

# Otimização de Controle Estrutural em Turbinas Eólicas Offshore Flutuantes do Tipo Barcaça Através de Computação Evolucionária

Thayza V. Melo \*. Luciana F. Almeida\*\*. Juan G. Lazo Lazo\*\*\*

\*Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca,  
Rio de Janeiro, RJ, Brasil (e-mail: thayzavdlaan@gmail.com).  
\*\* Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca,  
Rio de Janeiro, RJ, Brasil (e-mail: lucianafaletti@gmail.com)  
\*\*\* Facultad de Ingeniería, Universidad del Pacífico,  
Lima, Peru (e-mail: jg.lazol@up.edu.pe)

**Abstract:** Offshore wind turbines have the potential to transform electricity production. Floating platforms have been developed to generate profitable and efficient energy in deep waters, but still face significant challenges. This work proposes the use of evolutionary computation to optimize passive structural control techniques in floating barge-type wind turbines, aiming to mitigate pendular loads. Control devices, such as Tuned Mass Dampers (TMDs), are analyzed in the FAST-SC simulator. Optimization uses the standard deviation of tower fatigue as a fitness function. The optimization seeks to improve TMD performance, limiting the stroke to the nacelle.

**Resumo:** As turbinas eólicas offshore têm potencial para transformar a produção de energia elétrica. Plataformas flutuantes foram desenvolvidas para gerar energia de forma lucrativa e eficiente em águas profundas, mas ainda apresentam desafios significativos. Este trabalho propõe o uso de computação evolucionária para otimizar técnicas de controle estrutural passivo em turbinas eólicas flutuantes do tipo barcaça, visando mitigar cargas pendulares. Dispositivos de controle, como amortecedores de massa sintonizados (TMD), são analisados no simulador FAST-SC. A otimização utiliza o desvio padrão da fadiga da torre como função de aptidão. A otimização busca melhorar o desempenho do TMD, limitando o curso à nacelle.

**Keywords:** Offshore Wind Turbines; Passive Structural Control; Tuned Mass Damper; Optimization; Evolutionary Computation; Genetic Algorithms; FAST-SC Simulator.

**Palavras-chaves:** Turbinas eólicas Offshore; Controle Estrutural Passivo; Amortecedor de Massa Sintonizado; Otimização; Computação Evolucionária; Algoritmos Genéticos; Simulador FAST-SC.

## 1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda por fontes de energia renovável impulsionou o desenvolvimento das turbinas eólicas offshore como uma alternativa promissora para a produção de eletricidade. Embora estes aerogeradores sejam instalados em plataformas flutuantes, projetadas para explorar ventos mais fortes e consistentes em águas profundas (60m a 900m de profundidade), elas enfrentam desafios significativos, como cargas pendulares induzidas pelo vento e ondas (Vijfhuizen, 2006), mostrado na Fig. 1. As Turbinas Eólicas Offshore Flutuantes (FOWT's) podem ter diferentes tipos de base para flutuabilidade, sendo a Barcaça uma opção estável, econômica e vantajosa para grandes profundidades (Villoslada et al. 2022), por isso, escolhida para as simulações neste projeto.

As pesquisas na área das FOWT's visam melhorar a produção de energia e evitar interferências negativas de ventos e ondas, controlando as vibrações e reduzindo fadigas estruturais (Olondriz et al. 2019). Para isso, têm-se explorado diversas formas de controle estruturais, na última década. O controle passivo que utiliza Turned Mass Damper (TMD) é um dos

mais promissores para as FOWT's quando instalados na nacelle, a parte superior e mais pesada da turbina eólica (Zuo et al. 2020).

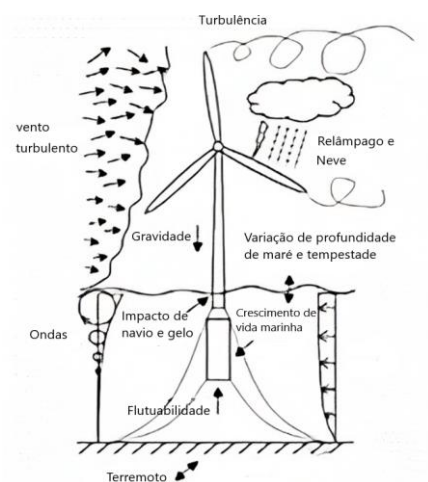


Fig. 1: Ações externas atuantes em uma FOWT (Adaptado de Butterfield et al. 2007).

Em todos os projetos, o design do TMD é otimizado para reduzir vibrações e melhorar o desempenho do aerogerador. Os parâmetros, como rigidez, amortecimento e massa, são ajustados para este fim. Os métodos de ajustes incluem: ajuste de frequência, algoritmos genéticos (AG's) e gráficos de superfície. As limitações no curso do TMD são pouco exploradas, comumente assumindo valores fixos e simplificados, além de utilizarem modelos reduzidos do sistema no loop de otimização (Chen et al. 2021). Apenas um trabalho (Villoslada et al. 2022) utilizou AG para otimização incluindo a limitação de curso do TMD e a configuração de paradas como variáveis. Embora tenha alcançado bons resultados na simulação, considerou apenas TMD frente-ré, não considerou o TMD lateral-lateral, tampouco incluiu suas variáveis no ciclo de otimização.

