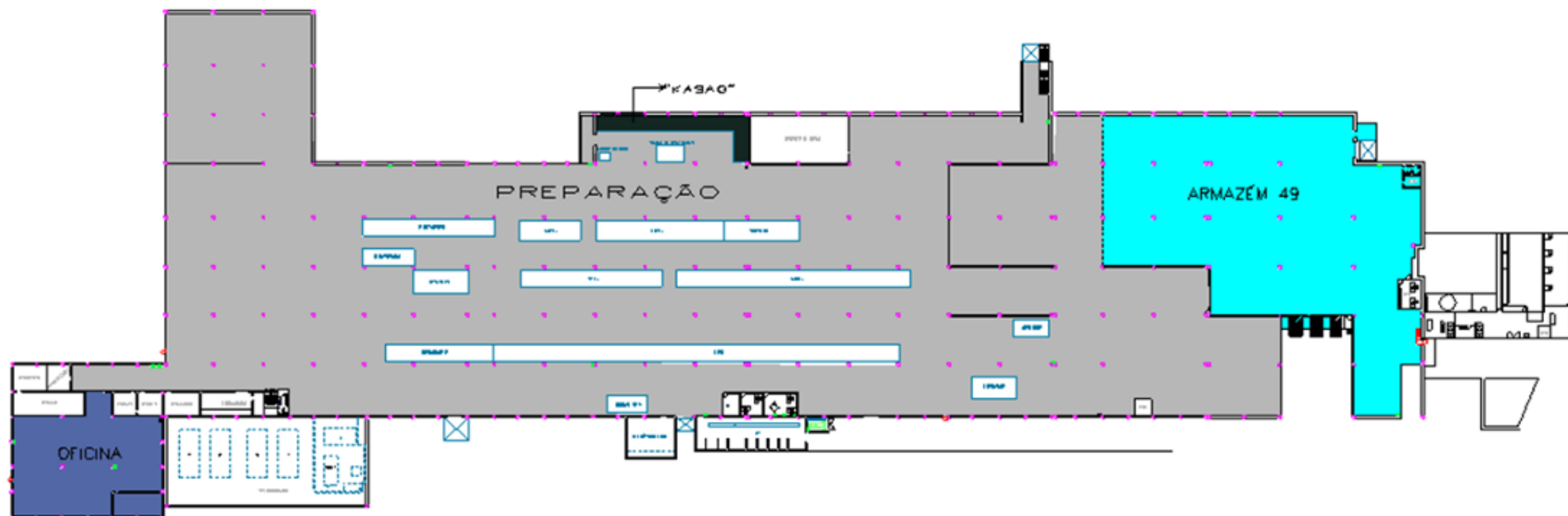
- [32] F. Corporation, “Fluke 434/435 Three Phase Power Quality Analyzer Users Manual”, 2008. [Em linha]. Disponível em: http://assets.fluke.com/manuals/434_435_umeng0300.pdf. [Acedido: 14-Nov-2017].
- [33] Fluke Corporation, “O ABC das pinças amperimétricas”, 2014. [Em linha]. Disponível em: <https://fluke.syncforce.com/efulfillment/11715-por>. [Acedido: 05-Jul-2018].
- [34] Fluke Corporation, “i400s Sonda de Corrente AC”. [Em linha]. Disponível em: <https://www.fluke.com/pt-pt/produto/acessorios/pincas-de-corrente/fluke-i400s>. [Acedido: 13-Set-2018].
- [35] Infocontrol, “TI’s - Transformadores de Corrente Abertos e Fechados”. [Em linha]. Disponível em: <https://www.infocontrol.pt/equipamentos-de-medida-e-de-qualidade-de-energia/tis-transformadores-de-corrente/>. [Acedido: 10-Jun-2018].
- [36] Fluke Corporation, “i430 flex Pinça de Corrente AC”. [Em linha]. Disponível em: <http://www.fluke.com/fluke/ptpt/Acessorios/Pincas-amperimetricas/i430-flex.htm?PID=56304>. [Acedido: 10-Jun-2018].
- [37] S. Bhattacharyya e S. Cobben, “Ensuring public safety through proper earthing in low-voltage networks”, 24th International Conference & Exhibition on Electricity Distribution (CIRED). ISSN 2515-0855. DOI: 10.1049/oap-cired.2017.1261, pp. 617–620, 2017.
- [38] António Arnaldo Lima dos Anjos Morais, “Programa de Cálculo de Curto-Circuitos”, General Eletric, Faculdade Engenharia Universidade do Porto. [Em linha]. Disponível em: <https://paginas.fe.up.pt/~ee95079/GECC-Relatorio.htm>. [Acedido: 22-Set-2018].
- [39] P. A. B. de Sá, “Dimensionamento de Sistemas de Compensação do Fator de Potência com Filtragem Passiva de Harmónicos”, Dissertação de Mestrado, 2013. [Em linha]. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10400.22/6272>. [Acedido: 03-Jul-2018].
