



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS (UFG)
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

EDUARDO COELHO DOS SANTOS

**OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL DE RODA-GIGANTE
ACESSÍVEL POR ALGORITMOS GENÉTICOS COM
AVALIAÇÃO BASEADA EM DESEMPENHO**

Goiânia

2026



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA) PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES

E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a [Lei 9.610/98](#), o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo das Teses e Dissertações disponibilizado na BDTD/UFG é de responsabilidade exclusiva do autor. Ao encaminhar o produto final, o autor(a) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do material bibliográfico

Dissertação Tese Outro*: _____

*No caso de mestrado/doutorado profissional, indique o formato do Trabalho de Conclusão de Curso, permitido no documento de área, correspondente ao programa de pós-graduação, orientado pela legislação vigente da CAPES.

Exemplos: Estudo de caso ou Revisão sistemática ou outros formatos.

2. Nome completo do autor

Eduardo Coelho dos Santos

3. Título do trabalho

Otimização estrutural de roda-gigante acessível por algoritmos genéticos com avaliação baseada em desempenho

4. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador)

Concorda com a liberação total do documento SIM NÃO¹

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante:

a) consulta ao(a) autor(a) e ao(a) orientador(a);

b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo da tese ou dissertação.

O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

Obs. Este termo deverá ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.



Documento assinado eletronicamente por **Gino Bertolucci Colherinhas, Professor do Magistério Superior**, em 18/02/2026, às 16:33, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Eduardo Coelho Dos Santos, Discente**, em 18/02/2026, às 19:31, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5944939** e o código CRC **00A1DF8A**.

EDUARDO COELHO DOS SANTOS

**OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL DE RODA-GIGANTE
ACESSÍVEL POR ALGORITMOS GENÉTICOS COM
AVALIAÇÃO BASEADA EM DESEMPENHO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação, da Universidade Federal de Goiás (UFG), como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Área de concentração: CIÊNCIAS MECÂNICAS

Linha de pesquisa: DINÂMICA DOS FLUIDOS E DOS SÓLIDOS

Orientador: Prof. Dr. GINO BERTOLLUCCI COLHERINHAS

Coorientador: Prof. Dr. ZENÓN JOSÉ GUZMÁN DEL PRADO

Goiânia

2026

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Santos, Eduardo Coelho Dos
Otimização estrutural de roda-gigante acessível por algoritmos genéticos com avaliação baseada em desempenho [Manuscrito] / Eduardo Coelho Dos Santos. - 2025.
99 f.: 2025

Orientador: Prof. Dr. Gino Bertollucci Colherinhas; co-orientador: Dr. Zenón José Guzmán Del Prado

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC), Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Goiânia, 2025.

Bibliografia.

Inclui: siglas, lista de figuras, lista de tabelas.

1. Otimização por Algoritmos Genéticos. 2. Modelagem por Elementos Finitos. 3. Probabilidade de Vento. 4. Roda Gigante. 5. Monte Carlo.

I. Colherinhas, Gino Bertollucci, orient. II. Prado, Zenón José Guzmán Del, co-orient. III. Título.

CDU 621



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS

ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Ata nº **08** da sessão de Defesa de Dissertação de **Eduardo Coelho dos Santos**, que confere o título de Mestre em **Engenharia Mecânica**, na área de concentração em **Ciências Mecânicas**.

Aos **trigésimo dia do mês de janeiro de dois mil e vinte e seis**, a partir das **10h**, em formato híbrido no Auditório da Engenharia Mecânica e online via google meet, realizou-se a sessão pública de Defesa de Dissertação intitulada “Otimização estrutural de roda-gigante acessível por algoritmos genéticos com avaliação baseada em desempenho”. Os trabalhos foram instalados pelo Orientador, Professor Doutor **Gino Bertolucci Colherinhas (UFG)** com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Professor Doutor **Marlipe Garcia Fagundes Neto (UFG)**, membro titular interno e Professor Doutor **Marcus Vinicius Girão de Moraes (UnB)** membro titular externo. Durante a arguição os membros da banca **não fizeram** sugestão de alteração do título do trabalho. A Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da Dissertação, tendo sido o candidato **aprovado** pelos seus membros. Proclamados os resultados pelo Professor Doutor **Gino Bertolucci Colherinhas**, Presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata que é assinada pelos Membros da Banca Examinadora, aos **trigésimo dia do mês de janeiro de dois mil e vinte e seis**.

TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA



Documento assinado eletronicamente por **Gino Bertolucci Colherinhas, Professor do Magistério Superior**, em 30/01/2026, às 12:26, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marlipe Garcia Fagundes Neto, Professor do Magistério Superior**, em 30/01/2026, às 12:27, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **MARCUS VINICIUS GIRAO DE MORAIS, Usuário Externo**, em 30/01/2026, às 12:28, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5911402** e o código CRC **59BABC39**.

Referência: Processo nº 23070.058688/2025-55

SEI nº 5911402

EDUARDO COELHO DOS SANTOS

**OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL DE RODAS-GIGANTES
COM ACESSIBILIDADE UTILIZANDO ALGORITMOS
GENÉTICOS COM AVALIAÇÃO BASEADA EM
DESEMPENHO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação, da Universidade Federal de Goiás (UFG), como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Área de concentração: CIÊNCIAS MECÂNICAS

Linha de pesquisa: DINÂMICA DOS FLUIDOS E DOS SÓLIDOS

Prof. Dr. Gino Bertollucci Colherinhas – Universidade Federal de Goiás

Prof. Dr. Zenón José Guzmán Del Prado – Universidade Federal de Goiás

Prof. Dr. Marcus Vinicius Girão de Moraes – Universidade de Brasília

Prof. Dr. Marlipe Garcia Fagundes Neto – Universidade Federal de Goiás

Goiânia, 30, janeiro, 2026.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus pelo dom da vida, pela oportunidade de estudar e de contribuir com um grão de areia para o avanço científico da humanidade.

Agradeço aos meus familiares por todo o apoio nesta caminhada, pelos cuidados e pelo amor.

Aos meus amigos que contribuíram nesta caminhada, tanto no mestrado quanto na graduação.

Ao meu orientador, Gino Bertollucci Colherinhas, pela orientação, paciência e dedicação ao longo deste estudo.

À Universidade Federal de Goiás e o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica pela infraestrutura e pelo ensino de alta excelência.

Agradeço, ainda, o apoio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e do acordo de PD&I entre VICOM e a UFG.

RESUMO

O desenvolvimento de rodas-gigantes acessíveis, com desempenho estrutural adequado e custo competitivo, permanece um desafio relevante no contexto brasileiro, marcado por escassez de literatura técnica aplicada e dependência de equipamentos importados. Esta dissertação propõe uma metodologia computacional integrada para projeto, modelagem e otimização estrutural de uma roda-gigante acessível, combinando o método dos elementos finitos com algoritmos genéticos em ambiente python. Um modelo paramétrico em método dos elementos finitos foi implementado e acoplado ao solver ANSYS por meio da biblioteca PyMAPDL, viabilizando a automação de geração de geometria, malha, carregamentos e pós-processamento. Em uma primeira etapa determinística, um algoritmo genético próprio foi adaptado para otimização discreta de seções comerciais, investigando operadores genéticos e parâmetros de execução com foco na minimização da massa estrutural sob requisitos de segurança e integridade. Complementarmente, adotou-se uma abordagem probabilística orientada a desempenho, em que incertezas associadas ao vento, à ocupação e a parâmetros estruturais foram propagadas via simulações de Monte Carlo, estruturadas segundo medidas de intensidade e parâmetros do sistema, e avaliadas por métricas probabilísticas. A partir da otimização com restrições implementada no algoritmo genético, foi obtido um projeto determinístico, com 14 gôndolas, aproxima-se de limites operacionais de deslocamento de pico e conforto. Como contribuição, o trabalho entrega um fluxo automatizado, reproduzível e extensível para otimização e avaliação de desempenho de rodas-gigantes, fornecendo diretrizes para projetos mais leves, seguros e alinhados a critérios normativos e operacionais, com potencial de apoiar o desenvolvimento nacional de estruturas recreativas acessíveis. Além disso, o estudo avança o estado da arte ao integrar algoritmo genético e método dos elementos finitos de forma automatizada, oferecendo um modelo replicável para aplicações futuras em estruturas de grande porte.

Palavras-chave: Otimização por Algoritmos Genéticos, Modelagem por Elementos Finitos, Probabilidade de Vento, Roda Gigante, Monte Carlo.

ABSTRACT

The development of accessible Ferris wheels with adequate structural performance and competitive cost remains a significant challenge in the Brazilian context, characterized by a scarcity of applied technical literature and reliance on imported equipment. This dissertation proposes an integrated computational methodology for the design, modeling, and structural optimization of an accessible ferris wheel, combining the finite element method with genetic algorithms in a Python environment. A parametric finite element model was implemented and coupled to the ANSYS solver through the PyMAPDL library, enabling automated geometry generation, meshing, loading application, and post-processing. In an initial deterministic stage, a proprietary genetic algorithm was adapted for discrete optimization of commercial sections, investigating genetic operators and execution parameters with the objective of minimizing structural mass while satisfying safety and integrity requirements. Complementarily, a performance-based probabilistic approach was adopted, in which uncertainties associated with wind, occupancy, and structural parameters were propagated via Monte Carlo simulations, structured according to intensity measures and system parameters and evaluated using probabilistic metrics. From the constrained optimization implemented in the genetic algorithm, a deterministic design with 14 cabins was obtained, approaching operational limits of peak displacement and comfort. As a contribution, this work delivers an automated, reproducible, and extensible workflow for the optimization and performance assessment of Ferris wheels, providing guidelines for lighter, safer designs aligned with normative and operational criteria, with the potential to support the national development of accessible recreational structures. In addition, the study advances the state of the art by integrating genetic algorithms and the finite element method in an automated manner, offering a replicable model for future applications in large-scale structures.

Keywords: Genetic Algorithm Optimization, Finite Element Modeling, Wind Probability, Ferris Wheel, Monte Carlo.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 – Yup Star Rio, atração turística localizada no Rio de Janeiro. | 1 |
| Figura 2 – Exemplo de simulação de impacto com PyDYNA. | 7 |
| Figura 3 – Aplicações do PyAnsys. | 8 |
| Figura 4 – Definição dos componentes de um cromossomo. | 13 |
| Figura 5 – Método da roleta. | 15 |
| Figura 6 – Cruzamento <i>One-Point</i> | 17 |
| Figura 7 – Cruzamento <i>Two-Point</i> | 18 |
| Figura 8 – Aceleração horizontal de pico versus frequência de vibração para verificação do conforto humano (residências e escritórios). | 26 |
| Figura 9 – Distribuições probabilísticas. | 28 |
| Figura 10 - Vegas High Roller, ponto turístico na cidade de Las Vegas. | 32 |
| Figura 11 – Modos de vibração Vegas High Roller. | 33 |
| Figura 12 - Fluxograma. | 35 |
| Figura 13 - Configurações de pórtico com (a) 4 vãos e (b) 3 vãos. | 36 |
| Figura 14 - Seções otimizadas no AG. | 37 |
| Figura 15 – Dimensões do pórtico radial com (a) 3 vãos e (b) 4 vãos. | 38 |
| Figura 16 – Gôndolas consideradas no cálculo da massa e da altura do centro de gravidade. | 38 |
| Figura 17 – Elemento BEAM188. | 39 |
| Figura 18 – Elemento MASS21. | 40 |
| Figura 19 - Direção do vento na roda-gigante. | 42 |
| Figura 20 – Coeficiente de força C_x e C_z para barras prismáticas de faces planas de comprimento infinito. | 43 |
| Figura 21 – Valor do fator de redução K para barras de comprimento finito. | 44 |
| Figura 22 – Fluxograma da implementação do AG. | 47 |
| Figura 23 – Processo de otimização. | 48 |
| Figura 24 – Interface gráfica (GUI). | 49 |
| Figura 25 – Seção transversal dos tubos de aço. | 53 |
| Figura 26 – Interface gráfica (GUI). | 53 |
| Figura 27 – Análise tipos de cruzamento, $N_T = 3$ | 58 |
| Figura 28 – Análise tipos de cruzamento, $N_T = 4$ | 58 |
| Figura 29 – Resultados otimização, $N_T = 3$ & $p_m = 1$ | 60 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 30 – Resultados otimização, $N_T = 4$ & $p_m = 1$ | 60 |
| Figura 31 – Resultados otimização, $N_T = 3$ & $p_m = 5$ | 61 |
| Figura 32 – Resultados otimização, $N_T = 4$ & $p_m = 5$ | 61 |
| Figura 33 – Correlação para $N_T = 3$ & $p_m = 1$ | 62 |
| Figura 34 – Correlação para $N_T = 4$ & $p_m = 1$ | 62 |
| Figura 35 – Correlação para $N_T = 3$ & $p_m = 5$ | 63 |
| Figura 36 – Correlação para $N_T = 4$ & $p_m = 5$ | 63 |
| Figura 37 – Comparativo configurações do pórtico radial, peso da massa igual a 1. | 64 |
| Figura 38 – Comparativo configurações do pórtico radial, peso da massa igual a 5. | 65 |
| Figura 39 – Análise do peso da massa no pórtico radial com três divisões. | 65 |
| Figura 40 – Análise do peso da massa no pórtico radial com quatro divisões. | 66 |
| Figura 41 - Resultados de convergência da otimização. | 67 |
| Figura 42 – Tensão de Von Mises do DC-14. | 68 |
| Figura 43 - Análise Modal. | 69 |
| Figura 44 - Resposta espectral (PSDs). | 70 |
| Figura 45 - Histogramas das variáveis de entrada. | 71 |
| Figura 46 - Histogramas das massas e ocupação das gôndolas. | 72 |
| Figura 47 - Histogramas dos resultados. | 73 |
| Figura 48 - Distribuição de resultados CCDF. | 74 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 – Parâmetros das otimizações iniciais. | 52 |
| Tabela 2 – Parâmetros definidos para o <i>PyMoo</i> | 54 |
| Tabela 3 - Resultados para os dimensionamentos extremos. | 57 |
| Tabela 4 – Parâmetros definidos para o AG. | 59 |
| Tabela 5 – Resultados das seções transversais. | 68 |
| Tabela 6 – Resultados determinísticos do DC-14. | 68 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|--------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| AG | Algoritmo Genético |
| MEF | Método dos Elementos Finitos |
| MAPDL | <i>Mechanical APDL (Ansys Parametric Design Language)</i> |
| PyMAPDL | <i>Python interface for Ansys Mechanical APDL</i> |
| FEA | <i>Finite Element Analysis</i> (Análise por Elementos Finitos) |
| TSP | <i>Traveling Salesman Problem</i> |
| BLX-α | <i>Blend Crossover</i> |
| RX | <i>Rayleigh Crossover</i> |
| NSGA-II | <i>Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II</i> |
| GDE3 | <i>Generalized Differential Evolution 3</i> |
| SPEA2 | <i>Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2</i> |
| MOEA/D | <i>Multi-Objective Evolutionary Algorithm based on Decomposition</i> |
| MOEA/D-EpDE | MOEA/D com Evolução Diferencial baseada em <i>pbest</i> |
| pbest | Melhor resultado |
| PSD | Densidade Espectral de Potência |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| Hz | Hertz |
| % | Percentual |
| σ_e | Tensão de escoamento do material (MPa) |
| $\sigma_{m\acute{a}x}$ | Tensão máxima obtida na análise estrutural (MPa) |
| FS | Fator de Segurança |
| m | Massa da roda gigante sem considerar as gôndolas |
| N_{ger} | Número de gerações na otimização |
| N_{ind} | Número de indivíduos por geração |
| p_{mut} | Probabilidade de mutação |
| p_c | Probabilidade de cruzamento |
| u | Vetor de deslocamento nodais |
| [M] | Matriz de massa da estrutura |
| [K] | Matriz de rigidez da estrutura |
| q_{eq} | Pressão dinâmica do vento (kN/m ²) |
| c_f | Coefficiente de força aerodinâmica |
| w₁ | Largura da seção transversal do tubo |
| w₂ | Altura da seção transversal do tubo |
| t_h | Espessura da parede do tubo |
| g | Aceleração da gravidade |

SUMÁRIO

| | | |
|--------------|--------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1. | INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 1.1 | Objetivos..... | 2 |
| 1.1.1 | Objetivo geral..... | 2 |
| 1.1.2 | Objetivos específicos..... | 2 |
| 1.2 | Justificativa | 3 |
| 2. | REFERENCIAL TEÓRICO..... | 4 |
| 2.1 | Acessibilidade..... | 4 |
| 2.2 | Histórico do MEF aplicado a análise de sistemas estruturais | 4 |
| 2.3 | PyMAPDL | 6 |
| 2.4 | Otimização por algoritmo genético | 10 |
| 2.5 | Aplicações de otimização..... | 22 |
| 2.6 | PyAnsys | 24 |
| 2.7 | Propagação de incertezas e avaliação probabilística de desempenho | 25 |
| 2.8 | Campo de vento turbulento | 29 |
| 2.9 | Estudos sobre rodas gigantes..... | 31 |
| 3. | MÉTODO | 35 |
| 3.1 | Elementos da roda-gigante | 36 |
| 3.2 | Modelagem em elementos finitos | 37 |
| 3.3 | Carregamentos aerodinâmicos durante a operação da roda-gigante..... | 41 |
| 3.2.1 | Carregamentos durante a operação da roda-gigante..... | 41 |
| 3.2.2 | Cargas aerodinâmicas sobre a roda-gigante | 42 |
| 3.2.3 | Modelagem do campo de vento turbulento | 44 |
| 3.2.4 | Resposta dinâmica estrutural | 46 |
| 3.4 | Modelagem determinística de rodas-gigantes com AG próprio..... | 47 |
| 3.4.1 | Modelo próprio de algoritmo genético | 49 |
| 3.4.2 | Roteiro de otimizações..... | 51 |

| | | |
|-------|---------------------------------------------------------------|----|
| 3.5 | Modelagem PBWE e avaliação de desempenho por Monte Carlo..... | 53 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÕES..... | 57 |
| 4.1 | Análise dos tipos de cruzamento | 57 |
| 4.2 | Análise determinística com AG próprio..... | 59 |
| 4.3 | Avaliação de Desempenho | 67 |
| 4.3.1 | Convergência do AG e obtenção do caso ótimo DC-14..... | 67 |
| 4.3.2 | Avaliação dinâmica | 69 |
| 4.3.3 | Simulações Monte Carlo | 70 |
| 5. | CONCLUSÕES | 75 |
| 6. | TRABALHOS FUTUROS | 77 |

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de estruturas de grande porte, como rodas gigantes, representa um desafio significativo na engenharia estrutural moderna. Essas estruturas não apenas exigem altos padrões de segurança e confiabilidade, mas também precisam atender a critérios de eficiência econômica e acessibilidade. No contexto brasileiro, essas exigências se tornam ainda mais desafiadoras devido à escassez de literatura técnica disponível nas principais plataformas de pesquisas, como a *Web of Science* e *SCOPUS*. Esse cenário reflete a necessidade de iniciativas que promovam soluções inovadoras e acessíveis, fortalecendo a capacidade de inovação e competitividade da engenharia nacional.

