



HARMÓNICAS E DESEQUILÍBRIOS PROVOCADOS PELOS SISTEMAS ELÉTRICOS CONSTITUINTES DE UMA INSTALAÇÃO EÓLICA

BRUNO MIGUEL CARNAPETE ALVES MENEZES

Setembro de 2019

HARMÓNICAS E DESEQUILÍBRIOS PROVOCADOS PELOS SISTEMAS ELÉTRICOS CONSTITUINTES DE UMA INSTALAÇÃO EÓLICA

Bruno Miguel Carnapete Alves Menezes



Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Eléctricos de Energia

2019

Relatório elaborado para satisfação parcial dos requisitos da Unidade Curricular de DSEE -
Dissertação do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia

Candidato: Bruno Miguel Carnapete Alves Menezes, Nº 1100048,
email_1100048@isep.ipp.pt

Orientação científica: Fernando Maurício Teixeira De Sousa Dias, fmd@isep.ipp.pt



Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia

2019

Agradecimentos

A motivação maior para o conhecimento é a constante procura do saber e da melhoria contínua através da aprendizagem e do desenvolvimento individual. Mas a concretização desse objetivo não é possível sem a ajuda e o contributo de outros. Por isso, gostaria de expressar desde já um especial agradecimento pelo apoio e ajuda ao

Professor Doutor Fernando Maurício Dias, meu orientador nesta tese, pela disponibilidade e orientação, ao longo de todo o período de trabalho, pelas correções, sugestões, questões e críticas construtivas potenciadoras da melhoria da qualidade do trabalho.

Professor Doutor José Manuel Ribeiro Baptista da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, pelo saber científico e indicações transmitidas, pelo apoio no ultrapassar de alguns desafios, nomeadamente na componente do programa de simulação apresentado no trabalho.

À minha entidade patronal pela valorização do desenvolvimento pessoal e académico e pela experiência profissional que me foi proporcionando ao longo destes quase vinte anos de trabalho, a qual permitiu evoluir em termos de conhecimentos. Em especial à minha gestão pelo incentivo e aos meus colegas de trabalho, nomeadamente ao António Domingos pelo apoio e pela motivação transmitidas.

Ao meu amigo e colega André de Oliveira Moutinho, por todos os momentos vividos, pela partilha do gosto pela aprendizagem, camaradagem, pela amizade. E pela eterna saudade.

À minha esposa Marisa pela paciência, pela compreensão da minha motivação à evolução académica na minha área de trabalho. Ao meu filho Afonso, pelos momentos de ternura partilhados em todas as horas.

Aos meus avós, em especial a minha avó Eugénia, aos meus Pais e aos meus irmãos, aos meus sobrinhos.

Resumo

Os Conversores de Potência desempenham um papel vital na integração da energia eólica na rede elétrica, mas também nos seus sistemas elétricos internos de alimentação e controlo. A evolução tecnológica permitiu o desenvolvimento destes componentes elétricos e eletrónicos e a sua integração em diferentes processos de controlo da instalação elétrica da torre eólica. Estes equipamentos, têm-se tornado cada vez mais sensíveis e mais exigentes em termos da qualidade de energia elétrica, mas ao mesmo tempo têm contribuído para uma diminuição dessa mesma qualidade de energia, uma vez que introduzem desequilíbrios na rede de Baixa Tensão. A análise dos desequilíbrios que essas cargas não lineares introduzem na rede elétrica interna de controlo da torre eólica, bem como soluções encontradas por forma à sua mitigação, foram as principais motivações para a realização deste trabalho. O trabalho apresenta uma introdução e uma breve apresentação sobre os diferentes conversores de potência e o seu papel no funcionamento e controlo da torre eólica. Os filtros de harmónicas são utilizados para reduzir as distorções causadas por equipamentos com comportamento não-linear. As medições no sistema elétrico interno da torre eólica são realizadas com o intuito de identificar injeções harmónicas destes equipamentos auxiliares na rede elétrica interna. O medidor de análise de rede é instalado junto das principais cargas não lineares, auxiliares de funcionamento da torre eólica, para obter estes dados. Após o trabalho de campo de aquisição de dados e respetiva análise, o sistema elétrico é modelado no programa de software Power Factory da DigSILENT. A simulação incorpora um modelo simplificado da rede elétrica, incluindo a alimentação proveniente da rede, as cargas lineares e não lineares, e as suas características harmónicas. A partir da análise da situação atual da instalação elétrica da torre eólica procura-se propor melhorias através dos filtros dimensionados, para que a mesma possa operar minimizando efeitos internos de distorções harmónicas de corrente e tensão presentes que são prejudiciais aos próprios equipamentos elétricos de controlo. Finalizando com uma análise através do simulador de diferentes cenários possíveis e comprovando que a solução encontrada é a mais adequada a implementar em todos os casos, por forma a melhorar a Qualidade de energia nos circuitos de controlo da rede de Baixa Tensão da instalação.

Palavras-Chave

Cargas não-lineares, rede elétrica, baixa tensão, fator de potência, distorções harmônicas, filtros passivos, qualidade de energia, eletrônica de potência, torre eólica, analisador de redes elétricas, Fourier, Termografia, simulação, monitorização.

Abstract

Power Converters play a vital role in integrating wind energy into the power grid, but also into the internal electrical power and control systems. Technological developments have enabled the development of these electrical and electronic components and their integration into different control processes of the wind tower electrical installation. These devices have become increasingly sensitive and more demanding in terms of power quality, but at the same time have contributed to a decrease in power quality as they introduce imbalances into the Low Voltage grid. The analysis of the imbalances that these nonlinear loads introduce into the wind turbine internal control grid, as well as solutions found to mitigate them, were the main motivations for this work. The paper presents an introduction and a brief presentation about the different power converters and their role in the operation and control of the wind tower. Harmonic filters are used to reduce distortions caused by equipment with nonlinear behavior. Measurements in the internal electrical system of the wind tower were performed to identify harmonic injections of this auxiliary equipment into the internal electrical network. The network analysis meter was installed next to the main nonlinear wind load auxiliary loads to obtain this data. After fieldwork of data acquisition and analysis, the electrical system was modeled on DigSILENT's Power Factory software program. The simulation incorporates a simplified grid model, including grid power, linear and nonlinear loads, and their harmonic characteristics. From the analysis of the current situation of the wind tower's electrical installation, it is sought to propose improvements through the dimensioned filters, so that it can operate minimizing internal effects of present harmonic distortions of current and voltage that are detrimental to the electrical control equipment itself. Finally, through a simulator analysis of different possible scenarios and proving that the solution found is the most suitable to implement in all cases, in order to improve the power quality in the control circuits of the installation's Low Voltage network.

Keywords

Nonlinear loads, power grid, low voltage, power factor, harmonic distortions, passive filters, power quality, power electronics, wind tower, power grid analyzer, Fourier, thermography, simulation, monitoring.

Índice

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
ÍNDICE	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABELAS	XII
LISTA DE SIGLAS E ACRÓNIMOS	XV
1. INTRODUÇÃO	1
1.1.CONTEXTUALIZAÇÃO.....	1
1.2.OBJETIVOS.....	2
1.3.CALENDARIZAÇÃO.....	3
1.4.ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO	4
2. QUALIDADE DE ENERGIA - DISTORÇÃO HARMÓNICA	7
2.1.ENQUADRAMENTO.....	7
2.2.PERTURBAÇÕES QUE AFETAM A QUALIDADE DE ENERGIA.....	9
2.3.ANALISADOR DE REDE.....	10
2.4.HARMÓNICAS.....	11
2.5.FORMAS DE REPRESENTAÇÃO	11
2.6.A ORIGEM DO PROBLEMA DAS HARMÓNICAS	15
2.7.HARMÓNICAS PARES E ÍMPARES	16
2.8.PRINCIPAIS PROBLEMAS QUALIDADE DE ENERGIA DA TORRE EÓLICA.....	20
3. SISTEMAS AUXILIARES DE CONTROLO E PRINCIPAIS CARGAS NÃO LINEARES DA INSTALAÇÃO EÓLICA	23
3.1.ESQUEMA DE LIGAÇÃO À TERRA DA TORRE EÓLICA	24
3.2.PRINCIPAIS SISTEMAS E CARGAS ELÉTRICAS NÃO LINEARES DA TORRE EÓLICA	27
3.3.RETIFICADOR DE SEIS PULSOS	35
4. RESULTADOS	38
4.1.MONITORIZAÇÃO DA QUALIDADE DE ENERGIA/ HARMÓNICAS	38
4.2.FORMA DE REALIZAR E INTERPRETAR AS MEDIDAS DE PERTURBAÇÃO HARMÓNICA.....	39

4.3.EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO	40
4.4.O ANALISADOR IMC POLARES	40
4.5.PINÇA AMPERIMÉTRICA UTILIZADA	42
4.6.MONITORIZAÇÕES	42
4.7.RESULTADOS DAS MONITORIZAÇÕES EFETUADAS.....	45
4.8.MONITORIZAÇÃO ATRAVÉS DA CÂMARA TERMOGRÁFICA	52
4.9.SIMULAÇÃO ATRAVÉS DO PROGRAMA <i>POWER FACTORY</i>	56
4.10.APLICAÇÃO DO PROGRAMA DE SIMULAÇÃO	57
5. SOLUÇÕES PROPOSTAS	63
5.1.MÉTODOS PARA ATENUAÇÃO HARMÓNICA.....	63
5.2.FILTROS ATIVOS.....	64
5.3.FILTRO PASSIVO LC	65
5.4.APLICAÇÃO DE FILTROS PASSIVOS	67
5.5.CÁLCULO DOS FILTROS PROPOSTOS	68
5.6.RESULTADOS OBTIDOS.....	73
5.7.FATOR DE POTÊNCIA E HARMÓNICAS.....	74
5.8.SIMULTANEIDADE DE CARGAS NÃO LINEARES	75
6. CONCLUSÕES.....	78
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81
ANEXO A. TORRE EÓLICA	84

Índice de Figuras

Figura 1	Exemplos de perturbações de Harmónicas (a) e Inter-harmónicas (b). Problemas de qualidade de energia.	10
Figura 2	Analisador de rede utilizado na monitorização da rede eléctrica.	10
Figura 3	Representação de senoide no domínio do tempo.	12
Figura 4	Representação de sinusóide no domínio da frequência.	13
Figura 5	Representação de um sinal não-periódico como soma dos seus componentes fasoriais.	14
Figura 6	Onda resultante, fundamental, 3. ^a , 5. ^a , 7. ^a e 9. ^a harmónica.	16
Figura 7	Exemplo do espectro harmónico de um sinal.	18
Figura 8	Esquema de Ligação TNC e TNS na torre eólica.	25
Figura 9	Resumo do Esquema de Ligação à Terra na Torre Eólica.	26
Figura 10	Motores - Acoplamento em caixas reductoras e na roda dentada da torre no topo para posicionamento da <i>Nacelle</i> na direcção do vento.	27
Figura 11	Inversor trifásico em ponte completa.	28
Figura 12	Constituição do motor de corrente contínua.	29
Figura 13	Ponte retificadora trifásica, e regulação de velocidade e direcção do motor CC com ponte em H de IGBT's.	30
Figura 14	Controlador de velocidade (a) e ventiladores do Gerador (b) na instalação eólica.	30
Figura 15	Princípio de funcionamento de equipamento UPS.	32

Figura 16	Performance da Torre Eólica com este equipamento UPS.	33
Figura 17	Retificador em ponte trifásico.	35
Figura 18	Espetro de harmónicas típico de uma ponte retificadora de 6 pulsos (a) e Onda de corrente característica (b).	36
Figura 19	Equipamento de monitorização IMC POLARES.	41
Figura 20	Esquema de ligação do IMC POLARES.	41
Figura 21	Pinça Amperimétrica ELControl C107	42
Figura 22	Ligação do aparelho de Monitorização ao Quadro Principal de uma Torre Eólica.	43
Figura 23	Gráfico de Harmónicas (a) e Formas de onda da corrente (b) associada aos sistemas analisados - <i>Yaw Inverter</i> .	47
Figura 24	Gráfico de harmónicas (a) e Formas de onda da corrente (b) associada aos sistemas analisados - <i>Fan Inverter</i> .	48
Figura 25	Gráfico de harmónicas (a) e Formas de onda de corrente (b) associada aos sistemas analisados - <i>Pitch Control</i> .	50
Figura 26	Gráfico de harmónicas (a) e Formas de onda de corrente (b) associada aos sistemas analisados no Quadro principal de Alimentação.	51
Figura 27	Imagens Termográficas de efeitos de Harmónicas na torre eólica recolhidas a 07/12/2018. Os valores apresentados nas imagens estão em °C, graus centígrados.	54
Figura 28	Câmara termográfica utilizada no trabalho: modelo Ti10 da FLUKE.	55
Figura 29	Programa de simulação utilizado: PowerFactory, versão 15.1.4.	56
Figura 30	Nível de Tensão na rede BT Aero gerador.	58
Figura 31	Esquema Unifilar simplificado de baixa tensão da Torre Eólica com inserção das principais cargas lineares e não lineares.	60

Figura 32	Ligação típica de um filtro ativo de harmónicas.	65
Figura 33	Utilização de um Filtro LC, para atenuação de uma harmónica específica.	65
Figura 34	Filtro passivo de sintonia simples [9].	67
Figura 35	Triângulo de potência para melhorar o fator de potência da instalação. Cálculo da reatância capacitiva [9].	69
Figura 36	Inserção de filtros de Harmónicas projetados na rede BT da torre eólica.	73
Figura 37	Gráficos de Harmónicas de Corrente antes (a) e depois (b) da aplicação de Filtros Passivos - Simulação no quadro da alimentação principal de rede.	74
Figura 38	Fator de Potência.	74
Figura 39	Onda de Corrente antes (a) e depois (b) da aplicação dos Filtros de Harmónicas Projetados.	75

Índice de Tabelas

Tabela 1	Principais constituintes elétricos BT da torre eólica.	8
Tabela 2	Principais problemas de qualidade de energia da instalação eólica.	20
Tabela 3	Sistemas e cargas elétricas da torre eólica.	24
Tabela 4	Malha de impedância e corrente de curto-circuito no Aerogerador Esquema TN – Alimentação BT. Dados do fabricante Enercon.	25
Tabela 5	Consequências relacionadas com os valores típicos de <i>THD_v</i> . Referência norma IEEE 519:2014 [8] e EN 50160:2015 [9]	44
Tabela 6	Consequências relacionadas com os valores típicos de <i>THD_i</i> . Referência norma IEEE 519:2014 [8] e EN 50160:2015 [9]	44
Tabela 7	Resultado das monitorizações efetuadas à corrente no controlador de Posição da <i>Nacelle</i> .	46
Tabela 8	Resultado das monitorizações efetuadas à tensão no controlador de Posição da <i>Nacelle</i> .	46
Tabela 9	Resultado das monitorizações efetuadas à corrente no controlador de velocidade da ventilação do Gerador.	47
Tabela 10	Resultado das monitorizações efetuadas à tensão no controlador de velocidade da ventilação do Gerador.	48
Tabela 11	Resultado das monitorizações efetuadas à corrente no controlador de velocidade das Pás do Rotor.	49
Tabela 12	Resultado das monitorizações efetuadas à tensão no controlador de velocidade das Pás do Rotor.	49

Tabela 13	Resultado das monitorizações efetuadas a corrente no quadro principal.	50
Tabela 14	Resultado das monitorizações efetuadas a tensão no Quadro Principal.	51
Tabela 15	Classificação das Harmónicas quanto à ordem e sequência.	52
Tabela 16	Repartição de cargas lineares e não lineares da WEC consideradas no estudo.	57
Tabela 17	Resultados das medições das Harmónicas efetuadas na torre eólica.	58
Tabela 18	Resultados inseridos para as cargas analisadas no programa <i>Power Factory</i> .	59
Tabela 19	Resultados obtidos para todas as cargas em simultâneo analisadas no programa <i>Power Factory</i> .	61
Tabela 20	Resultados do THDi com variação das cargas não lineares ligadas e desligadas com o mesmo filtro dimensionado.	76

Lista de Siglas e Acrónimos

CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
UPS	<i>Uninterruptable power supply</i>
TI	Transformador de intensidade
EP	Eletrónica de potência
QEE	Qualidade de energia eléctrica
PWM	<i>Pulse width modulation</i>
BT	Baixa tensão
IGBT	<i>Insulated gate bipolar transistor</i>
P	Potência ativa
Q	Potência reativa
S	Potência aparente
RMS	<i>Root mean square</i> , valor médio quadrático
THD	<i>Total harmonic distortion</i>
UVRT	<i>Under voltage ride trough</i>
MT	Média tensão
TN	Terra pelo neutro
RQS	Regulamento da Qualidade de Serviço

1. INTRODUÇÃO

A crescente utilização de equipamentos baseada na eletrónica de potência (EP) desperta a importância da relação entre esta área da engenharia Eletrotécnica - sistemas elétricos de energia e a qualidade de energia elétrica (QEE). Apesar de proporcionar um controlo eficiente do fluxo de energia, estas cargas produzem tensão e/ou correntes harmónicas que acarretam aumento das perturbações originadas pela distorção harmónica em sistemas elétricos, resultando na degradação da qualidade da energia elétrica. Sendo assim, é necessário medir o conteúdo de harmónicas do sistema para que se possa determinar os níveis de degradação e se necessário uma forma de se mitigar os problemas de distorção harmónica. Neste trabalho foram analisadas as harmónicas geradas por parte dos consumidores internos de controlo da torre eólica e avaliada a necessidade de correção das distorções harmónicas geradas, caso exceda os limites recomendados.

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

O tipo de torre eólica analisada, é uma instalação elétrica que inclui diversos sistemas auxiliares que incluem cargas não-lineares. A energia elétrica na instalação, é utilizada por um controlador de velocidade para seis motores de indução assíncronos no movimento da *nacelle* em direção ao vento, num controlador de velocidade para a ventilação forçada do gerador através de cinco ventiladores. Ainda, utiliza um controlador

PWM das pás do rotor e respectivos motores de corrente contínua. Estes são os mais relevantes consumidores a analisar no trabalho e que se apresentam como fontes possíveis de perturbações. Inicialmente, são realizadas as medições de grandezas elétricas deste sistema elétrico da torre eólica sobre as quais será executado o diagnóstico acerca da situação da qualidade de energia, com relação as distorções harmónicas de corrente e de tensão. Os resultados aqui descritos sintetizam os estudos e as monitorações realizadas nos períodos previstos compreendidos entre as semanas 9 e 32 de 2017 - recolha de dados através do analisador de rede (períodos de 24 horas); E na semana 49 de 2018 a recolha de dados de câmara termográfica. Importante ressaltar que esta amostragem efetuada representa a operação normal do sistema, considerando o estado dinâmico de funcionamento.

As grandezas contempladas no trabalho de campo a serem descritas são:

- Tensões e correntes;
- Distorções harmónicas totais das tensões e correntes;
- Amplitudes individuais das harmónicas mais significativas das tensões e correntes;

A avaliação a efetuar apresenta dados reais das condições de operação da torre eólica.