- [40] J. N. dos Santos, “Compensação Do Factor De Potência”, Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, 2006. [Em linha]. Disponível em: https://paginas.fe.up.pt/~jns/material_didatico/CorrecaoFactorPotenciaFinal.pdf. [Acedido: 09-Ago-2018].
- [41] INCM, Ed., “Regras Técnicas das Instalações Elétricas de Baixa Tensão”, Regulamento e licenças para instalações elétricas (5a Edição revista e atualizada). ISBN: 9789722724302, 2016.
- [42] J. E. Almeida, “Neutro à Terra”, Revista Técnico-Científica |Nº10|Segurança, 2012. [Em linha]. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10400.22/3608>. [Acedido: 14-Out-2018].
- [43] J. Deere, “4045HF158 PowerTech Manual”. [Em linha]. Disponível em: https://mototech.ru/manuals/dvigatel_john_deere_4045hf158.pdf. [Acedido: 18-Nov-2018].
- [44] N. A. Generators, “Alternators Series SG2”. [Em linha]. Disponível em: <https://www.cial.no/file/andre/nsm-sg2.pdf>. [Acedido: 18-Nov-2018].
- [45] F. Tiago Belerique, “A bombagem hidroelétrica em Portugal no quadro do mercado ibérico”, Dissertação de Mestrado- Universidade Nova de Lisboa, 2015. [Em linha]. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10362/16247>. [Acedido: 12-Dez-2018].
- [46] “Google Maps”. [Em linha]. Disponível em: <https://www.google.pt/maps/@41.4383817,-8.3736475,136m/data=!3m1!1e3>. [Acedido: 03-Dez-2018].
- [47] M. e A. dos E. da S. Comissão Permanente de Prevenção, “Monitorização Agrometeorológica e Hidrológica”, Balanço do ano hidrológico 2016/17, 2017. [Em linha]. Disponível em: http://www.gpp.pt/images/Agricultura/Seca/Relatorio_Monitorizaco_30-SETEMBRO_2017.pdf. [Acedido: 24-Dez-2018].
- [48] João. L. Afonso e Júlio. S. Martins, “Qualidade de energia eléctrica na indústria”, Book Chapter in “Ciclo de Seminários – As Oportunidades das Ameaças: A Qualidade da Energia Eléctrica”, 2003, EUVEO, ISBN: 972-8063-15-6. pp. 1–35. <http://hdl.handle.net/1822/1499>.

