

INSTRUMENTAÇÃO DAS PÁS DIRECTRIZES DA TURBINA WELLS DA CENTRAL DE ONDAS DA ILHA DO PICO

INSTRUMENTATION OF THE GUIDE VANES FROM THE WELLS TURBINE INSTALLED ON THE PICO POWER PLANT

M. Vieira¹, A. Ribeiro², A. Sarmiento^{1,3}, L. Reis¹

luis.g.reis@ist.utl.pt

¹ ICEMS, Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa

² IDMEC, Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa

³ WavEC - Offshore Renewables



RESUMO

O princípio de funcionamento da turbina Wells, usada na extracção da energia das ondas, pode por vezes conduzir à entrada em perda aerodinâmica das suas pás, fenómeno indesejado que induz nos componentes mecânicos solicitações muito agressivas, reduzindo também a eficiência da extracção energética. Este trabalho incide no dano causado nas pás directrizes pelas solicitações a que estas foram sujeitas devido ao fenómeno de entrada em perda das pás da turbina. De forma a caracterizar as solicitações a que as pás directrizes estão sujeitas foram instalados sensores de pressão e extensómetros nestas. O aparecimento de fissuras nas pás directrizes aparenta ter sido resultado de falhas cometidas nas fases de projecto e produção, retirando às pás directrizes a capacidade de suportar as cargas a que foram sujeitas. A inexistência de uma estratégia activa de controlo da turbina contribuiu também para as excessivas cargas com que as pás directrizes foram solicitadas.

ABSTRACT

The working principle of the Wells turbine, used in the ocean energy extraction, can sometimes lead to stall in the turbine and stators' blades, which represents an unintended action as it creates potentially damaging conditions to the mechanical components, moreover reducing the efficiency of the take-off system. This work focuses on the cracking damage caused to the guide vanes due to the loading from turbulent air flow as a result of turbine stall. Strain gauges and pressure sensors were used to evaluate the loading profile in real-sea working conditions. The appearance of cracks seems to have been caused by mistakes taken at both design and manufacturing phases. The lack of an active control strategy on the power plant resulted in consistent turbine stall, thus contributing to the excessive loadings that the blades are subjected to.

1. INTRODUÇÃO

A Central de Ondas do Pico (Fig.1) é um dos poucos dispositivos de extracção da energia das ondas no mundo instalado à escala real e ligado à rede eléctrica local.

Este dispositivo, do tipo CAO (Coluna de Água Oscilante), possui uma câmara com uma abertura submersa para as ondas incidentes, cuja superfície oscilante actua como um pistão, comprimindo e expandindo o ar no interior desta, o qual é forçado a escoar,



Fig 1 – A Central de Ondas do Pico é sujeita a ondas de grande intensidade energética.

de forma bidireccional, pela conduta da turbina Wells que está ligada a um gerador de 400 kW de potência nominal. A turbina Wells é utilizada devido à sua característica autorrectificadora, já que consegue adaptar-se ao escoamento bidireccional e gerar a mesma sustentação, independentemente da direcção do escoamento. No entanto, este tipo de turbina pode entrar em perda de sustentação quando o ângulo de ataque ultrapassa um determinado valor crítico, tendo esta situação consequências ao nível do ruído, do impacto ambiental e da extracção energética, induzindo também em toda a estrutura da turbina vibrações de elevada intensidade que resultam em fenómenos de fadiga nos componentes da mesma.

Das diferentes configurações que as turbinas Wells podem tomar, a turbina do Pico consiste numa turbina de oito pás fixas, possuindo ainda dois estatores que deflectem o escoamento antes e depois das pás da turbina (Fig. 2), através de 59 pás directrizes fixas instaladas em cada estator, cujo intuito é o de aumentar o rendimento da turbina, Cruz, J. (2008). Estes estatores são, desde o início da operação da Central, dos componentes que mais dificuldades têm demonstrado em suportar as solicitações a que estão submetidos.

Assim, o primeiro par de estatores, instalado em 1999 (data da instalação da Central), demonstrou desde cedo fragilidades, tendo sido alvo de sucessivas reparações que condu-

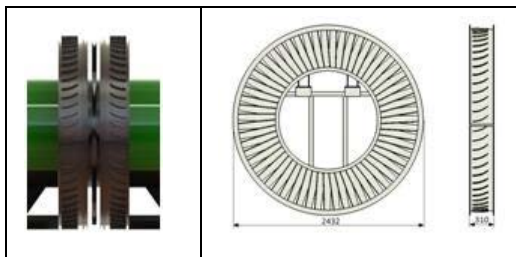


Fig 2 – Representação dos dois estatores com a turbina ao centro (à esquerda), e dimensões (mm) totais do estator do lado-terra (à direita).

ziram à sua remoção em 2005. Um novo par de estatores foi então projectado e construído com o intuito de suportar os carregamentos a que seria sujeito, tendo sido instalado em 2006.