1.2. OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é a caracterização e análise minuciosa ao sistema elétrico interno de uma torre eólica, incidindo na qualidade de energia e, se for o caso, adotar procedimentos e melhorias para atender aos limites estipulados pela legislação em vigor. Será realizada uma avaliação de cada ponto de carga instalada bem como uma avaliação geral da operação do circuito. O sistema elétrico interno de uma torre eólica possui diversos equipamentos com tecnologia baseada em eletrónica de potência (conversores, retificadores, etc.), que são cargas não lineares. Durante a fase de pesquisa

bibliográfica foi possível verificar a inexistência de trabalhos publicados na literatura que abordem uma análise a este tipo de instalação. Esta avaliação é importante para as empresas que gerem a manutenção e operação de instalações eólicas bem como para os próprios fabricantes de torres eólicas. O trabalho tem como objetivo principal apresentar um amplo diagnóstico, da atual situação de injeção harmónica no sistema elétrico interno da torre eólica. A partir desta análise, propor soluções para mitigar as distorções geradas no sistema elétrico.

1.3. CALENDARIZAÇÃO

A calendarização das principais etapas deste trabalho, teve em consideração a necessidade de realização de uma pesquisa inicial acerca de estudos já realizados sobre a temática, bem como do software de simulação mais adequado e interessante para a análise pretendida. Foi também importante e necessário o estudo sobre os manuais de operação dos aparelhos de medição utilizados. De seguida, são apresentadas as principais datas desta tese-dissertação:

- Preparação e estudo de software PowerFactory para simulação da rede elétrica: início de 2017
- Consulta de documentação e pesquisa na internet: durante 2017;
- Registo de dados e monitorização de torre eólica com equipamento analisador de redes elétricas POLARES da IMC: entre 01/03/2017 e 31/08/2017;
- Preparação de relatório e análise de dados: 2017/ 2018;
- Monitorização de barramentos através de câmara termográfica FLUKE: 12/2018;
- Verificação de resultados e cálculos para solução proposta: 2018/2019;
- Finalização e conclusões: 01/07/2019 - 30/09/2019;
- Proposta de entrega do trabalho: Início de 10/2019.

1.4. ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO

No **capítulo 1** é feita breve exposição sobre a contextualização e objetivos do trabalho bem como a calendarização das diferentes etapas do trabalho. No **capítulo 2** são apresentadas as definições básicas relacionadas com a QEE bem como os principais problemas - com o especial foco na Distorção Harmónica. Os diversos equipamentos que geram harmónicas e também os efeitos desta distorção harmónica na rede eléctrica da torre eólica. Formas de representação de sinais. É efetuada uma descrição teórica acerca da série de Fourier. A esquematização entre fenómenos analisados nos domínios do tempo e da frequência. A importância da Transformada de Fourier como uma ferramenta útil para o estudo da distorção harmónica, pois através dela as equações diferenciais e integrais são reduzidas a simples equações algébricas. No **capítulo 3** é apresentada a configuração do sistema eléctrico da torre eólica com os seus respetivos componentes e cargas alimentadas. São apresentadas informações sobre o tipo de conversor e respectiva eletrónica de potência que constitui o equipamento, bem como função no contexto global da instalação eólica. É apresentada também a UPS (*uninterruptible power supply*, alimentação de tensão ininterrupta) instalada que protege também a rede interna da torre eólica contra falhas e flutuações de tensão vindas principalmente do exterior. Servindo para filtragem permanente da fase L1 que alimenta as placas de controlo. Finalmente, indicação acerca dos conversores trifásicos PWM utilizados na torre eólica, sendo de seis pulsos geram harmónicas de corrente com ordens características conhecidas. No **capítulo 4** são apresentados os resultados obtidos na monitorização efetuada com o analisador de qualidade de energia eléctrica. Breve descrição do equipamento utilizado - IMC Polares. São apresentados ainda os resultados de monitorização efetuada com Câmara termográfica no quadro de controlo e alimentação principal da Torre Eólica. Dimensionamento e modelagem da instalação estudada com suas características e peculiaridades através de simulação do sistema eléctrico no programa de software PowerFactory. Comparativo entre os resultados obtidos de medição na torre eólica com os resultados obtidos no programa de simulação. No **capítulo 5** é apresentado um resumo de principais soluções ou métodos existentes para problemas de distorção harmónica em instalações eléctricas. Descrição do método selecionado e cálculos dos filtros propostos. Com o objetivo de reduzir ou minimizar as anormalidades encontradas, é efetuado o cálculo para implementação de

filtros passivos de sintonia única a serem utilizados em paralelo com as cargas de acordo com cada frequência harmónica. Após a elaboração do projeto dos filtros foram feitas as simulações do sistema completo energizado com a interligação dos equipamentos. Foram estudadas as situações com e sem os filtros instalados. Assim, obtiveram-se e são apresentados os novos valores das distorções harmónicas da tensão e da corrente, bem como as formas de onda resultantes. Através do programa escolhido PowerFactory da DigSILENT, é apresentada a simulação das correntes e tensões com inserção de filtros de harmónicas bem como para a apresentação dos gráficos de distorções. É analisado o papel do filtro seleccionado tendo em conta diferentes cenários possíveis da diferente conjugação de cargas não lineares para diferentes cenários de operação da torre eólica confirmando como sendo este filtro uma boa solução. Finalmente os resultados obtidos na Distorção Harmónica e no Fator de Potência; O trabalho realizado na recolha de dados considerou os piores cenários em termos de maior número de horas em operação das cargas não lineares. Os períodos (de 24 horas) de dados recolhidos consideram os dias em que a torre eólica se encontrava com velocidade de vento mais elevado, ou seja, estando normalmente a plena carga (aproximadamente 2 MW);

Finalmente, no **capítulo 6** são apresentadas as conclusões da tese-dissertação. Em resumo, os principais objetivos e resultados alcançados com este trabalho, mas também as principais dificuldades encontradas no decorrer do mesmo. Ainda, as possíveis aplicações futuras da solução encontrada no contexto prático numa torre eólica deste tipo como forma de melhoria da qualidade de energia eléctrica.

2. QUALIDADE DE ENERGIA - DISTRORÇÃO HARMÓNICA

A qualidade da energia eléctrica estuda qualquer tipo de alteração na energia que se pode revelar, principalmente, por alterações nas tensões, correntes ou frequência, que resultam na falha ou operação inadequada de equipamentos. A qualidade da energia eléctrica explica fenómenos eletromagnéticos divididos em várias classes: transitórios, variações de curta e de longa duração, desequilíbrios de tensão, flutuações de tensão, variações na frequência, distorções na forma de onda.

2.1. ENQUADRAMENTO

As instalações de produção de energia eléctrica em BT, torres eólicas, apresentam crescentes preocupações com a manutenção eléctrica preventiva e corretiva dos equipamentos e com a própria utilização da rede eléctrica e, como tal, adquirem aparelhos que possibilitam o controlo e monitorização da mesma. Pela razão do crescendo de cargas

não lineares nos sistemas que naturalmente contribui para o decréscimo da qualidade da energia.

Tabela 1 Principais constituintes elétricos BT da torre eólica.

Motores Elétricos (Sensíveis a harmónicas, cavas de tensão, desequilíbrios entre fases. Simultaneamente causadores destes problemas)	Fontes de alimentação (Distorção harmónica, deterioração fator potencia)
Ventiladores (Sensíveis a harmónicas, cavas de tensão, desequilíbrios entre fases.)	Componentes Eletrónicos (Sensíveis a sobretensões e cavas. Produtores de harmónicas)
Bancos de Condensadores (Sensíveis a harmónicas)	Controladores de Velocidade em CC ou CA (Fontes de harmónicas)

No fornecimento e produção de energia elétrica, o aerogerador monitoriza os diversos parâmetros da rede para o exterior, para poderem garantir à rede uma boa qualidade de energia. Mas, principalmente na monitorização dos diversos parâmetros da rede interna para poderem garantir um normal estado operacional dos equipamentos, isso nem sempre é conseguido.

A irregularidade ou falta de qualidade dos parâmetros da rede elétrica interna do aerogerador, pode conduzir a um maior e prolongado desgaste nos materiais e equipamentos, conseqüentemente a maiores custos de manutenção preventiva e corretiva que se revelariam desnecessários no caso da deteção precoce destes parâmetros não-conformes e na sua minimização ou eliminação.

2.2. PERTURBAÇÕES QUE AFETAM A QUALIDADE DE ENERGIA

O principal fenómeno estudado no contexto deste trabalho é a distorção na forma de onda, resultante da distorção harmónica. No entanto, existem outros fenómenos igualmente importantes de perturbações que afetam a qualidade de energia. São apresentados de seguida. [1]

- **Distorção harmónica:** quando existem cargas não lineares ligadas a um sistema elétrico, a corrente que circula nas linhas contém determinadas harmónicas. A deformação do sinal sinusoidal pode ocorrer tanto na onda de corrente como na onda de tensão, sendo considerados respetivamente, harmónicas de corrente e harmónicas de tensão.
- **Ruído:** corresponde ao ruído eletromagnético de alta-frequência, que pode ser produzido pelas comutações rápidas dos conversores eletrónicos de potência.
- **Inter-harmónicas:** surgem quando há componentes de corrente que não estão relacionadas com a componente fundamental (50 Hz);
- **Subtensão momentânea (*voltage sag*):** também conhecido por - cava de tensão, pode ser provocada, por exemplo, por um curto-circuito momentâneo num outro alimentador do mesmo sistema elétrico.
- **Sobretensão momentânea (*voltage swell*):** pode ser provocada, entre outros casos, por situações de defeito ou operações de comutação de equipamentos ligados à rede elétrica.
- **Flutuação da tensão (*flicker*):** acontece devido a variações intermitentes de certas cargas, causando flutuações nas tensões de alimentação (que se traduz, por exemplo, em oscilações na intensidade da iluminação elétrica).
- **Micro-cortes de tensão (*notches*):** resultam de curto-circuitos momentâneos, que ocorrem durante intervalos de comutação dos semicondutores de potência dos retificadores.
- **Transitórios:** ocorrem como resultado de fenómenos transitórios, tais como a comutação de bancos de condensadores ou descargas atmosféricas. [1]

A monitorização da qualidade da energia da rede elétrica tem como principal objetivo observar as variações de determinados parâmetros (tensões, correntes, fatores de potência ($\cos\phi$), potências ativas, reativas e aparentes). Um dos principais parâmetros que é necessário monitorizar é a frequência da rede. Este valor não é constante, flutuando em torno do valor nominal devido às variações das cargas da rede de energia. [1]

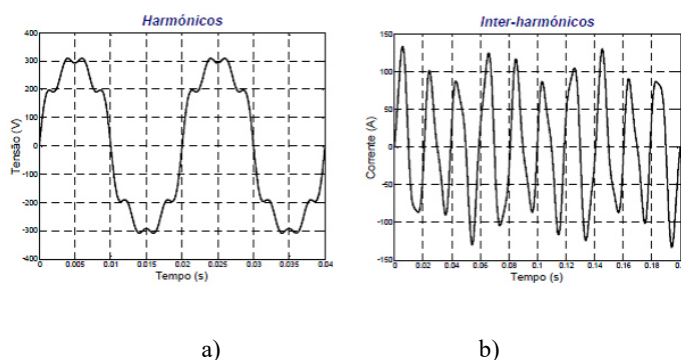


Figura 1 Exemplos de perturbações de Harmônicas (a) e Inter-harmônicas (b). Problemas de qualidade de energia.

2.3. ANALISADOR DE REDE

Um analisador de redes ou da qualidade de energia elétrica é um aparelho que mede um conjunto de parâmetros que constituem o sistema elétrico. Este aparelho conjuntamente com quatro pinças amperimétricas e quatro cabos de tensão, permite fazer análise e registo dos diferentes parâmetros elétricos da rede a estudar.



Figura 2 Analisador de rede utilizado na monitorização da rede elétrica.

Os equipamentos analisadores de qualidade de energia elétrica registam diferentes valores instantâneos, médios e máximos em intervalos de tempo estipulados, quer por fase quer entre fases. Permitem ainda medir e analisar as distorções que podem ser provocadas pelas harmónicas introduzidas por certas cargas na rede elétrica, entre outras perturbações. São equipamentos de apoio à análise da rede elétrica e de energia, permitindo tirar conclusões relativamente às grandezas elétricas características de um circuito elétrico de uma instalação ou equipamento. [1]

2.4. HARMÓNICAS

Uma instalação elétrica, por regra deve proporcionar uma tensão de alimentação com amplitude constante, forma de onda sinusoidal, frequência e simetria constantes no caso das redes trifásicas. Quando as características acima deixam de se verificar, surgem então perturbações, que podem afetar equipamentos e que dão origem a falhas de funcionamento e ao aquecimento das cargas e aparelhos ligados a rede eléctrica comum. Uma das causas para estas perturbações tem origem no aparecimento das Harmónicas; [2]

2.5. FORMAS DE REPRESENTAÇÃO

Por forma a existir uma esquematização entre fenómenos analisados nos domínios do tempo e da frequência, o comportamento da grandeza no domínio do tempo deve ser periódico, ou seja, repetir-se em períodos iguais a T, sendo T o período de tempo que contém um ciclo do sinal de frequência f. A relação entre os dois domínios é a seguinte:

$$f = \frac{1}{T} \quad (1)$$

A representação e análise no domínio da frequência apresenta inúmeras vantagens.

Mas um ponto importante é perceber em quais condições se torna mais conveniente analisar um sinal no domínio da frequência. [3]

2.5.1. REPRESENTAÇÃO NO DOMÍNIO DO TEMPO

No domínio do tempo precisamos definir explicitamente a função e os parâmetros que a caracterizam, por exemplo:

$$x(t) = A \cdot \text{sen}(2\pi ft - \phi) \quad (2)$$

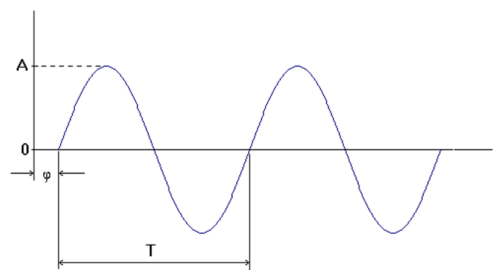


Figura 3 Representação de senoide no domínio do tempo.

A= Amplitude;

$T = \frac{1}{f} = \frac{2\pi}{\omega} = \text{Período};$

$\Phi = \text{Fase inicial};$

2.5.2. REPRESENTAÇÃO NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

No domínio da frequência esse mesmo sinal é representado apenas pelos seus parâmetros, ficando subentendida a função temporal (sinusoidal) escolhida como referência na decomposição:

$$x(f) \rightarrow [A, f, \phi] \quad (3)$$

Uma vez que a função periódica de referência já está implícita no domínio da frequência, a caracterização do sinal decomposto em termos dessa referência necessita apenas dos parâmetros resultantes da decomposição. [3]

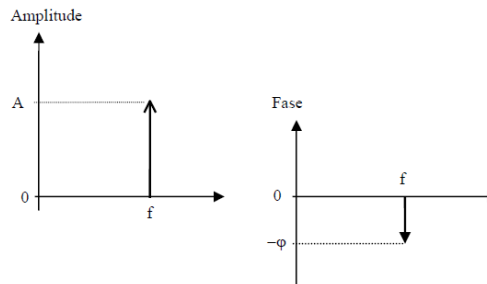


Figura 4 Representação de sinusóide no domínio da frequência.

2.5.3. COMO APLICAR A ANÁLISE DE FOURIER

As propriedades anteriores ajudam a simplificar a análise qualitativa, porém é necessário um procedimento para decompor a função na sua série harmônica. A **série de Fourier** é uma decomposição do sinal no somatório de funções cosseno e seno:

$$f(\omega t) = A_0 + \sum_{h=1}^{\infty} A_h \cos(h\omega t) + \sum_{h=1}^{\infty} B_h \sin(h\omega t) \quad (4)$$

Sendo,

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

A_0 - amplitude da componente contínua (normalmente nula em sinais ímpares e com simetria de meia onda)

A_h - valor eficaz do harmónico ímpar de ordem h

B_h - valor eficaz do harmónico par de ordem h

ω - Frequência angular fundamental

A análise pela Série de Fourier, no domínio da frequência, para sinais periódicos, resume-se a determinar os valores dos coeficientes **A** e **B** da série, uma vez que se conhece o período T da função de referência. [3]

2.5.4. DA SERIE DE FOURIER Á TRANSFORMADA DE FOURIER

O estudo de sinais de harmónicas usando o domínio do tempo muitas vezes é de complexa abordagem e pode apresentar inúmeros integrais. A forma mais fácil de analisar sinais é, pois, usando o domínio da frequência fazendo o uso da *Transformada de Fourier*. A Transformada de Fourier é uma ferramenta útil, pois através dela as equações diferenciais e integrais são reduzidas a simples equações algébricas. A mesma está apresentada na Equação (5).

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt \quad (5)$$

Sendo $e^{\pm j\theta} = \cos(\theta) \pm \text{sen}(\theta)$, Fórmula de Euler (denominado phasor)

Aplicando-se a Transformada de Fourier, temos um gráfico normalmente chamado de Espectro de Energia ou Frequência com o eixo das abcissas tendo a frequência e no eixo das ordenadas a Energia. Na Figura 5 podemos ver o espectro de frequência onde o sinal é representado por todas as barras. Cada barra é um *phasor* com determinada frequência e amplitude. Usando então o gráfico de espectro de frequência podemos representar um sinal não-periódico como soma dos seus componentes fasoriais. [3]

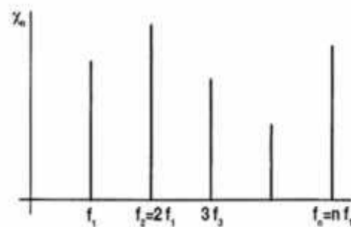


Figura 5 Representação de um sinal não-periódico como soma dos seus componentes fasoriais.

2.6. A ORIGEM DO PROBLEMA DAS HARMÓNICAS

Num sistema ideal sem perturbações tanto a forma de onda da corrente como a de tensão será perfeitamente sinusoidal. Mas na realidade, correntes não-sinusoidais resultam de correntes que atravessam cargas que estão relacionadas linearmente com a tensão aplicada sobre elas. Num circuito simples, com apenas elementos lineares - resistências, indutâncias e condensadores - a corrente que o atravessa é proporcional a tensão aplicada para uma dada frequência. Relativamente a um elemento reativo (condensador ou indutância) haverá, no entanto, um desfasamento entre a tensão e a corrente; o fator de potência irá diminuir, **mas, no entanto, o circuito ainda será linear.** [2]

Nos últimos anos, têm existido um constante aumento da utilização de equipamentos e componentes eletrónicos alimentados pela rede eléctrica, por exemplo:

- Retificadores;
- Inversores;
- Controladores de velocidade;
- Arrancadores suaves;
- Etc.;

Embora estas cargas não lineares melhorem a realização de tarefas, bem como o rendimento e operação, entre outras vantagens, são elas que criam deformações nas ondas da tensão e da corrente, harmónicas. Uma onda periódica não sinusoidal pode ser decomposta em ondas sinusoidais com frequências variáveis e múltiplas da frequência fundamental do sinal que lhes deu origem. A amplitude de cada uma destas harmónicas é habitualmente apresentada em valores percentuais da amplitude da componente fundamental que é a componente cuja frequência é a mesma da onda que é decomposta. Uma harmónica de tensão ou corrente, não é mais que um sinal sinusoidal, cuja frequência é múltipla inteira da frequência fundamental do sinal principal. Na rede eléctrica pública a frequência fundamental das ondas de corrente e tensão é de 50 Hz sendo que a frequência de uma harmónica de ordem h será:

$$f_h = h \times 50 \text{ (Hz)} \quad (6)$$

Na **Figura 6** são apresentadas as componentes da onda fundamental, de 3.^a, 5.^a, 7.^a e de 9.^a ordem de uma hipotética onda periódica. Ao adicionar as componentes harmônicas à componente fundamental, temos como resultado a forma de onda original que é apresentada como onda “Total”. [2]

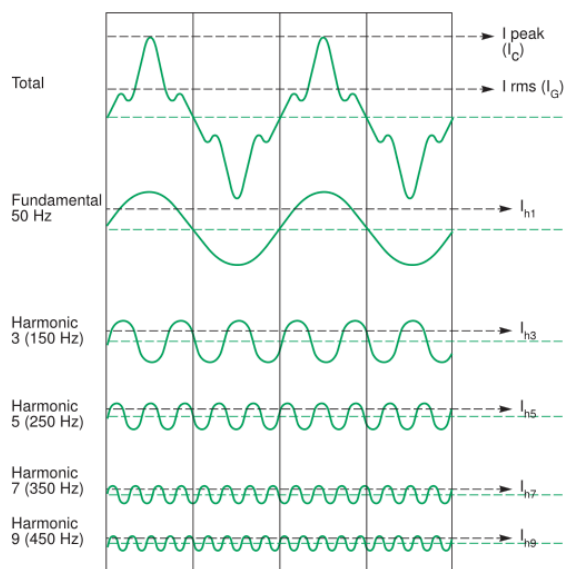


Figura 6 Onda resultante, fundamental, 3.^a, 5.^a, 7.^a e 9.^a harmônica.