Anexo 1

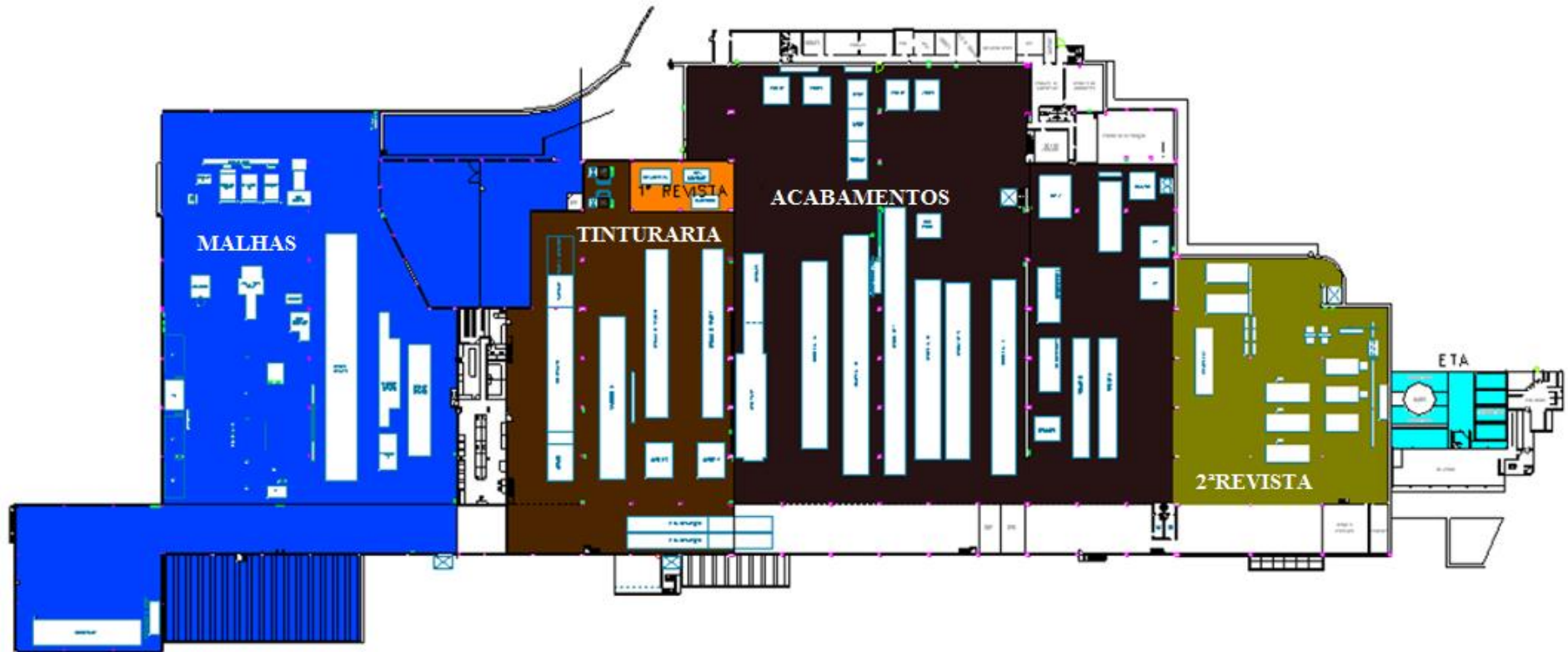
Piso 0



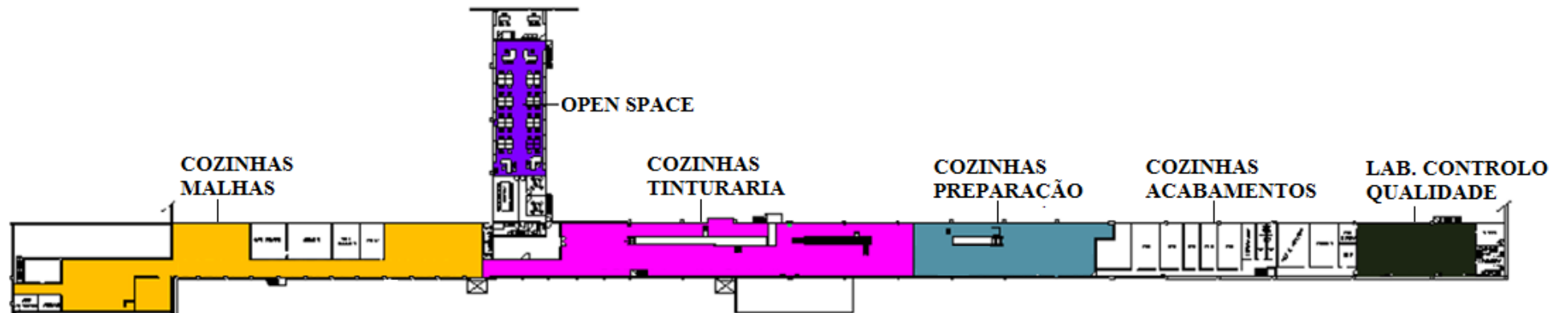
Piso 1



Piso 2



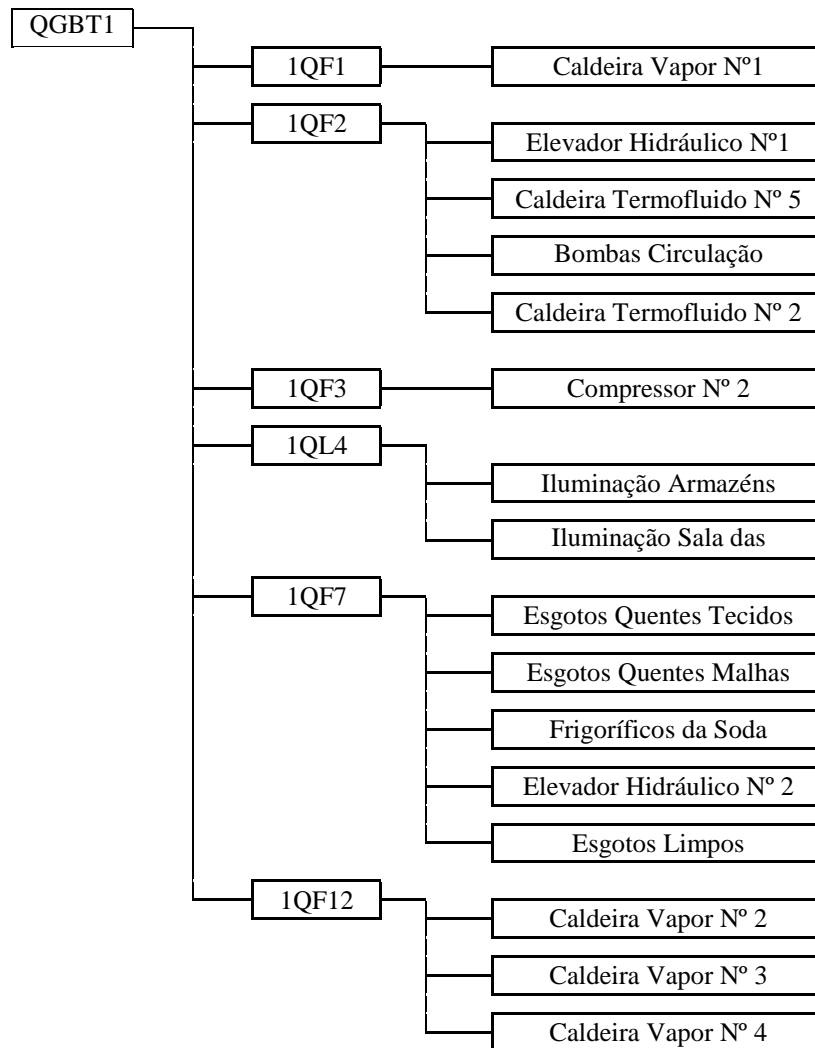
Piso 3



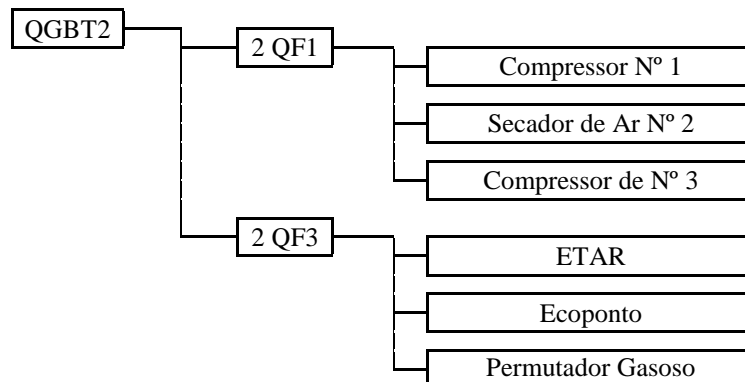
Anexo 2

Piso 0

Organograma dos quadros parciais do piso 0 ligados ao QGBT1.