Porém, em 2009 surgiram, nas regiões de trabalho das pás do estator do lado-terra, diversas fissuras que propagaram até uma dimensão que colocavam em risco a integridade das pás e da própria turbina, o que conduziu à remoção desse estator no final de 2010. É, ainda, possível constatar que todas as pás (incluindo aquelas onde não ocorreu a propagação de fissuras) possuem dois ou quatro entalhes na região de trabalho (Fig. 3), supostamente consequência dos procedimentos de corte por laser durante a produção dos estatores.

Todas as fissuras existentes na região de trabalho das pás do lado-terra tiveram a sua origem nestes entalhes, tendo-se totalizado 190 entalhes nas pás directrizes do lado terra que resultaram na nucleação de 66 fissuras (Fig. 4). O estator do lado-mar, por outro lado, não apresentava na altura (e não apresenta ainda hoje) qualquer fissura na região de trabalho das suas pás.

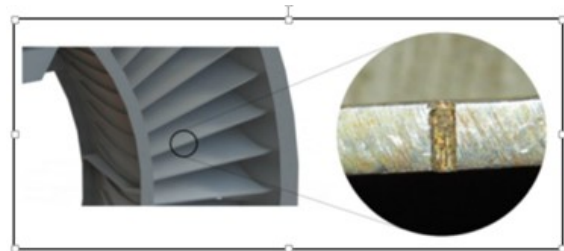


Fig 3 – Localização e pormenor de um dos entalhes encontrados nas pás directrizes.



Fig 4 – Representação de uma das fissuras presente na região de trabalho de uma das pás.

No âmbito da reabilitação do estator, diversas pás do estator lado-terra foram removidas para que fossem reparadas ou substituídas. Na sequência destes procedimentos, foi possível constatar que todas as pás removidas possuíam algumas fissuras nas regiões de encastramento (Figura 5), fissuras essas que não eram visíveis quando as pás estavam instaladas. A existência destas fissuras era assim desconhecida pelo que representam dano cujas causas necessitam de ser apuradas, tal como para as fissuras na região de trabalho das pás.

A análise realizada no âmbito desta falha consistiu, de forma sucinta, na análise das características do material, dos procedimentos de projecto e fabrico e na compreensão das solicitações impostas às pás directrizes. Esta análise das solicitações é especialmente importante já que, por serem poucas as turbinas Wells em funcionamento em todo o mundo (e considerando que nem todas possuem pás directrizes), nenhuma informação existe acerca do carregamento a que as pás directrizes estão efectivamente sujeitas durante a operação da turbina, podendo-se assim compreender que o projecto mecânico destes componentes constitui uma tarefa especialmente difícil. É necessário notar que este é um escoamento bidireccional, que depende ainda de parâmetros como a velocidade de rotação da turbina e do escoamento, entre outros.

Este trabalho incide na análise e caracterização das solicitações impostas nas pás directrizes e na sua implicação no dano que conduziu à remoção do estator lado-terra.

2. METODOLOGIA

As solicitações impostas ao estator, que são consequência do escoamento que atravessa a conduta da turbina, induzem vibra-



Fig 5 – Representação de uma das fissuras encontradas nas regiões de encastramento das pás.

ções nas pás directrizes já que possuem um comportamento intrinsecamente oscilante no tempo e de frequências desconhecidas. As frequências que as caracterizam podem depender da velocidade de rotação da turbina, da passagem das pás da turbina, da passagem das pás da turbina nas pás directrizes, e ainda do fenómeno de entrada em perda, que liberta vórtices de frequência (e intensidade) desconhecida.

Tendo isto em atenção, é necessário avaliar, antes de mais, as frequências naturais das pás directrizes, de forma a podermos compreender o comportamento das mesmas quando sujeitas a um carregamento dinâmico. Isto será concretizado através de análises modais realizadas às pás directrizes.

A utilização da extensometria permite adquirir dados reais da deformação de componentes e estruturas e é especialmente útil neste projecto, já que permitirá adquirir as tensões sentidas pelas pás directrizes durante a operação da central.

Por se tratar de um carregamento que é consequência de um escoamento de ar, a análise da variação da pressão estática na superfície das pás directrizes pode ajudar a compreender de que forma a entrada em perda modifica o perfil de pressões na superfície.