As rodas-gigantes são ícones culturais e marcos arquitetônicos em diversas partes do mundo. Além de seu apelo visual e turístico, destaca-se, por exemplo, a *Yup Star Rio*, localizada no Porto Maravilha, no Rio de Janeiro, que oferece aos visitantes uma nova perspectiva dos principais pontos turísticos da cidade a uma altura de 88 metros, elas desempenham um papel social importante, proporcionando experiências inclusivas em parques de diversão e eventos recreativos. Entretanto, o alto custo de desenvolvimento e manutenção dessas estruturas pode limitar sua acessibilidade em mercados emergentes, como o Brasil. Nesse contexto, a busca por métodos eficientes de otimização estrutural torna-se uma prioridade para reduzir custos, melhorar o desempenho e ampliar o acesso a esse tipo de infraestrutura.

Figura 1 – *Yup Star Rio*, atração turística localizada no Rio de Janeiro.



Fonte: ATRNP (2025).

Este trabalho propõe uma abordagem computacional inovadora voltada ao desenvolvimento estrutural de rodas gigantes por meio da integração entre algoritmos genéticos (AG) e o método dos elementos finitos (MEF). O algoritmo genético é empregado como mecanismo de busca para explorar combinações de variáveis de projeto de forma eficiente, enquanto o modelo de elementos finitos é utilizado para avaliar o desempenho estrutural das soluções candidatas. A integração entre os módulos é conduzida em linguagem Python, com uso de ferramentas que viabilizam automação de modelagem, análise e pós-processamento no *solver* de elementos finitos, favorecendo rastreabilidade e reprodutibilidade do fluxo de trabalho. Complementarmente à otimização determinística, o trabalho contempla uma etapa de modelagem probabilística e avaliação de desempenho por simulações de Monte Carlo, com adaptação do processo de otimização para tratar um problema discreto associado à seleção de seções comerciais e parâmetros geométricos. Nesta etapa, adota-se uma biblioteca dedicada à otimização em Python, em razão da maior flexibilidade para implementação de restrições e estratégias de viabilidade.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Desenvolver e aplicar uma metodologia computacional para o projeto estrutural de rodas-gigantes, integrando algoritmos genéticos e o método dos elementos finitos, com foco na redução de massa e preservação de níveis adequados de segurança e desempenho estrutural, incluindo a consideração de carregamentos operacionais, em conformidade com normas técnicas vigentes, e ações aerodinâmicas, bem como uma etapa de avaliação probabilística baseada em simulações de Monte Carlo.

1.1.2 Objetivos específicos

- i. Quantificar o potencial de redução de massa estrutural de rodas-gigantes por meio de otimização estrutural, mantendo níveis adequados de segurança e desempenho dinâmico;
- ii. Analisar a influência das variáveis de projeto estruturais (seções, rigidez e massa) sobre as respostas estáticas e dinâmicas relevantes ao comportamento global da roda-gigante;

- iii. Investigar a sensibilidade do desempenho estrutural às incertezas associadas ao vento, à ocupação e a parâmetros mecânicos, por meio de uma abordagem probabilística orientada a desempenho;
- iv. Estimar probabilidades de excedência de respostas críticas, deslocamentos, acelerações e tensões para um projeto ótimo determinístico, fornecendo subsídios para avaliação de confiabilidade estrutural;

1.2 Justificativa

O avanço da engenharia estrutural no desenvolvimento de grandes estruturas rotativas, como rodas gigantes, impõe desafios técnicos relevantes, especialmente quando se busca avaliar leveza estrutural, segurança e viabilidade econômica. No contexto brasileiro, esses desafios são acentuados pela escassez de literatura especializada sobre o tema e pela dependência de soluções importadas, que limitam a difusão de tais estruturas em contextos urbanos e sociais diversificados. Diante desse cenário, a presente pesquisa justifica-se pela proposição de uma solução nacional, inovadora e acessível, que contribua de maneira significativa para a autonomia tecnológica no setor.

Além da relevância técnica, o impacto social e econômico desta dissertação é expressivo. Ao promover o desenvolvimento de rodas gigantes mais leves, seguras e economicamente viáveis, amplia-se a possibilidade de implantação dessas estruturas em municípios de pequeno e médio porte, promovendo lazer e revitalização de espaços públicos. Além disso, como forma de promoção de inclusão social no desenvolvimento da roda-gigante é projetado uma gôndola acessível por Rodrigues (2024), com foco na inclusão de pessoas com mobilidade reduzida. A pesquisa também fortalece a capacidade de inovação da engenharia nacional ao integrar algoritmos evolutivos e métodos numéricos de alta precisão, promovendo uma engenharia orientada por dados e simulações robustas.

Ao propor uma abordagem automatizada, fundamentada em inteligência computacional e modelagem numérica, esta dissertação não apenas busca suprir lacunas existentes no campo da engenharia estrutural aplicada a rodas gigantes, como também estabelecer um paradigma replicável para o desenvolvimento de outras estruturas complexas, de grande porte e alta responsabilidade técnica. Assim, a relevância da pesquisa transcende o objeto de estudo específico, contribuindo para o avanço metodológico e tecnológico da área.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo apresenta os fundamentos teóricos que sustentam a presente pesquisa, abordando os principais conceitos de engenharia estrutural aplicados ao desenvolvimento de rodas gigantes, com ênfase nos métodos contemporâneos de projeto, dimensionamento e análise do comportamento dinâmico dessas estruturas. São discutidas, ainda, técnicas de otimização estrutural por meio de ferramentas computacionais avançadas, com destaque para os algoritmos evolutivos, inspirados na teoria da seleção natural de Charles Darwin, e estratégias meta-heurísticas, amplamente utilizadas para aprimorar a eficiência das estruturas. A seção também aprofunda a discussão sobre a integração entre linguagens de programação e softwares de análise por elementos finitos, com foco na utilização do PyMAPDL, ferramenta que viabiliza o controle automatizado do ANSYS via scripts em Python, permitindo a personalização de rotinas, controle paramétrico e pós-processamento eficiente. Além disso, são exploradas as principais abordagens de análise estrutural, incluindo os métodos estático, modal e harmônico, os quais fornecem subsídios para a avaliação da resistência, da estabilidade e da resposta dinâmica da estrutura sob diferentes condições de carregamento.

2.1 Acessibilidade

2.2 Histórico do MEF aplicado a análise de sistemas estruturais

Diante do avanço computacional ao longo do século XX, métodos numéricos passaram a ganhar protagonismo como alternativas eficazes à solução analítica tradicional, a qual é baseada na formulação e resolução exata de equações diferenciais que descrevem os fenômenos físicos. Embora a solução analítica proporcione resultados precisos em problemas idealizados e de menor complexidade, sua aplicação se torna inviável diante da geometria irregular, condições de contorno complexas e comportamento não linear de materiais, comumente encontrados em problemas reais de engenharia. Nesse contexto, no início do século XX surgem os métodos numéricos, com a característica de solucionar equações diferenciais complexas mais rapidamente, mas de forma aproximada. Em seguida na década de 40 e 50 o método dos elementos finitos é desenvolvido com a finalidade de solucionar problemas de elasticidade com conceitos de funções de forma e discretização, nas décadas de 50 e 60 essa ferramenta foi amplamente popularizada o que permitiu sua aplicação em análises de estruturas complexas,

consolidando-se como uma das ferramentas mais versáteis da engenharia moderna. (Zienkiewicz; Taylor; Zhu, 2013).

A modelagem de estruturas é um processo fundamental na engenharia estrutural, permitindo a análise de comportamento de materiais e componentes sob diversas condições de carregamento e ambientais. A aplicação de ferramentas computacionais na análise estrutural tem revolucionado o projeto de grandes construções, ao viabilizar simulações mais precisas, seguras e economicamente viáveis. Segundo Bathe (2014) a utilização do método dos elementos finitos (MEF) permite a subdivisão de estruturas complexas em pequenos elementos finitos interconectados, permitindo a modelagem numérica de sistemas físicos governados por equações diferenciais parciais, nos quais as equações diferenciais parciais são resolvidas numericamente, assim, efetua-se a simulação com precisão do comportamento estrutural sob diferentes carregamentos, fornecendo informações detalhadas sobre tensões, deslocamentos e fatores de segurança.

O MEF se destaca pela flexibilidade na representação de geometrias complexas e pela capacidade de lidar com diferentes condições de contorno, propriedades materiais variáveis, permitindo a análise eficiente de sistemas mecânicos altamente não-lineares e com geometrias complexas (Zienkiewicz; Taylor; Zhu, 2013). Tais características o tornam especialmente eficaz na análise de sistemas mecânicos sofisticados, como estruturas tridimensionais e componentes submetidos a carregamentos dinâmicos. Além disso, o MEF tem se mostrado aplicável não apenas à análise estrutural, mas também a domínios térmicos, acústicos, eletromagnéticos e de escoamento de fluidos. Consolidando-se como uma técnica multidisciplinar amplamente difundida em engenharia e ciência aplicada (Cook et al., 2001).

A precisão e a confiabilidade dos resultados obtidos por meio do MEF dependem fortemente de diversos fatores, entre os quais se destacam a escolha adequada do tipo de elemento, a estratégia de geração de malha e os métodos de integração numérica empregados (Bathe, 2014). Sendo um dos principais desafios na aplicação do MEF a definição adequada da malha e do refinamento dos elementos, de modo a equilibrar a precisão e o custo computacional. Malhas mais refinadas, compostas por um maior número de elementos, tendem a fornecer resultados mais precisos, especialmente em regiões de alto gradiente de tensão ou deformação; no entanto, implicam em maior custo computacional e tempo de processamento. Por outro lado, malhas mais grosseiras reduzem o tempo de simulação, mas podem comprometer a acurácia dos resultados e até mesmo conduzir a interpretações equivocadas do comportamento estrutural. Métodos

adaptativos têm sido desenvolvidos para otimizar esse processo, permitindo um refinamento localizado em regiões de maior gradiente de tensão ou deformação. Além disso, a escolha das funções de forma influencia diretamente a convergência da solução, sendo que elementos quadráticos e isoparamétricos são amplamente utilizados para reduzir erros numéricos e melhorar a representação geométrica, sobretudo em domínios curvos ou com transições bruscas de geometria (Cook et al., 2001). Ademais, Hughes (2000) também destaca que a formulação correta das funções de interpolação é essencial para evitar problemas de rigidez excessiva ou instabilidades na solução numérica.

O avanço das técnicas de computação, aliado ao desenvolvimento de softwares especializados, como ANSYS, Abaqus e COMSOL Multiphysics, proporcionou uma verdadeira transformação no modo como engenheiros projetam e analisam estruturas. Essas ferramentas possibilitam análises cada vez mais realistas, abrangendo geometrias complexas, materiais com comportamento não linear, condições de contorno sofisticadas e carregamentos dinâmicos. Essa abordagem permite que os engenheiros realizem testes virtuais antes mesmo da fabricação dos componentes, prevendo tensões, deformações e deslocamentos em diversos cenários de carregamento, o que reduz significativamente custos e tempo de desenvolvimento, além de permitir a identificação de possíveis falhas em estágios iniciais do projeto (Zienkiewicz; Taylor; Zhu, 2013; Smith; Griffiths; Margetts, 2013). Permitindo que decisões de engenharia sejam fundamentadas em dados simulados e validados computacionalmente, o que resulta em maior eficiência, segurança e economia. Diante dessas características o MEF é amplamente utilizado nos projetos de engenharia. Como enfatizado por Belytschko et al. (2014), a contínua evolução do MEF permite a aplicação em novos desafios da engenharia, consolidando-se como uma ferramenta indispensável à inovação, fornecendo a base computacional para a análise estrutural de sistemas críticos e desenvolvimento de soluções estruturais avançadas.

2.3 PyMAPDL

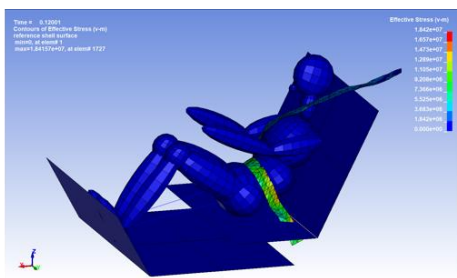
O MAPDL (Mechanical Ansys Parametric Design Language) é uma linguagem de script integrada ao ambiente clássico do Ansys, amplamente utilizada para a modelagem e simulação de problemas complexos em engenharia. Sua principal característica é a flexibilidade no desenvolvimento de rotinas paramétricas que permitem a automatização de análises, como a definição de geometria, aplicação de carregamentos, geração de malha, solução e pós-processamento. Como destacado por Moaveni (2007), o

MAPDL oferece um nível de controle detalhado sobre os elementos do modelo numérico, tornando-se uma ferramenta robusta em análises de elementos finitos (FEA) em projetos complexos. Segundo Ferziger; Perić (2002), essa abordagem baseada em scripts é especialmente útil em análises que exigem repetibilidade e controle fino sobre as variáveis de entrada, como é o caso de processos de otimização estrutural, simulações paramétricas e análises térmicas sob diferentes condições operacionais.

Além de sua aplicação em análises estruturais, o MAPDL é também amplamente explorado em simulações multifísicas, como acoplamentos térmico estruturais, eletromecânicos e análises transientes. Conforme enfatizado na documentação do ANSYS (Mechanical APDL, 2023), essa capacidade é ampliada significativamente pela possibilidade de integração com rotinas personalizadas, por meio da criação de *macros*, *do-loops*, e funções definidas pelo usuário, tornando possível resolver problemas que vão além dos pacotes pré-configurados das interfaces gráficas convencionais do ANSYS Workbench. Em contextos de pesquisa aplicada e desenvolvimento experimental, como o abordado nesta dissertação, a possibilidade de escrever scripts altamente especializados permite que o pesquisador configure modelos customizados, explore cenários operacionais não padronizados e implemente estratégias de controle e pós-processamento adaptadas ao problema em estudo.

De acordo com a documentação oficial do (PyAnsys, 2022), integração desse ecossistema com o ANSYS Workbench permite que usuários acessem uma ampla gama de funcionalidades de simulação diretamente a partir do ambiente Python, favorecendo a automação, a personalização e a reprodutibilidade dos fluxos de trabalho. O PyAnsys fornece suporte para uma variedade de módulos, entre os quais destaca-se o PyDYNA, utilizado principalmente em simulações dinâmicas e de impacto, como os testes de colisão em veículos e simulações de dinâmica estrutural, Figura 2.

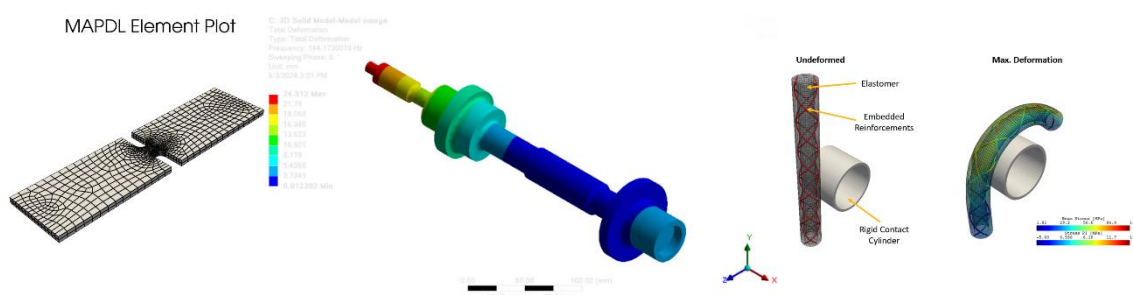
Figura 2 – Exemplo de simulação de impacto com PyDYNA.