Nesse sentido este trabalho busca otimizar por algoritmo evolucionário um sistema de controle estrutural passivo, composto por dois TMD's instalados na nacela de uma FOWT do tipo Barcaça, nos sentidos frente-ré e lateral-lateral. Algoritmo genético é utilizado para ajustar os parâmetros do sistema TMD, como massa, rigidez, amortecimento, limitação de curso e variáveis de paradas, com objetivo de atenuar vibrações na estrutura, *pitch tower* da plataforma e modo de flexão da turbina. Nos ciclos de otimização e nos testes da FOWT, a simulação é realizada com software FAST-SC (Fatigue, Aerodynamics, Structures, and Turbulence – Structural Control), considerando decaimento livre do sistema.

Este trabalho está organizado da seguinte forma: a Seção 2 apresenta marco teórico e revisão bibliográfica, a Seção 3 apresenta a metodologia proposta, a Seção 4 mostra os resultados obtidos, finalmente a Seção 5 aborda as conclusões.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A maior parte da geração de energia eólica é realizada por aerogeradores de três pás, com eixo horizontal, localizados em áreas litorâneas pouco povoadas ou em campos *onshore* (Picolo et al. 2014). Essas turbinas são constituídas de pás, rotor (cubo), caixa de engrenagens, gerador, nacela, torre de suporte e sistema de freio. A nacela abriga componentes essenciais, como a caixa multiplicadora e o gerador, enquanto a torre de suporte eleva a turbina a alturas ideais para a geração de energia. O sistema de freio controla a velocidade das pás, especialmente em tempestades. Ainda possuem um sensor de direção para direcionar as pás para capturar o melhor vento frontalmente (Figueiredo, 2019).

### 2.1 Turbinas Eólicas Offshore e suas Tecnologias

Nos últimos anos, houve uma mudança gradual para a energia eólica offshore, devido ao recurso eólico favorável e à proximidade com áreas urbanas litorâneas. As turbinas offshore aproveitam velocidades de vento mais altas e menos turbulentas, proporcionando maior eficiência energética. Elas compartilham tecnologia com as turbinas *onshore* com adaptações estruturais para diferentes profundidades de água (Costoya et al. 2020). As turbinas fixas em águas rasas apresentam complexidade e custos elevados, além de impactos ambientais e limitações de espaço. Por outro lado, as turbinas flutuantes em águas profundas (60m a 900m de profundidade)

oferecem custos reduzidos, montagem simplificada e menor impacto ambiental, tornando-as mais viáveis para implantação *offshore* (Hu et al. 2017).

As FOWT's oferecem a flexibilidade de instalação em várias profundidades oceânicas, até 900m, ampliando as possibilidades de locais de implantação. São categorizadas em Barcaças, Boias de Longarina e Plataformas de Perna de Tensão (Villoslada et al. 2022). A Barcaça é estável e móvel, equipada com placas de alheta para evitar tensões na estrutura, enquanto a Boia de Longarina é desafiadora para fabricação e instalação, devido ao seu peso concentrado no ponto mais baixo. A Plataforma de Perna de Tensão é mais inovadora e arriscada, imersa com geometria estelar. A estabilidade da base flutuante é garantida por elementos de ancoragem, como a amarração e o tensionamento, com três tipos principais: concatenária, amarrações tensionadas mecanicamente e ancoragens de Tensioned Legs Platform - TLP's (Jonkman, 2007).

Entre essas opções, as plataformas do tipo Barcaça, estabilizadas por amarração flexível ou concatenária, são mais promissoras e econômicas para águas profundas (Chen et al. 2021). Para este estudo, foi escolhida a turbina NREL 5MW apoiada à Barcaça ITI Energy, desenvolvidas pelo Laboratório Nacional de Energias Renováveis - EUA (NREL). Uma ilustração da barcaça com a turbina NREL 5MW está presente na Fig. 2.

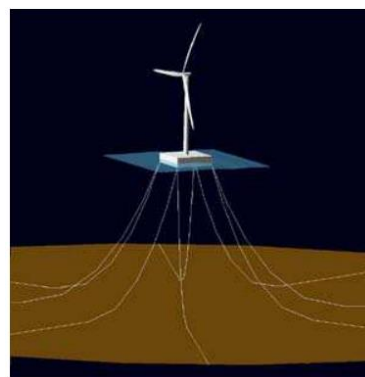


Fig. 2 –FOWT NREL 5MW e Barcaça ITI Energy (Stewart et al. 2012).

### 2.2 Controle Estrutural

O controle estrutural visa reduzir as cargas em edifícios e pontes devido a ondas e terremotos (Stewart et al. 2012). Para aerogeradores em plataformas flutuantes do tipo barcaça, esse controle é crucial devido aos movimentos induzidos por ondas e ventos, que geram efeito de pêndulo invertido e fadiga estrutural. Existem três categorias de métodos de controle: controle de *pitch*, controle estrutural ativo e controle estrutural passivo. O controle de *pitch* ajusta forças aerodinâmicas, mas tem desvantagens na redução de outras cargas. O controle estrutural ativo restringe vibrações diretamente. Já o controle estrutural passivo, como o Tuned Mass Damper (TMD), é mais robusto e econômico, sendo amplamente utilizado em estruturas de arranha-céus e plataformas offshore (Jonkman, 2007).