2.1. Análise Modal das pás

A análise modal das pás directrizes consistiu na utilização de equipamento dedicado a este tipo de análises, tendo sido instalado um acelerómetro em diferentes localizações da pá. A excitação foi realizada através de um martelo instrumentado, sendo assim possível obter as funções de transferência destas análises, sob a forma de um espectro que relaciona a aceleração medida com a força aplicada, frequência a frequência. O esquema de montagem da análise está indicado na fig. 6:

Foram analisadas diversas pás do estator do lado-terra, entre elas pás sem fissuras e pás com uma, duas e três fissuras. Foi também testada uma pá do lado-mar.

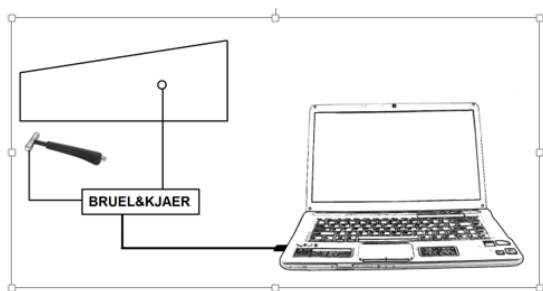


Fig 6 – Esquema de montagem da análise modal experimental.

As análises foram efetuadas considerando uma gama de frequências que varia entre os 0 e os 1000 Hz.

2.2. Análise de Extensometria

A análise de extensometria tem como objectivo caracterizar e medir o perfil da solicitação imposta nas pás directrizes, nomeadamente no que diz respeito à sua frequência e intensidade. Foram instalados dois extensómetros numa pá do lado-terra e dois extensómetros numa pá do lado-mar. Assim, pretende-se avaliar também a diferença de carregamentos existente entre os dois estatores.

O sistema de aquisição de extensões é usualmente constituído por um extensómetro e respectivo circuito de *Wheatstone*, equipamento de aquisição de sinal, que tem a função de adquirir convenientemente o sinal transmitido por esse circuito, e o equipamento de visualização ou armazenamento dos dados, que permite ao utilizador do sistema analisar e interpretar os dados recolhidos. A ponte de *Wheatstone* utilizada é do tipo *quarter-bridge*, contendo ainda um extensómetro de referência para compensação da temperatura.

Foram utilizados extensómetros do tipo *TML WFRA-3-17-1L*, adequados a condições húmidas, tendo sido instalados cumprindo os procedimentos recomendados pela marca, nomeadamente usando-se o adesivo cianoacrilato para unir o extensómetro à superfície da pá (Fig. 7).

Os extensómetros do tipo roseta possuem na verdade 3 extensómetros orientados em diferentes direcções, permitindo assim



Fig 7 – Instalação de um dos extensómetros na pá do lado-terra.

determinar a tensão equivalente de *von Mises* na superfície, considerando que estamos em condições de tensão plana. A equação (1) permite determinar as tensões principais a partir das extensões medidas pela roseta, Branco, M. (1998):

$$\begin{cases} \sigma_1 = \frac{E}{1-\nu^2} \cdot (\epsilon_1 + \nu \epsilon_2) \\ \sigma_2 = \frac{E}{1-\nu^2} \cdot (\epsilon_2 + \nu \epsilon_1) \end{cases} \quad (1)$$

onde ν simboliza o coeficiente de Poisson do material e ϵ_1 e ϵ_2 são obtidos através das equações, Branco, M. (1998):

$$\begin{aligned} \epsilon_1 &= \frac{1}{2} \cdot (\epsilon_a + \epsilon_c) + \frac{\sqrt{2}}{2} [(\epsilon_a - \epsilon_b)^2 + (\epsilon_b - \epsilon_c)^2]^{\frac{1}{2}} \\ \epsilon_2 &= \frac{1}{2} \cdot (\epsilon_a + \epsilon_c) - \frac{\sqrt{2}}{2} [(\epsilon_a - \epsilon_b)^2 + (\epsilon_b - \epsilon_c)^2]^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (2)$$

A tensão de *von Mises*, para o estado de tensão plana, Branco, M. (1998), é:

$$\sigma_c = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2^2} \quad (3)$$

A aquisição dos resultados foi realizada através de uma placa de aquisição da *National Instruments* (NI9237+NI9235), que possui, já nela integrada, os circuitos necessários à aquisição deste sinal (Fig. 8).