Fonte: PyAnsys (2022).

Outro módulo amplamente empregado é o PyDPF – Post, que permite acessar e realizar o pós-processamento dos arquivos de resultados gerados pelo solver do Ansys, fornecendo uma estrutura eficiente para análise de grandes volumes de dados estruturais, com ferramentas para extração de tensões, deslocamentos, frequências naturais, respostas dinâmicas e outros parâmetros críticos. O PyWorkbench, funciona como uma interface Pythonic para o Ansys Workbench, na qual permite a automação e personalização dos fluxos de trabalho no ambiente gráfico do Workbench. A documentação fornece exemplos detalhados de como usar o PyAnsys em diferentes contextos, Figura 3, o que torna a ferramenta uma solução robusta, acessível e escalável para engenheiros e pesquisadores que buscam maior controle sobre as simulações numéricas, além de apresentar um avanço significativo na direção de análises paramétricas, otimização computacional e simulações multifísicas automatizadas.

Figura 3 – Aplicações do PyAnsys.



Fonte: PyAnsys (2022).

Entre os módulos centrais do ecossistema PyAnsys, destaca-se o PyMAPDL, uma biblioteca que estabelece uma ponte direta entre a linguagem Python e o solver ANSYS Mechanical APDL (MAPDL). Seu principal objetivo é simplificar a interação com o MAPDL por meio de uma interface moderna, orientada a objetos, permitindo o envio de comandos, controle de simulações, extração de dados e automação completa de processos de análise. Seu pacote principal, `ansys-mapdl-core`, permite a criação de scripts MAPDL utilizando tanto a sintaxe original Ansys Parametric Design Language (APDL) quanto diretamente em Python, promovendo uma integração fluida entre os dois ambientes. Esse recurso facilita a automação e personalização de simulações, oferecendo maior flexibilidade aos usuários. A API do PyMAPDL, que combina a familiaridade do APDL com a versatilidade do Python, facilita a integração dos recursos de simulação do Ansys MAPDL em novos aplicativos, enquanto a troca eficiente de dados é garantida por um sistema de chamadas de procedimento remoto de alto desempenho desenvolvido pelo

Google chamado *gRPC* (*gRemote Procedure Call*), representando um avanço significativo na interação com o solucionador MAPDL. O *gRPC* permite que o MAPDL funcione como um servidor, capaz de responder a clientes conectados de forma eficiente. Esse protocolo possibilita a comunicação segura e de alto desempenho, permitindo que um aplicativo cliente invoque métodos diretamente em uma instância do MAPDL, independentemente de sua localização, como se estivesse manipulando um objeto local, viabilizando o controle de simulações de grande escala com mínima latência e alto desempenho. Ao empregar o *gRPC*, o PyMAPDL converte instruções em Python para comandos APDL, transmitindo-os para uma instância MAPDL em execução de maneira compacta, eficiente e com baixo impacto na rede, o que resulta em um desempenho superior e mais escalável nas simulações.

Conforme discutido por Cooke; Coleman; Derrick (2023), o uso do PyMAPDL em ambientes acadêmicos tem proporcionado maior acessibilidade ao ensino de simulação, ao permitir que os alunos interajam com problemas reais de engenharia por meio de scripts Python. Essa abordagem elimina a dependência de interfaces gráficas complexas e promove o aprendizado ativo, baseado na lógica computacional e na experimentação. Além de facilitar a compreensão de conceitos fundamentais em elementos finitos, o PyMAPDL tem sido explorado como uma ferramenta de inovação em projetos acadêmicos e competições estudantis. O estudo de Cooke; Coleman; Derrick (2023) destaca a realização de eventos como "CodeFests", nos quais alunos são desafiados a resolver problemas de engenharia utilizando o PyMAPDL para otimizar estruturas mecânicas e realizar simulações paramétricas. Esses desafios têm demonstrado a eficácia da linguagem Python como meio de controle sobre o solver ANSYS, permitindo a rápida criação e modificação de modelos, a variação sistemática de parâmetros e a análise comparativa de diferentes configurações estruturais. Como resultado, os estudantes conseguem explorar cenários complexos de maneira iterativa e eficiente, desenvolvendo soluções robustas em períodos curtos, o que reforça o potencial didático e inovador da ferramenta no contexto educacional.

Outro aspecto relevante abordado por Cooke; Coleman; Derrick (2023) é a integração do PyMAPDL com Jupyter Notebooks, possibilitando a criação de laboratórios virtuais para experimentação e ensino remoto. Essa abordagem permite que os alunos realizem análises estruturais completas, desde a definição da geometria até o pós-processamento dos resultados, diretamente em um ambiente interativo baseado em navegador, eliminando a necessidade de acesso físico a laboratórios equipados com

licenças locais do ANSYS. Com isso, o ensino se torna mais acessível, flexível e escalável, atendendo a uma maior diversidade de instituições e realidades acadêmicas. A interface dinâmica dos Jupyter Notebooks oferece uma experiência de aprendizado rica e integrada, combinando código, visualizações gráficas, textos explicativos e blocos interativos em um único ambiente. Essa estrutura facilita não apenas a execução e modificação dos scripts de simulação, mas também a interpretação dos resultados, permitindo que os estudantes explorem com maior profundidade os fenômenos físicos envolvidos. Ao integrar simulação, documentação e análise de forma transparente, os notebooks ampliam o potencial didático do PyMAPDL.

2.4 Otimização por algoritmo genético

A otimização no contexto da engenharia mecânica desempenha um papel estratégico no aprimoramento do desempenho estrutural, na redução de custos e na eficiência de sistemas complexos. Através da aplicação de técnicas avançadas de otimização torna-se possível atingir múltiplos objetivos de projeto, como minimizar a massa estrutural, maximizar a rigidez, controlar deslocamentos, melhorar a distribuição de tensões e elevar os fatores de segurança (Vanderplaats, 2001). Há inúmeros métodos de otimização amplamente empregados para explorar espaços multidimensionais de projeto e identificar soluções que atendam aos requisitos técnicos com maior precisão, impulsionando a inovação no desenvolvimento de novos materiais e dispositivos, além de contribuir significativamente para a sustentabilidade industrial ao promover o uso racional de recursos. Nesse contexto, diversas abordagens vêm sendo desenvolvidas para tratar problemas de otimizações, desde métodos determinísticos clássicos, métodos heurísticos e meta-heurísticos, até técnicas mais recentes baseadas em inteligência computacional.

Dentre as abordagens empregadas na otimização de sistemas mecânicos, os métodos determinísticos se destacam por sua precisão matemática e previsibilidade na busca por soluções ótimas. Essas técnicas, como a programação linear, a programação quadrática e os métodos baseados em derivadas, como o método de Newton e o gradiente conjugado, exploram o espaço de soluções de forma contínua e sistemática, seguindo trajetórias orientadas pela inclinação da função objetivo e oferecem resultados confiáveis ao explorar gradualmente o espaço de soluções em busca de mínimos ou máximos globais (Arora, 2017). Segundo Bazaraa; Sherali; Shetty (2005), a programação matemática é

amplamente utilizada para otimizar processos de manufatura, controle estrutural e desempenho aerodinâmico, garantindo soluções consistentes e eficientes. Entretanto mesmo apresentando robustez, métodos determinísticos podem apresentar limitações diante de problemas altamente não lineares ou com múltiplos mínimos locais, nessas situações, a rigidez da formulação matemática e a dependência de condições iniciais favoráveis podem comprometer a qualidade da solução encontrada, o que muitas vezes exige a combinação com técnicas heurísticas para aumentar a eficácia da otimização (Nocedal; Wright, 2006).

Os métodos heurísticos representam uma classe de estratégias de otimização que visam encontrar soluções satisfatórias para problemas complexos, especialmente quando uma formulação matemática rigorosa ou a busca exata pelo ótimo global se mostram inviáveis. Conforme Glover; Kochenberger (2003), os métodos heurísticos são amplamente utilizados em situações em que a busca exaustiva ou as abordagens determinísticas são proibitivamente dispendiosas do ponto de vista computacional ou quando a estrutura do problema apresenta alta complexidade, não linearidades e múltiplos locais. Embora, os métodos heurísticos não garantam a obtenção da solução ótima, sua capacidade de fornecer respostas rápidas e próximas ao ótimo em tempos computacionais razoáveis os torna ferramentas valiosas para problemas de otimização em engenharia, como a alocação de recursos, o projeto de estruturas e a otimização de processos industriais, onde a eficiência e a robustez da solução são mais importantes do que a garantia absoluta da otimalidade (Michalewicz; Fogel, 2010).

Os métodos meta-heurísticos representam uma abordagem avançada e flexível para a otimização de problemas complexos na engenharia mecânica, combinando princípios heurísticos com estratégias estocásticas que incorporam elementos de incerteza e aleatoriedade na exploração do espaço de soluções. Yin et al. (2015) explica que esses métodos são especialmente úteis para lidar com problemas de otimização multidimensionais e altamente não lineares, onde métodos determinísticos podem falhar devido à presença de múltiplos mínimos locais e superfícies de resposta complexas. Exemplos populares de meta-heurísticas incluem os algoritmos genéticos, a otimização por enxame de partículas e os algoritmos inspirados em processos de aprendizado, como a otimização baseada em ensino-aprendizagem (Camp; Farshchin, 2014). Essas técnicas são amplamente aplicadas na otimização estrutural, no projeto de componentes mecânicos e na melhoria da eficiência de sistemas industriais, permitindo a obtenção de soluções robustas, de alto desempenho com custos computacionais razoáveis. No entanto,

segundo Salehi; Burgueño (2018), o sucesso desses algoritmos depende crucialmente da escolha adequada dos parâmetros, como taxas de mutação, tamanho da população e critérios de convergência, ademais de estratégias eficientes de refinamento e balanceamento entre exploração e exploração (*exploration and exploitation*), o que permanece sendo um desafio essencial para garantir a convergência e a eficácia desses algoritmos.

A computação evolutiva configura uma subclasse importante dos métodos meta-heurísticos, fundamentada na inspiração dos processos naturais de evolução biológica para a solução de problemas complexos de otimização. Conforme abordado por Colherinhas (2016) esses algoritmos implementam princípios fundamentais como seleção natural, mutação, recombinação genética e sobrevivência do mais apto, que são aplicados iterativamente para explorar e refinar soluções ao longo de múltiplas gerações. Dentre as abordagens mais consolidadas dentro da computação evolutiva destacam-se os algoritmos genéticos, a programação genética e as estratégias evolucionárias, amplamente aplicadas em engenharia mecânica para otimização de estruturas, desenvolvimento de novos materiais e melhoria de processos produtivos (Arslanian et al., 2022). Uma das vantagens mais significativas da computação evolutiva reside em sua robustez para encontrar soluções próximas ao ótimo global em espaços de busca altamente complexos, onde métodos tradicionais frequentemente demonstram limitações ou ineficiência. Além disso, avanços recentes nesta área têm integrado técnicas evolucionárias a técnicas de inteligência artificial, como aprendizado de máquina supervisionado e redes neurais artificiais, combinando a capacidade adaptativa da computação evolutiva com a capacidade preditiva e generalizadora dos modelos de IA, o que resulta na elevação substancial da eficiência, a velocidade de convergência e a robustez das soluções encontradas (Salehi; Burgueño, 2018).

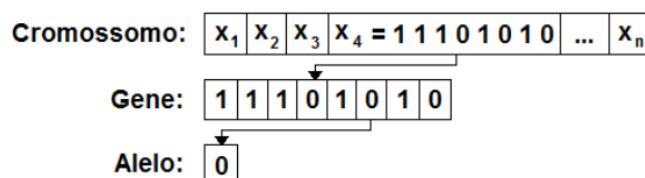
Os métodos baseados em gradiente utilizam derivadas para guiar a busca e são eficientes em problemas contínuos e suaves, mas sensíveis a mínimos locais. Os métodos heurísticos baseiam-se em regras empíricas simples, com implementação direta, porém com capacidade limitada de exploração global. Já os métodos meta-heurísticos são mais robustos, combinando exploração global e refinamento local, sendo adequados para problemas complexos e não lineares, embora com maior custo computacional.

Segundo Holland (1992), os AGs fundamentam-se na teoria da evolução biológica proposta por Charles Darwin, cujo objetivo original era analisar de forma estruturada os processos naturais de adaptação e seleção presentes na natureza. Essa inspiração permitiu

a criação de mecanismos computacionais que simulam a adaptação natural, visando a resolução de problemas complexos por meio de uma evolução iterativa de soluções. Os Algoritmos Genéticos foram apresentados por Goldberg (1989) como uma técnica poderosa de otimização baseada na simulação de processos genéticos naturais, como a seleção, cruzamento e mutação.

Nos Algoritmos Genéticos, cada cromossomo ou indivíduo da população representa uma possível solução potencial para o problema. Esse cromossomo é composto por um conjunto de genes, onde cada gene corresponde a uma variável específica do problema a ser otimizado. Os valores que esses genes podem assumir são chamados de alelos, que definem as possíveis configurações ou características daquela variável. Essa explicação pode ser ilustrada por meio de uma representação visual, na Figura 4, que evidencia a estrutura dos algoritmos genéticos, destacando a relação entre os cromossomos, os genes e os alelos. Por meio de uma série de etapas lógicas iterativas, a população evolui ao longo das gerações, esse processo iterativo visa aprimorar gradativamente a qualidade das soluções, aproximando-se do ótimo global ao longo das gerações.

Figura 4 – Definição dos componentes de um cromossomo.



Fonte: Colherinhas (2016).

Os algoritmos genéticos podem ser classificados em duas categorias principais: discretos e contínuos. O algoritmo genético discreto é empregado em problemas cuja solução é representada por variáveis discretas, como sequências binárias ou combinações de elementos de um conjunto finito, sendo comumente utilizados em problemas de roteamento e programação de horários (Goldberg, 1989). Enquanto o algoritmo genético contínuo é voltado para otimização em espaços de busca contínuos, nos quais os genes dos cromossomos assumem valores reais, sendo frequentemente utilizado em problemas de ajuste fino de parâmetros e na otimização de funções matemáticas complexas (Holland, 1992). A principal diferença entre eles reside na forma como os operadores genéticos como *crossover* e mutação são aplicados, pois nos algoritmos genéticos contínuos, a mutação geralmente é implementada por meio de perturbações baseadas em

distribuições probabilísticas, como a mutação gaussiana, que adiciona variações suaves aos valores dos genes, enquanto nos algoritmos genéticos discretos a mutação altera diretamente os valores dos genes dentro do conjunto finito de possibilidades permitidas, modificando, por exemplos, bits individuais em uma cadeia binária (Mitchell, 1998). Essas diferenças tornam cada tipo de algoritmo mais adequado para determinadas classes específicas de problemas, impactando diretamente a eficiência e a velocidade de convergência da busca pela solução ótima.

O algoritmo genético discreto é uma abordagem amplamente utilizada em problemas onde as soluções precisam ser expressas de forma categórica ou combinatória, como no Problema do Caixeiro Viajante (TSP – *Traveling Salesman Problem*), apresentado por Goldberg (1989). Nesse tipo de problema, a ordem de visitação das cidades deve ser mantida dentro de um conjunto finito de possibilidades. A principal vantagem do algoritmo genético discreto está na sua capacidade de explorar grandes espaços de busca e encontrar soluções próximas do ótimo global, mesmo em problemas com alta complexidade, como funções altamente não lineares e com múltiplos ótimos locais (Michalewicz, 1996). No entanto, sua eficiência depende da escolha apropriada de operadores genéticos, como crossover e mutação, que devem preservar a integridade das representações discretas, a modificação inadequada dos genes pode gerar soluções inválidas ou inviáveis fora dos limites definidos pelo problema, prejudicando a qualidade da busca (Jong, De, 1975).

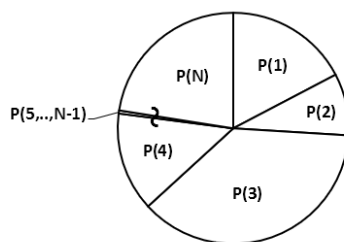
Enquanto o algoritmo genético discreto, opera sobre representações binárias ou inteiras, o algoritmo contínuo utiliza de codificações numéricas diretas, onde as variáveis assumem valores reais, o que conforme Michalewicz (1996) possibilita maior precisão na busca por soluções ótimas. Além disso, neste algoritmo, a mutação frequentemente utiliza perturbações baseadas em distribuições probabilísticas, como a mutação gaussiana, que permite pequenas alterações nos valores dos genes, enquanto o crossover aritmético combina as soluções dos pais com base em combinações lineares ponderadas (Deb, 2014). Essas estratégias favorecem a exploração eficiente do espaço de busca contínuo, tornando o algoritmo genético contínuo uma ferramenta valiosa para aplicações como aprendizado de máquina, ajuste de redes neurais e problemas de otimização multiobjetivo, nos quais a precisão e a robustez são essenciais (Back, 1996).