O amortecedor de massa sintonizado (TMD) é um dispositivo passivo comum usado em controle estrutural. Ele consiste em uma massa conectada à estrutura principal por uma mola e um amortecedor, dissipando energia na forma de calor. O ajuste ideal dos parâmetros do TMD pode ser desafiador, especialmente para estruturas não lineares como turbinas eólicas offshore. A eficácia do TMD está ligada à sua massa, mas o espaço disponível na nacela é uma limitação importante para sua instalação. A introdução de batentes adicionais e paradas limitantes aumenta a complexidade do sistema, requerendo algoritmos e abordagens numéricas avançadas para definição e otimização dos sistemas de FOWT com TMD (Stewart et al. 2013).

### 2.3 Computação Evolucionária

Algoritmos evolucionários têm sido amplamente adotados para otimizar os parâmetros do TMD devido à sua capacidade de lidar com a complexidade do sistema de controle estrutural passivo (Villoslada et al. 2022). Esses algoritmos, inspirados na evolução das espécies e na genética, oferecem um mecanismo de busca adaptativo, utilizando uma população de soluções do problema e operadores genéticos como cruzamentos e mutações para produzir resultados. Os mais aptos são selecionados para reprodução a cada geração, combinando características dos pais. O procedimento básico do algoritmo genético (AG) envolve a inicialização da população, cálculo da aptidão, seleção, cruzamento, mutação e criação de uma nova população até atingir uma condição de parada (Almeida, 2007), mostrado no Algoritmo 1. A representação do problema é feita através de um conjunto de parâmetros codificados em um cromossomo, que é decodificado para construir a solução real (indivíduo) (Michalewicz et al. 2000).

---

**Algoritmo 1:** Procedimento Básico do AG

---

```
1 início
2 t <- 1
3 inicializar população P(t)
4 avaliar população P(t)
5 enquanto (não_condição_de_fim) faça
6 t <- t+1
7 selecionar população a partir de P(t-1)
8 aplicar operadores genéticos
9 avaliar população P(t)
10 fim enquanto
11 fim
```

---

No processo do AG, a avaliação é essencial para atribuir a cada indivíduo na população um valor numérico correspondente à sua capacidade de resolver o problema. O cruzamento envolve a troca de partes dos cromossomos de dois indivíduos para gerar novas soluções, enquanto a mutação consiste na troca aleatória dos valores dos genes dos cromossomos, garantindo diversidade na população (Almeida, 2007). Os parâmetros de evolução que afetam o desempenho do algoritmo genético incluem o tamanho da população, taxa de cruzamento, taxa de mutação e intervalo de geração. O ajuste adequado desses parâmetros é essencial para uma busca eficiente. A avaliação do desempenho é feita por curvas de evolução (Michalewicz

et al. 2000). Neste estudo, algoritmos genéticos são usados para otimizar os parâmetros do controle estrutural passivo do tipo TMD em FOWT do tipo barcaça.

### 2.4 Trabalhos Relacionados

As FOWT's têm sido foco de muitas pesquisas recentes visando melhorar a eficiência do sistema, especialmente através do controle estrutural para evitar interferências negativas de ventos e ondas e controlar vibrações. Estudos examinaram tanto o controle passivo quanto o ativo para turbinas eólicas flutuantes, com destaque para o uso de dispositivos amortecedores de massa sintonizados (Zuo et al, 2020). A maioria desses dispositivos é instalada na nacela das turbinas, embora algumas pesquisas tenham explorado instalações na torre das turbinas e em plataformas do tipo Barcaça (Zuo et al. 2020). O design desses dispositivos envolve a otimização de parâmetros para reduzir as vibrações na estrutura da FOWT. Simuladores como o FAST, desenvolvido pelo NREL, têm sido utilizados para avaliar soluções de controle passivo TMD em diferentes configurações de FOWT (Lakner et al. 2011). Além disso, modelos lineares foram desenvolvidos para investigar os efeitos de supressão de vibrações em uma variedade de casos de carga (He et al, 2017).

Um novo método de controle estrutural passivo para FOWT é proposto em Liao et al (2021), para superar limitações anteriores no espaço do TMD. O trabalho inclui a otimização de um TMD instalado na nacela, mostrando que ele pode reduzir significativamente cargas estruturais e estabilizar a potência de saída. O ajuste dos parâmetros do TMD é feito atualmente por meio de métodos como ajuste de frequência, algoritmos genéticos e gráficos de superfície. O uso de algoritmos genéticos para otimizar projetos de TMD tem crescido, com resultados promissores em simulações (Lakner et al. 2011).