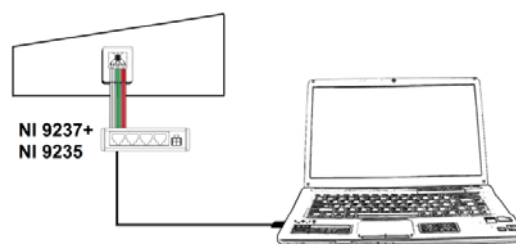


Fig 8 – Esquema de montagem da análise de extensometria.

Foi utilizada, no primeiro ensaio, uma frequência de aquisição de 5000Hz, tendo sido elevada para 10000Hz nos ensaios seguintes.

2.3. Análise da distribuição de pressões ao longo da pá

No âmbito da análise da variação de pressão na superfície de uma das pás directrizes do lado-terra, foram maquinados pequenos entalhes para a instalação de 5 sensores numa das superfícies dessa pá.

Foi utilizado o sensor de pressão *Freescale MPXH6300A*, tendo sido calibrado nas instalações do LNEC (Laboratório Nacional de Engenharia Civil). A placa de aquisição utilizada foi uma *Labjack UE9*, que permitiu a aquisição a 4000Hz, com uma resolução de 12 bits. A ficha técnica do sensor utilizado indica que o seu tempo de resposta é de 1 ms (para 90% da pressão). O esquema de montagem desta análise é exemplificado na Fig. 9:

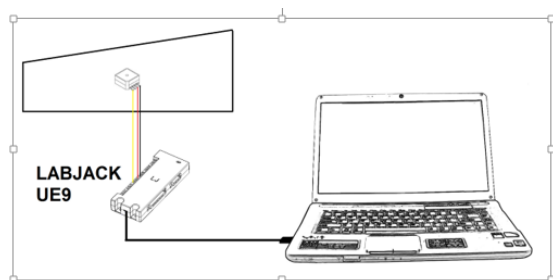


Fig 9 – Esquema de montagem da análise da distribuição de pressões na superfície de uma pá do lado-terra.

3. RESULTADOS

Os primeiros ensaios realizados incidiram na determinação do material das pás directrizes e suas propriedades mecânicas. Estamos então perante um AISI 316L, que é um aço austenítico inoxidável, com as seguintes propriedades (Tabela 1):

Tabela 1 – Propriedades mecânicas do material AISI 316L testado.

Tensão Ced.	Tensão Rot.	Mod. Elast.
282 MPa	586 MPa	172 GPa

3.1. Elementos Finitos

As análises de elementos finitos foram realizadas no *software* comercial *ANSYS Workbench 15*, pretendendo-se com estas verificar em que localizações da pá as tensões são máximas, e qual o valor dessas tensões. Para isso, foi estimada uma solicitação teórica com base nos valores de caudal máximos que atravessam a conduta da turbina.

A tensão equivalente de *von Mises* máxima foi registada na região de encastramento, junto ao limite da mesma, atingindo um valor de 5.3 MPa (Fig. 10). Por outro lado, a tensão máxima registada nos entalhes tem o valor de 1.5 MPa (Fig. 11).

Mesmo considerando que estamos num ambiente corrosivo, estes valores de tensão máximos são muito baixos, quando comparados com a tensão de cedência do material.

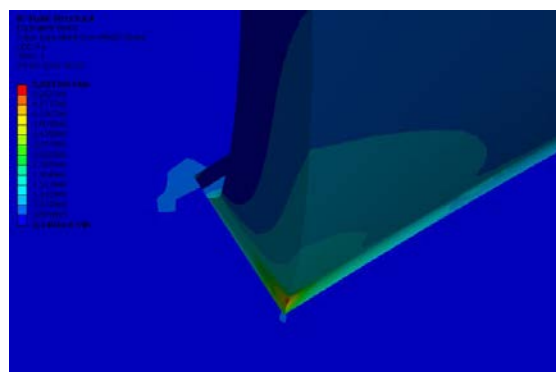


Fig 10 – Pormenor da zona onde se regista a tensão máxima equivalente, na região de encastramento da pá.

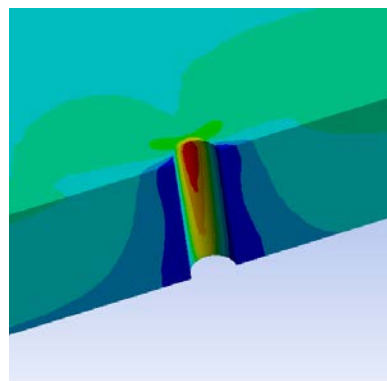


Fig 11 – Pormenor do entalhe onde se regista a tensão máxima equivalente.

3.2. Análise Modal

A análise modal permitiu compreender a resposta dinâmica de diversas pás, quando excitadas com um carregamento controlado, e adquirir as suas frequências naturais.