Há inúmeras estratégias de escolhas dos indivíduos com as melhores características genéticas, a seleção depende da nota atribuída a cada indivíduo. **A aptidão é uma medida da qualidade de uma solução, que orienta a seleção dos indivíduos**

que participarão da próxima geração. Dentre os métodos de seleção mais comuns, destacam-se o método de seleção da roleta, por torneio, por classificação, elitismo e dizimação.

O método da roleta, ou seleção proporcional à aptidão, é uma das técnicas clássicas empregadas no processo de seleção de indivíduos em algoritmos genéticos. Introduzido por Holland (1992) e posteriormente detalhado por autores como Goldberg (1989), esse método simula uma roleta virtual, na qual a probabilidade de seleção de cada indivíduo é proporcional ao valor de sua função de aptidão, visualizando na roleta, na Figura 5, o indivíduo com maior aptidão tem uma “fatia” maior na roleta, no caso dessa figura o indivíduo P(3), o que aumenta suas chances de ser escolhido para a próxima geração. Durante o processo de seleção, a roleta é girada um número determinado de vezes, geralmente igual ao tamanho da população, e, a cada giro, um indivíduo é selecionado conforme a probabilidade associada à sua aptidão relativa. Dessa forma, indivíduos com melhor desempenho possuem maior chance de serem escolhidos para compor a próxima geração, sem, contudo, excluir completamente a possibilidade de seleção de indivíduos com menor desempenho, o que mantém certo grau de diversidade genética no sistema.

Figura 5 – Método da roleta.



Fonte: Autor.

A seleção por torneio é um dos métodos mais utilizados em algoritmos genéticos devido a sua simplicidade de implementação e à flexibilidade no controle da pressão seletiva. Nessa abordagem, um número predeterminado de indivíduos é selecionado aleatoriamente da população e colocados em “torneio”. Aquele com maior valor de aptidão é escolhido como vencedor e, portanto, selecionado para compor a nova geração. Essa abordagem quando comparada a seleção por roleta apresenta como vantagem uma implementação mais simples que resulta em uma seleção rápida, sem a necessidade de calcular probabilidades complexas. Conforme Miller; Goldberg (1995) a pressão seletiva, que representa a tendência do algoritmo de selecionar indivíduos mais aptos, pode ser

ajustada variando o tamanho do torneio. Quanto maior o número de competidores, maior a probabilidade de selecionar os indivíduos mais aptos, o que aumenta a pressão seletiva e acelera a convergência do algoritmo. Por outro lado, torneios com menos competidores favorecem a preservação de diversidade genética, visto que a chance de indivíduos com menor aptidão serem escolhidos aumenta, o que pode retardar a convergência, mas também ajuda a evitar o problema da convergência prematura. A seleção pode ser ajustada variando-se o tamanho do torneio, quanto mais competidores no torneio, maior a probabilidade de seleção dos indivíduos mais aptos, enquanto torneios menores preservam mais diversidade genética na população

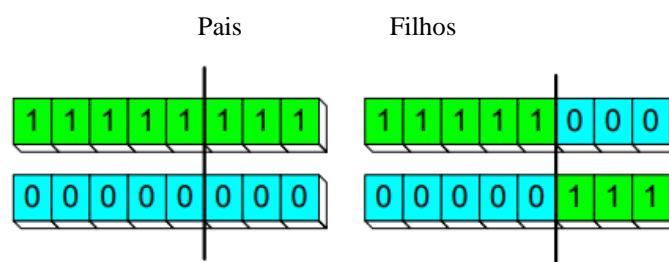
Na seleção por classificação em vez de associar diretamente a probabilidade de seleção ao valor da aptidão, os indivíduos da população são ordenados em função de sua aptidão relativa e atribuídas as probabilidades de seleção com base em sua posição no ranking. Como descrevem Goldberg; Deb (1991), o indivíduo com melhor desempenho obtém a maior probabilidade, mas essa diferença é suavizada em relação aos demais indivíduos, o indivíduo mais apto recebe a maior probabilidade de ser selecionado, mas a diferença da probabilidade em comparada aos demais indivíduos não é absolutamente intrínseca a diferença de aptidão dos indivíduos, o que evita a predominância de um único indivíduo ao longo das gerações, proporcionando um controle mais refinado da pressão seletiva,

O elitismo consiste em preservar uma pequena fração dos indivíduos mais aptos de cada geração, garantindo que as melhores soluções encontradas ao longo do processo evolutivo sejam mantidas sem alterações. Por ser uma abordagem de caráter determinístico, o elitismo pode acelerar a convergência do algoritmo, uma vez que as soluções mais promissoras são diretamente transferidas para a próxima geração. No entanto, é recomendável que a quantidade de indivíduos mantidos seja reduzida, a fim de evitar a diminuição da variabilidade genética ao longo das gerações, o que poderia resultar em convergência prematura. De forma análoga, a dizimação é uma estratégia também determinística que promove a remoção de um número fixo de indivíduos com baixo desempenho, que ocorre geralmente após um número determinado de gerações. Esse processo ocorre com o objetivo de reduzir a população e garantir que apenas os indivíduos mais aptos sejam mantidos, aumentando a pressão seletiva. Contudo, a dizimação deve ser aplicada com cautela, visto que, se realizada de maneira excessiva, pode reduzir a diversidade genética e diminuir a capacidade de exploração do algoritmo, prejudicando a busca por soluções globalmente ótimas (Colherinhas, 2016).

Na etapa de cruzamento (*crossover*), ocorre a permuta de uma parcela de genes entre dois cromossomos selecionados, o resultado dessa permuta são novos descendentes que herdam características dos dois pais. Conforme Goldberg (1989), para simular uma ocorrência natural na qual a maioria dos casais possuem filhos a probabilidade de cruzamento, p_c , deve ser igual ou superior à 60%. Assim, essa taxa de cruzamento é fundamental para garantir novas soluções e a propagação de características vantajosas da população ao longo das gerações, permitindo uma otimização mais eficiente. Existem diversos métodos de cruzamento, cada um com suas características e aplicabilidades específicas para diferentes tipos de problemas, permitindo uma adaptação mais eficiente ao espaço de busca e à natureza das soluções a serem encontradas. Dentre esses métodos destacam-se o *crossover one-point*, o *two-point*, o Aritmético, *Blend crossover (BLX- α)* e *Rayleigh crossover (RX)*.

O *crossover one-point*, é um dos métodos de recombinação mais antigos e amplamente utilizados em algoritmos genéticos. Introduzido nos primeiros trabalhos de Holland (1992) e consolidado por Goldberg (1989), esse operador consiste na seleção aleatória de um único ponto de corte ao longo do cromossomo dos pais, Figura 6. A partir desse ponto, os segmentos genéticos são trocados entre os dois indivíduos, gerando assim dois descendentes com combinações das características genéticas de ambos os pais. Essa abordagem simula o mecanismo biológico de recombinação genética, o que permite a propagação de características vantajosas de ambos os pais. Mitchell (1998) observa que, embora eficaz em cenários bem estruturados, esse método pode ser superado por outras técnicas como *crossover* de dois pontos em ambientes mais complexos ou com representações não lineares. Isso ocorre porque o *crossover one-point* pode gerar descendentes com informações excessivamente agrupadas em uma única região do cromossomo, o que limita a exploração do espaço de soluções e pode reduzir a diversidade genética da população.

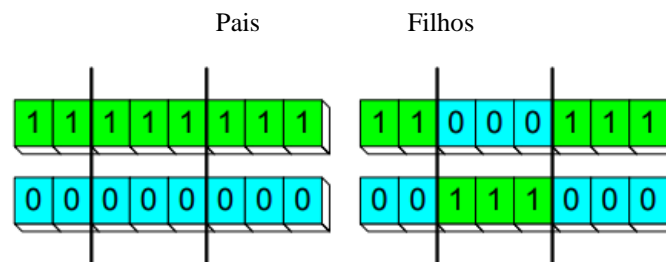
Figura 6 – Cruzamento *One-Point*.



Fonte: Adaptado de Mognon (2004).

O *crossover two-point* crossover é uma extensão direta do crossover de um ponto e consiste na definição aleatória de dois pontos de corte ao longo do cromossomo dos indivíduos genitores, Figura 7. O segmento compreendido entre esses dois pontos é trocado entre os pais, formando dois novos descendentes com combinações genéticas de ambos os genitores. Essa abordagem permite uma maior diversidade genética em relação ao crossover *one-point*, pois a troca de informações ocorre em duas seções do cromossomo, o que gera uma recombinação mais rica e diversificada das características dos pais. Conforme Mitchell (1998), o *crossover two-point* é uma ferramenta robusta em algoritmos genéticos clássicos, oferecendo um equilíbrio entre simplicidade de implementação e capacidade de recombinação efetiva. Sendo particularmente eficaz onde é necessário preservar a integridade estrutural dos cromossomos, ao mesmo tempo em que se favorece uma maior exploração do espaço de soluções.

Figura 7 – Cruzamento *Two-Point*.



Fonte: Adaptado de Mognon (2004).

O *crossover* aritmético é um operador amplamente utilizado em algoritmos genéticos com representação contínua dos cromossomos, sendo particularmente eficaz em problemas de otimização numérica. Nesse método, diferente dos métodos de cruzamento que envolvem trocas discretas de segmentos, os filhos são gerados a partir de combinações lineares dos pais, ponderadas por um coeficiente $\alpha \in [0, 1]$, esse coeficiente controla a influência de cada pai na criação do descendente, permitindo uma transição suave entre as soluções dos pais, útil em problemas de otimização com variáveis reais e restrições contínuas. A equação que representa esse cruzamento é apresentada a seguir:

$$Filho_1 = \alpha \cdot Pais_1 + (1 - \alpha) \cdot Pais_2 \quad \text{Equação (1)}$$

$$Filho_2 = (1 - \alpha) \cdot Pais_1 + \alpha \cdot Pais_2 \quad \text{Equação (2)}$$

Essa técnica foi inicialmente proposta por Michalewicz; Janikow (1991), que destacaram sua capacidade de preservar a consistência das variáveis dentro do domínio

de busca, o que é particularmente importante em otimizações contínuas, onde os valores das variáveis precisam se manter dentro de certos limites. Além disso, essa abordagem favorece uma evolução mais gradual das soluções, ao evitar saltos abruptos, além de favorecer uma transição suave entre gerações.

O *blend crossover* é um operador de recombinação projetado para algoritmos genéticos com codificação real de parâmetros, proposto por Eshelman; Schaffer (1993). Ao contrário do crossover aritmético, que combina os valores dos pais de forma linear, o BLX- α gera filhos dentro de uma faixa expandida, além do intervalo delimitado pelos valores dos pais. Esse método permite uma exploração mais ampla do espaço de soluções, o que pode ser particularmente útil em problemas de otimização onde a busca local pode ser limitada pela representação linear. Considerando dois cromossomos x e y , um novo cromossomo z é gerado da seguinte maneira, conforme a equação 3:

$$z = x + \beta \cdot (y - x) \quad \text{Equação (3)}$$

sendo $\beta \sim U(-\alpha, 1 + \alpha)$, onde U representa uma distribuição uniforme. Conforme Eshelman; Schaffer (1993), os valores típicos para α são $\alpha = 0,5$ ou $0,25$, sendo que valores maiores de α proporcionam uma exploração mais ampla, enquanto valores menores de α favorecem uma busca mais local.

O *Rayleigh crossover* (RX) é um operador de recombinação utilizado em algoritmos genéticos com representações em ponto flutuante. Esse método baseia-se na distribuição de *Rayleigh* para gerar os novos valores dos filhos a partir dos genes dos pais. Segundo Herrera; Lozano (2000), característica distintiva desse operador é a introdução de uma variação probabilística controlada, onde os descendentes podem tender a se posicionar em torno do valor de um dos pais ou afastar-se, dependendo do parâmetro de escala da distribuição. Sendo uma vantagem na exploração mais ampla do espaço de soluções, em problemas onde é necessário evitar a convergência precoce ou explorar soluções fora das regiões já visitadas.

A função densidade de *Rayleigh* é definida como:

$$f(x; s) = \frac{x}{s^2} \cdot e^{-x^2/2s^2}, \quad x \geq 0 \quad \text{Equação (4)}$$

sendo $s > 0$ o parâmetro de escala da distribuição, esse parâmetro determina a largura da distribuição, e conforme Lim et al. (2014), experimentalmente foi identificado como o mais eficaz para a maioria dos problemas de otimização o valor para s igual a 3.

Para aplicar essa distribuição, dois pais p_1 e p_2 geram dois filhos y_1 e y_2 com base nas seguintes equações:

$$y_1 = p_1 \cdot \log(x) + p_2 \cdot (1 - \log(x)) \quad \text{Equação (5)}$$

$$y_2 = p_2 \cdot \log(x) + p_1 \cdot (1 - \log(x)) \quad \text{Equação (6)}$$

onde x é o valor gerado pela distribuição de Rayleigh, e o logaritmo é utilizado para definir o contorno do parâmetro x , com $0 < x < 1$. Dessa forma, o filho 1 tende a ser mais próximo do pai 1, e o filho 2 tende a ser mais próximo do pai 2. Para gerar o valor de x a partir da distribuição de Rayleigh, utiliza-se a inversão da função distribuição acumulada, gerando x para valores positivos por meio da seguinte fórmula:

$$x = \left| -s \cdot (2 \cdot \ln(1 - U))^{1/2} \right| \quad \text{Equação (7)}$$

A mutação em codificação binária é um dos operadores mais tradicionais e fundamentais no contexto de algoritmos genéticos clássicos, em que os indivíduos são representados por cadeias de bits. Esse tipo de mutação consiste na inversão de bits selecionados aleatoriamente ao longo do cromossomo, ou seja, substitui um bit 0 por 1 e vice-versa, com uma determinada probabilidade de mutação p_m . Essa operação é crucial para manter a diversidade genética dentro da população, permitindo que novas soluções sejam exploradas e evitando a convergência prematura para ótimos locais.

Nos problemas discretos a mutação uniforme destaca-se como uma técnica eficaz para preservar a diversidade genética em algoritmos genéticos aplicados a domínios com variáveis categóricas ou com valores numéricos discretos e pré-definidos. Esse tipo de operador atua substituindo o valor de um gene por outro, escolhido aleatoriamente dentro do conjunto de valores permitidos, com probabilidade uniforme, o que assegura uma exploração uniforme do espaço de busca. Segundo Goldberg (1989), essa abordagem é especialmente útil para escapar de ótimos locais e reinserir diversidade em populações que já estão convergindo para ótimos locais, ao permitir a troca aleatória de valores, esse tipo de mutação amplia a capacidade do algoritmo de explorar mais regiões do espaço de soluções. Conforme aponta Herrera; Lozano (2000), esse tipo de mutação é particularmente eficaz em fases iniciais ou intermediárias da busca evolutiva, quando o algoritmo se beneficia de saltos exploratórios maiores para diversificar a população e explorar amplamente o espaço de soluções.

Na mutação de contorno, um ou mais genes do cromossomo são selecionados aleatoriamente, e seus valores são alterados para um dos limites máximos ou mínimos permitidos no domínio da variável. Como descrito por Michalewicz (1996), a ideia central desse operador é permitir que o algoritmo descubra soluções situadas nas bordas do espaço de busca, o que pode ser crucial em problemas onde a melhor solução está próxima de um dos limites do domínio das variáveis, evitando que o algoritmo concentre exclusivamente em regiões centrais do espaço de busca.

A mutação gaussiana é um operador amplamente utilizado em algoritmos genéticos com representação real dos cromossomos. Nesse método, os valores dos genes selecionados para mutação são modificados pela adição de um ruído extraído de uma distribuição normal (gaussiana), o que introduz uma variação nos valores dos cromossomos com base na média e desvio padrão da distribuição. A fórmula geral para essa mutação é dada por:

$$x'_k = \begin{cases} N(x_k, \sigma), & \text{para } k = j \\ x_k, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad \text{Equação (8)}$$

onde $N(x_k, \sigma)$ representa a distribuição normal de média x_k e desvio padrão σ , e x_k é o valor original do gene. Segundo Back (1996), essa técnica é particularmente eficaz na intensificação da busca local, permitindo ajustes finos nos cromossomos para refinar as soluções já obtidas. Essa técnica é especialmente útil em problemas de otimização contínuos, onde a busca por soluções ótimas requer uma abordagem mais precisa e adaptativa, sem a necessidade de mudanças abruptas nos valores das variáveis.

Na mutação *creep* uniforme, o gene x_k é alterado por um pequeno número aleatório ou multiplica-o por um número próximo de 1, mantendo a variabilidade controlada. Conforme Colherinhas (2016), esse operador possui como objetivo a promoção de pequenas perturbações controladas nos valores dos genes a fim de levá-los mais rapidamente para a convergência.