Embora o estudo de Villoslada et al. (2022) tenha explorado a inclusão de paradas nos modelos TMD, a otimização desses parâmetros ainda é limitada, muitas vezes utilizando modelos simplificados do sistema durante o ciclo de otimização. Além disso, poucos estudos abordam o uso de TMDs tanto frente-ré quanto lateral-lateral para mitigar a fadiga estrutural, negligenciando variáveis de parada no processo de otimização e empregando modelos simplificados de FOWT (Lakner et al. 2011). Este trabalho propõe a otimização de um sistema de controle estrutural passivo, com dois dispositivos TMD (frente-ré e lateral-lateral) instalados na nacela, incorporando limitação de curso durante o ciclo de otimização. O desempenho desses dispositivos é avaliado em condições de decaimento livre, utilizando o simulador FAST-SC diretamente no processo de otimização.

## 3. METODOLOGIA

### 3.1 Caracterização: FOWT e Barcaça

Este trabalho utiliza uma turbina eólica offshore flutuante de 5MW, desenvolvida pelo Laboratório Nacional de Energia (NREL). Com eixo horizontal, três pás e velocidade variável,

projetada para posição contra o vento, com um rotor de 126m de diâmetro e altura de cubo de 90m, conforme Tabela 1. Amplamente adotado em pesquisas, este modelo é apoiado por organizações como a Union UpWind e a Agência Internacional de Energia, é considerado economicamente viável para FOWT's devido ao seu tamanho (Jonkman, 2007).

**Tabela 1 - FOWT NREL-5MW (Chen et al, 2021).**

Parâmetros	Dimensões
Potência nominal	5MW
Orientação do rotor, Config.	contra o vento, 3 pás
Controle	veloc. variável/controle de passo
Transmissão	caixa de velocidade, vários estágios
Rotor, Diâmetro do cubo	126m, 3m
Dimensão nacele	18m x 6m x 6m
Altura do cubo	90m
Veloc. de vento mín./máx./ nominal	3m/s, 11.4m/s, 25 m/s
Veloc. rotor mín./máx..	6.9 rpm, 12.1 rpm
Massa rotor/ Nacele/ Torre	110ton, 240ton, 347.46ton
Coord. CM geral	(-0.2 m, 0.0 m, 64.0 m)

Montada em uma barçaça desenvolvida em parceria pelas Universidades de Glasgow e Strathclyde, juntamente com a ITI Energy, a barçaça é quadrada e lastreada com água do mar, ancorada por oito linhas de catenária (Vijfhuizen, 2006), conforme Tabela 2. Para o controle estrutural, optou-se pelo dispositivo TMD, instalado na nacele, composto por uma massa conectada a molas e amortecedores, eficaz na redução de vibrações. O TMD, vibrando em fase oposta à estrutura, diminui a energia vibracional, convertendo-a em calor. Esses sistemas são ajustados à frequência natural da estrutura, geralmente seu primeiro modo vibracional mais relevante na resposta do sistema (Villoslada et al. 2022).

**Tabela 2: Barçaça ITI Energy (Vijfhuizen, 2006).**

Parâmetros	Dimensões
Tamanho (L x P x A)	40m x 40m x 10m
Piscina (L x P x A)	10m x 10m x 10m
Calado, Borda Livre	4m, 6m
Massa (incluindo lastro)	5.452.000kg
Centro de Massa (CM) (abaixo do SWL)	0,282 m
Roll de inércia em CM	726.900.000 kg·m <sup>2</sup>
Pitch de inércia em CM	726.900.000 kg·m <sup>2</sup>
Yaw de inércia em CM	1.453.900.000 kg·m <sup>2</sup>
Profundidade da âncora	150m
Comprimento da linha neutra até o fundo do mar	250m
Diâmetro da linha	0,0809m
Rigidez Extensional da linha	589.000.000 N

### 3.2 Parametrização dos TMD's

Os principais parâmetros do TMDX (sentido frente-ré) são: massa  $m_T$  (kg), onde uma massa maior aumenta a inércia e a

energia cinética armazenada, limitada pela massa total da estrutura; rigidez da mola  $k_T$  (N/m); amortecimento  $d_T$  (N·s/m); posição  $x_T$  (m), que influencia as cargas e restrições de projeto; orientação (frente-traz ou lateral, lateral-lateral); e limites de curso (paradas para limitar o movimento do TMDX, afetando as cargas e restrições). O modelo de barçaça considera a conformidade da plataforma, com graus de liberdade da torre e do TMDX, além do grau de lançamento. Neste contexto, são utilizados os seguintes subíndices: TMDX (T), torre (t), batentes (S) e plataforma tipo barçaça (p). O modelo completo do TMDX é ilustrado na Figura 3.

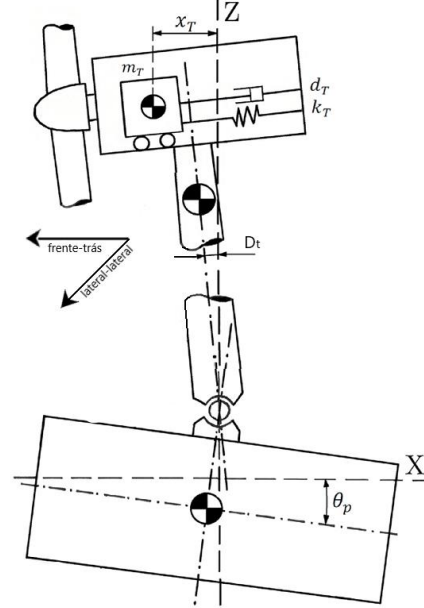


Fig. 3: Modelo completo do sistema para TMDX. Adaptado de Villoslada et al. (2022).