Um dos ensaios realizados a uma das pás do lado-terra que não possui qualquer fissura vem indicado na Fig. 12:

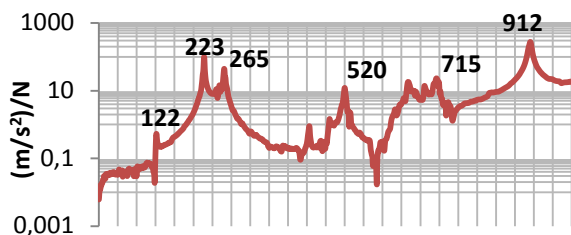


Fig 12 – Função de transferência que representa a resposta de uma das pás do lado-terra a uma excitação controlada e conhecida.

As respostas obtidas variam de forma pouco significativa de pá para pá, variando também ligeiramente consoante a localização do acelerómetro na pá (como seria de esperar). As pás com fissuras apresentam, na generalidade, frequências naturais inferiores, consequência da perda de rigidez por parte das mesmas.

Nos ensaios das pás do lado-mar, apesar de a curva obtida ser também semelhante às do lado mar, existe um padrão característico nas frequências mais baixas (na gama dos 0-150 Hz), semelhante a ruído (Fig. 13). Isto indica que a pá se encontra pouco encastrada, notabilizando que as pás do lado-mar possuem, também elas, fissuras nas regiões de encastramento e que, por estarem há mais tempo instaladas, podem já ter evoluído para dimensões maiores que aquelas encontradas nas pás removidas do lado-terra.

Apesar disso, a propagação destas fissuras não parece ser preocupante já que, mesmo considerando a rotura total, a pá ficaria encastrada entre os dois discos do estator.

3.3. Análise de extensões

A análise de extensões constituiu o passo mais importante desta investigação, já que

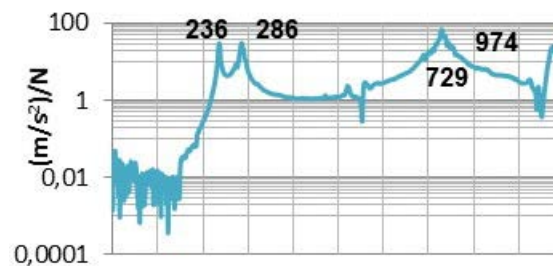


Fig 13 – Função de transferência que representa a resposta de uma das pás do lado-mar a uma excitação controlada e conhecida.

permitiu avaliar, pela primeira vez, os esforços a que estas pás estão sujeitas.

Os resultados primeiro ensaio, realizado com uma frequência de aquisição de 5000 Hz, podem ser visualizados na série temporal representada na Fig. 14.

São notórios, neste sinal temporal, diversos padrões que se caracterizam por uma grande amplitude de extensões num curto espaço de tempo. Estes padrões estão associados à entrada em perda da turbina, sendo resultado das vibrações que este fenómeno induz nas pás. Na Fig. 15 pode ser visto, com mais pormenor, o formato temporal de um destes padrões (neste caso, aquele associado à onda mais energética, i.e., aquela que provocou maiores extensões):

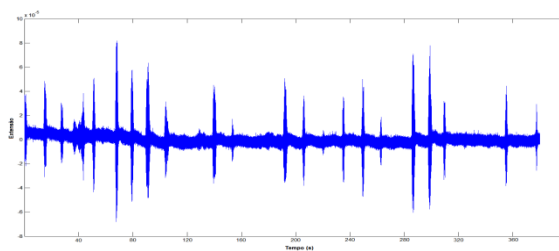


Fig 14 – Série temporal dos resultados obtidos com a leitura de um dos extensómetros de uma roseta.

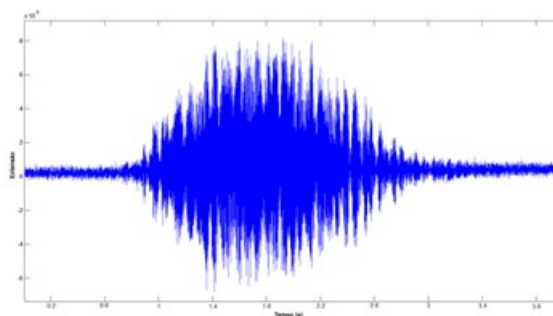


Fig 15 – Pormenor da vibração resultante de uma entrada em perda, com a variação da extensão pelo tempo.