2.7. HARMÔNICAS PARES E ÍMPARES

Num sistema de potência com cargas não lineares é normal que as harmônicas pares (2.^a, 4.^a, 6.^a, 8.^a, etc.) sejam encontrados em níveis não prejudiciais ao funcionamento do sistema (exemplo detetado durante o trabalho de campo num sistema conversor com defeito no IGBT positivo em L1). Este tipo de harmônicas apenas surge somente em níveis significativos quando se verifica assimetria no sinal, levando ao aparecimento de uma componente contínua. Quando ambos os semi-ciclos (positivo e negativo) de uma onda têm a mesma forma, a Série de Fourier apenas contém harmônicas de ordem ímpar. Desta forma a análise da grande maioria dos sistemas de potência é simplificado pois as cargas

não lineares mais comuns, produtoras de harmónicas, apresentam formas com simetria de meia onda idênticas em ambas as alternâncias. [2]

2.7.1. VALOR EFICAZ DA CORRENTE E VALOR RMS

Em redes de alimentação em corrente alternada, à frequência de 50 Hz, as características dos aparelhos de medição, a seleção das proteções e o cálculo das secções dos condutores, entre outros, baseiam-se numa corrente perfeitamente sinusoidal. Com o crescendo de cargas não lineares nas instalações industriais, a corrente não mantém a forma de onda puramente sinusoidal. Torna-se, portanto, fundamental medir o valor eficaz de um sinal qualquer que seja a sua forma de onda.

Os aparelhos de medição digitais utilizam tecnologia RMS e determinam o valor eficaz de um sinal qualquer que seja a sua forma de onda. Um aparelho de medição que não utilize esta tecnologia pode proporcionar medidas erradas não dando um valor eficaz exato, pois apenas reflete na medida o valor eficaz da componente fundamental. Um sinal distorcido decompõe-se numa soma de sinais harmónicas, múltiplos inteiros da frequência fundamental, o valor eficaz real da corrente também é representativo do efeito de Joule devido ao conjunto destes sinais. Desta forma é tida em conta a soma da componente fundamental e das harmónicas.

O valor eficaz (RMS) de um sinal distorcido, obtém-se calculando a raiz quadrada da soma quadrática das suas componentes harmónicas, de acordo com a equação seguinte:

$$Y = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} Y_n^2} \quad (7)$$

No caso concreto da corrente eléctrica, o seu valor eficaz é dado pela equação seguinte.

$$I_{ef} = \sqrt{I_{fund}^2 + I_3^2 + I_5^2 + I_7^2 + \dots} \quad (8)$$

onde I_n representa a corrente associada a harmónica de ordem n .

As harmónicas de ordem mais elevada representam um valor eficaz desprezável face ao valor total, bastando na maioria dos casos uma aproximação a partir das primeiras harmónicas para quantificar um sinal (até ordem 25). [2]

2.7.2. ESPETRO DE HARMÓNICAS

O espectro de harmónicas permite decompor um sinal nas suas harmónicas e representa-los graficamente através de um gráfico de barras, onde cada uma das barras representa uma harmónica, com uma frequência, uma amplitude, como mostra de seguida a figura 7.

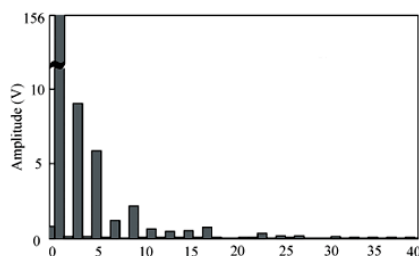


Figura 7 Exemplo do espectro harmónico de um sinal.

O espectro de harmónicas de um sinal distorcido, pode, em termos teóricos ir até ao infinito, mas na realidade verifica-se que as harmónicas de ordem elevada (normalmente acima de 25) são praticamente desprezáveis, como indicado anteriormente, não tendo qualquer influência no respeitante à qualidade da energia. [2]

2.7.3. TAXA DE DISTORÇÃO HARMÓNICA (THD)

A taxa de distorção harmónica - THD (*Total Harmonic Distortion*) define-se como uma grandeza indicadora da deformação da onda de tensão ou de corrente. Sendo a relação entre o valor eficaz das harmónicas e o valor eficaz da componente fundamental, calculado com base na equação (9). [2]

$$THD\% = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} Y_n^2}}{Y_1} \cdot 100 \quad (9)$$

2.7.4. FATOR DE POTÊNCIA

O fator de potência (FP), define-se pela relação entre a potência ativa (P) e a potência aparente (S) como mostra a equação (10).

$$FP = \frac{P}{S} \quad (10)$$

Podemos considerar o fator de potência e o $\cos\phi$ como sendo a mesma variável e de valores iguais. Mas, esta consideração apenas pode ser feita quando na presença de sinais (tensão e corrente) puramente sinusoidais sem harmônicas.

O $\cos\phi$ é dado pela relação entre as componentes fundamentais da potência ativa e potência aparente, como apresentado pela equação (11).

$$\cos\phi = \frac{P_{h1}}{S_{h1}} \quad (11)$$

O factor de potência e o $\cos\phi$ embora diferindo, têm normalmente valores muito próximos. Isto verifica-se devido ao facto de que na grande maioria dos casos embora exista uma grande distorção no sinal de corrente tal não se verifica na taxa de distorção da tensão que apresenta valores baixos. Levando, assim, a que o produto de uma componente harmónica de corrente pela correspondente da tensão seja praticamente nulo. [2]

O Fator de Potência permite avaliar o sobredimensionamento a aplicar à alimentação de uma instalação, pois este permite-nos conhecer a relação entre a potência ativa e a potência aparente. O espectro de harmônicas (decomposição em frequência do sinal) permite avaliar a deformação dos sinais elétricos, sob o ponto de vista de uma representação gráfica.

2.8. PRINCIPAIS PROBLEMAS QUALIDADE DE ENERGIA DA TORRE EÓLICA

O grau de severidade com que os equipamentos ou aparelhos de rede são afetados pelas harmônicas depende da sensibilidade dos equipamentos e das características técnicas da rede. Os equipamentos menos sensíveis, geralmente, são os de aquecimento (carga resistiva), para os quais a forma de onda não é relevante.

Os mais sensíveis são aqueles que, na sua essência, assumem a existência de uma alimentação sinusoidal como, por exemplo, equipamentos de comunicação, controlo e processamento de dados. No entanto, mesmo para as cargas de baixa sensibilidade, a presença de harmónicos (de tensão ou de corrente) podem ser prejudiciais, produzindo maiores esforços nos componentes e isolantes. [3]

Tabela 2 Principais problemas de qualidade de energia da instalação eólica.

Falhas eletrónica de potência (tiristores, IGBT's, etc.)	Avarias de Equipamentos: Subtensões e Sobretensões
Aquecimento de cabos e máquinas elétricas	Harmónicas nas Correntes e Tensões Desgaste Elétrico cabos, condensadores etc.
Disparos Intempestivos de Proteções nos Quadros Elétricos	Perda de Velocidade nos Motores Desgaste Elétrico
Falhas placas de controlo, processamento de dados, comunicações; (Proteção pela UPS)	

Os efeitos das harmônicas podem manifestar-se devido ao aumento da corrente eficaz ou devido à deformação da onda de tensão (deixa de ser sinusoidal). Um aumento da corrente eficaz vai sempre provocar uma subida de temperatura de todos os componentes

da rede elétrica o que se traduz em degradação dos materiais isolantes, diminuição do rendimento e menor eficácia da aparelhagem de proteção. Todos estes factos contribuem para a diminuição da vida útil dos equipamentos. [3]

3. SISTEMAS AUXILIARES DE CONTROLO E PRINCIPAIS CARGAS NÃO LINEARES DA INSTALAÇÃO EÓLICA

O sistema elétrico interno das torres eólicas consome energia ativa a partir da alimentação na ligação à rede, a fim de manter a funcionalidade do sistema de controlo e das unidades auxiliares. Mesmo que os quadros inversores não gerem energia, alguns sistemas permanecem ativos e têm de ser alimentados com energia elétrica. Se a torre eólica gera potência ativa, o consumo de energia é coberto pela própria. Senão é alimentada diretamente a partir da rede geral do Parque Eólico. Este trabalho de tese-dissertação aborda a análise sobre o circuito elétrico, os principais consumidores de energia da torre eólica bem como focaliza os potenciais causadores de deterioração da qualidade de energia interna do sistema elétrico da torre.

Os seguintes sistemas auxiliares e cargas elétricas contribuem significativamente para o consumo próprio de energia da torre eólica, tabela 3:

Tabela 3 Sistemas e cargas elétricas da torre eólica.

Sistema	Carga Elétrica	Potência
Consumo básico	Placas electrónicas de controlo	1 kW
Sistemas de movimento	Motores da <i>Nacelle</i>	12 kW
	Motores de <i>Pitch</i>	15 kW
Sistemas de arrefecimento	Ventiladores da <i>Nacelle</i>	10 kW
	Ventiladores da base da Torre	12 kW
	Ventiladores quadros de potência	15 kW
Sistemas de aquecimento	Aquecimento dos quadros de potência	5 kW
	Potência máxima consumida total \approx	50 kW

3.1. ESQUEMA DE LIGAÇÃO À TERRA DA TORRE EÓLICA

3.1.1. TN (TERRA PELO NEUTRO)

Os esquemas TNC e TNS são os sistemas utilizados na torre eólica. Sendo que o esquema TNC está a montante do TNS. A parte da instalação comum, TNC está a montante dos dispositivos diferenciais por forma a que estes atuem em conformidade no esquema a jusante, TNS. O TNC é sempre montando a montante do TNS, sendo a situação inversa não permitida, para evitar que o condutor de proteção seja percorrido em permanência por uma parte da corrente de funcionamento normal da instalação. [4]

O esquema TN utiliza-se fundamentalmente por motivos de ser uma instalação onde é difícil conseguir boas ligações à terra. O sistema de terra de alimentação PEN é permanentemente monitorizado (através de TI) bem como a sua continuidade.

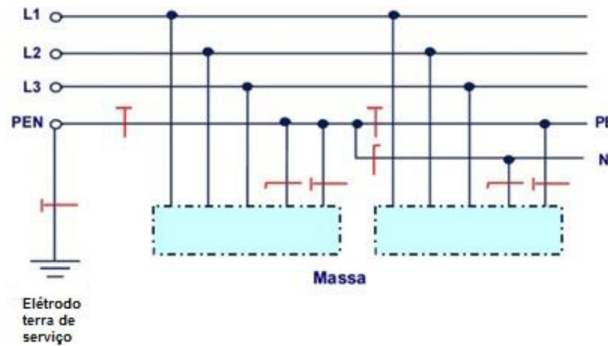


Figura 8 Esquema de Ligação TNC e TNS na torre eólica.

Neste sistema de proteção, todas as massas condutoras são ligadas diretamente a uma terra única, a terra da alimentação, através de um condutor de proteção. Nos sistemas TN, qualquer defeito de isolamento à terra resulta num curto-circuito fase-neutro; Como a corrente de curto-circuito por regra toma valores muito elevados, é garantido o corte automático da alimentação através de dispositivos de proteção contra sobreintensidades. [4]

Na tabela seguinte são apresentados alguns valores de malha de impedância e corrente de curto-circuito indicados pelo fabricante da torre eólica.

Tabela 4 Malha de impedância e corrente de curto-circuito no Aerogerador Esquema TN – Alimentação BT. Dados do fabricante Enercon.

Alimentação	Corrente de curto-circuito	Malha de Impedância
Base da Torre	$I_k > 5 \text{ kA}$	---
Nacelle	$I_k > 0,75 \text{ kA}$	$R < 0,31 \Omega$

A imagem seguinte apresenta os esquemas TNC e TNS utilizados na torre eólica. O transformador de potência de rede utilizado é do tipo Dyn5. No sistema de terras de alimentação PEN é ligado em comum a terra e o neutro de rede - esquema TNC. No quadro de alimentação geral é separada a terra do neutro - TNS. Sendo que o esquema geral de ligação à terra da torre eólica seguido é então o TNS para toda a instalação.

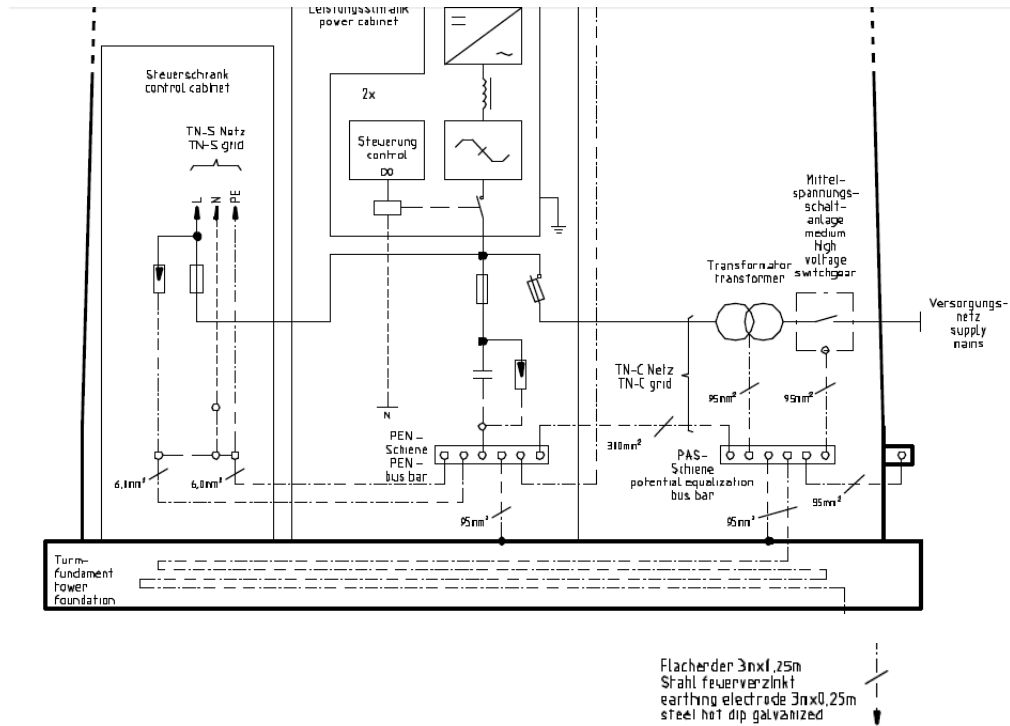


Figura 9 Resumo do Esquema de Ligação à Terra na Torre Eólica.

3.2. PRINCIPAIS SISTEMAS E CARGAS ELÉTRICAS NÃO LINEARES DA TORRE EÓLICA

3.2.1. CONTROLADOR DE VELOCIDADE DOS MOTORES DA *NACELLE*

Para o controlo de direção da *Nacelle* ao vento, várias unidades (que consistem em motores e engrenagens) atuam em conjunto com a engrenagem principal, que está ligada com o topo da torre. O uso de várias unidades que atuam numa única coroa dentada minimiza por sua vez a carga aos componentes das unidades individuais, mas exige medidas para o equilíbrio das cargas. Caso contrário, a carga seria desigualmente distribuída de acordo com a distância dos respetivos dentes e a engrenagem seria sobrecarregada. A folga nas engrenagens, com um rolamento instalado, tende também a provocar ruídos, o que resulta numa variedade de defeitos, nomeadamente fadiga dos materiais. O binário de azimute deve ser igualmente distribuído por todas as caixas redutoras com o controlo de movimento no arranque e quando em paragem. A carga externa (força do vento) deve ser uniformemente distribuída em todas as unidades durante o controlo de azimute, a fim de evitar que as engrenagens individuais sejam sobrecarregadas dinâmica ou estaticamente. O sistema de bloqueio da posição *Nacelle* é garantido, também através dos travões acoplados aos respetivos motores.

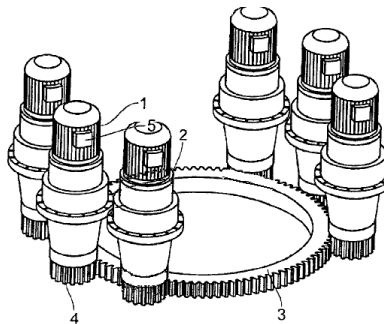


Figura 10 Motores - Acoplamento em caixas redutoras e na roda dentada da torre no topo para posicionamento da *Nacelle* na direção do vento.

Princípio de funcionamento:

Utilização do Circuito Inversor (CA-CC-CA)

Os retificadores de seis pulsos proporcionam tensão CC constante. Para que se possa produzir uma tensão CA, controlada em magnitude e frequência, utiliza-se o controle PWM (*Pulse Width Modulation*). Neste tipo de técnica, é necessário o controle sobre a introdução e saída dos interruptores no circuito. Isto não é possível com tirístores, mas sim com IGBT's.

Na Figura 11 apresenta-se um inversor que é alimentado por um barramento de corrente contínua, e com uma ponte completa trifásica.

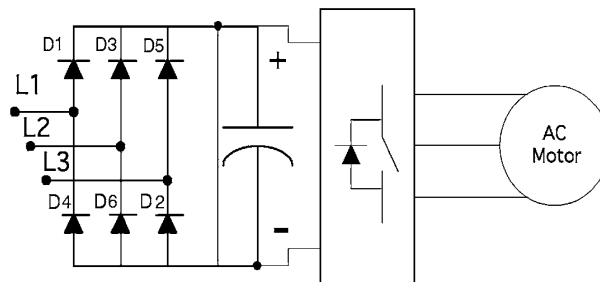


Figura 11 Inversor trifásico em ponte completa.

O inversor com IGBT's, que permite controlar a amplitude e a frequência das tensões de alimentação a aplicar aos motores da *Nacelle*.

3.2.2. CONTROLADOR DE VELOCIDADE DOS MOTORES DAS PÁS - *PITCH*

No rotor da torre eólica estão os quadros de *Pitch* que controlam a posição das pás. Utilizam um motor de corrente contínua que foi a primeira máquina elétrica a ser utilizada industrialmente. Tendo como principais características: o controlo preciso, elevado binário. Possui um rotor constituído por um enrolamento, induzido, rodando livremente entre os pólos do estator, indutores (figura 12).