As paradas do TMDX ou batentes, limitam o curso da massa ressonante, tornando a instalação viável e realista. Elas são constituídas por uma mola adicional e um amortecedor que entram em ação quando a massa se desvia de uma determinada distância da posição de repouso. Os parâmetros das paradas incluem a distância de acionamento ( $X_s$ ), a rigidez da mola ( $k_s$ ) e o coeficiente de amortecimento ( $d_s$ ). A lógica operacional das paradas segue o mesmo desempenho do simulador FAST, com a mola sempre ativa e o amortecedor operando somente quando a massa se afasta da posição de repouso (Fig. 4).

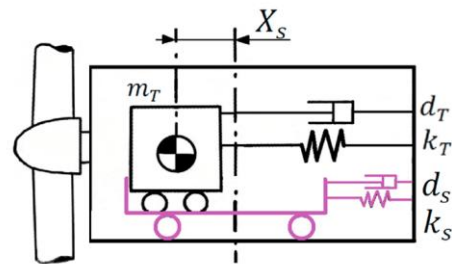


Fig. 4: Adição de batentes no sistema do TMDX. Adaptado de Villoslada et al. (2022).

O TMDY, com direção lateral-lateral, tem os mesmos parâmetros do TMDX, mas sua localização é diferente,

instalado para reduzir fadigas laterais na nacele. Ambos são dispostos em formato de "cruz" com relação ao centro da nacele, possuindo cotas verticais distintas.

### 3.3 Simulador FAST-SC

O software FAST (Fadiga, Aerodinâmica, Estruturas e Turbulência) simula uma turbina eólica de 5 MW, usando os módulos AeroDyn e HydroDyn para calcular aerodinâmica e cargas hidrodinâmicas na plataforma flutuante. Ele emprega simulação temporal para resolver equações não lineares, considerando vários fatores, como indução axial e tangencial, perdas de ponta e hub, e modelagem dinâmica de estol (Lackner et al. 2011). Neste simulador, dois TMD's independentes são integrados para controle estrutural, sendo esta versão modificada do software denominada 'FAST-SC'. As equações de movimento são derivadas usando a dinâmica de Kane (Kane et al. 1985). Os TMDs são posicionados na nacele da turbina eólica e consistem em massa, mola e amortecedor. A posição de cada TMD, incluindo a posição neutra da mola, é definida em relação à linha central do topo da torre, exercendo uma força igual e oposta na nacele. Cada TMD possui dois batentes para limitar o movimento (Kane et al. 1985).

Os TMDs oscilam axialmente na nacele da turbina (TMDX) e lateralmente (TMDY), gerando forças. Suas equações de movimento, derivadas do FAST, consideram posições, velocidades, acelerações e forças. No FAST-SC, TMDX e TMDY são independentes e podem ser controlados de diversas maneiras pelo usuário, incluindo controle passivo, semiativo ou ativo (Lackner et al. 2011). O simulador FAST-SC utiliza um arquivo executável e um arquivo de entrada principal. Este último permite ao usuário modificar parâmetros iniciais para representar o sistema proposto, incluindo informações sobre a simulação, turbina eólica, base de flutuação (se aplicável) e TMD's. Ele também requer arquivos secundários e bibliotecas para seu funcionamento adequado (Fig. 5).

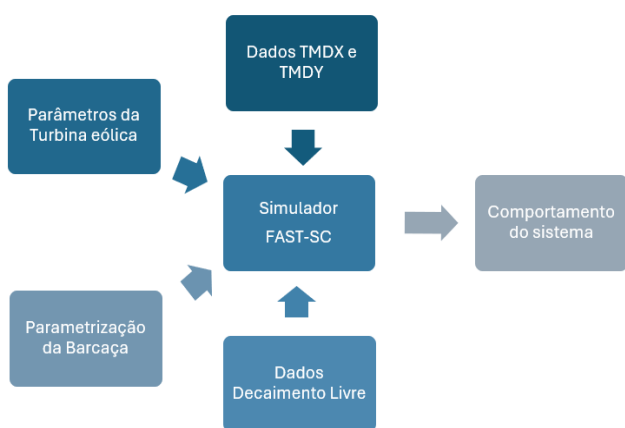


Fig. 5: Fluxograma Simplificado do FAST-SC.

Nas simulações de otimização, foram empregadas condições simplificadas do sistema, incluindo decaimento livre da estrutura (vento de 0,5 m/s e sem modelo cinemático de ondas). Analisou-se a resposta a um deslocamento inicial de 5 graus no pitch e 10 graus de rotação de guinada inicial na plataforma. Os principais parâmetros incluem: tempo de

simulação (100 segundos), graus de liberdade (DOF's) de rotação, inclinação e guinada da plataforma, assim como os modos de flexão são definidos como 'True' e as condições iniciais, mostradas na Tabela 3.

Tabela 3: Principais parâmetros entrada no FAST.