Estes padrões, que ocorrem no momento em que o escoamento se dirige de dentro da câmara para o exterior, têm uma duração aproximada de 2 segundos. A tensão de von Mises máxima registada para este primeiro ensaio foi de cerca de 25 MPa. Este valor é bastante superior ao determinado para esta região (onde está instalado o extensómetro) pela análise de elementos finitos, que foi de 400 kPa. Esta diferença pode dever-se, por um lado, à existência de fissuras na região de encastramento da pá, que aumentam os esforços junto à secção restante de material, e por outro, ao facto de o carregamento teórico ter sido estimado para condições de escoamento consideradas ideais, enquanto na realidade temos um escoamento que é aleatório e turbulento, consequente da entrada em perda das pás da turbina.

Já que este fenómeno de entrada em perda resulta numa libertação de vórtices com frequências desconhecidas, que resultam nas vibrações vistas anteriormente, foi aplicado o algoritmo da Transformada Rápida de Fourier (TRF) a diferentes fenómenos da entrada em perda através do programa computacional *MATLAB* com o objectivo de conhecer qual a gama de frequências ou as frequências que são excitadas nestas situações. A TRF associada à onda mais energética medida durante este ensaio é apresentada na Fig. 16.

É notório o aparecimento da frequência da passagem das pás (122 Hz) e respectivas harmónicas, que vêm associadas à onda de pressão criada pela passagem destas. Por outro lado, a curva desta TRF é semelhante à curva estrutural obtida na determinação das frequências naturais (Fig. 12).

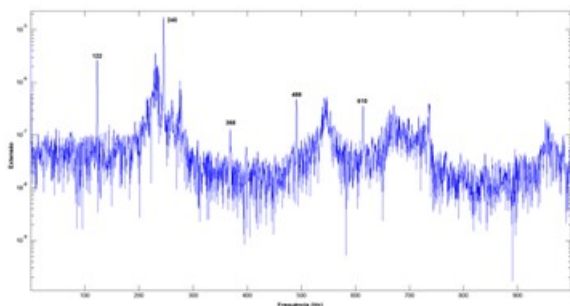


Fig 16 – TRF resultante da análise de um dos fenómenos de perda, em condições de operação (0-1000Hz).

Esta semelhança existente entre as funções de transferência das pás e a resposta em operação da pá indica-nos que os vórtices criados durante a entrada em perda da turbina não excitam uma frequência em particular mas antes uma determinada gama de frequências. Já que é possível visualizar a frequência natural da pá que se situa no intervalo de 900 a 1000 Hz, assume-se que esta gama de excitação possui uma amplitude que varia entre 0 e 1000 Hz. Também a passagem das pás e as suas harmónicas são relevantes para este carregamento, principalmente porque a velocidade de rotação da turbina varia desde as 750 e as 1450 rpm, sendo assim compreensível que a passagem das pás excite também uma gama considerável de frequências.

O segundo ensaio consistiu na aquisição de dados a partir de um outro extensómetro instalado na pá do lado-terra, mas agora com uma frequência de aquisição de 10 kHz. Com este aumento da frequência de aquisição pretende-se tentar compreender até que valor vai a gama de frequências excitadas pela entrada em perda da turbina.

Na fig. 17 podemos visualizar a TRF da onda mais energética deste ensaio, na gama de 0-4000 Hz, onde se pode ver que a partir dos 3000 Hz deixam de existir solicitações na pá. Assume-se então que a libertação de vórtices resultantes da entrada em perda poderá excitar uma gama que vai até aos 3000 Hz. Continua neste caso a ser notória a aproximação desta resposta à curva estrutural da pá, assim como a presença da frequência da passagem das pás e algumas das suas harmónicas. A tensão de von Mises máxima registada tem o valor de, aproximadamente, 46 MPa, fazendo notar, mais uma vez, que as tensões a que as pás estão sujeitas são muito maiores que aquelas estimadas a partir do carregamento teórico.

Foram também realizados ensaios nas pás do lado-mar, que registaram também diversos fenómenos de entrada em perda da turbina. A tensão máxima registada nestes ensaios do lado-mar foi de 24 MPa.

É possível afirmar que as solicitações a que as pás do lado-terra estão sujeitas são muito superiores às que as pás do lado-mar estão sujeitas, já que a diferença dos esforços medidos é considerável. Neste âmbito, a tensão registada para a pá do lado-terra foi de 46 MPa e de 24 MPa para a pá do lado-mar.

Esta informação vem confirmar o efeito do empolamento da onda, que resulta numa subida de onda superior à descida e, conseqüentemente, em caudais maiores na subida da onda, em comparação com os caudais registados na descida da onda. Isso mesmo pode ser confirmado pela análise dos caudais registados na conduta da turbina, que são consistentemente superiores na subida da onda, comparando com a descida (Fig. 18).