Na mutação *creep* não uniforme o gene é modificado por um número extraído de uma distribuição não uniforme. A equação geral para a mutação *creep* não uniforme é dada por:

$$x'_k = \begin{cases} x_k + \Delta(i, L_s - x_k), & \text{se } z = 0 \\ x_k - \Delta(i, x_k - L_s), & \text{se } z = 1 \end{cases} \quad \text{Equação (9)}$$

onde z representa um dígito binário aleatório, assumindo valor 0 ou 1, e L_s são os limites inferior e superior do parâmetro x'_k . A função $\Delta(i, y)$ retorna um valor dentro do intervalo

$[0,y]$, cuja probabilidade de ocorrência começa em zero e aumenta progressivamente conforme o número de gerações i , de acordo com a seguinte fórmula:

$$\Delta(i, y) = y \cdot r \cdot \left(1 - \frac{i}{N_{ger}}\right)^b \quad \text{Equação (10)}$$

em que r é um valor aleatório selecionado dentro do intervalo $[0,1]$, N_{ger} representa a quantidade total de gerações no algoritmo, b é um parâmetro definido pelo usuário, responsável por controlar o nível de influência do avanço das gerações sobre o comportamento da mutação. Segundo Colherinhas (2016), essa propriedade conduz a uma exploração inicial ampla do espaço de soluções, que, com o avanço das gerações, é progressivamente substituída por uma exploração mais refinada e local.

Como apontado por Mitchell (1998), a taxa de mutação é um parâmetro crítico nos algoritmos genéticos, uma vez que sua escolha afeta diretamente o equilíbrio entre exploração e refinação do espaço de soluções. Onde uma taxa de mutação muito alta pode transformar o algoritmo genético em uma busca aleatória, onde as modificações nos cromossomos são tão drásticas que o algoritmo perde a capacidade de convergir para soluções eficientes, explorando aleatoriamente o espaço de soluções sem aproveitamento das soluções já encontradas. Enquanto uma taxa de mutação muito baixa pode resultar em convergência prematura, onde a população rapidamente converge para um ótimo local sem explorar adequadamente outras regiões do espaço de soluções.

2.5 Aplicações de otimização

Conforme observa-se no estudo desenvolvido por Chethan et al. (2019), o qual avalia o perfil de prótese da articulação do quadril com as melhores propriedades para implantação, observa-se que, em problemas de engenharia, nem sempre a estrutura mais adequada para determinada aplicação é previamente conhecida ou facilmente determinada. Essa incerteza torna a otimização estrutural um processo essencial, pois permite a exploração sistemática de diferentes alternativas de projeto, levando em consideração restrições físicas, funcionais e de segurança, em busca de uma solução ótima que atenda aos requisitos mínimos de segurança, além de outros critérios de projeto relevantes, como a eficiência de material, custos de fabricação, durabilidade e outros.

As ferramentas de otimização são numerosas e amplamente aplicadas em problemas multiobjetivos. Dentre os algoritmos de otimização meta-heurística, destaca-se o *Jellyfish Search* (JS), desenvolvido por Chou; Truong (2021), que se inspira no

comportamento das águas-vivas no oceano para simular a busca por alimentos. Esse algoritmo modela tanto os movimentos ativos, nos quais as águas-vivas se deslocam dentro do grupo, quanto os movimentos passivos, guiados pelas correntes oceânicas, simulando os comportamentos adaptativos do organismo no ambiente natural. O JS alterna entre essas duas estratégias, ativa e passiva, por meio de um mecanismo de controle do tempo, o que favorece a exploração do espaço de soluções de maneira eficiente. Esse equilíbrio entre diversificação, exploração de novas áreas, e intensificação, aprofundamento nas regiões promissoras é de suma importância para alcançar soluções ótimas.

Há inúmeros outros mecanismos, sendo alguns destacados por Tran et al. (2024) em sua pesquisa sobre estruturas de aço, na qual se busca minimizar a massa total da estrutura enquanto controla o deslocamento inter-histórico, que se refere ao deslocamento relativo entre dois pavimentos consecutivos de uma edificação. Dentre os métodos utilizados, destacam-se cinco algoritmos de otimização, cada um com suas características e abordagens específicas. O *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II* (NSGA-II) é um algoritmo baseado na teoria evolucionista de Darwin e fundamentado em algoritmos genéticos, sendo um dos métodos mais populares para otimização multiobjetivo, ele utiliza o conceito da fronteira de Pareto para classificar e selecionar soluções, mantendo a diversidade da população e garantindo que soluções dominadas não sejam selecionadas; o *Generalized Differential Evolution 3* (GDE3) é um algoritmo que utiliza o método de Evolução Diferencial (DE) adaptado para otimização multiobjetivo. É eficaz na busca de soluções, aproveitando a evolução diferencial para promover a diversificação e intensificação no espaço de soluções, mantendo a capacidade de explorar o espaço de soluções de forma ampla; o *Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2* (SPEA2), aprimora a seleção de soluções na fronteira de Pareto, aplicado um mecanismo de força de Pareto para classificar as soluções e assegurar que a qualidade da solução final seja otimizada, ao mesmo tempo que preserva a diversidade genética. Esse algoritmo é projetado para aprimorar a diversidade e preservação de boas soluções encontradas ao longo das gerações. O *Multi-Objective Evolutionary Algorithm based on Decomposition* (MOEA/D) divide o problema em subproblemas de otimização de objetivo único e resolve-os simultaneamente, permitindo uma abordagem mais eficiente para lidar com problemas complexos, decompondo-os em partes menores e mais manejáveis, utilizando soluções vizinhas para guiar a solução global. O MOEA/D-EpDE é um algoritmo híbrido que combina MOEA/D com uma abordagem aprimorada, incorporando a Evolução

Diferencial baseada em *pbest* (EpDE) e alocação dinâmica de recursos. O MOEA/D-EpDE busca aumentar a eficiência na exploração do espaço de soluções, utilizando a alocação adaptativa de recursos para melhorar a convergência e a exploração em problemas multiobjetivo.

2.6 PyAnsys

O uso do PyAnsys e do PyMAPDL no contexto da otimização da rigidez de materiais compostos, como demonstrado por Coropetchi et al. (2021), representa uma aplicação significativa de ferramentas computacionais no design estrutural avançado. O PyAnsys é uma coleção de pacotes Python integrado ao Ansys, o PyMAPDL é um desses pacotes que é utilizado para resolver problemas de elementos finitos, sendo essencial na realização de simulações precisas no processo de otimização de estruturas. Esse *software* é empregado para modelar a distribuição de dois materiais com diferentes propriedades elásticas em uma microestrutura composta, com o objetivo de maximizar a rigidez efetiva nas direções X e Y de uma célula representativa. Esse processo é fundamental para o design de materiais compostos, que exigem uma avaliação detalhada das propriedades anisotrópicas do material em diversas direções (Coropetchi et al., 2021). Com o auxílio do PyMAPDL, foi possível aplicar as condições de contorno necessárias, simulando a deformação dos materiais e otimizando a distribuição dos elementos de modo a reduzir a anisotropia e melhorar as propriedades globais da estrutura. Esse processo foi realizado por meio da implementação de um algoritmo ganancioso modificado, adaptado para encontrar soluções eficazes no design de materiais compostos.

Da mesma forma, PyAnsys é fundamental em simulações envolvendo pressão interna e deformações em vasos compostos, como demonstrado por Yadav et al. (2024). Nesse estudo, o PyMAPDL foi utilizado para modelar e simular diferentes formas de domos em vasos de pressão, com o objetivo de avaliar a distribuição de tensões e deformações nos domos elipsoides e torisféricos. Os resultados mostraram como a variação das propriedades geométricas e a escolha de ângulos de fibra impactam a resistência estrutural do vaso. Além disso, O PyMAPDL, ao ser integrado com o *software* Cadfil para otimização do ângulo de bobinagem e distribuição da camada de compósito, permitindo uma análise detalhada do comportamento dos domos sob pressão interna e facilitando das melhores soluções para garantir a integridade e segurança estrutural.

2.7 Propagação de incertezas e avaliação probabilística de desempenho

Conforme a terminologia metrológica consagrada pelo ISO/IEC Guide 98-1 (2024), incerteza de medição é o parâmetro associado ao resultado de uma medição que caracteriza a dispersão dos valores que podem razoavelmente ser atribuídos ao mensurando. De forma prática, o GUM distingue a Incerteza tipo A que é estimada por métodos estatísticos, a partir da repetição de medições, como cálculo de média, desvio padrão e outros, há também a Incerteza Tipo B estimada por outros meios, são eles calibração, especificações de fabricante, literatura técnica.

Augusti; Ciampoli (2008), discute o projeto baseado em desempenho (PBD – *Performance-Based Design*) como um arcabouço em que a avaliação de risco combina, de forma probabilística, a ameaça (*hazard*), a vulnerabilidade estrutural e as consequências, permitindo estabelecer diferentes “níveis de desempenho” associados a probabilidades de excedência ao longo da vida útil da estrutura.

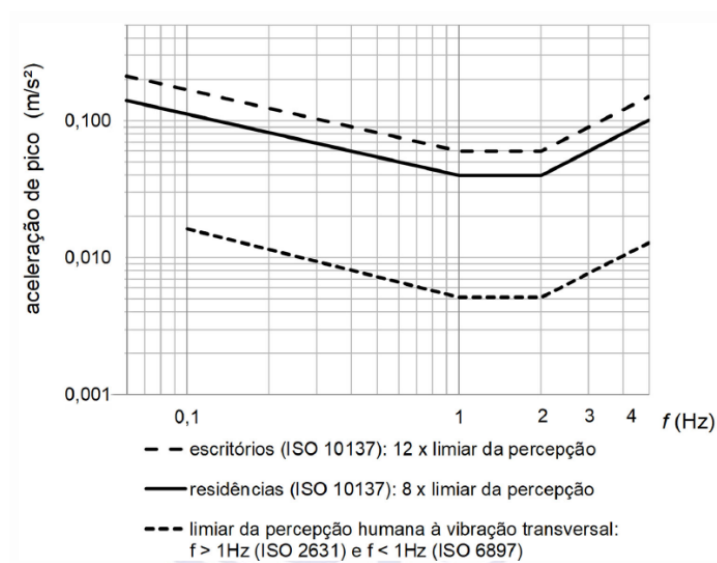
Essa filosofia é especializada para o caso de ações de vento por Ciampoli; Petrini (2012). Os autores propõem o método de engenharia do vento baseada em desempenho (PBWE – *Performance-Based Wind Engineering*) em que o risco associado ao vento em edifícios altos é quantificado a partir de medidas de desempenho probabilísticas, como a probabilidade anual de a aceleração no topo exceder um limiar de conforto, ou de a razão de deslocamento relativo entre pavimentos ultrapassar um valor máximo admissível. Tais grandezas são avaliadas combinando um modelo de ação de vento dependente da direção, que descreve a distribuição de velocidade média, turbulência e características espectrais do escoamento, com modelos estruturais que incluem incertezas em parâmetros mecânicos e nas propriedades aerodinâmicas. Dessa forma, o mesmo formalismo PBD de Augusti é adaptado para tratar simultaneamente segurança estrutural, estados-limite de serviço e conforto dos ocupantes em uma perspectiva de risco.

Como referência normativa para operacionalizar o estado-limite de conforto humano dentro desse enquadramento PBWE, pode-se adotar o critério da NBR 6123 (2023), que se ancora na curva-base de percepção da ISO 10137 para definir acelerações-limite em função da frequência de vibração: como critério de aceitabilidade, a aceleração horizontal máxima associada à frequência f (Hz), tomada para um período de recorrência de 1 ano, não deve exceder o limite correspondente ao tipo de ocupação; em particular, na faixa $0,06 \leq f \leq 1,00$ Hz, a aceleração-limite pode ser expressa por:

$$a_{\text{lim}} = 0,01 \cdot k_{\sigma} \cdot f^{-0,445} \quad \text{Equação (11)}$$

com $k_{\sigma} = 6,12$ para edifícios comerciais/escritórios e $k_{\sigma} = 4,08$ para edifícios residenciais, conforme ilustrado na Figura 8; para consistência com esse nível de recorrência, a norma também estabelece que a aceleração máxima seja obtida considerando a ação do vento com $S_3 = 0,54$ (recorrência anual).

Figura 8 – Aceleração horizontal de pico versus frequência de vibração para verificação do conforto humano (residências e escritórios).



Fonte: ABNT NBR 6123:1988.

Complementarmente, o Anexo C da ISO 2631-1 (C.2.3) ressalta que valores aceitáveis de vibração para conforto dependem do contexto de uso (duração da exposição, expectativas do usuário e atividade realizada, como ler/escrever/comer, além de fatores ambientais como ruído e temperatura) e, portanto, não há um único limite universal; em vez disso, a norma fornece faixas indicativas que associam a magnitude global da vibração às reações mais prováveis de conforto/desconforto, o que permite interpretar a resposta calculada e, no âmbito do PBWE, tratar esse critério como um parâmetro de demanda (EDP) para estimar probabilisticamente a probabilidade anual de excedência de níveis de desconforto.

- Abaixo de 0,315 m/s²: não desconfortável
- 0,315 a 0,63 m/s²: um pouco desconfortável
- 0,50 a 1,0 m/s²: razoavelmente desconfortável
- 0,80 a 1,6 m/s²: desconfortável
- 1,25 a 2,5 m/s²: muito desconfortável
- Acima de ~2,0 m/s²: extremamente desconfortável

Em outros estudos de PBWE, Petrini (2009) estrutura essas incertezas em dois “blocos” físicos: zona do ambiente, como os parâmetros básicos de vento, ondas, correntes, além disso a zona de interação, que inclui os fenômenos aerodinâmicos, aeroelásticos ou hidroelásticos e parâmetros estruturais para aplicação em aerogeradores eólicos, em que cada conjunto incorpora incertezas aleatórias, epistêmicas e de modelo. Essa visão é particularmente conveniente para a formulação de integrais de risco e para o acoplamento com análises numéricas.

A simulação de Monte Carlo é uma técnica numérica baseada em amostragem aleatória usada para estimar o comportamento de sistemas complexos e de modelos matemáticos que envolvem incerteza (Robert; Casella, 2004). O método consiste em representar as variáveis de interesse como variáveis aleatórias com distribuições de probabilidade conhecidas ou assumidas e a partir delas, aproximar estatisticamente a resposta do sistema. De forma geral, um procedimento de Monte Carlo começa com a definição do modelo matemático que relaciona entradas e saídas, sendo as entradas variáveis aleatórias que representam incertezas em carregamentos, propriedades de materiais, parâmetros geométricos, entre outros. Em seguida, especificam-se as distribuições de probabilidade de cada variável. A etapa seguinte consiste em gerar, com auxílio de um gerador de números pseudoaleatórios, um grande número de amostras cada uma representando um cenário possível do sistema. Para cada uma dessas amostras, o modelo é avaliado numericamente, obtendo-se uma realização da variável de resposta. Ao final de todas as simulações, forma-se um conjunto de dados, a partir do qual se podem estimar a função densidade de probabilidade de eventos específicos.

Em aplicações recentes, Colherinhas; Morais, De; Petrini (2024) a integral de propagação de incertezas via PBWE pode ser formalizada como uma integral de probabilidade total, sendo estimada pela integral da equação 12. Na pesquisa foi selecionado a simulação de Monte Carlo que é padrão em análises de confiabilidade e risco.

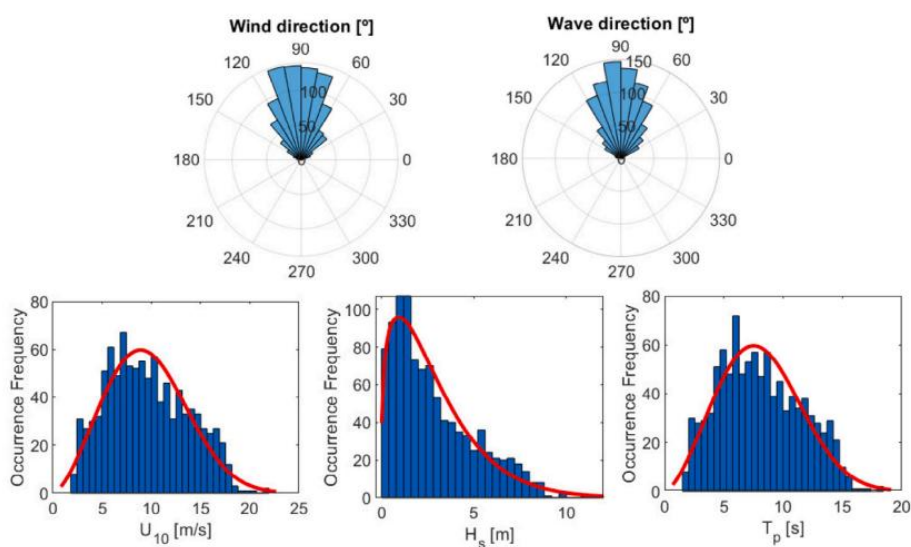
$$\lambda(\mathbf{EDP}) = \int \int \int \lambda(\mathbf{EDP} | \mathbf{IM}, \mathbf{IP}, \mathbf{SP}) \cdot f(\mathbf{IP}) \cdot f(\mathbf{IM}) \cdot f(\mathbf{SP}) \cdot d\mathbf{IM} \cdot d\mathbf{IP} \cdot d\mathbf{SP} \quad \text{Equação (12)}$$

Os parâmetros ambientais incertos são reunidos no vetor de medidas de intensidade, \mathbf{IM} , enquanto os parâmetros incertos associados à zona de interação são organizados nos vetores de parâmetros de interação, \mathbf{IP} , e de parâmetros estruturais, \mathbf{SP} .