Parâmetros	Valor e Grandeza
RotSpeed (veloc. inicial do rotor)	12,1 (rpm)
TmdXDsp (desloc. inicial do TMDX)	1,0 (m)
TmdYDsp (desloc. inicial do TMDY)	1,0 (m)
PtfmRoll (desloc. rotação inicial plataforma)	5 graus
PtfmPitch (desloc. passo inicial plataforma)	5 graus
PtfmYaw (desloc. guinada inicial plataforma)	10 graus

### 3.4 Parametrização do AG

Neste trabalho foi utilizado o software MATLAB com suas bibliotecas de otimização para a codificação do algoritmo genético. Durante o ciclo de otimização do AG, cada indivíduo passa por uma simulação de 100 segundos no FAST-SC, com decaimento livre do sistema, para analisar sua resposta em relação à deflexão da torre em x e y (m) e ao pitch da barçaça (graus). Esses resultados permitem avaliar o desempenho de cada indivíduo na redução da fadiga da estrutura. Cada indivíduo é representado por um cromossomo com 14 variáveis, sendo metade delas para os parâmetros do TMDX e a outra metade para os parâmetros do TMDY. Na Tabela 4, encontram-se a descrição de cada variável e seus limites inferiores e superiores.

Tabela 4: Limites inferiores e superiores dos parâmetros otimizados.

Parâmetros TMD's	L. Inferior	L. Superior
TmdXMass (massa)	18.10 <sup>3</sup> kg	42.10 <sup>3</sup> kg
TmdYMass (massa)	8.10 <sup>3</sup> kg	12.10 <sup>3</sup> kg
TmdXSpr, TmdYSpr (rigidez mola)	10 <sup>3</sup> N/m	10 <sup>5</sup> N/m
TmdXDamp, TmdYDamp (amortecimento)	10 <sup>3</sup> N.s/m	2.10 <sup>4</sup> N.s/m
TmdXDwSp (posição de parada – eixo positivo)	7,5 m	8,3 m
TmdXDwSp (posição de parada – eixo negativo)	-8,3 m	-7,5 m
TmdYDwSp (posição de parada)	1,5 m	2,3 m
TmdYDwSp (posição de parada – eixo negativo)	-2,3 m	-1.5 m
TmdXSSpr, TmdYSSpr (mola de parada)	10 <sup>4</sup> N/m	10 <sup>6</sup> N/m
TmdXSDamp, TmdYSDamp (amortecimento de parada)	10 <sup>4</sup> N.s/m	10 <sup>6</sup> N.s/m

A função de avaliação (*fa*), que determina a aptidão de cada indivíduo, baseia-se na deflexão da torre (em metros) nos eixos x (*Dtx*) e y (*Dty*), sendo aplicada uma média ponderada entre ambas. Devido à maior fadiga ocorrer no eixo x (Lackner et al.

2011), o desvio padrão total da função de avaliação foi calculado conforme a equação 1.

$$f_a = \frac{\sigma(Dtx) \times 9 + \sigma(Dty)}{10} \quad (1)$$

Foram realizados 20 processamentos do algoritmo genético para obter os melhores resultados de parametrização dos TMD's. Os hiperparâmetros são baseados nos utilizados por Villoslada et al (2022) e alguns valores foram testados de forma empírica. Na Tabela 5, são apresentados somente os principais parâmetros de evolução para os processamentos do AG que resultaram nos 4 melhores resultados.

**Tabela 5: Principais parâmetros de evolução do AG.**

Parâmetros	1°	2°	3°	4°
Nº de processamento	12	11	3	5
População	50	50	15	15
Nº Gerações	50	50	30	30
Taxa Crossover	0.70	0.70	0.70	0.70
Taxa Mutação	0.30	0.30	0.30	0.30
Elitização	5	5	2	3
Critério de Parada	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-6</sup>
Melhor Indivíduo ( <i>f<sub>a</sub></i> )	0,2625	0,2714	0,2731	0,2781

### 3. RESULTADOS

O melhor indivíduo (solução) dentre os processamentos do AG ocorreu no 12º processo, conforme evidenciado na curva de gerações versus função de avaliação na Fig. 6, com o melhor indivíduo (0,262508) e a média de cada geração (0,262516).

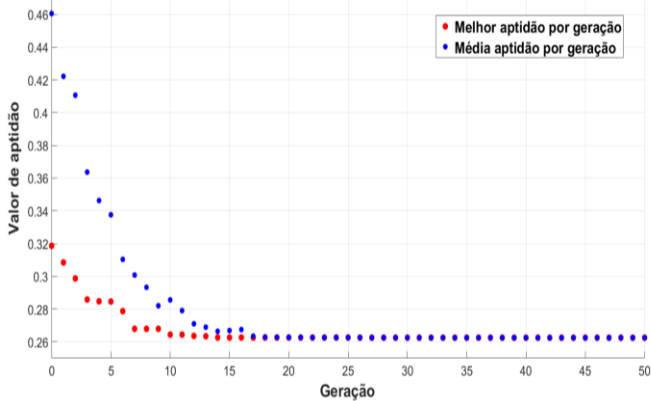


Fig. 6: Comportamento do AG: gerações versus função de avaliação.