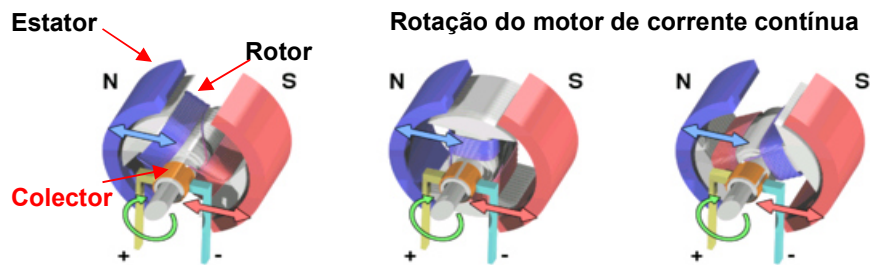


Figura 12 Constituição do motor de corrente contínua.

A corrente elétrica é fornecida ao enrolamento do rotor por uma fonte de corrente contínua, aplicada através de escovas a um coletor, sendo a rotação originada pela interação entre o campo elétrico do rotor e o campo magnético existente entre os pólos norte e sul do estator.

Princípio de funcionamento:

Utilização de um Circuito Retificador (CA-CC) no sistema de *Pitch*

Um retificador trifásico de seis pulsos na entrada converte tensões e correntes alternadas (CA) em tensões e correntes contínuas (CC). O objetivo é gerar uma corrente CC no banco de condensadores e mantida, que será posteriormente regulada pelos IGBT's na componente CC para a realização da função requerida, **o controlo do motor de corrente contínua** (figura 13).

Um circuito em ponte rectificadora totalmente controlada de três fases, e regulação de velocidade e direção do motor CC com ponte em H de IGBT's (página seguinte).

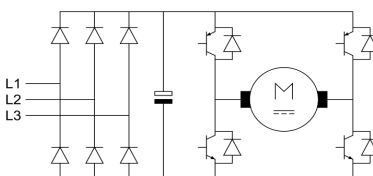


Figura 13 Ponte rectificadora trifásica, e regulação de velocidade e direção do motor CC com ponte em H de IGBT's.

3.2.3. SISTEMA DE VENTILAÇÃO DA *NACELLE* PARA ARREFECIMENTO DO GERADOR

Através de 5 motores de indução, colocados em posição frontal ao Gerador com volume de ar vedado para aquisição de pressão. De modo a melhorar o desempenho dinâmico do motor do ventilador, é utilizado o controlador de velocidade do fabricante NORDAC.



a)

b)

Figura 14 Controlador de velocidade (a) e ventiladores do Gerador (b) na instalação eólica.

Princípio de funcionamento:

O controlador de velocidade utilizado é similar em funcionamento ao utilizado no sistema de controlo dos motores da *Nacelle* - constituído por ponte rectificadora trifásica de 6 pulsos; O conversor de frequência opera como um conversor de potência no circuito principal de alimentação do motor. O conversor de energia fornece energia ativa através do

retificador da rede e fornece potência ativa e reativa através do inversor ligado ao motor. A potência reativa necessária para a operação do motor é fornecida pelos condensadores do circuito intermédio.

3.2.4. UPS, ALIMENTAÇÃO DE TENSÃO ININTERRUPTA

As falhas ou perturbações na rede externa também afetam a alimentação de controlo da torre eólica. A UPS (*uninterruptible power supply*, alimentação de tensão ininterrupta) protege a rede interna da torre eólica contra falhas e flutuações.

A alimentação da torre eólica é dividida em duas categorias:

- Alimentação de controlo através de “Controlo L1”. - Esta tensão de UPS é permanentemente gerada pela UPS e não comutada através de um *bypass*.
Todos os componentes sensíveis a falhas na rede, como contactores e placas de circuito impresso são ligados nesta saída monofásica. Esta tensão naturalmente não é sujeita a flutuações na rede e protegida contra picos de sobretensão, harmónicas, etc.;
- Alimentação de tensão através de L1 - L3. - Consumidores de potência como ventiladores, motores e aquecedores não são tão sensíveis a flutuações de potência curtas, mas precisam de muita potência. Por isso, continuam a ser alimentados pela rede, e apenas em caso de falhas grandes na rede (interrupções e curto-circuito) passam a ser alimentados de forma segura pela UPS através de um *bypass* de tirístores.

3.2.4.1. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

A UPS utilizada pela torre eólica estudada é constituída por componentes de eletrónica de potência e sistemas de controlo e proteção incluídos (figura 15). Os equipamentos UPS tradicionais de baterias não podem ser alimentadas pelos bancos de condensadores dos quadros elétricos existentes na torre eólica.

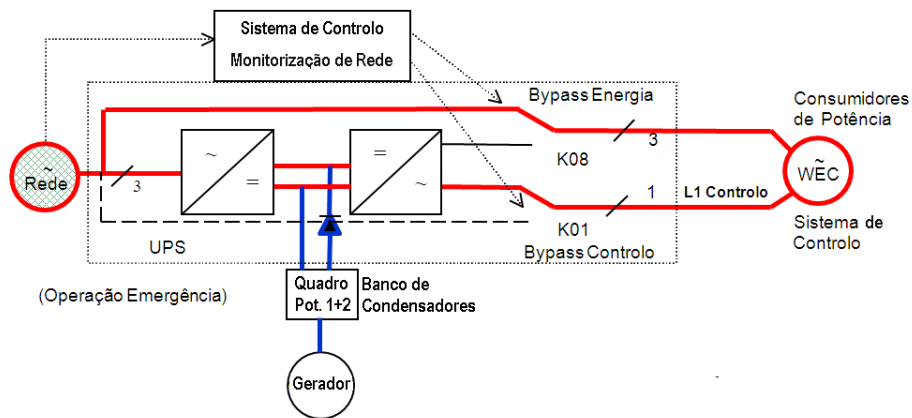


Figura 15 Princípio de funcionamento de equipamento UPS.

O *bypass da UPS* consiste em seis módulos de tirístores, que contêm dois módulos desses tirístores completamente separados. Pela conexão antiparalela dos dois tirístores de um módulo, este comporta-se como um triac e assim é adequado para comutar correntes alternadas. Quando seis destes triacs são combinados, pode ser obtido um contator semicondutor com um total de três contatos inversores. [5]

Através do *bypass* o circuito de controlo comuta da Rede para alimentação através da UPS. Os circuitos de Potência são alimentados a partir da Rede ou do inversor da UPS - A comutação é realizada através dos tirístores. [5]

Aquando de uma falha na rede, provocada por exemplo por um curto-circuito, o aerogerador que se encontra em funcionamento e alimenta tensão na rede, reage da seguinte forma:

- Os quadros de potência alimentam a corrente máxima de curto-circuito
- A UPS é alimentada pelos bancos de condensadores dos quadros de potência
- Os consumidores de potência são ligados à saída da UPS
- O excesso de potência é consumido pelas resistências de carga instaladas nos quadros de potência inversores

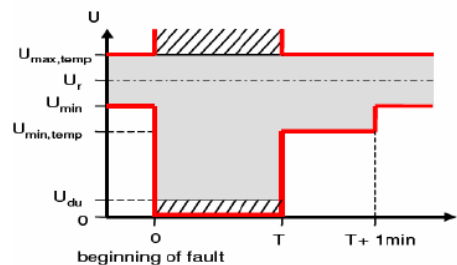


Figura 16 Performance da Torre Eólica com este equipamento UPS.

3.2.4.2. CARATERÍSTICAS DE COMPORTAMENTO

A torre eólica permanece ligada, se a tensão aos seus terminais durante ou após a falha permanecer na área cinzenta (figura 16). Nas áreas com *linhas paralelas* a torre eólica fica fora da rede, mas permanece em operação. Se a tensão regressar para entre $U_{min, temp}$ e $U_{max, temp}$, ressincroniza e religa instantaneamente (em aproximadamente 400 ms). A Opção UVRT (com UPS utilizada) permite a torre eólica ficar em operação durante quedas de tensão ou sobretensões temporárias até oito segundos. Esse desempenho pode ser alcançado mesmo se a torre eólica se encontra com potência ativa nominal e mesmo que a tensão seja reduzida a zero volts aos seus terminais não havendo qualquer alteração de controlo especial para o ângulo de inclinação das pás.

- Valor de proteção mínima tensão: $U_{min, temp} = 80\% U_r$
- Temporização proteção tensão: $t = t_{up} < 8 \text{ sec}$

- Mínima tensão ponto de desconexão: $U_{du} = 15\% U_r$
- Sobretensão ponto de desconexão: $U_{max, temp} = 120\% U_r$. [5]

A UPS apresentada inclui *software* e *hardware* adicionais para a torre eólica: resistências de carga controladas para assumirem a energia gerada durante uma falha. As pás, a torre eólica em geral não é afetada pela perturbação de rede.

3.2.4.3. DADOS PRINCIPAIS DO EQUIPAMENTO UPS

O quadro UPS assegura o abastecimento de todos os auxiliares relevantes da torre eólica. O tempo máximo de oito segundos dá a reserva para resistir mesmo a possível religação sem sucesso.

Se a tensão de pelo menos uma fase excede os limites definidos, a torre eólica muda o seu modo de operação.

- Potência de saída máxima de 35 kVA com operação contínua;
- Pode suportar sobrecargas de até 150 kVA;
- Alimentação segura dos componentes de controlo;
- Auto-alimentação através dos bancos de condensadores dos quadros elétricos de potência da torre eólica (600 V - 750 V -) e pela rede (400 V~);
- Desvio de falhas de rede e curtos-circuitos durante alguns segundos até alguns minutos;
- À prova de curto-circuito com corrente de curto-circuito de fases de aproximadamente 200 A. [6]

3.3. RETIFICADOR DE SEIS PULSOS

Em geral, os conversores trifásicos PWM utilizados na torre eólica pelas principais cargas não lineares são de seis pulsos. Normalmente, este tipo de conversores com díodos retificadores no lado do sistema de potência gera harmônicas de corrente de ordens 5.^a, 7.^a, 11.^a, 13.^a e 17.^a. A figura 17, mostra o circuito de potência do retificador em ponte trifásica totalmente controlado, utilizando 6 tirístores. Este conversor também é conhecido então como retificador de 6 pulsos, devido à tensão gerada na carga conter 6 pulsos num período da tensão da rede.

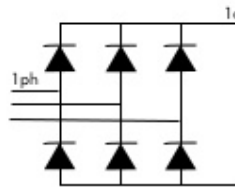


Figura 17 Retificador em ponte trifásico.

As harmônicas características que são produzidas por um retificador são determinadas pelo número de pulsos. A equação seguinte (12) permite determinar as harmônicas características de um retificador de 6 pulsos. [15]

$$h = kq \pm 1 \quad (12)$$

Onde,

h = número de harmônica (múltiplo inteiro da fundamental)

k = qualquer número inteiro positivo

q = número de pulsos do retificador

Substituindo na equação 12, um retificador de 6 pulsos (ou trifásico) apresenta harmônicas de 5.^a, 7.^a, 11.^a, 13.^a, 17.^a, 19.^a, 23.^a etc. ordens, múltiplas da fundamental. Como regra geral, as magnitudes das harmônicas de correntes será a corrente fundamental dividida pelo número de harmônica (por exemplo, a magnitude da 5.^a harmônica seria cerca de 1/5 da corrente fundamental).

Um espectro típico do retificador de 6 pulsos é apresentado na figura 18. [15]

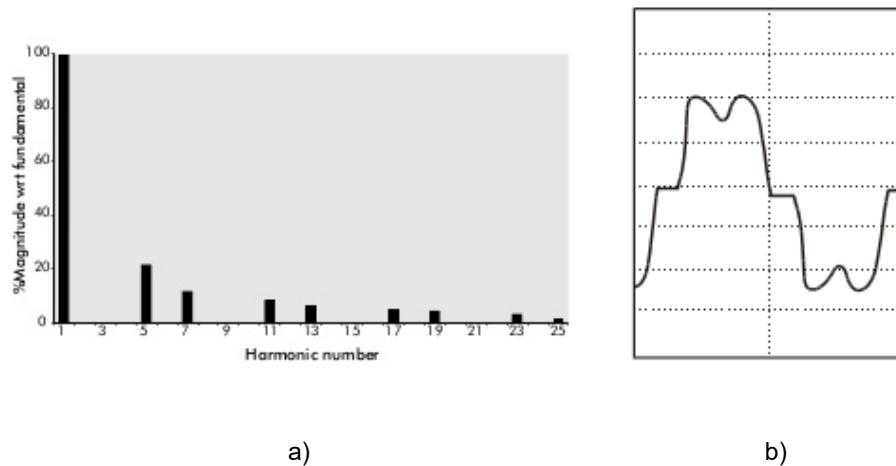


Figura 18 Espectro de harmônicas típico de uma ponte retificadora de 6 pulsos (a) e Onda de corrente caraterística (b).

4. RESULTADOS

4.1. MONITORIZAÇÃO DA QUALIDADE DE ENERGIA/ HARMÓNICAS

Na área industrial onde a mais pequena perturbação poderá levar a prejuízos consideráveis, é importante que os problemas sejam solucionados rapidamente, idealmente mesmo antes de acontecerem. Neste sentido, a monitorização aparece como um elemento fundamental no sentido da necessária caracterização da performance dos sistemas elétricos, constituindo assim uma importante medida preventiva. Ao obtermos um conhecimento rigoroso e detalhado da performance destes sistemas, todas as perturbações poderão ser facilmente identificáveis. Assim, quando se estiver perante uma situação de problemas relacionados com a qualidade da energia numa dada instalação, uma boa estratégia será após efetuada uma inspeção do local e recolha de toda a informação possível, proceder à monitorização do sistema durante um certo período de tempo. Deste modo, após uma análise cuidada de todos os dados recolhidos, poder-se-á então avançar para a aplicação de medidas corretivas necessárias por forma a solucionar o(s) problema(s). [2]

4.2. FORMA DE REALIZAR E INTERPRETAR AS MEDIDAS DE PERTURBAÇÃO HARMÓNICA

A deteção da presença de perturbação harmónica numa rede de alimentação é possível mediante a monitorização das tensões e correntes harmónicas, que atuam sobre a qualidade das ondas de tensão/corrente da instalação elétrica em questão. A localização das cargas poluidoras é feita medindo as correntes harmónicas que circulam nos diferentes ramos da rede elétrica, permitindo desta forma identificar as cargas que dão origem à produção de harmónicas. O valor da taxa de distorção harmónica total em tensão (*THD_v*) e em corrente (*THD_i*), medidos numa instalação deve comparar-se com os valores da recomendação IEEE 519: 2014 [8] e EN 50160:2015 [9] que em termos práticos resultam nos valores indicados nas tabelas 5 e 6. O objetivo é obter uma primeira ideia, a partir da medida realizada, da presença ou não de perturbação harmónica na rede em causa. [2]

Desta forma pode-se identificar a causa e, portanto, os equipamentos perturbadores existentes na rede elétrica, medindo as correntes harmónicas até á entrada da(s) carga(s) poluidora(s). As monitorizações devem ser feitas em períodos de funcionamento que se supõem altamente "contaminantes" ou quando as cargas não lineares estejam em funcionamento. Assim os períodos críticos a ter em conta de acordo com as diversas áreas de intervenção são os seguintes:

- No setor industrial, geração contínua de harmónicas, independentemente do horário.
- No caso da torre eólica foram selecionados preferencialmente os períodos de 24 horas em que o aerogerador estava à plena carga.

Por outro lado, deve ter-se em conta se as cargas poluidoras funcionam em simultâneo, ou não, e conhecer quais os períodos críticos nos quais as perturbações são máximas. Atualmente existem no mercado diversos equipamentos de medição de harmónicas que permitem recolher estes dados, permitindo alguns deles fazer a análise e tratamento informático dos dados recolhidos.

4.3. EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO

A avaliação da perturbação harmónica neste trabalho tem como principais objetivos:

- 1) avaliação global do estado da rede interna de alimentação da torre eólica com vista a conhecer a qualidade da mesma;
- 2) os dados das monitorizações efetuadas serem utilizados para a implementação e dimensionamento de medidas corretivas apropriadas (dimensionamento de filtros).

Por conseguinte, o equipamento de medição selecionado cumpre os requisitos da norma IEC61000 4-7:2008 que descreve as técnicas e condições a ter em conta na medição de harmónicas. [10]. No caso de estudo de distorção harmónica, as principais grandezas a monitorizar por parte dos equipamentos são as seguintes:

- Amplitude das tensões e correntes harmónicas para as diferentes ordens;
- Taxa de distorção harmónica da corrente e tensão para as diferentes ordens;
- Taxa de distorção harmónica total para a corrente e tensão, THDi e THDv;

4.4. O ANALISADOR IMC POLARES

No decurso deste trabalho foram levadas a cabo inúmeras monitorizações a equipamentos diferentes constituintes da torre eólica. O analisador de energia utilizado, na recolha dos dados foi o IMC POLARES, apresentado na figura 19.

Este aparelho permite analisar a qualidade do fornecimento de energia de acordo a norma europeia EN 50160:2015 [9], que regulamenta as variações dos parâmetros relacionados com o fornecimento de energia em redes de distribuição de energia em BT e MT, através dele podemos obter uma imagem instantânea das principais características da

qualidade da rede elétrica e assim detetar com facilidade os elementos "poluidores" da rede.



Figura 19 Equipamento de monitorização IMC POLARES.

4.4.1. CARATERÍSTICAS TÉCNICAS PRINCIPAIS

As principais características deste aparelho (relativamente às harmónicas) são:

- Análise de harmónicas até à ordem 50
 - Tensão: medida H_n ou $H_n/fundamental$;
 - Corrente: medida H_n ou $H_n/fundamental$;
 - Desvio de fase para cada harmónica;
 - THD: total ou por harmónica.

Este aparelho possui 4 canais de entrada permitindo a ligação, em cada um deles, de uma pinça amperimétrica, uma ponta de prova para ligação à respetiva fase e outra para ligação ao neutro. Desta forma, o aparelho adquire diretamente o valor da tensão e corrente em cada um dos canais (fases). A figura 20 mostra um possível esquema de ligação do aparelho.

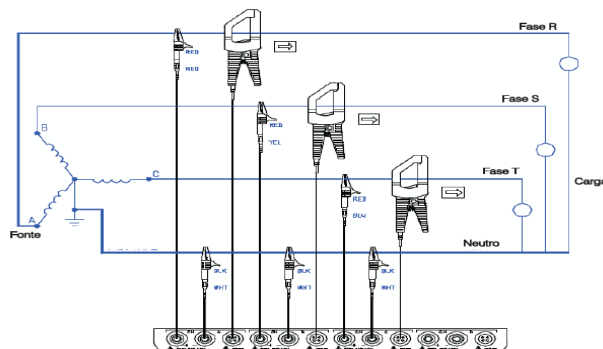


Figura 20 Esquema de ligação do IMC POLARES.