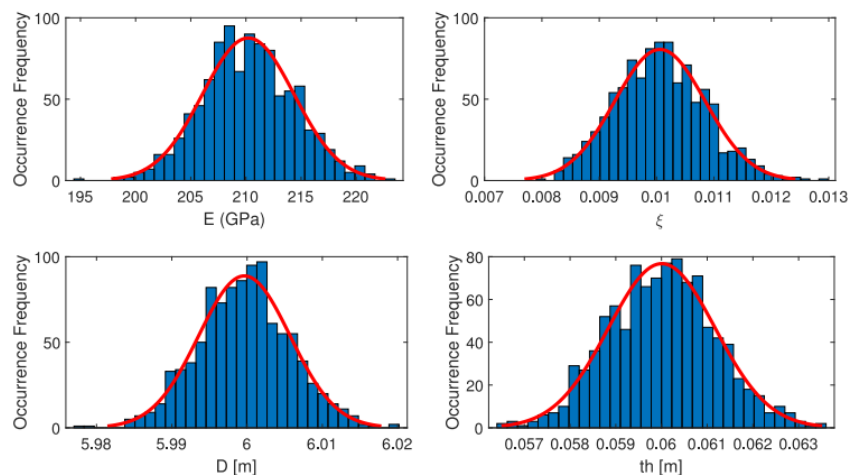
No estudo de Colherinhas; Morais, De; Petrini (2024), a etapa de modelagem probabilística é estruturada a partir da distinção entre parâmetros de medida de

intensidade (IM) e parâmetros estruturais (SP). A Figura 9, representa as distribuições probabilísticas de parâmetros do artigo: no subgráfico (a) são mostradas as distribuições associadas ao ambiente, o vento e as ondas do mar, enquanto no subgráfico (b) aparecem as distribuições referentes às propriedades mecânicas e geométricas da torre e da fundação monopilar. Nas medidas de intensidade (IM), o estudo modela a velocidade média do vento em 10 m de altura (U_{10}) e as direções de vento e de ondas. A U_{10} é representada por uma distribuição de Weibull, enquanto as direções são descritas por distribuições normais centradas na direção principal, com desvio padrão de 30° . A partir de U_{10} , derivam-se ainda a altura significativa de onda (H_s) e o período de pico (T_p) por relações empíricas, garantindo a coerência física entre vento e mar. Já os parâmetros estruturais (SP) incluem o módulo de elasticidade do aço (E), o amortecimento equivalente (ξ), o diâmetro externo da fundação tubular (D) e a espessura de parede do monopile (t_h). Todos são modelados por distribuições lognormais, apropriadas para grandezas estritamente positivas e sujeitas a efeitos multiplicativos de fabricação e material.

Figura 9 – Distribuições probabilísticas.



(a) Wind direction (top-left), wave direction (top-right); 10-minute mean wind speed at 10 m height (bottom-left), wave characteristic height (bottom-center), and wave peak period (bottom-right).



(b) Steel elastic modulus (top-left), structural damping (top-right); tower cross-section diameter (bottom-left), tower cross-section thickness (bottom-center), and wave peak period (bottom-right).

Fonte: (Colherinhas; Morais, De; Petrini, 2024)

Song; Kawai (2023) apresenta os métodos de Monte Carlo que se consolidaram como ferramenta central para estimar probabilidades de falha em problemas com funções de estado-limite complexas, possivelmente de alta dimensão, e com distribuições não lineares dos parâmetros. Os autores organizam o campo em três blocos principais: métodos aproximados (como FORM e SORM), modelos substitutos (*response surfaces*, expansões em caos polinomial, *kriging*, redes neurais) e formulações de Monte Carlo associadas a técnicas de redução de variância, detalhando também sua combinação com modelos substitutos. Song; Kawai (2023), desenvolve uma série de técnicas de redução de variância com o intuito de tornar viável a estimativa de probabilidades de falhas muito pequenas, típicas de problemas de projeto estrutural de alta confiabilidade.

2.8 Campo de vento turbulento

O vento atmosférico apresenta comportamento intrinsecamente aleatório, resultante da interação entre o escoamento médio, a rugosidade do terreno e fenômenos turbulentos na camada limite atmosférica. Desde os trabalhos pioneiros de Davenport (1964), consolidou-se na engenharia do vento a abordagem que decompõe o vento em uma componente média determinística e uma componente flutuante de natureza estocástica. Essa decomposição possibilita a aplicação de métodos estatísticos e espectrais na avaliação dos efeitos dinâmicos do vento sobre estruturas flexíveis, sendo amplamente adotada em análises modernas de engenharia estrutural.

A componente turbulenta do vento é usualmente modelada como um processo aleatório aproximadamente estacionário e gaussiano, descrito por meio de espectros de densidade de potência (*Power Spectral Density* – PSD) das flutuações de velocidade (Holmes, 2018; Simiu; Scanlan, 1996). Essa representação espectral permite capturar a distribuição da energia do vento ao longo das frequências e avaliar a interação entre a excitação aerodinâmica e os modos naturais da estrutura, constituindo a base das análises espectrais lineares empregadas em normas técnicas e softwares de engenharia.

A intensidade de turbulência é definida como a razão entre o desvio-padrão das flutuações de velocidade do vento e a velocidade média do escoamento, sendo um parâmetro fundamental na caracterização estatística do vento atmosférico. Observações experimentais indicam que a intensidade de turbulência decresce com a altura em relação ao solo, comportamento associado à redução da influência da rugosidade superficial (Simiu; Scanlan, 1996).

Essa variação vertical é comumente representada por uma lei potencial, amplamente adotada na literatura e em normas técnicas, como a NBR 6123 (2023). A intensidade de turbulência longitudinal em uma altura y pode ser expressa por:

$$I_u(y) = I_{10} \left(\frac{y}{10} \right)^{-\alpha_I} \quad \text{Equação (13)}$$

em que I_{10} é a intensidade de turbulência a 10 m de altura e α_I é um expoente empírico dependente da categoria de terreno (Holmes, 2018; NBR 6123, 2023). A partir dessa definição, obtêm-se os desvios-padrão das flutuações de velocidade nas direções longitudinal e transversal como $\sigma_u = I_u V(y)$ e $\sigma_v = 0,8\sigma_u$, sendo $V(y)$ a velocidade média do vento na altura considerada.

Além da intensidade de turbulência, a descrição completa do vento turbulento requer a definição das escalas integrais, que representam o comprimento característico das estruturas coerentes do escoamento responsáveis pelas flutuações de velocidade. As escalas integrais influenciam diretamente a forma dos espectros de densidade de potência e a correlação espacial do vento (Kaimal et al., 1972).

Estudos experimentais clássicos indicam que as escalas integrais longitudinal e transversal apresentam magnitudes distintas, sendo a escala longitudinal significativamente maior. Relações empíricas amplamente utilizadas em engenharia do vento expressam essas escalas como funções de um parâmetro dependente da altura, frequentemente denotado por λ_1 dependente da altura, sendo $L_u = 8,1\lambda_1$ e $L_v = 2,7\lambda_1$. Essas

relações são adequadas para aplicações em análises espectrais de estruturas sujeitas à ação do vento (Holmes, 2018).

Os espectros de densidade de potência descrevem a distribuição da energia das flutuações de velocidade do vento ao longo das frequências. Entre os diversos modelos espectrais disponíveis, o espectro proposto por Kaimal et al. (1972) destaca-se como um dos mais utilizados em engenharia do vento, devido à sua boa aderência a dados experimentais e simplicidade de aplicação.

Para as direções longitudinal e transversal, os espectros de Kaimal podem ser expressos, respectivamente, por:

$$S_u(f) = \sigma_u^2 \frac{\left(\frac{4L_u}{V}\right)}{\left(1 + \frac{6fL_u}{V}\right)^{5/3}} \quad \text{Equação (14)}$$

$$S_v(f) = \sigma_v^2 \frac{\left(\frac{4L_v}{V}\right)}{\left(1 + \frac{6fL_v}{V}\right)^{5/3}} \quad \text{Equação (15)}$$

Em estruturas com múltiplos pontos de aplicação de carga, as flutuações de vento não atuam de forma completamente independente. A coerência espacial do vento descreve o grau de correlação entre flutuações medidas em diferentes posições, sendo um aspecto essencial na modelagem de carregamentos distribuídos (Davenport, 1964).

Modelos clássicos representam a coerência por funções de decaimento exponencial dependentes da frequência e da separação espacial, refletindo o fato de que flutuações de baixa frequência tendem a ser mais correlacionadas que flutuações de alta frequência. A consideração da coerência espacial permite a construção de matrizes espectrais auto e cruzadas de carregamento, fundamentais para análises dinâmicas envolvendo sistemas estruturais com múltiplos graus de liberdade (Solari; Piccardo, 2001).

2.9 Estudos sobre rodas gigantes

Diversos estudos exploram a concepção e o design estrutural de rodas-gigantes. O trabalho de Krolicki; Sullivan; Willford (2013), que apresenta o projeto da Vegas High Roller, Figura 10. Quando concluída em 2014, essa estrutura tornou-se a maior roda-gigante de observação do mundo, com aproximadamente 168 metros de altura. O estudo discute aspectos fundamentais relacionados à segurança, durabilidade e inovações tecnológicas aplicadas no desenvolvimento de uma estrutura eficiente, leve e segura.

Inspirada na London Eye e na Singapore Flyer, a Vegas High Roller adota o conceito de roda gigante tensionada, caracterizada por cabos tensionados nos raios e um aro comprimido. Esse design inovador permite a operação contínua por até 18 horas diárias ao longo de 50 anos. Com massa total inferior a 5.000 toneladas, sua altura e grande porte exigiram a implementação de estratégias específicas para mitigar vibrações induzidas pelo vento e garantir o conforto dos passageiros durante as viagens. Uma das inovações aplicadas foi a implementação de um sistema de amortecimento dinâmico, projetado para absorver as vibrações e garantir uma operação estável mesmo em condições de vento forte. Além disso, o projeto foi desenvolvido para resistir a outras condições extremas como terremotos, variações bruscas de temperatura, incluindo aquelas decorrentes de incêndios e explosões, assegurando a integridade estrutural e a segurança operacional da roda gigante.

Figura 10 - Vegas High Roller, ponto turístico na cidade de Las Vegas.

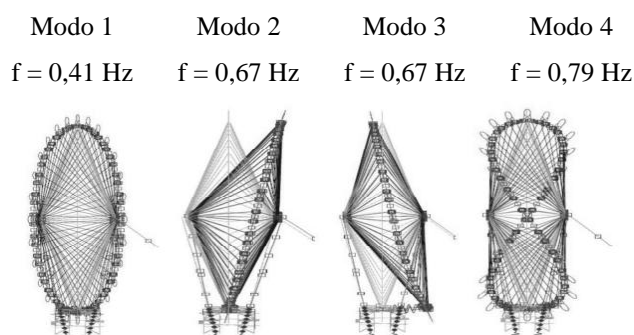


Fonte: (Civatis, 2023).

Almufti et al. (2013) aprofunda na análise da influência do vento na resposta estrutural da roda gigante Vegas High Roller, utilizando dados de medições de vento coletados ao longo de 39 anos no Aeroporto McCarran e na Base Aérea de Nellis, ambos em Las Vegas. A análise dinâmica revelou que a frequência natural da estrutura é aproximadamente 0,4 Hz, enquanto os modos de vibração identificados variam entre 0,3 Hz e 2,5 Hz, na Figura 11 estão os quatro primeiros modos de vibração da estrutura, o que caracteriza um amplo espectro de possíveis oscilações, dado a grande massa e altura da estrutura. O estudo destaca a importância da instalação de um sistema de amortecimento viscoso dinâmico, que desempenha um papel crucial na redução

significativa das oscilações percebidas pelos passageiros dentro das gôndolas, garantindo maior conforto e segurança diante das cargas de vento.

Figura 11 – Modos de vibração Vegas High Roller.



Fonte: Adaptado de Almufti et al. (2013).

O primeiro modo de vibração ocorre próximo à frequência natural da roda gigante, 0,4 Hz, e é puramente torcional em relação ao eixo vertical. Enquanto os dois modos seguintes ocorrem em frequências bem próximas e são principalmente translacionais, sendo que no terceiro modo a deformação ocorre de maneira antissimétrica em relação ao segundo modo de vibração. Por fim o quarto modo é um modo de vibração do aro, Almufti et al. (2013) com 4 a 12 pontos de inflexão, variando de 0,79 Hz até acima de 2,6 Hz, os modos de vibração aparecem em pares com a mesma frequência e com pontos de inflexão em defasagem entre si.

Outro projeto de roda gigante que adotava cabos tensionados nos raios é a Beijing Great Wheel, (You et al., 2010), projetada para ter uma altura de 208 metros de altura, que não foi concluída devido à recuperação judicial da empresa responsável. O projeto adotava cabos de raios tensionados, que são um componente crítico no design de rodas gigantes, proporcionando a necessária distribuição de carga e estabilidade. A estrutura foi modelada no software ANSYS, onde os cabos de raios e de ancoragem foram representados por elementos do tipo *Link*. Enquanto o aro e as colunas estruturais foram modelados com elementos de viga, refletindo a rigidez e a distribuição de forças ao longo da estrutura. A análise considerou diversas cargas atuantes, incluindo o peso próprio da estrutura e dos passageiros, efeitos do vento, variações térmicas e forças dinâmicas geradas durante a operação e frenagem. Foram realizadas a análise estática, a dinâmica e de estabilidade para avaliar o desempenho estrutural e a segurança da roda-gigante diante das solicitações esperadas.

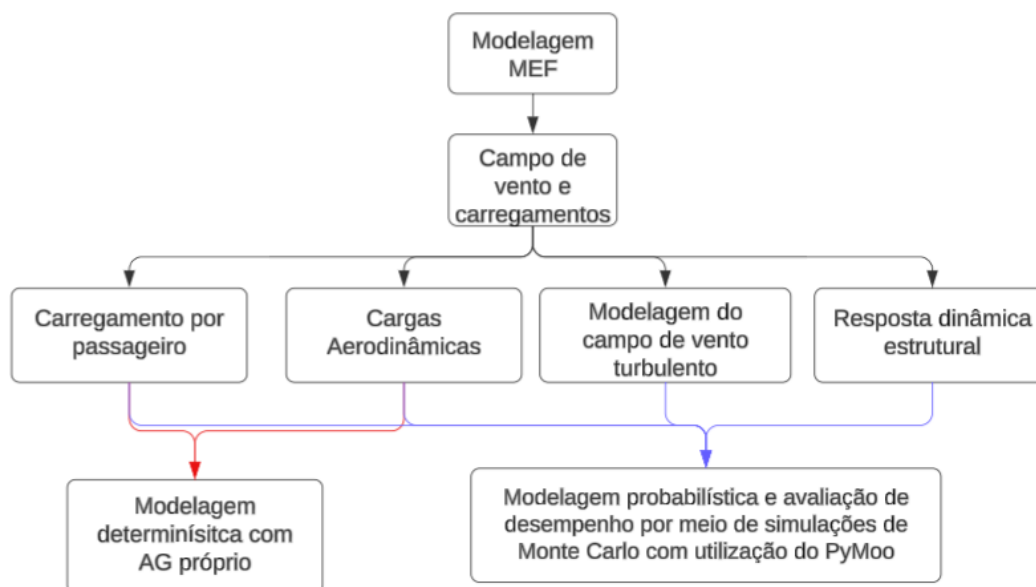
No contexto internacional, destaca-se a norma técnica EN 13814 (2004), estabelece requisitos técnicos abrangentes e rigorosos para o projeto, fabricação,

instalação, operação e manutenção de equipamentos de diversão, com ênfase especial em estruturas de grande porte, como rodas-gigantes. Entre suas diretrizes, merecem atenção os critérios relativos ao dimensionamento de componentes críticos, à resistência frente a cargas dinâmicas e à garantia de estabilidade global da estrutura. A norma enfatiza a importância da análise das frequências naturais e dos modos de vibração, com o intuito de mitigar os riscos associados à ressonância estrutural. No cenário nacional, a NBR 15926-2 (2023) representa o principal referencial normativo aplicado ao projeto e à instalação de equipamentos de diversão. Esta norma, elaborada com base nos preceitos da EN 13814 (2004), adapta suas diretrizes ao contexto brasileiro e estabelece os critérios mínimos de segurança estrutural e de integridade física das estruturas, incluindo as rodas-gigantes. Assim como sua correspondente europeia, a NBR 15926-2 (2023) também recomenda a realização de análises dinâmicas, especialmente para a identificação de modos de ressonância que possam comprometer a segurança operacional da estrutura.

3. MÉTODO

Este trabalho foi estruturado a partir de uma cadeia metodológica integrada e automatizada, em três etapas, Figura 12.

Figura 12 - Fluxograma.



Fonte: Autor.

Foi desenvolvido um modelo paramétrico da roda-gigante acessível em ambiente Python. O modelo foi acoplado ao solver ANSYS por meio da biblioteca PyMAPDL. Essa integração permitiu a geração automatizada da geometria, da malha, das condições de contorno e dos carregamentos, assegurando reprodutibilidade e rastreabilidade dos resultados.