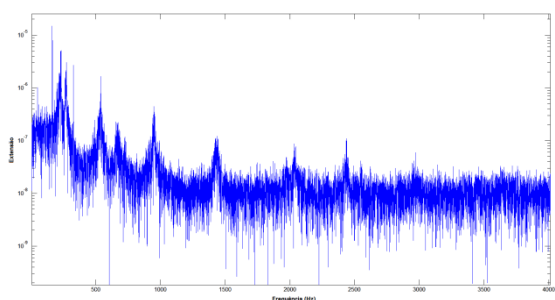


Fig 17 – TRF resultante da análise de um dos fenómenos de perda, em condições de operação (0-3000Hz).

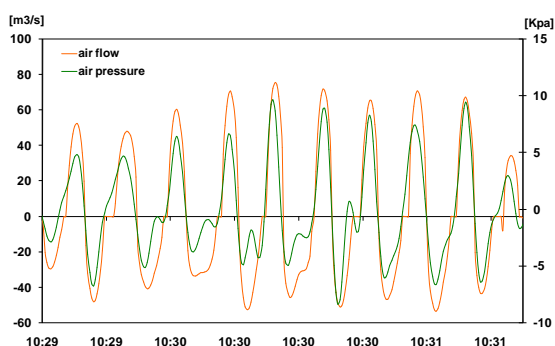


Fig 18 – Série temporal de dois minutos que representa a variação da pressão estática (a verde) e do caudal (a laranja) na conduta da turbina Wells da Central do Pico (Frank Newmann)

3.4. Análise de pressões

A análise de pressões consistiu na realização de um ensaio único, cujos resultados estão identificados na Fig. 19.

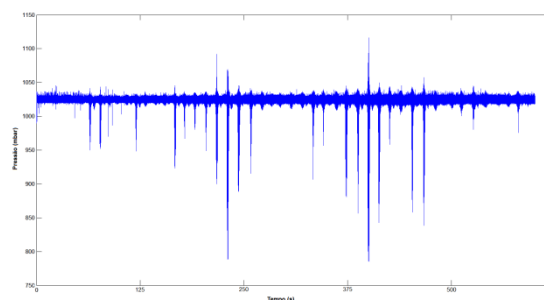


Fig 19 – Série temporal dos resultados obtidos com a leitura de um dos sensores de pressão.

Estes resultados apresentam padrões semelhantes aos encontrados nos dados adquiridos pelos extensómetros, servindo como indicadores da entrada em perda da turbina. No entanto, a análise mais cuidada de uma onda revela dois padrões distintos: um associado à subida da onda, e outro associado à descida da onda dentro da câmara de pressão (Fig. 20).

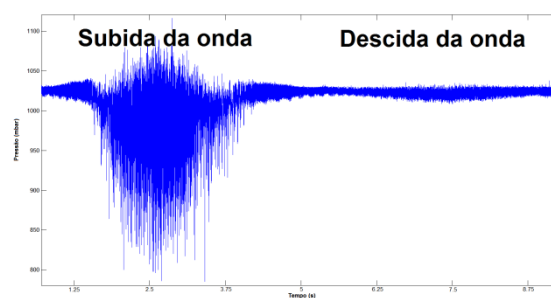


Fig 20 – Evolução temporal do sinal medido por um dos sensores durante uma onda em que se verificou entrada em perda da pá directriz.

Enquanto na descida da onda a variação da pressão estática na superfície da pá pouco varia, na subida da onda o padrão é característico da entrada em perda da turbina, notabilizando a existência de um carregamento aleatório e extremamente energético. Foi realizada uma TRF aos dados referentes a este fenómeno, com o intuito de se compreender como seria o espectro resultante do mesmo. No entanto, o espectro obtido apresentava elevado ruído, indicando que o sensor possui uma sensibilidade limitada, não lhe permitindo adquirir, com a precisão pretendida, o carregamento a que foi sujeito. Assim, optou-se pela aplicação de um filtro passa-baixo, com frequência de corte nos 20 Hz, já que estes resultados poderão, ainda,

providenciar alguma informação relativamente ao comportamento genérico da pressão estática na superfície superior da pá.

É possível verificar a evolução da pressão ao longo da onda analisada previamente, agora com a aplicação do filtro (Fig. 21). Na região da subida da onda, a queda abrupta de pressão confirma a entrada em perda da superfície da pá directriz, enquanto que na região da descida da onda, o perfil da pressão na superfície da pá é bastante menos abrupto.