4.5. PINÇA AMPERIMÉTRICA UTILIZADA

As principais características elétricas das pinças amperimétricas, Modelo ELCONTROL C107 (figura 21) utilizadas são:

- Intervalo de medição 0,1 A até 1200 A
- Tensão de Operação 600 Vrms
- Sinal de saída 1 mV AC / A AC (1 V para 1000A)
- Precisão 30 Hz....10 kHz
- Largura de banda ≤ 6 para corrente ≤ 3000 A pico
- Correntes máximas 1000 A continua para frequência ≤ 1 kHz
- Categoria III;



Figura 21 Pinça Amperimétrica ELControl C107

4.6. MONITORIZAÇÕES

A avaliação da poluição harmónica foi realizada através da medição do valor das correntes ou tensões harmónicas detetáveis junto aos locais onde a sua presença possa provocar consequências graves para o sistema e para os equipamentos.

A recolha dos dados foi feita na vizinhança das fontes de harmónicas (cargas "poluidoras") e principalmente nos nós da rede onde existem ou venham a ser instalados filtros.

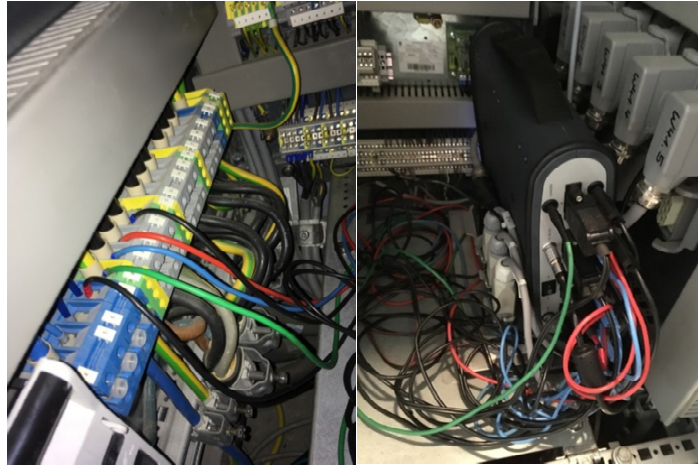


Figura 22 Ligação do aparelho de Monitorização ao Quadro Principal de uma Torre Eólica.

Para que o efeito das harmónicas seja avaliado corretamente é necessário recolher ambas as medidas, das tensões e das correntes. As correntes são utilizadas para caraterizar a "produção" de harmónicas por parte das cargas não lineares existentes no sistema, permitindo, com estas medições individuais em cada carga, determinar as caraterísticas das harmónicas existentes. A medição das tensões é um elemento fundamental para caracterizar a resposta do sistema às correntes harmónicas geradas, sendo as condições de ressonância indicadas por uma elevada distorção na tensão para determinadas frequências.

Para se poder efetuar uma correta avaliação das caraterísticas da resposta em frequência do sistema, a medição das correntes e das tensões foram feitas em simultâneo.

4.6.1. INDICADORES THD

A taxa de distorção harmónica da tensão (THD_v), caracteriza a deformação da onda de tensão pode, dependendo do seu valor, levar à ocorrência ou não de anomalias nos equipamentos ligados à rede.

Tabela 5 Consequências relacionadas com os valores típicos de THD_v . Referência norma IEEE 519:2014 [8] e EN 50160:2015 [9]

THD _v	Consequência
$THD \leq 5\%$	Não existem problemas na maioria dos casos. Considerado normal
$5\% \leq THD \leq 8\%$	Aparecimentos de falhas de funcionamento em dispositivos extremamente sensíveis; Poluição harmónica significativa
$8\% \leq THD \leq 10\%$	Falhas de funcionamento nos aparelhos mais robustos
$THD \geq 10\%$	Os efeitos prejudiciais a longo prazo são praticamente certos

A taxa de distorção harmónica de corrente (THD_i), caracteriza a deformação da onda de corrente pode, dependendo do seu valor, levar à ocorrência ou não de anomalias nos equipamentos ligados à rede.

Tabela 6 Consequências relacionadas com os valores típicos de THD_i . Referência norma IEEE 519:2014 [8] e EN 50160:2015 [9]

THD _i	Consequência
$THD \leq 10\%$	É considerado como normal. Situações de anomalias não são previsíveis;
$10\% \leq THD \leq 50\%$	Um valor de THD_i compreendido entre 10 e 50% revela uma poluição harmónica significativa. Existe risco de aquecimento, este implica o sobredimensionamento dos cabos e das fontes;
$THD \geq 50\%$	Revela uma poluição harmónica bastante significativa. Anomalias são prováveis. Uma análise aprofundada e a colocação de dispositivos de atenuação são necessárias.

4.7. RESULTADOS DAS MONITORIZAÇÕES EFETUADAS

De seguida serão apresentados os resultados obtidos em monitorizações efetuadas a diferentes equipamentos elétricos de utilização na BT da Torre Eólica. Na seleção das cargas monitorizadas foram tidos em conta dois aspetos importantes. O primeiro aspeto prende-se com a repartição dos consumos pelos diferentes equipamentos. Por outro lado, deu-se prioridade a equipamentos que envolvem suspeita de níveis elevados de perturbação harmónica. A apresentação dos resultados é feita por intermédio de tabelas e gráficos onde se podem ver as principais grandezas monitorizadas para as diferentes cargas. Desta forma, podem-se comparar quer os níveis de Taxa de Distorção Harmónica Total quer os valores parcelares de distorção associados a cada uma das harmónicas.

Para cada equipamento monitorizado são apresentadas duas tabelas onde estão apresentados os dados recolhidos relativos à corrente e tensão, respetivamente. São apresentados os valores de consumo do equipamento (I_{ef}), a taxa de distorção total de corrente (THD_i) assim como os valores de distorção harmónica de corrente até à ordem 25. Os dados relativos à tensão, temos, o valor eficaz da tensão no momento da monitorização (U_{ef}), a taxa de distorção total (THD_v) e os valores de distorção harmónica de tensão até à ordem 25. Os valores a partir da ordem 25 até a ordem 50 são residuais por conseguinte não são considerados.

4.7.1. MONITORIZAÇÕES EFETUADAS AOS CONTROLADORES DE VELOCIDADE E *SOFT STARTERS*

Os conjuntos de dados apresentados referem-se a cargas do tipo *soft starters*, ou seja, controladores de velocidade. Este tipo de cargas, que possuem fontes de alimentação com retificadores (fontes comutadas) e inversores, é gerador de grandes perturbações para as redes onde estão inseridos.

Yaw inverter - Nacelle

De salientar os valores elevados de THDi verificados neste equipamento, bem como as ordens de harmônicas que mais contribuem para estes resultados. São as seguintes: ordem 5.^a, 7.^a, 11.^a e 13.^a. Os resultados da monitorização são apresentados nas tabelas 7 e 8. O equipamento é caracterizado pelo funcionamento da ponte retificadora trifásica de 6 pulsos.

Tabela 7 Resultado das monitorizações efetuadas à corrente no controlador de Posição da Nacelle.

03/05/2017 Harmónicas	%RMS / I(A)		
	L1	L2	L3
FND	100 / 5,30	100 / 5,66	100 / 5,90
H03	22,64 / 1,20	15,72 / 0,89	15,42 / 0,91
H05	86,79 / 4,60	83,92 / 4,75	86,78 / 5,12
H07	73,58 / 3,90	74,56 / 4,22	71,69 / 4,23
H09	13,40 / 0,71	8,30 / 0,47	9,15 / 0,54
H11	45,85 / 2,43	40,99 / 2,32	44,75 / 2,64
H13	31,13 / 1,65	30,57 / 1,73	27,97 / 1,65
H15	6,04 / 0,32	7,07 / 0,40	3,90 / 0,23
H17	12,83 / 0,68	9,54 / 0,54	11,36 / 0,67
H19	6,98 / 0,37	11,48 / 0,65	8,98 / 0,53
H21	4,15 / 0,22	5,48 / 0,31	2,88 / 0,17
H23	8,87 / 0,47	6,01 / 0,34	9,66 / 0,57
H25	6,60 / 0,35	8,30 / 0,47	7,12 / 0,42
THDi (%)	130,77	126,26	127,10
Ief (A)	8,72	9,12	9,54

Tabela 8 Resultado das monitorizações efetuadas à tensão no controlador de Posição da Nacelle.

03/05/2017 Harmónicas	%RMS / U(V)		
	L1	L2	L3
FND	100 / 243,14	100 / 242,54	100 / 243,18
H03	0,4 / 0,98	0,32 / 0,77	0,38 / 0,92
H05	2,16 / 5,26	2,60 / 6,31	2,25 / 5,48
H07	2,30 / 5,60	2,33 / 5,65	2,37 / 5,77
H09	0,28 / 0,68	0,35 / 0,86	0,27 / 0,65
H11	0,80 / 1,94	0,81 / 1,97	0,87 / 2,12
H13	0,46 / 1,11	0,47 / 1,13	0,34 / 0,83
H15	0,35 / 0,84	0,26 / 0,64	0,30 / 0,73
H17	0,60 / 1,45	0,34 / 0,83	0,54 / 1,31
H19	0,63 / 1,52	0,50 / 1,22	0,50 / 1,22
H21	0,24 / 0,58	0,33 / 0,79	0,21 / 0,52
H23	0,36 / 0,87	0,44 / 1,07	0,28 / 0,69
H25	0,51 / 1,23	0,27 / 0,66	0,35 / 0,84
THDv (%)	3,52	3,76	3,56
Uef (V)	243,29	242,71	243,33

Na figura 23 é apresentada a forma de onda de corrente obtida nesta monitorização.

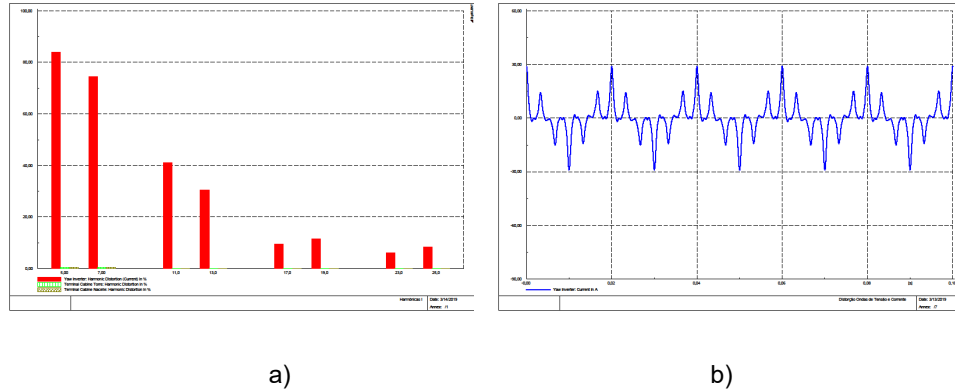


Figura 23 Gráfico de Harmónicas (a) e Formas de onda da corrente (b) associada aos sistemas analisados - *Yaw Inverter*.

Fan inverter - Ventilação Gerador

De salientar o elevado consumo verificado por este equipamento (I_{ef}), comparativamente às restantes cargas analisadas. As ordens de harmónicas que mais contribuem para o THDi são similares as da carga analisada anteriormente, sendo as mais relevantes de ordem 5.^a e 7.^a, 11.^a e 13.^a.

Tabela 9 Resultado das monitorizações efetuadas à corrente no controlador de velocidade da ventilação do Gerador.

06/08/2017 Harmónicas	%RMS / I(A)		
	L1	L2	L3
FND	100 / 15,20	100 / 14,76	100 / 15,69
H03	6,71 / 1,02	5,62 / 0,83	3,06 / 0,48
H05	64,74 / 9,84	66,94 / 9,88	65,58 / 10,29
H07	40,79 / 6,20	40,65 / 6,00	41,05 / 6,44
H09	1,78 / 0,27	2,30 / 0,34	1,08 / 0,17
H11	10,00 / 1,52	10,37 / 1,53	10,01 / 1,57
H13	6,45 / 0,98	6,23 / 0,92	6,18 / 0,97
H15	0,79 / 0,12	1,08 / 0,16	0,70 / 0,11
H17	4,74 / 0,72	4,95 / 0,73	4,53 / 0,71
H19	2,89 / 0,44	3,39 / 0,50	3,19 / 0,50
H21	0,79 / 0,12	1,02 / 0,15	0,70 / 0,11
H23	2,89 / 0,44	3,05 / 0,45	2,55 / 0,40
H25	2,17 / 0,33	2,17 / 0,32	2,42 / 0,38
THDi (%)	78,04	79,80	78,60
I_{ef} (A)	19,28	18,88	19,96

Tabela 10 Resultado das monitorizações efetuadas à tensão no controlador de velocidade da ventilação do Gerador.

06/08/2017 Harmónicas	%RMS / U(V)		
	L1	L2	L3
FND	100 / 242,18	100 / 240,44	100 / 241,81
H03	0,42 / 1,01	0,39 / 0,93	0,36 / 0,87
H05	2,61 / 6,32	2,72 / 6,53	2,70 / 6,53
H07	2,46 / 5,96	2,52 / 6,07	2,46 / 5,95
H09	0,26 / 0,63	0,35 / 0,84	0,26 / 0,64
H11	0,78 / 1,89	0,89 / 2,15	0,86 / 2,09
H13	0,59 / 1,42	0,53 / 1,27	0,55 / 1,33
H15	0,43 / 1,05	0,28 / 0,67	0,33 / 0,79
H17	0,63 / 1,52	0,39 / 0,94	0,52 / 1,26
H19	0,64 / 1,56	0,45 / 1,08	0,52 / 1,26
H21	0,41 / 1,00	0,27 / 0,66	0,20 / 0,49
H23	0,48 / 1,17	0,26 / 0,62	0,39 / 0,95
H25	0,34 / 0,82	0,29 / 0,69	0,29 / 0,69
THDv (%)	3,95	3,97	3,94
Uef (V)	242,37	240,63	242,00

Na figura 24 são mostradas as formas de onda da corrente obtida nesta monitorização.

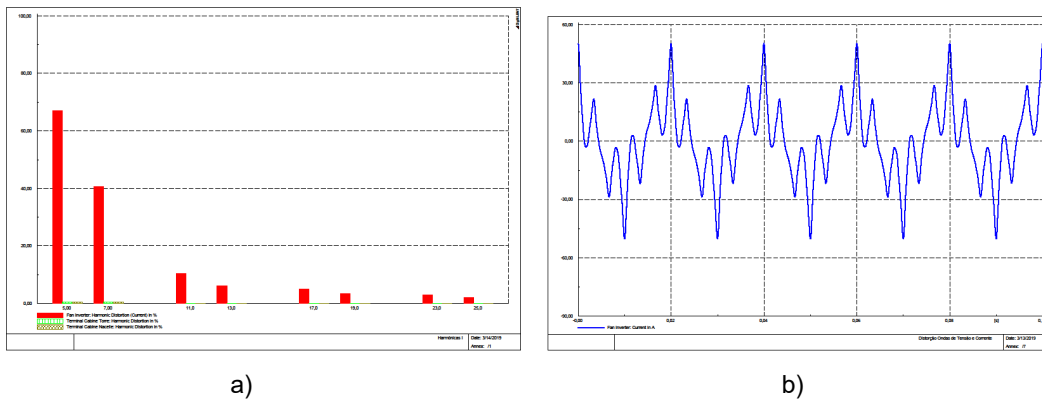


Figura 24 Gráfico de harmónicas (a) e Formas de onda da corrente (b) associada aos sistemas analisados - Fan Inverter.

Controlo *Pitch* - Pás

As ordens de harmónicas que mais contribuem para o THDi são similares as da carga analisada anteriormente, sendo as mais relevantes de ordem 5.^a e 7.^a, 11.^a e 13.^a. Os resultados da monitorização são apresentados nas tabelas 11 e 12.

Tabela 11 Resultado das monitorizações efetuadas à corrente no controlador de velocidade das Pás do Rotor.

22/03/2017 Harmónicas	%RMS / I(A)		
	L1	L2	L3
FND	100 / 3,84	100 / 4,07	100 / 4,39
H03	5,47 / 0,21	7,62 / 0,31	10,25 / 0,45
H05	64,06 / 2,46	59,71 / 2,43	56,04 / 2,46
H07	42,97 / 1,65	39,56 / 1,61	38,50 / 1,69
H09	2,08 / 0,08	2,46 / 0,10	3,19 / 0,14
H11	10,42 / 0,40	9,09 / 0,37	9,34 / 0,41
H13	7,55 / 0,29	7,13 / 0,29	6,61 / 0,29
H15	1,04 / 0,04	0,98 / 0,04	1,14 / 0,05
H17	6,25 / 0,24	5,41 / 0,22	5,01 / 0,22
H19	3,65 / 0,14	3,44 / 0,14	2,73 / 0,12
H21	0,78 / 0,03	0,74 / 0,03	0,68 / 0,03
H23	3,91 / 0,15	3,19 / 0,13	2,96 / 0,13
H25	2,60 / 0,10	2,21 / 0,09	2,51 / 0,11
THDi (%)	78,91	73,38	70,13
Ief (A)	4,89	5,04	5,36

Tabela 12 Resultado das monitorizações efetuadas à tensão no controlador de velocidade das Pás do Rotor.

22/03/2017 Harmónicas	%RMS / U(V)		
	L1	L2	L3
FND	100 / 245,44	100 / 245,41	100 / 245,80
H03	0,27 / 0,66	0,22 / 0,53	0,20 / 0,49
H05	2,29 / 5,62	2,45 / 6,01	2,23 / 5,47
H07	1,99 / 4,88	2,13 / 5,23	2,07 / 5,10
H09	0,22 / 0,53	0,37 / 0,90	0,17 / 0,41
H11	0,75 / 1,83	0,78 / 1,91	0,76 / 1,87
H13	0,48 / 1,17	0,50 / 1,22	0,50 / 1,24
H15	0,25 / 0,62	0,18 / 0,43	0,28 / 0,68
H17	0,30 / 0,74	0,29 / 0,72	0,30 / 0,74
H19	0,43 / 1,06	0,32 / 0,79	0,35 / 0,85
H21	0,13 / 0,33	0,13 / 0,32	0,17 / 0,41
H23	0,27 / 0,67	0,32 / 0,79	0,31 / 0,76
H25	0,22 / 0,54	0,24 / 0,59	0,21 / 0,52
THDv (%)	3,25	3,46	3,26
Uef (V)	245,57	245,56	245,93

Na figura 25 é apresentada a forma de onda de corrente obtida nesta monitorização.

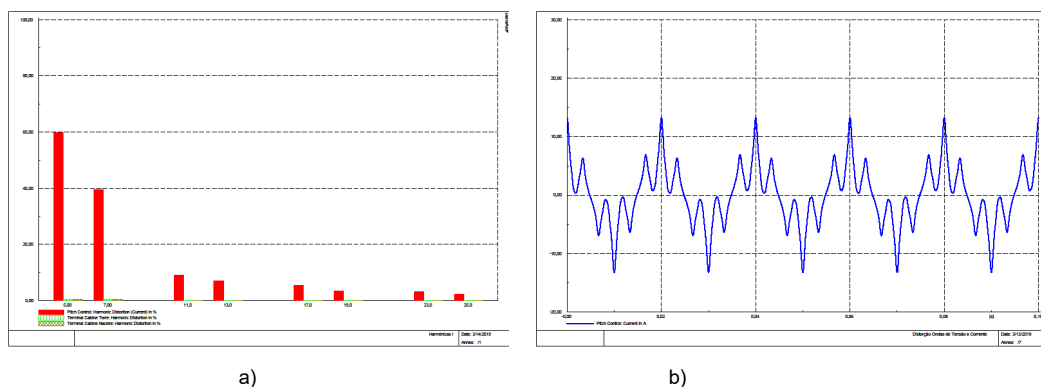


Figura 25 Gráfico de harmónicas (a) e Formas de onda de corrente (b) associada aos sistemas analisados - *Pitch Control*.