Adotou-se uma abordagem determinística de projeto baseada em Algoritmos Genéticos (AG). Um algoritmo próprio foi implementado para explorar o espaço de soluções, considerando variáveis discretas associadas às seções transversais e a parâmetros estruturais. Cada indivíduo foi avaliado com base nas respostas obtidas via Método dos Elementos Finitos (MEF), incluindo tensões, deslocamentos e verificação dos requisitos de segurança sob ações operacionais.

Na etapa final, foi desenvolvida uma abordagem probabilística orientada ao desempenho. Incertezas associadas às ações de vento e aos parâmetros estruturais foram propagadas por simulações de Monte Carlo. Como resultado, obtiveram-se distribuições de respostas em termos de parâmetros de demanda de engenharia (EDPs) e métricas

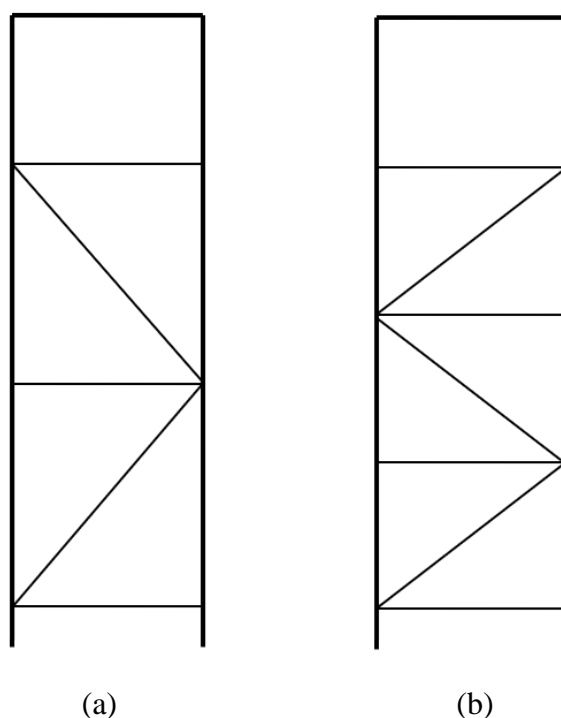
compatíveis com o arcabouço de Engenharia Baseada em Desempenho, permitindo uma avaliação robusta do comportamento estrutural sob variabilidade inerente.

3.1 Elementos da roda-gigante

Esta seção tem por finalidade definir elementos estruturais da roda-gigante. As imagens inseridas nesta seção têm caráter técnico-ilustrativo, permitindo visualizar a configuração estrutural, os detalhes construtivos e as ligações responsáveis pela transferência de esforços.

Entre esses elementos, destaca-se o pórtico radial, Figura 13, por representar parcela significativa da massa total e por exercer papel determinante na rigidez global do conjunto. Foram analisadas duas configurações geométricas de pórtico radial, sendo uma com três vãos internos, Figura 13(a), e a outra com quatro vãos, Figura 13(b).

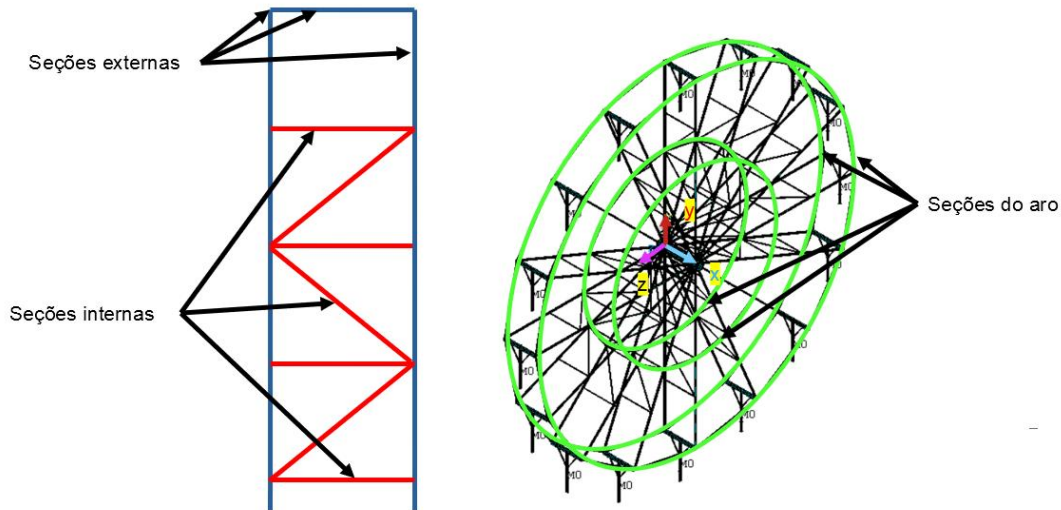
Figura 13 - Configurações de pórtico com (a) 4 vãos e (b) 3 vãos.



Fonte: Autor.

No presente estudo, serão submetidas à otimização três seções transversais representativas da roda-gigante, destacadas na Figura 14, a seção dos tubos externos do pórtico radial, a seção dos tubos internos do pórtico radial e a seção dos elementos estruturais que compõem o aro, responsável pela conexão entre as hastes da roda-gigante.

Figura 14 - Seções otimizadas no AG.



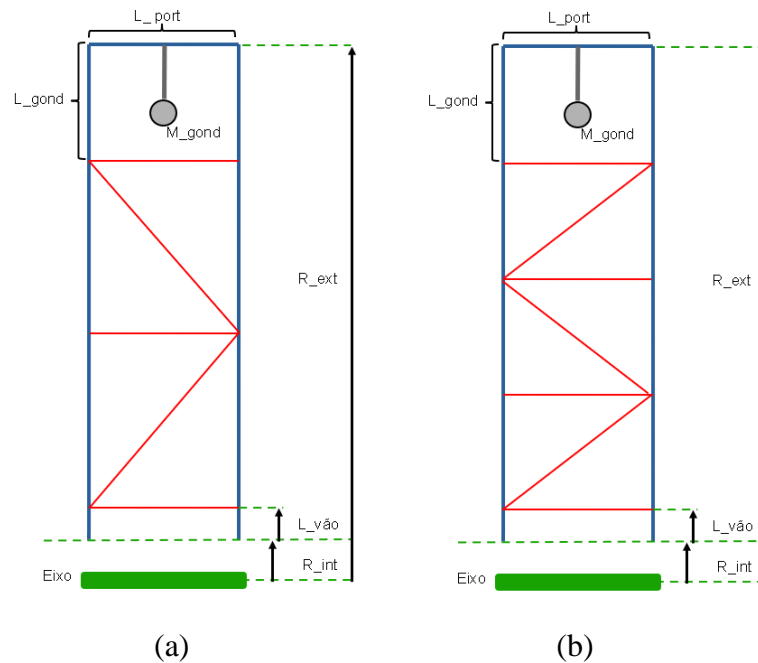
Fonte: Autor.

3.2 Modelagem em elementos finitos

Inicialmente, são definidos os parâmetros de entrada fixos da configuração da roda gigante. Estão representados a configuração com três divisões, Figura 15(a), e com quatro divisões, Figura 15(b). Esses parâmetros incluem as dimensões e características estruturais essenciais para a modelagem da roda gigante, sendo eles:

- r_{int} representa o raio interno, medido pela distância do eixo até o início do pórtico radial, com valor de 0,48 metros;
- r_{ext} é o raio externo, medido pela distância entre o eixo e o fim do pórtico radial, com valor de 8,88 metros;
- $L_{vão}$ representa a distância entre o início do pórtico radial e o ponto onde as divisões do pórtico radial começam, com valor de 0,4 metro;
- l_{port} refere-se à largura do pórtico radial, com valor de 1,8 metro;
- l_{gond} representa a distância entre o final do pórtico radial e a gôndola de roda gigante, com valor de 2,6 metros;
- m_{gond} representa a massa de cada gôndola, que é de 750 kg;
- N_{port} representa o número de pórticos radiais, ou consequentemente de gôndolas na roda gigante, neste estudo são 16 pórticos radiais e gôndolas;
- D_{eixo} refere-se ao diâmetro do eixo, com valor de 20 polegadas;
- t_{eixo} representa a espessura da parede do eixo, com o valor de 0,5 polegadas.

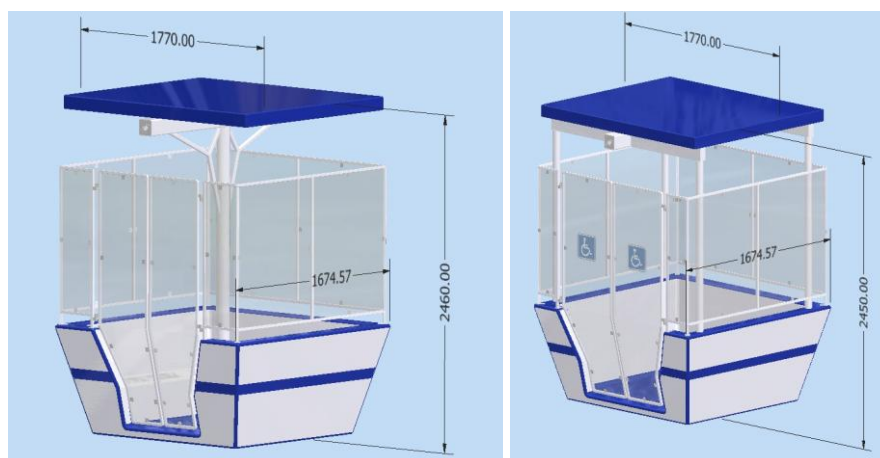
Figura 15 – Dimensões do pórtico radial com (a) 3 vãos e (b) 4 vãos.



Fonte: Autor.

Foram projetadas duas tipologias de gôndolas: uma acessível e outra sem adaptações específicas, conforme ilustrado na Figura 16. Na gôndola acessível, a configuração estrutural foi modificada, eliminando-se a viga central e substituindo-a por vigas laterais, a fim de viabilizar as condições de acessibilidade. Considerou-se a presença de apenas uma gôndola destinada a pessoas com deficiência (PCD) na roda-gigante e, para fins de padronização da modelagem, essa gôndola é sempre identificada como a gôndola 1.

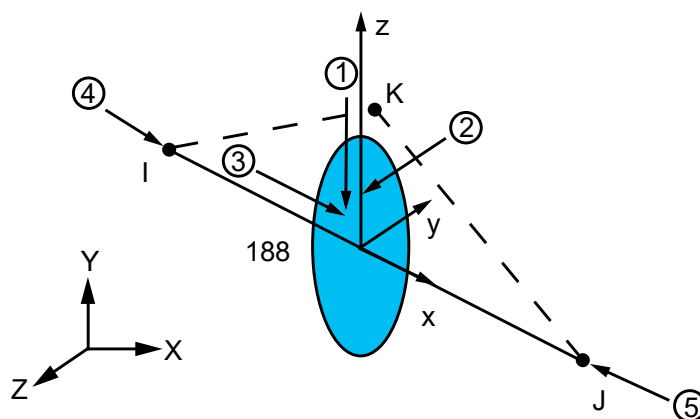
Figura 16 – Gôndolas consideradas no cálculo da massa e da altura do centro de gravidade.



Fonte: Adaptado de (Rodrigues, 2024).

Na modelagem em elementos finitos da roda gigante utiliza-se dois tipos principais de elementos. Um dos elementos utilizados é o BEAM188, Figura 17, possui características fundamentais para a modelagem estrutural da roda gigante. Esse elemento é baseado na teoria de vigas de Timoshenko, a qual considera os efeitos da deformação por cisalhamento de primeira ordem. Nessa formulação, a deformação por cisalhamento transversal é assumida constante ao longo da seção transversal. Como consequência, as seções permanecem planas e não sofrem distorção após a deformação. Cada nó do elemento BEAM188 possui seis graus de liberdade, três translacionais (deslocamentos nas direções X, Y e Z) e três rotacionais (rotações em torno dos eixos X, Y e Z), há um sétimo grau de liberdade que representa a magnitude de empenamento opcional, neste estudo não será considerado esse último. Esse tipo de elemento apresenta algumas características de suma importância como a capacidade de representar feixes tridimensionais submetidos a forças axiais, flexão, cisalhamento e torção, o que o torna adequado para a modelagem de estruturas esbeltas, como a roda gigante e os componentes, como os tubos e os pórticos radiais da estrutura.

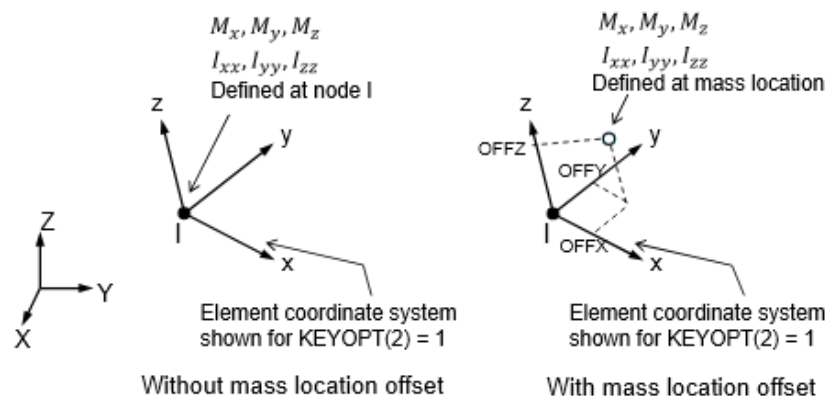
Figura 17 – Elemento BEAM188.



Fonte: Ansys (2025).

O elemento MASS21, Figura 18, um elemento pontual definido por um único nó, descrito por seis graus de liberdade. Adequado para a modelagem de massas concentradas. No presente trabalho o MASS21 é aplicado para representar a massa pontual de cada gôndola. Outrossim, são aplicadas restrições adicionais a esse elemento de massa, como a condição de não inércia rotacional. Ou seja, a massa não pode girar durante a simulação, ademais é adotada a condição de ser um elemento tridimensional permitindo.

Figura 18 – Elemento MASS21.



Fonte: Ansys (2025).

O material principal selecionado para a estrutura da roda gigante é o aço A36, amplamente utilizado em estruturas metálicas devido às propriedades mecânicas favoráveis e boa relação custo-benefício. As propriedades mecânicas do aço A36 incluem um módulo de elasticidade de 200 GPa, densidade de 7850 kg/m³ e coeficiente de Poisson de 0,3. Para a modelagem do comportamento dinâmico da estrutura, foi definido um valor de amortecimento do material correspondente a 1% da rigidez crítica para todos os modos considerados na análise modal. A tensão de escoamento adotada para o aço A36 é de 250 MPa. Além do material estrutural primário, foi adotado um material secundário, SAE 1020, para a composição do eixo da roda gigante, caracterizado por propriedades ligeiramente diferenciadas. Esse material apresenta um módulo de elasticidade de 207 GPa, densidade de 7850 kg/m³ e um coeficiente de Poisson de 0,293. A escolha desses materiais levou em consideração sua ampla aplicabilidade em projetos estruturais metálicos.

Há seções transversais específicas adotadas para determinados componentes estruturais da roda gigante. São elas, a seção do tubo do eixo, optou-se por uma seção circular vazada, cuja geometria foi fixada na simulação com um diâmetro externo de 20 polegadas e uma espessura de parede de 0,5 polegadas, valores mantidos constantes ao longo das análises.

A seção transversal específica responsável pela conexão entre o pórtico radial da roda gigante e o eixo adota uma seção quadrada com 60 mm de lado e 4 mm de espessura. As dimensões são selecionadas com a finalidade de garantir a rigidez estrutural necessária e promover uma distribuição equilibrada das tensões na junção, suportando adequadamente as cargas transmitidas durante a operação da roda gigante.

A última seção transversal é responsável pela ligação entre a gôndola e o pórtico radial da roda gigante. Esse componente foi modelado com uma seção circular, apresentando um raio externo de 2 polegadas e espessura de 1/4 de polegada. Essa escolha estrutural visa assegurar a resistência mecânica adequada para suportar as cargas dinâmicas e estáticas atuantes durante a operação do equipamento.

São gerados nós centrais que servem como referência estrutural para todo o modelo. A malha é gerada por meio de um processo automatizado, no qual um loop percorre a estrutura, adicionando nós e elementos de maneira sistemática e ordenada. Além dos nós principais, são introduzidos nós de orientação, que desempenham um papel fundamental na definição da direção e inclinação dos elementos estruturais. A geração dos pórticos radiais é efetuada também de forma automatizada, por meio da rotação do plano de trabalho, permitindo a replicação sistemática dos elementos estruturais até a completa formação da roda gigante. Os nós de orientação garantem que os elementos dos pórticos radiais sejam posicionados corretamente ao longo da estrutura da roda gigante durante a rotação do plano de trabalho, respeitando as condições geométricas e estruturais. Essa automação proporciona vantagens significativas, permitindo a modificação dos parâmetros iniciais da roda gigante, como dimensões e configurações geométricas, sem a necessidade de alterações no código

O elemento de massa que representa a gôndola da roda gigante. Essa massa é inserida no modelo por meio do elemento de massa (MASS21). O valor da massa adotado foi de 750 kg conforme levantamento em campo das dimensões e do material de uma gôndola. Esse elemento é posicionado em um nó específico, posicionado a uma distância condizente com a altura do centro de gravidade da gôndola. Na simulação do efeito das forças gravitacionais atuantes, é aplicada uma aceleração da gravidade no eixo Y, com valor padrão de $9,81 \text{ m/s}^2$, que gera o carregamento vertical correspondente à massa do sistema.