Os resultados após a otimização do sistema, com as melhores parametrizações para TMDX e TMDY, estão apresentados na Tabela 6. As Figuras 7 e 8 mostram uma melhoria significativa na resposta do sistema, tanto para a deflexão da torre quanto ao *pitch* da barcaça, quando adicionados TMDX e TMDY otimizados, em comparação ao sistema sem nenhum TMD.

Para efeito comparativo, os gráficos da deflexão frente-ré e da deflexão lateral da torre deste sistema (Fig. 9 e Fig. 10) são mostrados em conjunto com os resultados obtidos por

Villoslada et al (2022), que otimizou apenas o TMDX, sob condições iniciais semelhantes e decaimento livre.

**Tabela 6: Parâmetros otimizados para TMDX e TMDY.**

Parâmetros	TMDX	TMY
Massa (kg)	40.076	8.938
Mola (N/m)	3.746	93.824
Amortecimento (N.s/m)	8.607	1.006
Posição de parada (m)	8	2,2
Mola de parada (N/m)	10.002	129.363
Amortecimento de parada (N.s/m)	389.954	85.957
$\sigma$ (deflexão. da torre)	0,2511	0,3655

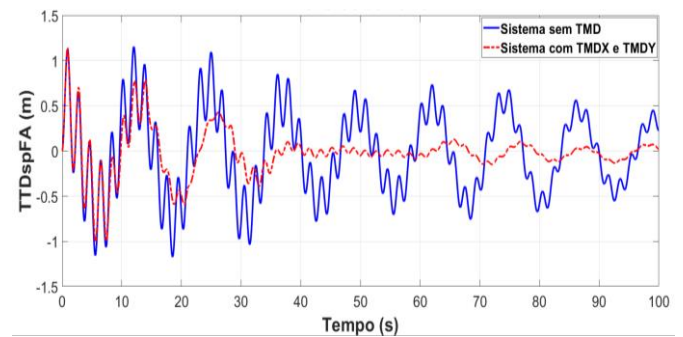


Fig. 7: Deflexão da torre - sistema sem TMD versus sistema com TMDX e TMDY

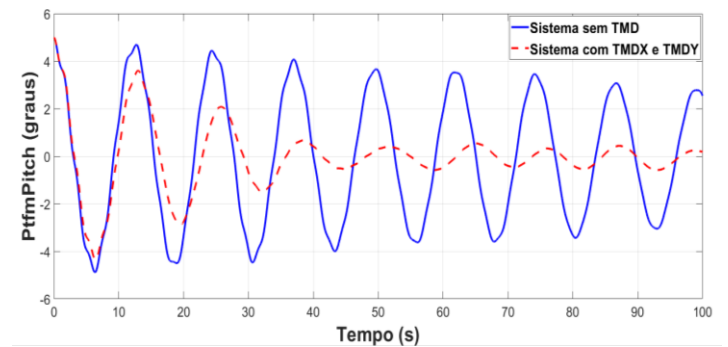


Fig. 8: Pitch da Barcaça - sistema sem TMD versus sistema com TMDX e TMDY.

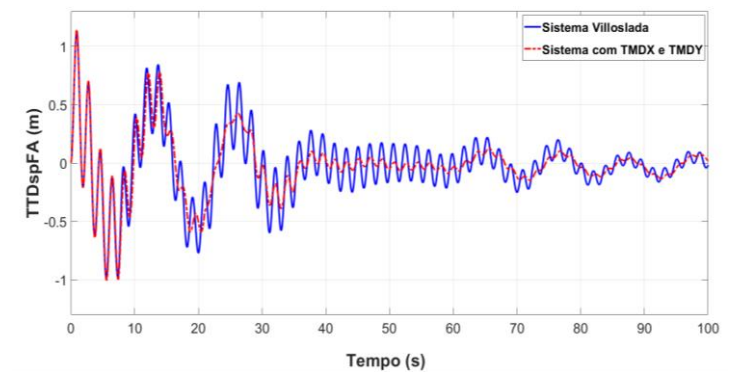


Fig. 9: Deflexão da torre - sistema com TMDX e TMDY versus resultados de Villoslada et al (2022).

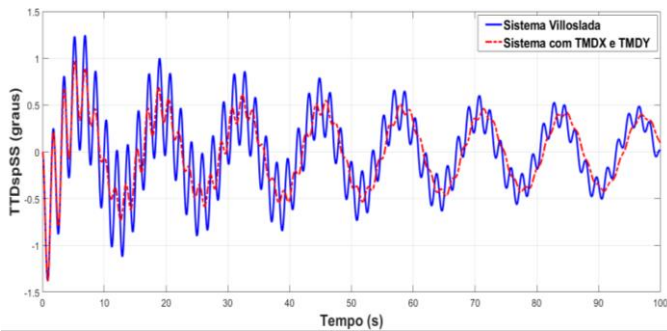


Fig. 10: Deflexão Lateral da Torre - sistema com TMDX e TMDY versus resultados de Villoslada et al (2022).

Nota-se uma melhora significativa na resposta do sistema que incorpora os TMDX e TMDY em comparação com o sistema sem nenhum TMD, alcançando uma redução de 36,7% na deflexão (RMSE: raiz do erro quadrado médio). Além disso, houve um desempenho superior em 11% (RMSE) em comparação ao sistema desenvolvido por Villoslada (2022), que otimizou apenas o TMDX.