Quadro Principal de alimentação

No quadro principal onde estão ligadas as três cargas analisadas anteriormente de salientar os valores de THDi verificados para o conjunto destes equipamentos e cargas lineares ligadas no mesmo barramento. As ordens harmónicas que mais contribuem para estes resultados são as seguintes: 5.^a, 7.^a, 11.^a e 13.^a. Os resultados da monitorização são apresentados nas tabelas 13 e 14.

Tabela 13 Resultado das monitorizações efetuadas a corrente no quadro principal.

03/03/2017 Harmónicas	%RMS / I(A)		
	L1	L2	L3
FND	100 / 46,64	100 / 47,36	100 / 47,51
H03	2,27 / 1,06	1,79 / 0,85	1,68 / 0,80
H05	30,64 / 14,29	31,06 / 14,71	31,36 / 14,90
H07	20,60 / 9,61	20,31 / 9,62	20,21 / 9,60
H09	0,86 / 0,40	0,84 / 0,40	1,01 / 0,48
H11	6,80 / 3,17	6,48 / 3,07	6,80 / 3,23
H13	4,31 / 2,01	4,37 / 2,07	4,29 / 2,04
H15	0,88 / 0,41	0,53 / 0,25	0,59 / 0,28
H17	2,57 / 1,20	2,51 / 1,19	2,63 / 1,25
H19	1,44 / 0,67	1,41 / 0,67	1,41 / 0,67
H21	0,26 / 0,12	0,38 / 0,18	0,21 / 0,10
H23	1,27 / 0,59	1,37 / 0,65	1,37 / 0,65
H25	1,05 / 0,49	1,06 / 0,50	1,01 / 0,48
THDi (%)	38,03	38,13	38,37
Ief (A)	49,90	50,69	50,89

Tabela 14 Resultado das monitorizações efetuadas a tensão no Quadro Principal.

03/03/2017 Harmônicas	%RMS / U(V)		
	L1	L2	L3
FND	100 / 243,92	100 / 245,20	100 / 244,97
H03	0,36 / 0,88	0,38 / 0,94	0,50 / 1,22
H05	1,75 / 4,27	1,83 / 4,48	1,85 / 4,52
H07	1,87 / 4,57	1,94 / 4,76	1,98 / 4,84
H09	0,21 / 0,51	0,24 / 0,60	0,20 / 0,48
H11	0,64 / 1,56	0,73 / 1,80	0,68 / 1,66
H13	0,55 / 1,35	0,57 / 1,40	0,60 / 1,48
H15	0,18 / 0,45	0,22 / 0,53	0,24 / 0,59
H17	0,26 / 0,64	0,26 / 0,63	0,28 / 0,69
H19	0,48 / 1,16	0,41 / 1,00	0,34 / 0,83
H21	0,18 / 0,43	0,11 / 0,27	0,14 / 0,34
H23	0,31 / 0,76	0,25 / 0,62	0,28 / 0,69
H25	0,36 / 0,89	0,21 / 0,52	0,21 / 0,51
THDv(%)	2,84	2,93	2,97
Uef (V)	244,02	245,31	245,08

Na figura 26 são mostradas as formas de onda de corrente obtida nesta monitorização.

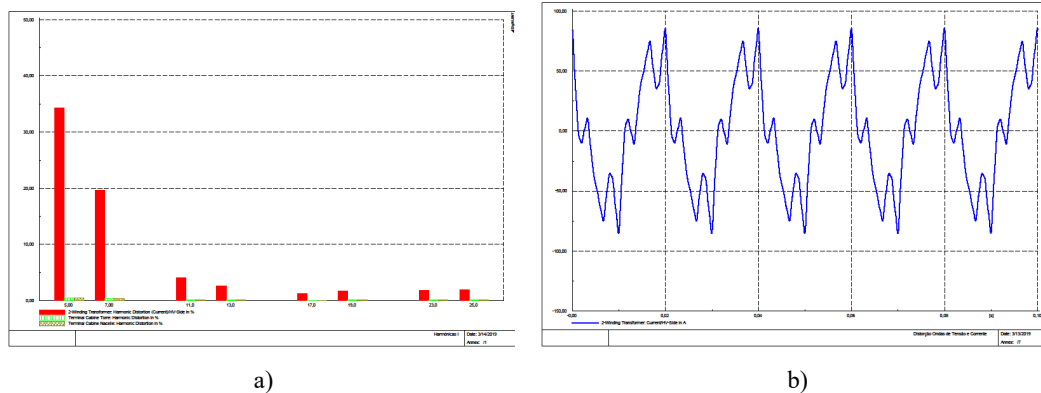


Figura 26 Gráfico de harmônicas (a) e Formas de onda de corrente (b) associada aos sistemas analisados no Quadro principal de Alimentação.

4.8. MONITORIZAÇÃO ATRAVÉS DA CÂMARA TERMOGRÁFICA

A poluição harmónica origina problemas que têm vindo a aumentar principalmente nos últimos anos e com eles as queixas dos consumidores à medida que se vão apercebendo dos efeitos negativos da sua presença. Em Portugal esta questão ainda não é completamente compreendida nem conhecida pelos consumidores particulares. Contudo, algumas empresas começam a sofrer as consequências desta poluição, que frequentemente tem origem nas suas próprias instalações. [11]

As harmónicas têm uma sequência que pode ser negativa, positiva ou nula (zero). As harmónicas de sequência positiva e negativa provocam sobreaquecimentos, enquanto as harmónicas de sequência nula (harmónicas homopolares) são as mais preocupantes nas instalações e redes eléctricas - devido a possibilidade de existir uma importante corrente a circular pelo condutor neutro no caso de uma ligação em estrela ou então pela malha do triângulo, no caso de ligação em Δ . [12]

Tabela 15 Classificação das Harmónicas quanto à ordem e sequência.

Ordem	Fundamental	2.º	3.º	4.º	5.º	6.º	7.º	8.º	9.º	10.º	11.º	12.º	13.º	...	n.º
Frequência (Hz)	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	...	Nx50
Sequência	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

O efeito da distorção harmónica apresenta-se principalmente ao nível da operação dos diferentes equipamentos existentes no sistema, mas também a sua influência em toda a rede eléctrica da instalação [11]:

- uma corrente no condutor de neutro muito superior à esperada, pode por vezes ser superior á corrente nas fases ($I_N = I_R + I_S + I_T$) provocada pela presença de harmónicas de

terceira ordem e suas múltiplas (Sequência nula). Uma corrente de valor mais elevado no condutor de neutro leva a um incremento da temperatura e conseqüente sobreaquecimento;

- com o aumento da frequência do sinal de corrente, devido às harmônicas, a corrente tende a circular pela periferia do condutor, significando em um aumento da sua resistência elétrica e, conseqüentemente, um aumento das perdas por efeito Joule (efeito pelicular);

- as harmônicas de corrente provocam perdas ôhmicas suplementares nos enrolamentos principais e nos enrolamentos amortecedores dos alternadores. Por outro lado, a interação entre correntes harmônicas e o campo magnético fundamental pode originar binários oscilatórios provocando vibrações no veio dos alternadores e por conseqüência o aumento da fadiga mecânica das máquinas;

- nos transformadores, as harmônicas de corrente provocam o aumento das perdas nos enrolamentos e as harmônicas de tensão criam correntes de Foucault e perdas por histerese suplementares nos circuitos magnéticos;

- nos motores assíncronos ocorrem aumentos nas perdas por efeito de Joule, com o conseqüente sobreaquecimento dos enrolamentos estatóricos, e por efeito pelicular uma distribuição assimétrica da corrente induzida nas barras rotóricas, o que por sua vez provoca vibrações com torção do veio da máquina;

- o corte das correntes com elevada taxa de distorção harmônica provoca dificuldades acrescidas ao funcionamento dos disjuntores. As componentes de alta frequência têm uma variação mais rápida na passagem por zero da corrente o que dificulta o corte da corrente.

Para a detecção de harmônicas um analisador da qualidade de energia é o equipamento mais adequado, embora não consiga detetar os efeitos provocados pelas harmônicas nos elementos de uma instalação elétrica. **A termografia é um excelente complemento para uma manutenção preditiva mais eficaz.**

As imagens termográficas apresentadas na figura 27 foram recolhidas na base da torre eólica no quadro principal de alimentação, onde estão ligadas os conjuntos de cargas analisadas, lineares e não lineares.

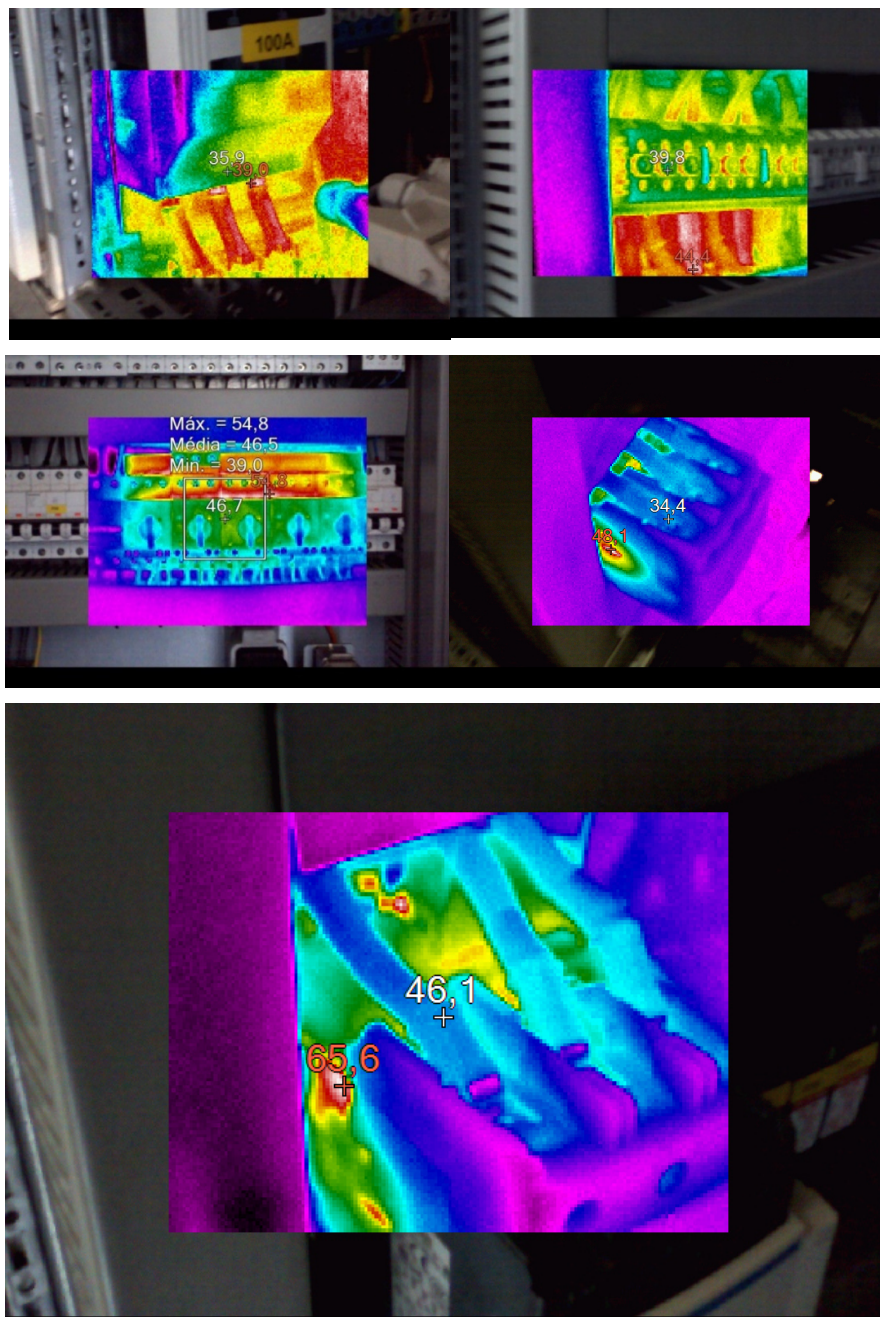


Figura 27 Imagens Termográficas de efeitos de Harmônicas na torre eólica recolhidas a 07/12/2018. Os valores apresentados nas imagens estão em °C, graus centígrados.

Para a recolha de imagens termográficas no quadro de alimentação foi utilizado o seguinte equipamento, a câmara termográfica da FLUKE, modelo Ti10, com as seguintes especificações:

- Gama de medição de temperatura: -20 °C a 250 °C
- Precisão: ± 2 °C
- Campo de visão: 23° x 17°
- Distância de focagem mínima: 0,46 m
- Focagem: Manual
- Tipo de lente IR: 20 mm F = lente de 0.8
- Sensibilidade térmica: ≤ 0.13 °C a 30 °C
- Câmara de imagens visuais: Resolução de 640 x 480
- Memória: Cartão SD de 2 Gb
- Visor: LCD VGA com 640 x 480
- Autonomia: 3-4 horas
- Índice de proteção: IP54
- Peso: 1,2 kg



Figura 28 Câmara termográfica utilizada no trabalho: modelo Ti10 da FLUKE.

Nos períodos de monitorização não foram detetados valores anormais de temperatura nos barramentos ou cabos através da câmara termográfica. O dimensionamento de cabos e equipamentos julga-se apropriado.

4.9. SIMULAÇÃO ATRAVÉS DO PROGRAMA *POWER FACTORY*

Foi escolhido o programa *PowerFactory* da *DigSILENT*, para a simulação das correntes e tensões da rede. E ainda, para a apresentação dos gráficos de distorções harmônicas, e do resultado da melhoria da qualidade de rede pela aplicação dos filtros simulados.

4.9.1. APRESENTAÇÃO DO PROGRAMA

O programa de cálculo *PowerFactory*, desenvolvido pela *DigSILENT*, é um *software* para análise de redes de energia elétrica industrial, de distribuição e transmissão.

“*DigSILENT*” significa “***DI***gital ***SI***muLation of ***E***lectrical ***NeT***works”.



Figura 29 Programa de simulação utilizado: PowerFactory, versão 15.1.4.

DigSILENT foi fundada em 1985, empresa totalmente privada e está localizada em Gomaringen/Tübingen, na Alemanha.

O software adquirido para este trabalho, foi a versão para estudante, PF4S - “PowerFactory4Students”. Algumas principais características do software:

- Modelização de sistemas de potência incluindo equipamentos de eletrônica de potência.

- Componente gráfica integrada e interativa de esquemas unifilares.
- Elementos de redes elétricas pré-definidos.
- Funções integradas de cálculo.
- Análise de fluxo de potências, análise de harmônicas, etc.
- Número máximo de nós de rede = 50;
- Número de utilizadores = 1;
- Tipo de licença do servidor = *Workstation* (USB chave de hardware);
- Tipo de licença = somente para fins educacionais (exemplos: seminários, projetos acadêmicos, teses, exercícios, etc.)

4.10. APLICAÇÃO DO PROGRAMA DE SIMULAÇÃO

Foram designadas para análise no programa, as principais cargas lineares e não lineares do sistema. Estas são apresentadas de seguida na tabela 16.

Tabela 16 Repartição de cargas lineares e não lineares da WEC consideradas no estudo.

Sistema	Barramento/ Carga	Tipo de Carga	Análise
Consumo Básico	PCBs - Power Control Board	Não Linear	Não considerada
WEC Control	Yaw motors	Não Linear	Considerada
	Pitch Motors	Não Linear	Considerada
Ventilação	Tower Fan	Linear	Considerada
	Nacelle Fan	Não Linear	Considerada
	Ventiladores dos Conversores	Linear	Considerada
	Conversores	Linear	Considerada
	Geral	Linear	Considerada

A torre eólica é constituída por algumas cargas lineares como por exemplo: a ventilação dos armários conversores de potência, a ventilação da torre, o ventilador do retificador; E por cargas não lineares, o sistema de *pitch*, sistema de azimute ou *yaw inverter*, controlador de velocidade da ventilação do gerador. Por razões de simplificação foi considerado um sistema trifásico equilibrado;

A figura seguinte, apresenta o diagrama unifilar geral simplificado de alimentação do sistema elétrico da instalação, mostrando o nível de tensão para a análise de harmónicas e as características do sistema analisado com cargas lineares e não lineares trifásicas.

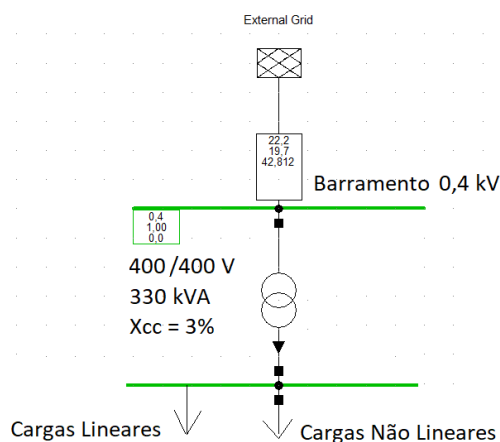


Figura 30 Nível de Tensão na rede BT Aerogerador.

Os resultados do fluxo de carga do circuito nas medições são apresentados de seguida, para os respetivos barramentos:

Tabela 17 Resultados das medições das Harmónicas efetuadas na torre eólica.

Sistema	Carga	Tipo de Carga	I _{rms} (A)	THDi (%)	THDv (%)	cosφ
WEC Control	Yaw motors	Não Linear	9,12	126,26	3,76	0,60
	Pitch Motors	Não Linear	5,04	73,38	3,46	0,50
Ventilação	<i>Tower Fan</i>	Linear	-	-	-	-
	Nacelle Fan	Não Linear	18,88	79,8	3,97	0,77
	Ventiladores dos Conversores	Linear	-	-	-	-
	Conversores	Linear	-	-	-	-
	Geral	Linear	-	-	-	-
Quadro de alimentação	Total	Ambos	50,69	38,13	2,93	0,80

A taxa de distorção harmónica da tensão (*THDv*), que caracteriza a deformação da onda de tensão, não foram consideradas no estudo através do simulador pois os valores

obtidos em medição para THD_v são inferiores a 5 %, é considerado como normal (ver resultados tabela 17, página anterior). Não existe motivo para grandes preocupações, é considerado normal.

Os resultados inseridos no programa da *DIGSILENT* para as principais **cargas não lineares** (obtidos através de medição) e **cargas lineares** (obtidos através de ficha técnica do fabricante) consideradas são apresentados de seguida (tabela 18).

Tabela 18 Resultados inseridos para as cargas analisadas no programa *Power Factory*.

		P (kW)	Q (kvar)	I_{rms} (A)	THDi (%)	FP
Cargas não lineares	Yaw Motors	2,4	3,1	8,966	124,7	0,6
	Pitch Motors	1,7	2,3	5,044	72,9	0,6
	Nacelle Fan Inverter	8,1	6,7	19,410	79,6	0,8
Cargas lineares	Ventilador da Torre 1	6,3	4,7	11,3	—	0,8
	Ventilador da Torre 2	1,4	1,1	2,61	—	0,8
	Ventiladores dos quadros de Potência	1,8	1,3	3,18	—	0,8
	Ventiladores do Retificador	0,6	0,5	1,10	—	0,8

O simulador PowerFactory executa todas as funções de simulação de trânsito de potências - funções tais como fluxo de cargas, cálculo de corrente de curto circuito, análise de harmónicas, etc.

O esquema simulado das cargas lineares e não lineares da torre eólica é apresentado na figura 31.