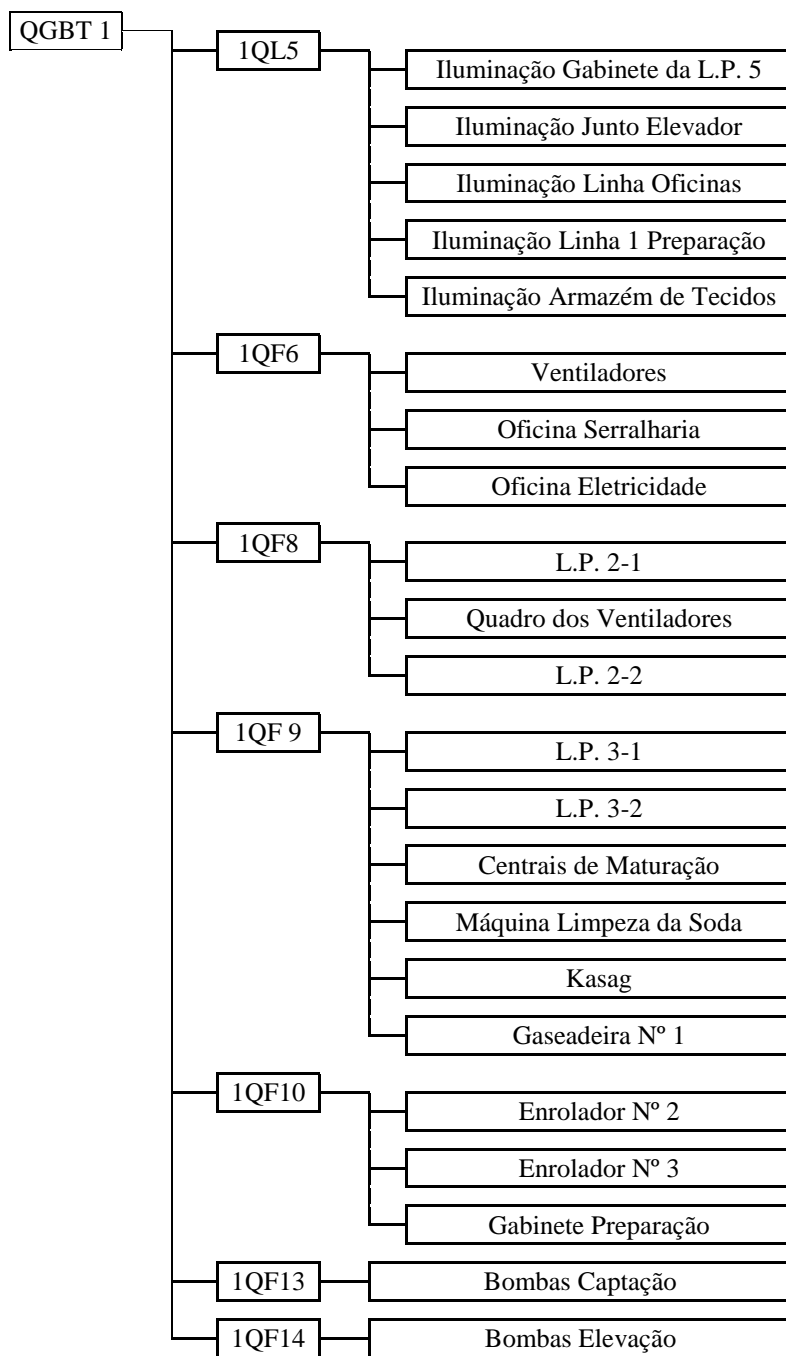


Organograma dos quadros parciais do piso 0 ligados ao QGBT2

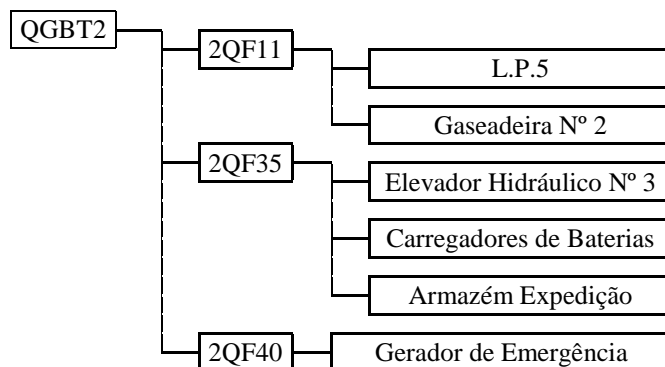


Piso 1

Organograma dos quadros parciais do piso 1 ligados ao QGBT1.