#### 4. CONCLUSÕES

Este estudo ressalta a importância e eficácia do controle passivo na redução de vibrações e cargas pendulares em sistemas eólicos flutuantes, tornando-os mais eficientes e atrativos para a produção de energia. A principal contribuição deste artigo é a consideração abrangente dos parâmetros do duplo dispositivo de controle TMD na nacela, tanto na direção frente-ré quanto lateral-lateral, no ciclo de otimização, demonstrando que a abordagem proposta alcança uma significativa redução da fadiga (36,7%). Recomenda-se o uso de computação evolucionária para a parametrização dos TMD's, considerando suas restrições de curso e massa devido à natureza não linear do sistema, assim como diversas variáveis a serem consideradas para encontrar a melhor solução. Essas descobertas têm aplicabilidade ampla, não se limitando aos FOWT's, podendo ser estendida sua aplicação a outros sistemas para melhorar o desempenho do controle TMD estrutural passivo. Trabalhos futuros podem incluir simulações e otimizações do sistema sob diversas condições de carga de vento e ondas, além da consideração de TMD's em outras partes do sistema flutuante, como a torre e/ou plataforma.

#### AGRADECIMENTOS

A Coordenação Técnica do CBA 2024 pela organização do evento e ao CEFET-RJ por permitir o desenvolvimento deste trabalho.

#### REFERÊNCIAS

Almeida, L. F. (2007). Sistema Híbrido de Otimização de Estratégias de Controle de Válvulas de Poços Inteligentes sob Incertezas. *Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro-PUC-Rio*. Unpublished.

Butterfield, S., Musial, W., Jonkman, J., & Sclavounos, P. (2007). Engineering challenges for floating offshore wind turbines. *National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States)*. Unpublished.

Chen, X., Kareem, A., Xu, G., Wang, H., Sun, Y., & Hu, L. (2021). Optimal tuned mass dampers for wind turbines using a Sigmoid satisfaction function-based multiobjective optimization during earthquakes. *Wind Energy*, v. 24, p. 1140-1155.

Costoya, X., DeCastro, M., Carvalho, D., & Gómez-Gesteira, M. (2020). On the suitability of offshore wind energy resource in the United States of America for the 21st century. *Applied Energy*, v. 262, p. 114537.

Figueiredo, A. C. V. S. (2019). Avaliação de viabilidade de aplicação de aerogerador de pequeno porte em uma pousada em arraial do cabo. *Doctoral dissertation, Universidade Federal do Rio de Janeiro*. Unpublished.

He, E. M., Hu, Y. Q., & Zhang, Y. (2017). Optimization design of tuned mass damper for vibration suppression of a barge-type offshore floating wind turbine. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, v. 231, p. 302-315.

Hu, Y., & He, E. (2017). Active structural control of a floating wind turbine with a stroke-limited hybrid mass damper. *Journal of Sound and Vibration*, v. 410, p. 447-472.

Jonkman, J. M. (2007). Dynamics modeling and loads analysis of an offshore floating wind turbine. *University of Colorado at Boulder*. Unpublished.

Kane, T. R., & Levinson, D. A. (1985). *Dynamics, theory and applications*. McGraw Hill.

Lackner, M. A., & Rotea, M. A. (2011). Passive structural control of offshore wind turbines. *Wind energy*, 14(3), 373-388.

Liao, M., & Wu, Y. (2021). Conceptual design and dynamic analysis of a novel passive floating offshore wind turbine structure. *Ships and Offshore Structures*, v. 16(10), p. 1040-1049.

Michalewicz, Z., Fogel, D. B., & Bäck, T. (2000). *Evolutionary Computation. Vol. 2, Advanced Algorithms and Operators*. Taylor & Francis.

Olondriz, J., Jugo, J., Elorza, I., Alonso-Quesada, S., & Pujana-Arrese, A. (2019). A feedback control loop optimisation methodology for floating offshore wind turbines. *Energies*, v. 12, p. 18, 3490.

Piccolo, A. P., Rühler, A. J., & Rampinelli, G. A. (2014). Uma abordagem sobre a energia eólica como alternativa de ensino de tópicos de física clássica. *Revista brasileira de ensino de física*, v., 36, p. 01-13.

Stewart, G. M. (2012). Load reduction of floating wind turbines using tuned mass dampers. Unpublished.

Stewart, G., & Lackner, M. (2013). Offshore wind turbine load reduction employing optimal passive tuned mass damping systems. *IEEE transactions on control systems technology*, v. 21, p. 1090-1104.

Vijfhuizen, W. J. M. (2006). Design of a wind and wave power barge. *Doctoral dissertation. Universities of Glasgow and Strathclyde, Scotland*. Unpublished.

Villoslada, D., Santos, M., & Tomás-Rodríguez, M. (2022). TMD stroke limiting influence on barge-type floating wind turbines. *Ocean Engineering*, 248, p. 110781.

Zuo, H., Bi, K., & Hao, H. (2020). A state-of-the-art review on the vibration mitigation of wind turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v.121, p. 109710.