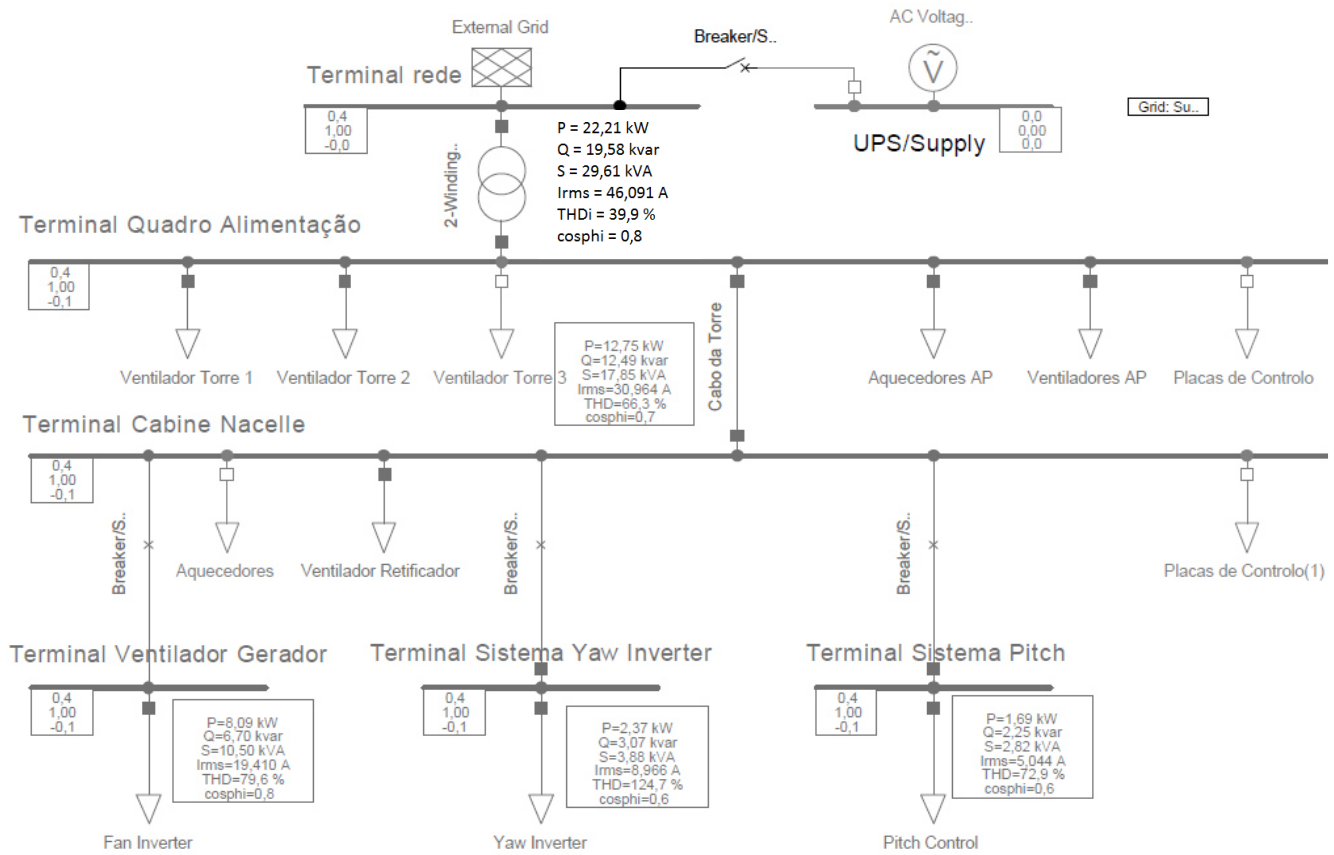


Figura 31 Esquema Unifilar simplificado de baixa tensão da Torre Eólica com inserção das principais cargas lineares e não lineares.

Os resultados obtidos na simulação para o barramento do quadro principal de alimentação são os seguintes:

Tabela 19 Resultados obtidos para todas as cargas em simultâneo analisadas no programa *Power Factory*.

		P (kW)	Q (kvar)	Irms (A)	THDi (%)	FP
Cargas não lineares e lineares	Quadro principal	22,2	19,6	46,1	39,9	0,75

As harmônicas são componentes sinusoidais da corrente e tensão, cujas frequências são múltiplas da frequência fundamental da rede. O resultado da sobreposição das diversas ondas harmônicas com a fundamental é uma onda periódica com distorções. De acordo com os resultados obtidos, para o conjunto de cargas em medição e confirmados no simulador, temos para a corrente ($THDi$) = **38,13 %** (obtido por medição) e **39,9 %** (obtido através do simulador - tabela 19).

Relembrando,

- Um valor de $THDi$ compreendido entre **10 e 50 %** revela uma poluição harmônica significativa. Existe risco de aquecimento, este implica o sobredimensionamento dos cabos e das fontes;

Com o objetivo de reduzir ou minimizar as anormalidades encontradas, este estudo propõe a elaboração de cálculo para implementação de filtros passivos de sintonia única a serem utilizados em paralelo com as cargas de acordo com cada frequência harmônica.

5. SOLUÇÕES PROPOSTAS

5.1. MÉTODOS PARA ATENUAÇÃO HARMÓNICA

É possível encontrar diversas técnicas para redução dos sinais de harmónicas de tensão e/ou corrente. Estas, são indicadas de seguida [7]:

- Uso de filtros passivos ligados em paralelo e/ou em série com o sistema elétrico;
- Filtros ativos de potência ligados em paralelo e/ou em série com o sistema elétrico;
- Aumento da quantidade de pulsos em unidades conversoras (IGBT's, etc.), com o uso de transformadores defasadores;
- Transformador mitigador de harmónicas;
- Sobredimensionamento de equipamentos de modo a minimizar o efeito das perdas excessivas (em forma de calor).

A escolha de um ou outro procedimento, ou até a interligação de soluções, deve ter em conta o estudo de alguns aspetos importantes, entre outros:

- Tipos de cargas instaladas, potência envolvida, problemas que ocorrem devido às harmónicas, perda de energia, diminuição do fator de potência real;
- Local da instalação do dispositivo para redução de harmónicas;
- Desempenho e capacidade nominal de tensão/corrente do dispositivo;
- Custo de aquisição e custos de consumo do próprio aparelho;
- Efeitos colaterais prejudiciais sobre o sistema de alimentação: o fator de potência em situações de carga nominal pode alterar-se em condições de carga baixa, modificação do nível e da distorção de tensão ou de corrente, alteração do nível de curto-circuito para a terra, mudança ou possibilidade de ressonância em outras frequências harmónicas. [7]

Das alternativas relacionadas como possíveis estratégias para a eliminação/redução das correntes harmónicas, aquelas associadas aos filtros ativos e passivos são, comumente, as mais utilizadas. Os filtros passivos são formados a partir de várias combinações dos elementos tipo R, L e C, podendo ser ligados em paralelo ou em série ao sistema eléctrico. Os filtros em paralelo (derivação, ou *shunt*), têm sido amplamente estudados e aplicados em diversos sistemas eléctricos. [7]

5.2. FILTROS ATIVOS

Os filtros ativos são constituídos basicamente por inversores CA/CC reversíveis com IGBT's (conversores comutados de electrónica de potência) com capacidade de injetar na rede intensidades de corrente cujo valor eficaz e forma de onda são programáveis (circuito de controlo). O filtro ativo tem, pois, como finalidade eliminar as harmónicas de corrente que circulam na rede eléctrica produzidas por uma ou mais cargas não lineares ligadas à rede correspondente, evitando fenómenos indesejáveis que originam a distorção da forma de onda da tensão, afetando tanto a instalação onde são produzidas como outras

redes a ela ligadas. O filtro ativo pode ser ligado em paralelo entre a fonte e a carga poluidora, conforme se pode ver na figura 32 - para compensação de harmónicas de corrente. Ou ainda, ser ligado em série para compensação de harmónicas de tensão.

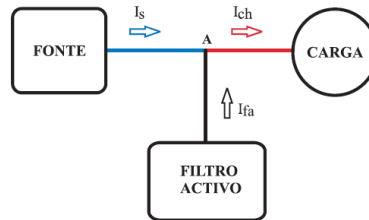


Figura 32 Ligação típica de um filtro ativo de harmónicas.

Seguidamente será feita uma abordagem à solução aplicada neste trabalho, a utilização de filtros passivos. Sendo a alternativa mais simples e economicamente viável; embora apresentem algumas desvantagens conforme apresentado de seguida. [7]

5.3. FILTRO PASSIVO LC

A alternativa mais simples e economicamente viável, embora apresentem algumas desvantagens, consiste, geralmente, na inclusão de um filtro LC em paralelo com a fonte poluidora. A figura 33 mostra uma ligação típica deste tipo de filtro, sendo este ajustado sobre cada frequência de harmónica a filtrar, em paralelo sobre a carga não linear. Este filtro em derivação absorve as harmónicas e evita que elas circulem na alimentação.

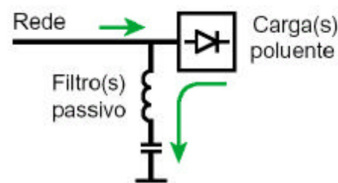


Figura 33 Utilização de um Filtro LC, para atenuação de uma harmónica específica.

Fórmulas de cálculo para o filtro passivo:

(Impedância) $Z = R + X_L - X_C$, por forma a termos impedância nula e $R = 0 \Omega \rightarrow$

$$\text{Temos } X_L = X_C \rightarrow \omega L = \frac{1}{\omega C}, \omega^2 = \frac{1}{LC}, \omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

A frequência de ressonância é dada por:

$$f_R = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} \quad (13)$$

Apresenta desempenho muito satisfatório, sobretudo na frequência sintonizada, obtendo-se geralmente $THDi \leq 5\%$;

- Tem baixas perdas, que estão geralmente associadas à resistência da indutância;
- Aumento do fator de potência da instalação, uma vez que a introdução do condensador (C) compensa parte da energia indutiva dos componentes existentes.

Por sua vez, os filtros de harmónicas passivos LC apresentam algumas desvantagens:

- Limite de espectro de atuação, ou seja, o filtro elimina apenas o sinal de harmónica sintonizado e atenua as outras harmónicas próximas, mas não é eficaz para uma banda mais larga de sinais;
- Interação com a rede, originando uma ressonância paralela equivalente á das baterias de condensadores;
- Funciona adequadamente apenas se não houver alteração nas cargas durante a vida da instalação, uma vez que, a mudança das cargas pode provocar alteração no espectro de harmónicas da instalação, fazendo com que a frequência de sintonia previamente estabelecida para o filtro seja diferente do novo valor existente. [7]

5.4. APLICAÇÃO DE FILTROS PASSIVOS

Conforme já indicado anteriormente, principalmente por razões de simplicidade e económicas, foi analisada a aplicação de filtros passivos como solução para redução da distorção harmónica de corrente encontrada. Atualmente, a maneira mais comum de se atenuarem as harmónicas é com a instalação de filtros passivos sintonizados para frequências mais baixas e dos filtros passa-alta para as frequências superiores. Antes da instalação de um filtro passivo temos de identificar as componentes harmónicas mais problemáticas na instalação, uma vez que estes filtros são projetados para atenuarem apenas uma determinada componente harmónica. Os filtros de sintonia simples também conhecidos como filtros *shunt* ressonantes, caracterizam-se por serem filtros passa-faixa, proporcionando uma redução da impedância para a frequência que se deseja filtrar, de modo a desviar as correntes indesejadas para a terra. [11]

São bastante usados nas frequências harmónicas que apresentam maiores amplitudes, abrangendo geralmente as harmónicas mais baixas (3.^a, 5.^a, 7.^a, 9.^a, 11.^a, 13.^a). Uma das suas características é contribuir para a correção do fator de potência, tendo em vista que para frequências abaixo da sintonia a impedância do filtro comporta-se de forma capacitiva. A figura 34 mostra a configuração do filtro passivo de sintonia simples. Para o caso em estudo, a sintonia dos filtros será realizada para as frequências desejadas, resultando assim em baixas resistências nos circuitos equivalentes, pois as reatâncias capacitivas, nesses casos, anulam-se com as reatâncias indutivas para as frequências desejadas. [11]

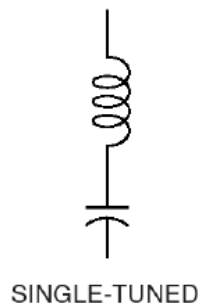


Figura 34 Filtro passivo de sintonia simples [9].

5.5. CÁLCULO DOS FILTROS PROPOSTOS

Para realização do estudo e dimensionamento de filtros foram considerados os valores seguintes respeitantes as cargas não lineares (*Yaw Motors, Pitch Motors, Nacelle Fan Inverter*), obtidos na simulação;

P = 12,16 kW, **Q** = 12,05 kvar, **I_{rms}** = 30,083 A **THDi** = 69,2 %,

FP = 0,71; **Tensão**: 400 V

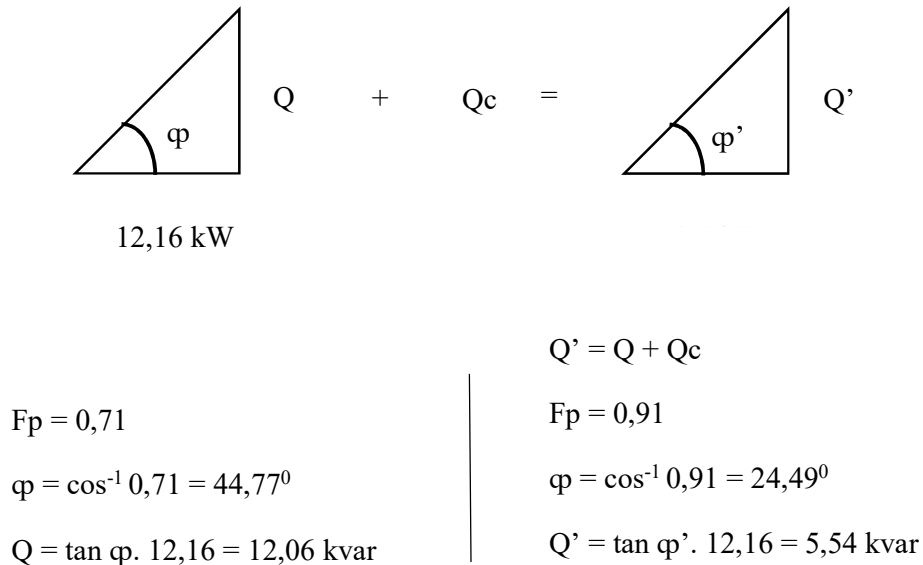
Estes valores foram obtidos a partir da simulação e considerados no cálculo para os filtros de Harmónicas; sendo o valor de THDi obtido do cabo de alimentação da Torre Eólica. Para calcular os filtros passivos em sintonia foi tido em conta na análise de melhorar o fator de potência e desta forma utilizar este valor de capacitância para cálculo do filtro passivo. O procedimento é descrito seguidamente. [13]

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = 17,1 \text{ kW} \quad (14)$$

Fp = 0,71 (fator de potência para as cargas não lineares da torre eólica)

Análise do fator de potência da instalação:

A figura seguinte, mostra o procedimento para melhorar o fator de potência do sistema para 0,91. Vamos verificar qual a potência reativa do banco de condensadores a instalar.



$$Q_c = 5,54 - 12,06 = - 6,5 \text{ kvar e } Q_{fc} = Q_c/3 = 2,17 \text{ kvar}$$

Figura 35 Triângulo de potência para melhorar o fator de potência da instalação. Cálculo da reatância capacitiva [9].

Por forma a calcular o valor da reatância capacitiva que será utilizada no cálculo dos filtros, partimos de um valor da potência reativa necessária instalar para melhorar o fator de potência: A instalação de $Q_c = 2,17 \text{ kvar}$ de potência reativa nos condensadores dos filtros.

Ordens 5.^a, 7.^a, 11.^a e 13.^a

$$Q_{fh} = Q_c \times \frac{I_h}{\sum_{h=3}^{25} (I_h)} \quad (15)$$

Onde I_h é a corrente harmónica de ordem h;

Dimensionamento dos Condensadores:

$$Qf5 = 2,17 \frac{14,71}{0,85 + 14,71 + 9,62 + 0,40 + 3,07 + 2,07 + 0,25 + 1,19 + 0,67 + 0,18 + 0,65 + 0,50}$$

$$Qf5 = 0,93 \text{ kvar}$$

$$Qf7 = 2,17 \frac{9,62}{0,85 + 14,71 + 9,62 + 0,40 + 3,07 + 2,07 + 0,25 + 1,19 + 0,67 + 0,18 + 0,65 + 0,50}$$

$$Qf7 = 0,61 \text{ kvar}$$

$$Qf11 = 2,17 \frac{3,07}{0,85 + 14,71 + 9,62 + 0,40 + 3,07 + 2,07 + 0,25 + 1,19 + 0,67 + 0,18 + 0,65 + 0,50}$$

$$Qf11 = 0,20 \text{ kvar}$$

$$Qf13 = 2,17 \frac{2,07}{0,85 + 14,71 + 9,62 + 0,40 + 3,07 + 2,07 + 0,25 + 1,19 + 0,67 + 0,18 + 0,65 + 0,50}$$

$$Qf13 = 0,13 \text{ kvar}$$

Cálculo do filtro para a 5.^a Harmónica:

$$Qf5 = \frac{U^2}{X_c}, \quad X_c = \frac{400^2}{930} = 172,04 \, \Omega \text{ então } C = \frac{1}{X_c \omega}$$

$$\omega = 2\pi f$$

$$C = \frac{1}{172,04 \times 314} = 18,5 \, \mu F$$

$$f5 (\omega_0) = 250 \text{ Hz} \rightarrow 1570,8 \text{ rad/s}$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

$$L = \frac{1}{(1570,8)^2 \times (18,5E^{-6})} = 21,9 \text{ mH}$$

Cálculo do filtro para a 7.^a Harmónica:

$$Qf7 = \frac{U^2}{X_c}, \quad X_c = \frac{400^2}{610} = 262,30 \, \Omega \text{ então } C = \frac{1}{X_c \omega}$$

$$\omega = 2\pi f$$

$$C = \frac{1}{262,30 \times 314} = \mathbf{12,14 \, \mu F}$$

$$f7 (\omega_0) = 350 \, \text{Hz} \rightarrow 2199,11 \, \text{rad/s}$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

$$L = \frac{1}{(2199,11)^2 \times (12,14E^{-6})} = \mathbf{17,03 \, mH}$$

Cálculo do filtro para a 11.^a Harmónica:

$$Qf11 = \frac{U^2}{X_c}, \quad X_c = \frac{400^2}{200} = 800,00 \, \Omega \text{ então } C = \frac{1}{X_c \omega}$$

$$\omega = 2\pi f$$

$$C = \frac{1}{800,00 \times 314} = \mathbf{3,98 \, \mu F}$$

$$f11 (\omega_0) = 550 \, \text{Hz} \rightarrow 3455,75 \, \text{rad/s}$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

$$L = \frac{1}{(3455,75)^2 \times (3,98E^{-6})} = \mathbf{21,03 \, mH}$$

Cálculo do filtro para a 13.^a Harmónica:

$$Qf13 = \frac{U^2}{X_c}, \quad X_c = \frac{400^2}{130} = 1230,77 \, \Omega \text{ então } C = \frac{1}{X_c \omega}$$

$$\omega = 2\pi f$$

$$C = \frac{1}{1230,77 \times 314} = \mathbf{2,59 \, \mu F}$$

$$f13 (\omega_0) = 650 \, \text{Hz} \rightarrow 4084,1 \, \text{rad/s}$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad e \quad L = \frac{1}{(4084,1)^2 \times (2,59E^{-6})} = \mathbf{23,17 \, mH}$$

O objetivo de um filtro RLC é criar um caminho de baixa impedância para a harmônica que se deseja eliminar, já foi calculada L e C, a resistência considerada neste caso é nula, $R = 0 \Omega$;

Após a elaboração do projeto dos filtros passivos em sintonia com a especificação das resistências, indutores e condensadores, foram feitas as simulações do sistema completo com a interligação dos equipamentos.