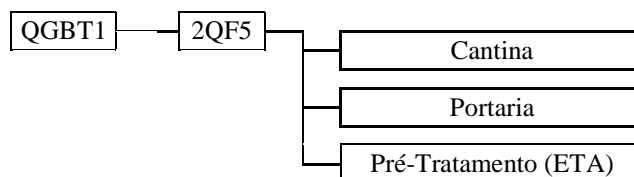


Organograma dos quadros parciais do piso 1 ligados ao QGBT2.

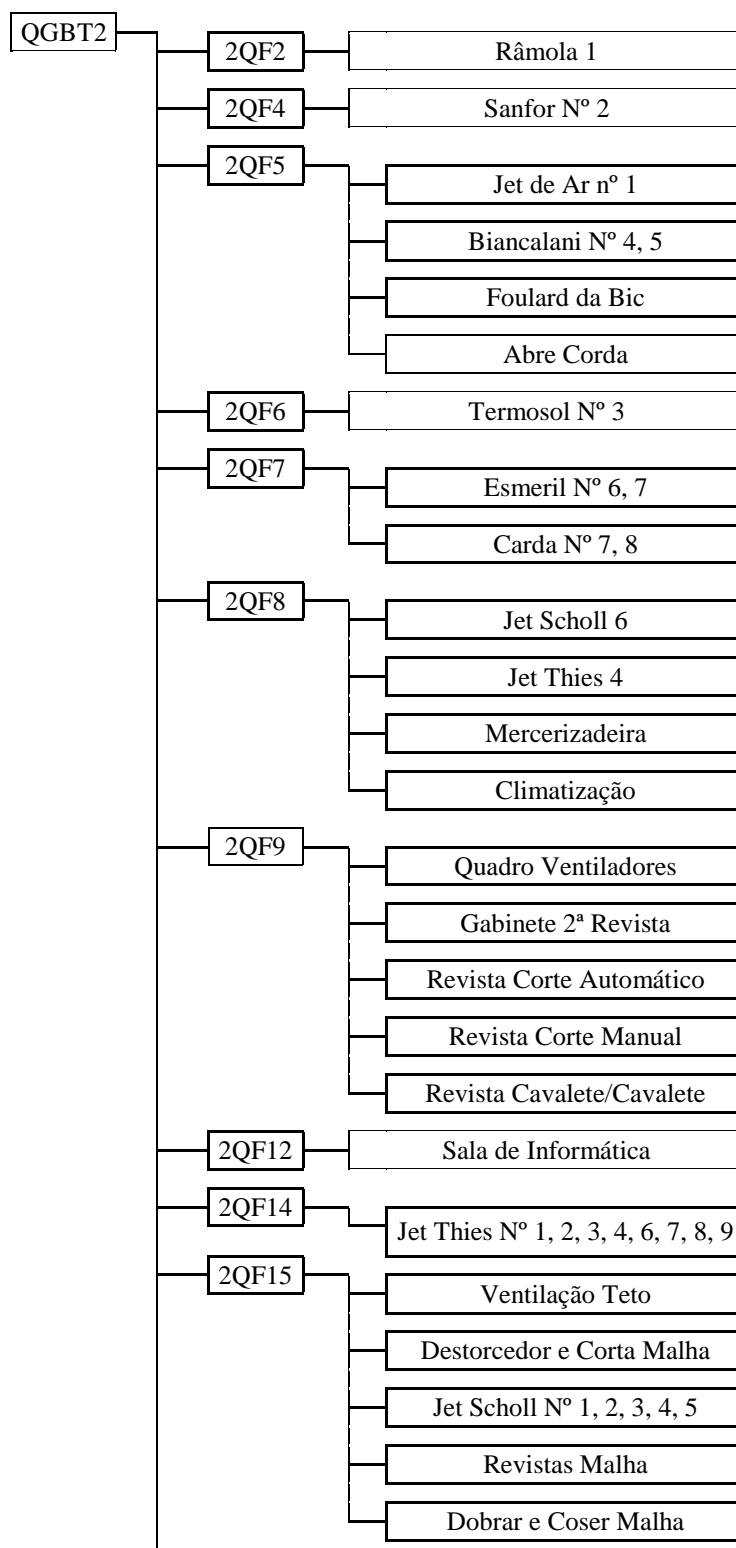


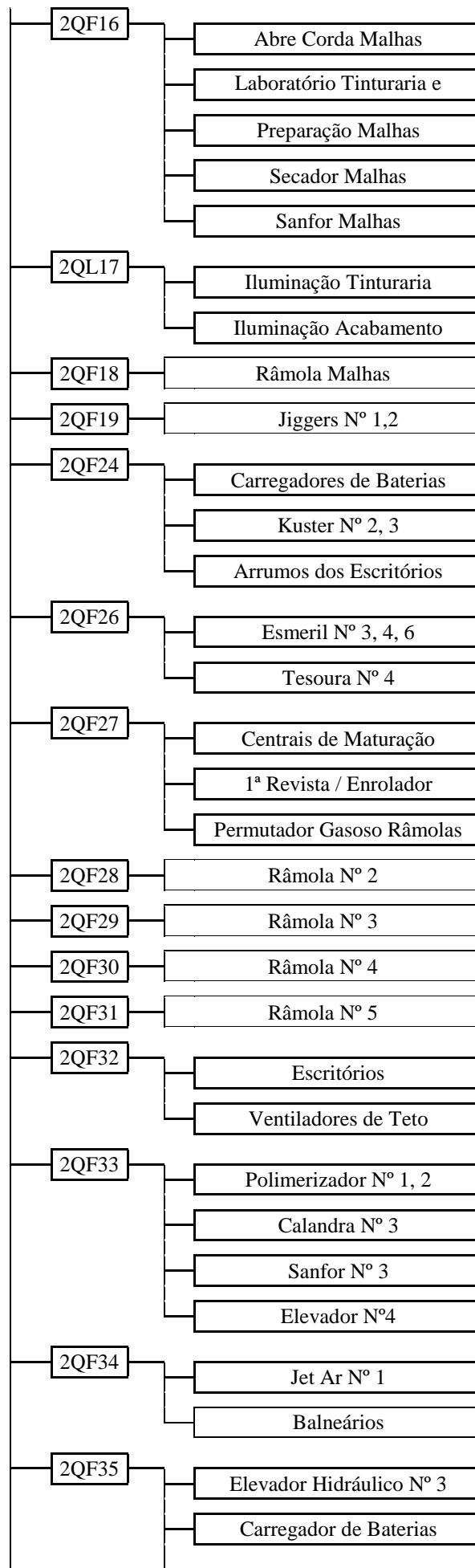
Piso 2

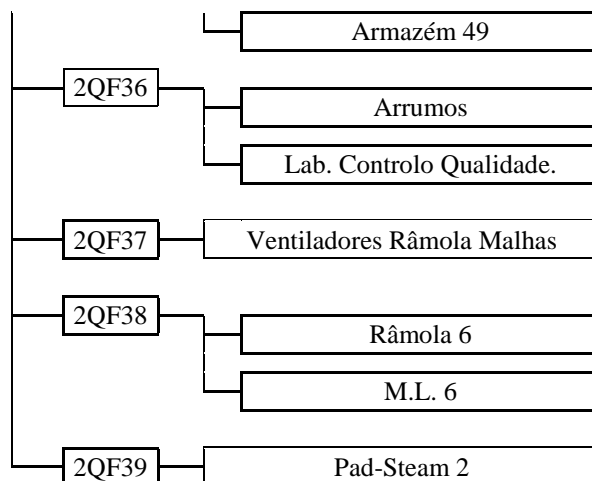
Organograma dos quadros parciais do piso 2 ligados ao QGBT1.



Organograma dos quadros parciais do piso 2 ligados ao QGBT2.







Piso 3

Organograma dos quadros parciais do piso 3 ligados ao QGBT2.