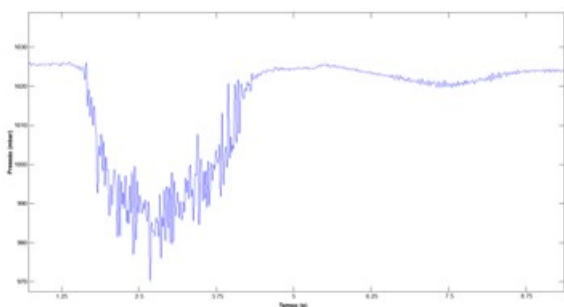


Fig 21 – Evolução temporal do sinal medido por um dos sensores durante uma onda em que se verificou entrada em perda da pá directriz, após aplicação de um filtro passa-baixo com frequência de corte de 20 Hz.

4. DISCUSSÃO DE RESULTADOS E RECOMENDAÇÕES

As condições a que o material AISI 316L constituinte das pás está sujeito são muito agressivas, não só pelo elevado carácter corrosivo do ar que entra em contacto com estas, mas também pela presença de pequenos detritos e areias que, ao entrarem em contacto com as pás directrizes, promovem a erosão.

O método de fixação projectado para as pás directrizes deste segundo par de estatores denotou algumas fragilidades, já que diversas fissuras foram descobertas nas pás que foram removidas (sete no total). Também pelos ensaios de determinação das frequências naturais das pás directrizes foi possível concluir que, por estarem instaladas há mais tempo que as do lado-terra, as pás do lado-mar possuem fissuras nesta região que podem conduzir à fractura completa entre estas e os discos do estator.

Os entalhes deixados na região de trabalho das pás constituem uma falha dos

procedimentos de fabrico das pás, contribuindo para a concentração de tensões na região e uma diminuição da qualidade superficial e da resistência à corrosão desta região, potenciando a nucleação de fissuras que, eventualmente, ocorreu.

O carregamento a que as pás estão efectivamente sujeitas foi caracterizado, permitindo entender que a entrada em perda da turbina constitui uma condição adversa para as pás directrizes, na medida em que estas são solicitadas por um carregamento aerodinâmico intenso e aleatório, excitando uma grande gama de frequências. As tensões de von-Mises registadas nos ensaios à pá do lado-mar são mais baixas que as registadas na pá do lado-terra, adequando-se isto à existência de inúmeras fissuras nas pás do estator do lado-terra, enquanto, nas pás do estator do lado-mar, nenhuma pá exhibe fissuras junto aos entalhes.

Como corolário do trabalho desenvolvido sugere-se o projecto mecânico de um novo estator. Esta sugestão centra-se na utilização de um método de fixação baseado em ligações mecânicas, que substituem as regiões de encastramento soldadas. Este novo método permite não só tornar mais rápida e eficiente a remoção e substituição das pás, mas também dispensar as operações de soldadura no encastramento, que afectam a microestrutura do material nessas regiões. A ligação mecânica pode também incluir materiais de diferentes rigidezes de forma a modificar, de forma controlada, a resposta dinâmica das pás, (Figura 22).



Fig 22 – Detalhe da região de encastramento da sugestão de projecto para um novo estator. Note-se o material intermédio existente entre a pá e os suportes, que pode ser fabricado de materiais específicos para modificar a resposta dinâmica da pá.

5- CONCLUSÕES

As principais conclusões retiradas através da investigação realizada são apresentadas de seguida:

- A análise de tensões recorrendo a extensometria permitiu caracterizar, pela primeira vez, o padrão do carregamento aplicado sobre as pás directrizes associado à entrada em perda das pás da turbina, nomeadamente na sua intensidade e frequência;
- A determinação teórica das solicitações impostas nas pás directrizes não representa, de forma satisfatória, a solicitação real a que estas estão sujeitas;
- A coexistência de um ambiente corrosivo com um carregamento dinâmico submeteu as pás directrizes a uma condição de fadiga com corrosão o que, associado à existência de entalhes e de uma região de encastramento fragilizada, levaram à nucleação e propagação de diversas fissuras;
- A inexistência de uma estratégia de controlo activo na Central tem como consequência frequentes fenómenos de entrada em perda, o que resulta em solicitações excessivas na estrutura da turbina, nomeadamente nas suas pás directrizes.

6- REFERÊNCIAS

- Cruz, J. (2008). “Ocean Wave Energy”. Springer
- Branco, M., C.A.G. (1998). “Mecânica dos Materiais”, Fundação Calouste Gulbenkian
- Neumann, F. e Melo, A. B. e Crom, I. (2001). “Pico OWC data exercise”, KIC REALWAVE