Foram estudadas as situações com e sem os filtros instalados. Assim, obtiveram-se os novos valores das distorções harmônicas de corrente, bem como as formas de onda resultantes. São apresentados os resultados na página seguinte, em 5.6 (figura 36).

5.6. RESULTADOS OBTIDOS

Através do programa Power Factory da DigSILENT, procedi a simulação das correntes com inserção de filtros de harmónicas bem como a apresentação dos gráficos de distorções resultantes.

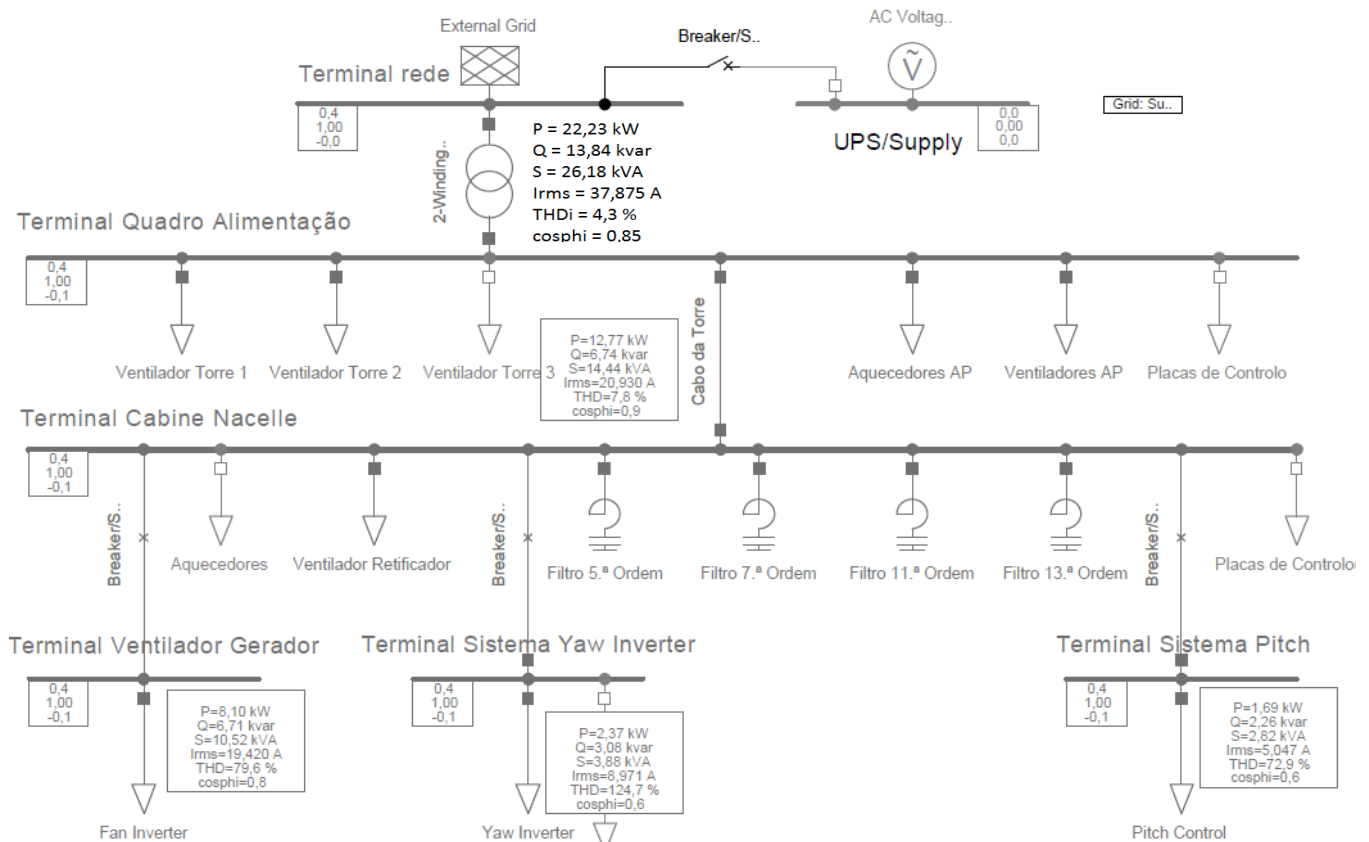


Figura 36 Inserção de filtros de Harmónicas projetados na rede BT da torre eólica.

Relembrando:

Os valores medidos com o equipamento para a THDi foram os seguintes na Cabine de Controlo, THDi = 38,13 %; os resultados da simulação realizada através do software apresentam-se de seguida, THDi = 39,9 %. Após a inclusão dos filtros projetados no circuito de simulação o resultado obtido foi o seguinte, **THDi = 4,3 %**;

De seguida são apresentados os gráficos de harmónicas antes e depois da aplicação dos filtros projetados.

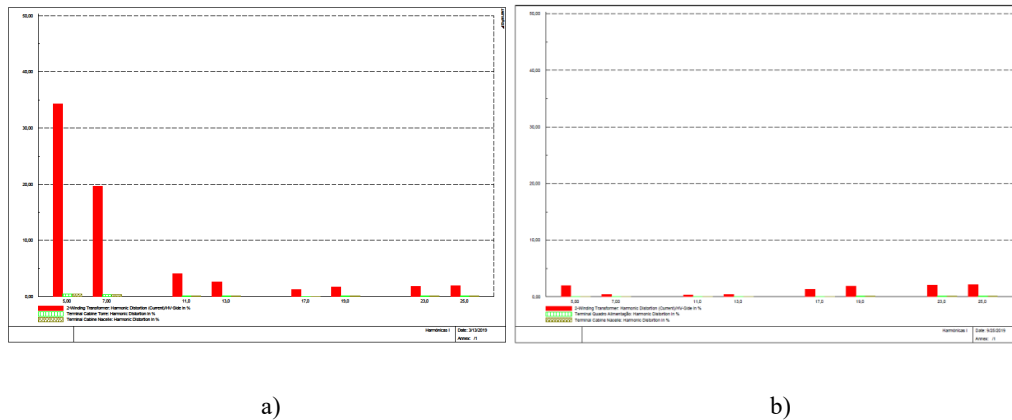


Figura 37 Gráficos de Harmónicas de Corrente antes (a) e depois (b) da aplicação de Filtros Passivos - Simulação no quadro da alimentação principal de rede.

5.7. FATOR DE POTÊNCIA E HARMÓNICAS

A onda sinusoidal de tensão fornecida tem uma frequência de 50 Hz. Se a onda de corrente e a onda de tensão apresentam um certo desfasamento, a eficiência do sistema elétrico é diminuída e a potência aparente excede a potência ativa. O fator de potência é a razão entre a potência ativa (KW) e a potência aparente (VA) (equação 16, figura 38):

$$\cos\phi = \frac{P}{S} \quad (16)$$

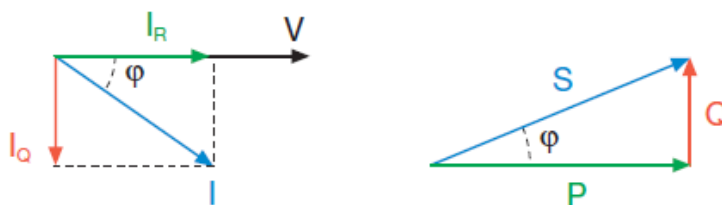


Figura 38 Fator de Potência.

No nosso caso obtivemos antes da aplicação dos filtros,

$$\cos\phi = \frac{22,21}{29,61} = 0,75$$

Obtivemos depois da aplicação dos filtros na simulação,

$$\cos\phi = \frac{22,23}{26,18} = 0,85$$

As correntes harmônicas das cargas não lineares na torre eólica, afetam o fator de distorção. Através da aplicação dos filtros passivos conseguimos reduzir o nível de correntes harmônicas no sistema, melhorando assim a qualidade da onda de corrente bem como do fator de potência do sistema.

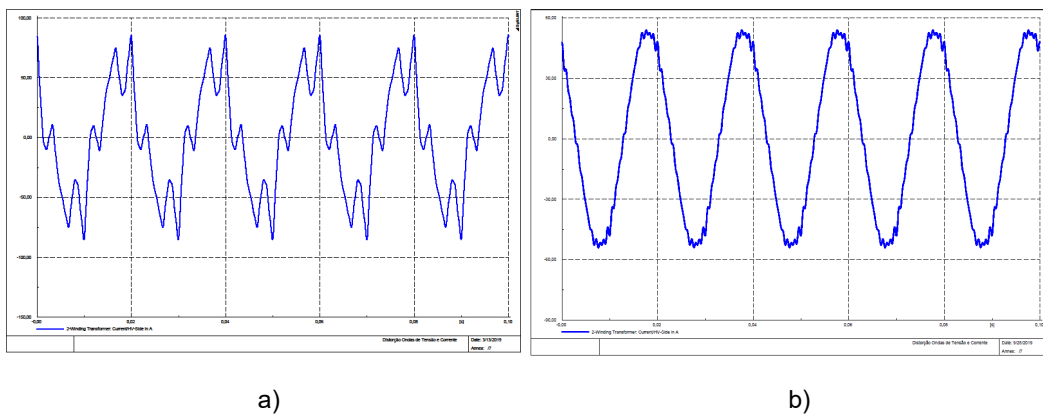


Figura 39 Onda de Corrente antes (a) e depois (b) da aplicação dos Filtros de Harmônicas Projetados.

5.8. SIMULTANEIDADE DE CARGAS NÃO LINEARES

O trabalho realizado na recolha de dados considerou os piores cenários em termos de maior número de horas em operação das cargas não lineares. Os períodos (de 24 horas) de dados recolhidos consideraram os dias em que a torre eólica se encontrava com

velocidade de vento mais elevado, ou seja, estando normalmente a plena carga (app 2 MW); em termos práticos a ventilação do Gerador (*fan inverter*) em funcionamento contínuo; E o sistema de controlo das pás (*pitch control*) em constante funcionamento;

Para o controlo da posição da *Nacelle* foram considerados pelo contrário os períodos em que o vento é mais reduzido, por esse motivo a torre eólica apresenta períodos mais longos de funcionamento desta carga não linear; A monitorização do barramento do conjunto das cargas foi realizada num período de vento mais elevado, mas comparado com um período intermédio não foram encontradas diferenças substanciais;

Visto que a solução apresentada no trabalho aponta para um tipo de filtro que está permanentemente em operação, filtro passivo, é de seguida apresentado um quadro em que são ligadas e desligadas as cargas no circuito de simulação e apresentados os resultados (com o mesmo filtro) do THDi, bem como do respetivo fator de potência resultante.

Tabela 20 Resultados do THDi com variação das cargas não lineares ligadas e desligadas com o mesmo filtro dimensionado.

		1	2	3	4	5	6	7	8
Sistema	Carga	Estado	Estado	Estado	Estado	Estado	Estado	Estado	Estado
WEC Control	Yaw motors	ON	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	ON
	Pitch Motors	ON	OFF	ON	OFF	OFF	ON	ON	OFF
	Nacelle Fan	ON	OFF	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON
Quadro de alimentação	THDi (%)	4,3	5,4	5,9	4,0	0,0	3,6	1,8	4,1
	cosφ	0,9	0,9	0,9	0,9	1,0	0,9	0,9	0,9

O THDi resultante para todos os cenários é sempre THDi <10%; é considerado como normal. Situações de anomalias não são previsíveis; sendo que no pior caso de simultaneidade entre cargas *Yaw Motor* e *Pitch Motor* é THDi = 5,9% (ver tabela 20).

6. CONCLUSÕES

Com o objetivo de melhorar o conhecimento da rede elétrica interna da torre eólica e principalmente a análise dos seus principais problemas relacionados com a qualidade de energia - harmônicas, bem como a proposta de soluções que este trabalho foi desenvolvido. O conhecimento profissional acerca do equipamento utilizado e do seu funcionamento foram uma vantagem para o tipo de abordagem e conclusões deste estudo. No início do trabalho, apesar da suspeita de quais seriam os principais equipamentos fontes de harmônicas, ainda não era de todo previsível qual o nível total de perturbação harmônica esperado. No entanto, como têm sido adicionados cada vez mais equipamentos baseados em eletrônica de potência nas torres eólicas seria espetável encontrar um valor de perturbação harmônica considerável.

A pesquisa bibliográfica efetuada, permitiu me encontrar diversos estudos similares acerca de instalações industriais, mas nenhum específico sobre estudo de distorção harmônica em redes elétricas de equipamentos de controlo de torres eólicas. A literatura consultada foi muito importante para reforçar o conhecimento acerca da temática de qualidade de energia - distorção harmônica, mas também da importância das ferramentas utilizadas para esse estudo e análise, tais como a série e transformada de Fourier.

A tese dissertação divide-se fundamentalmente em duas partes principais. Que foram sendo desenvolvidas ao longo do tempo, em primeiro lugar a parte teórica e em segundo lugar uma parte prática. Uma parte teórica em que através do simulador da DIGSILENT o Power Factory, foi criada a rede elétrica interna da torre eólica e onde através da consulta dos dados do fabricante Enercon - modelo E-82 foram parametrizados e inseridos os diversos equipamentos e simulados em funcionamento operacional. E uma parte prática com a utilização de equipamentos de medição, tais como o analisador de redes elétricas e a câmara termográfica através dos quais com diversas monitorizações em torres eólicas, do fabricante Enercon - modelo E-82 foram sendo adquiridas as medidas acerca dos diferentes equipamentos em diferentes pontos da rede elétrica e inseridos no programa de simulação. Algumas dificuldades foram sentidas no programa de simulação, em termos de parametrizações, mas com ajuda do fabricante DIGSILENT e ainda do Professor Doutor José Manuel Ribeiro Baptista da UTAD - Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, foram sendo passo a passo ultrapassadas. Outra dificuldade sentida durante o trabalho, teve haver com a necessidade de tempos de espera e seleção de determinadas condições para validação dos dados de monitorização. Ou seja, a torre eólica em funcionamento pleno com as cargas não lineares em operação. Os resultados obtidos no simulador do conjunto das cargas, foram comparados com os resultados da monitorização para o global das cargas em operação real, sendo praticamente iguais. A distorção harmónica total de tensão, THDv apresenta valores considerados normais ($THDv < 5 \%$), não existindo problemas na maioria dos casos. A distorção harmónica total de corrente, THDi apresenta, no entanto, valores que revelam uma poluição harmónica significativa ($10 \% \leq THDi \leq 50 \%$). Indiciando risco de aquecimento, mas que a recolha de imagens através da câmara termográfica, apresenta valores tudo indica adequados de aquecimento. Mas, são previstos outros problemas na presença deste nível de harmónicas: **Tais como falhas nos equipamentos de comunicação, controlo e processamento de dados, maiores esforços nos componentes e isolantes, falhas nos componentes de eletrónica de potência, IGBTs, Tiristores.**

Baseado nestes resultados utilizei o simulador para aplicar e analisar a melhor solução para melhorar a qualidade de energia da rede elétrica da torre eólica. Os resultados da aplicação da solução sugerida, os filtros passivos, são extremamente positivos. Tendo como consequência o decréscimo do nível total de distorção harmónica total de corrente para valores considerados normais, $THDi = 4,3 \%$ em que situações de anomalias não são

previsíveis. Foi também conseguida uma melhoria substancial do Fator de Potência para a rede elétrica estudada ($FPI = 0,75$) \rightarrow ($FPf = 0,85$).

Para finalizar e como proposta de continuidade deste trabalho, o objetivo será a apresentação e divulgação do relatório e das conclusões internamente ao fabricante Enercon, como forma de sugestão de melhoria para a qualidade de rede interna dos equipamentos de controlo da torre eólica. Também como sugestão, a indicação de uma proposta de monitorização permanente da qualidade de rede elétrica interna da torre eólica, através da instalação de equipamento adicional específico ou melhoramento desta capacidade através de equipamento já existente.

Referências Bibliográficas

- [1] Afonso, João e Martins, Júlio. Qualidade da Energia Elétrica. Departamento de Eletrónica Industrial - Universidade do Minho.
- [2] Batista, José Manuel Ribeiro Batista. Análise Harmónica em Instalações Elétricas BT HarmoSim - Uma ferramenta eficiente de simulação.
- [3] S.M. Deckmann e J.A. Pomilio, Avaliação da Qualidade de Energia Elétrica.
- [4] Instituto Politécnico do Porto, NEUTRO À TERRA, Revista Técnico-Científica N.º 18, dezembro de 2016.
- [5] BURGER, THOMAS. Descrição breve de sistema UPS Enercon GmbH, dezembro de 2007
- [6] BUSS, H. Instalação e Funcionamento UPS Enercon GmbH, dezembro de 2007
- [7] Schneider Electric / Procobre, “Workshop Instalações elétricas de baixa tensão, Qualidade de energia Harmónicas.
- [8] “IEEE std 519-2014: IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems.” Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 1993.
- [9] “NP EN 50160-2015: Caraterísticas da tensão fornecida pelas redes de distribuição pública de energia elétrica.” CENELEC, 1995.
- [10] “IEC 61000-1-2-2016: Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 1-2: General - Methodology for the achievement of functional safety of electrical and electronic systems including equipment with regard to electromagnetic phenomena.
- [11] João Abel Peças Lopes, “PERTURBAÇÕES NA TENSÃO E SEUS IMPACTOS NA EXPLORAÇÃO DE REDES ELÉTRICAS INDUSTRIAIS”, Instalações Elétricas Industriais - Textos de apoio sobre a qualidade da onda.
- [12] Procobre, Harmónicas nas Instalações Elétricas, Causas Efeitos e Soluções.
- [13] HSIA, Y. T., “Design of Filters for Reducing Harmonic Distortion and Correcting Power Factor in Industrial Distribution Systems”, Tamkang Journal of Science and

Engineering, Vol. 4, No. 3, pp. 193-199, 2001. (consultado na página da internet <https://www.researchgate.net/publication/228885469>)

- [14] Schneider Electric, Eliminação de harmónicas - 09 / 2015 edition.
- [15] Allen-Bradley, Power System Harmonics. By: Robert G. Ellis, P. Eng., Rockwell Automation. Publication MVB-WP011B-EN-P – April 2001
- [16] “IEC 62477-1:2012+AMD1:2016 CSV” Safety requirements for power electronic converter systems and equipment - Part 1: General.

Anexo A. Torre Eólica

Nacelle ou casa das Máquinas:

Equipamentos: Ventilação, *Yaw inverter*, *Fan inverter*, *Pitch control*, Quadro parcial.

Torre:

Equipamentos: Cabos de Potência, cabos de alimentação e controlo.

Base da Torre:

Equipamentos: Ventilação, Quadro de alimentação principal, BT, barramentos.