3.3 Carregamentos aerodinâmicos durante a operação da roda-gigante

3.2.1 Carregamentos durante a operação da roda-gigante

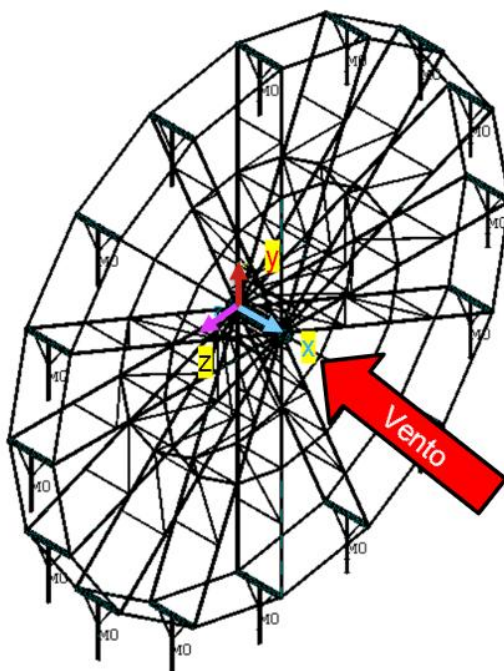
Deve-se considerar a condição de carregamento mais desfavorável associada à ocupação máxima da gôndola, admitindo-se capacidade de quatro passageiros por unidade. O carregamento devido aos usuários foi definido em conformidade com a NBR 15926-2 (2023). Essa norma estabelece diretrizes para a determinação das unidades de

carregamento em sistemas que envolvem usuários, tais como veículos, carros e gôndolas, sendo esta última a configuração analisada. Para situações com dois ou mais usuários, a norma prescreve que a carga nominal atribuída a cada indivíduo com estatura superior a 1,30 m seja igual a 0,75 kN. Assim, na presente modelagem, assumiu-se que os quatro passageiros possuem mais de 1,30 m de altura, resultando em uma carga total de 3,0 kN por gôndola, aplicada na direção do eixo Y para representar o efeito das ações verticais associadas ao peso dos ocupantes.

3.2.2 Cargas aerodinâmicas sobre a roda-gigante

A ação do vento foi considerada como carregamento longitudinal, como apresentado na Figura 19, relevante para a avaliação estrutural da roda-gigante, incidindo principalmente sobre as gôndolas, que se comportam como corpos rombudos e impõem forças aerodinâmicas ao sistema de raios, aros e eixo.

Figura 19 - Direção do vento na roda-gigante.



Fonte: Autor.

A velocidade média do vento na altura de cada gôndola é obtida a partir de uma velocidade de referência, corrigida por fatores multiplicativos associados ao terreno e à topografia. No modelo implementado, a velocidade média ajustada na altura z é calculada por

$$V(y) = V_{\text{ref}} S_1 S_2(y) S_3 \quad \text{Equação (16)}$$

em que $S_2(y) = b_m \times F_r \left(\frac{y}{10}\right)^p$, sendo b_m o parâmetro meteorológico, F_r o fator de rajada terreno e p o expoente da lei potencial. Essa formulação é implementada diretamente no cálculo de velocidade média por altura. Os valores padrão adotados para os parâmetros do perfil e propriedades do ar incluem:

- $S_1 = 1,0$
- $p = 0,16$
- $b_m = 0,73$
- $F_r = 0,98$
- $S_3 = 1,0$

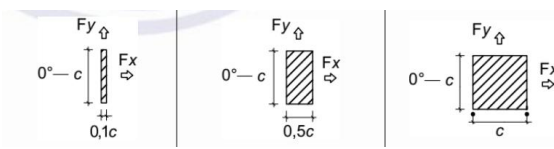
A partir de $V(y)$, define-se a pressão dinâmica:

$$q(y) = \frac{1}{2} \rho V(y)^2 \quad \text{Equação (17)}$$

que é utilizada para converter coeficientes aerodinâmicos em forças nodais aplicáveis ao modelo de elementos finitos.

As forças aerodinâmicas nas gôndolas são decompostas em duas componentes horizontais ortogonais, no modelo numérico, em F_x e F_z , associadas às direções globais X e Z , respectivamente aplicadas nas gôndolas. Os coeficientes aerodinâmicos C_x e C_z são estabelecidos em função do ângulo de incidência do vento e da razão geométrica b/d , a razão da largura pela profundidade da gôndola, sendo os valores dos coeficientes obtidos por meio da interpolação a partir da tabela apresentada na Figura 20, no presente estudo o eixo Z é o representativo do eixo Y na NBR 6123 (2023).

Figura 20 – Coeficiente de força C_x e C_z para barras prismáticas de faces planas de comprimento infinito.



| C_x | C_y | C_x | C_y | C_x | C_y |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| +2,0 | 0 | +2,1 | 0 | +2,0 | 0 |
| +1,8 | +0,1 | +1,4 | +0,7 | +1,55 | +1,55 |
| 0 | +0,1 | 0 | +0,75 | 0 | +2,0 |

Fonte: Adaptado de NBR 6123 (2023).

Adicionalmente, é considerado o fator de redução para barras de comprimento finito, dependente do comprimento efetivo da barra prismática, l_{ef} , e da largura da barra prismática medida na direção perpendicular à direção do vento, c_a , sendo obtido por meio da tabela apresentada na Figura 21.

Figura 21 – Valor do fator de redução K para barras de comprimento finito.

| l_{ef} / c_a ou l_{ef} / d | 2 | 5 | 10 | 20 | 40 | 50 | 100 | ∞ |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|----------|
| Barras prismáticas de seção circular em regime subcrítico ($Re < 4,2 \times 10^5$) | 0,58 | 0,62 | 0,68 | 0,74 | 0,82 | 0,87 | 0,98 | 1,0 |
| Barras prismáticas da seção circular em regime acima do crítico ($Re \geq 4,2 \times 10^5$) | 0,80 | 0,80 | 0,82 | 0,90 | 0,98 | 0,99 | 1,0 | 1,0 |
| Barras prismáticas de faces planas | 0,62 | 0,66 | 0,69 | 0,81 | 0,87 | 0,90 | 0,95 | 1,0 |

Fonte: Adaptado de NBR 6123 (2023).

As componentes de força por gôndola são calculadas como:

$$F_x = q(y)C_x k A_x \quad \text{Equação (18)}$$

$$F_z = q(y)C_z k A_z \quad \text{Equação (19)}$$

obtendo-se diretamente as componentes (F_x , F_z) para uso na montagem do caso de carregamento.

No acoplamento com o modelo de elementos finitos, a altura de cada gôndola em relação ao solo é computada a partir da geometria da roda e de uma folga ao solo, sendo então utilizada para calcular $V(y)$ e $q(y)$. Em seguida, as forças aerodinâmicas são aplicadas como cargas concentradas nos nós representativos do centro de gravidade de cada gôndola, por meio das componentes F_x e F_z .

3.2.3 Modelagem do campo de vento turbulento

Para capturar efeitos dinâmicos associados ao vento turbulento, o vento é tratado como um processo estocástico descrito por espectros de densidade de potência (PSD) das flutuações de velocidade nas direções longitudinal e transversal. A intensidade de turbulência é modelada por uma lei potencial:

$$I_u(y) = I_{10} \left(\frac{y}{10} \right)^{-\alpha_i} \quad \text{Equação (20)}$$

o que permite obter os desvios padrão $\sigma_u = I_u V(y)$ e $\sigma_v = 0,8\sigma_u$, no presente estudo para I_{10} foi adotado o valor de 0,15 e para α_1 o valor de 0,20.

As escalas integrais no sentido longitudinal (subscrito u) e transversal (subscrito v) são definidas a partir de um parâmetro λ_1 dependente da altura, sendo $L_u = 8,1\lambda_1$ e $L_v = 2,7\lambda_1$. Com isso, os espectros de velocidade são avaliados para cada gôndola, de acordo com a altura das gôndolas, assumindo a forma:

$$S_u(f) = \sigma_u^2 \frac{\left(\frac{4L_u}{V}\right)^{\frac{5}{3}}}{\left(1 + \frac{6fL_u}{V}\right)^{\frac{5}{3}}} \quad \text{Equação (21)}$$

$$S_v(f) = \sigma_v^2 \frac{\left(\frac{4L_v}{V}\right)^{\frac{5}{3}}}{\left(1 + \frac{6fL_v}{V}\right)^{\frac{5}{3}}} \quad \text{Equação (22)}$$

A conversão dos espectros de velocidade em espectros de força é realizada por um ganho aerodinâmico linear dependente do escoamento médio:

$$K_{F,x} = \rho C_x A_x V(y) \quad \text{Equação (23)}$$

$$K_{F,z} = \rho C_z A_z V(y) \quad \text{Equação (24)}$$

resultando em:

$$S_{F,x}(f) = K_{F,x}^2 S_u(f) \quad \text{Equação (25)}$$

$$S_{F,z}(f) = K_{F,z}^2 S_v(f) \quad \text{Equação (26)}$$

Como se trata de uma estrutura com múltiplas gôndolas distribuídas ao longo do raio, incorporou-se a coerência espacial do vento, correlação entre excitações em diferentes alturas. A coerência é modelada por decaimento exponencial em função do afastamento vertical Δ_r e da frequência, sendo computadas matrizes de coerência no sentido longitudinal e transversal do vento (*along* e *across-wind*, respectivamente) e, conseqüentemente, os espectros cruzados de forças entre pares de gôndolas. Esses espectros, auto e cruzados, são então utilizados na análise PSD do modelo MEF por meio da definição de cargas espectrais e covariâncias no próprio *solver* do ANSYS APDL, via análise espectral.

3.2.4 Resposta dinâmica estrutural

A avaliação da resposta estrutural sob ação do vento foi conduzida a partir da decomposição clássica da resposta em parcela média, determinística, e parcela flutuante, estocástica, assumindo o vento turbulento como um processo aleatório aproximadamente estacionário. Essa abordagem está alinhada com a separação entre resposta média e resposta flutuante indicada na NBR 6123 (2023), na qual a resposta flutuante é quantificada por seu desvio-padrão e a estimativa de picos é realizada por meio de um fator de pico. Assim, para qualquer grandeza de interesse r , como deslocamento, aceleração ou tensão equivalente, a resposta de pico é expressa por:

$$r_p = r_m + g_r \cdot \sigma_r \quad \text{Equação (27)}$$

em que r_p é o pico da resposta dinâmica estrutural, r_m é a componente média, seção 3.2.2, σ_r é o desvio-padrão associado à componente turbulenta, seção 3.2.3, e $g_r = \sqrt{2 \ln(v T_{\text{wind}})} + 0,577 / \sqrt{2 \ln(v T_{\text{wind}})}$ é o fator de pico, análogo ao g_y apresentado na NBR 6123 (2023), sendo v a taxa de ciclagem da resposta estrutural (adotada igual à primeira frequência natural do sistema) e T_{wind} o intervalo de tempo no qual o valor máximo é avaliado (adotado como 600 s, correspondente a uma exposição ao vento de 10 minutos).

A parcela média foi obtida por análise estática no modelo em elementos finitos, aplicando-se os carregamentos determinísticos. A solução estática fornece diretamente a resposta média r_m nas grandezas monitoradas.

A parcela flutuante foi determinada por um procedimento espectral, no qual a turbulência do vento é representada por densidades espectrais de potência (PSDs) das flutuações de velocidade nas direções longitudinal e transversal. A partir do carregamento espectral e do modelo dinâmico linear, obtém-se a PSD da resposta e, por integração espectral, calcula-se a variância. Consequentemente, obtém-se o desvio-padrão da resposta.

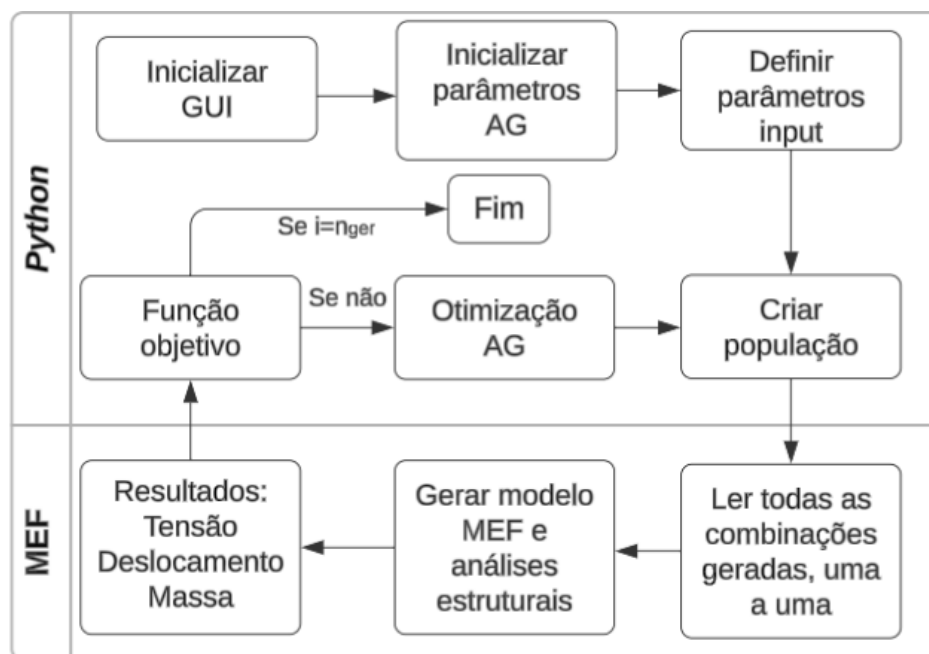
Para a conversão de σ_r em valores de pico, adota-se um fator de pico g_r , utilizado para estimar máximos a partir do desvio-padrão da resposta flutuante. No código computacional, essa etapa é explicitamente tratada por fatores de pico associados às respostas espectrais nas direções ao longo e transversal ao vento, além dos correspondentes indicadores de resposta dinâmica, deslocamentos e acelerações espectrais. Por fim, o pico de resposta dinâmica estrutural utilizado nas verificações é

reconstruída pela soma da componente média r_m com a componente turbulenta amplificada $g_r \cdot \sigma_r$, conforme a Equação 27, garantindo a rastreabilidade entre a análise estática, componente média, e a análise estocástica no domínio da frequência componente turbulenta.

3.4 Modelagem determinística de rodas-gigantes com AG próprio

Na modelagem determinística, foram adotados os procedimentos descritos nas seções 3.2.1 e 3.2.2, contemplando os carregamentos associados às condições de operação e as ações aerodinâmicas incidentes sobre a roda-gigante. Neste estudo, utiliza-se uma ferramenta de Algoritmo Genético (AG) desenvolvida por Colherinhas (2019), com as devidas modificações para aplicação em problemas discretos, adaptada para ser executada no ambiente Python. Essa adaptação, foi essencial para a criação de um fluxo de trabalho eficiente, que possibilita a interação simultânea entre o Python e o programa de elementos finitos (MEF), ANSYS, por meio da linguagem PyMAPDL no próprio Python, com simulações automatizadas, Figura 22.

Figura 22 – Fluxograma da implementação do AG.

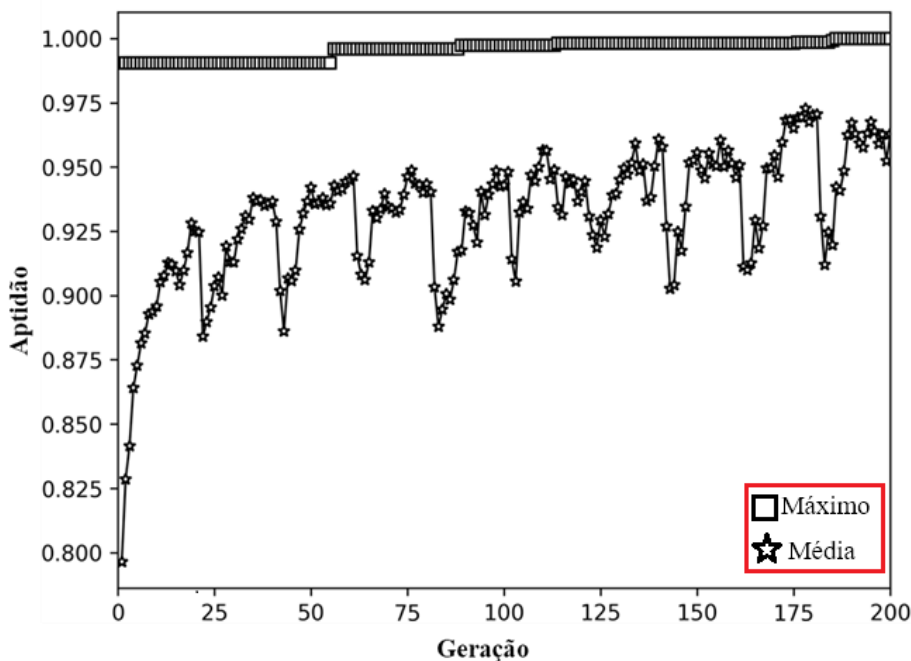


Fonte: Autor.

A adaptação do Algoritmo Genético (AG) ao Python foi bem-sucedida, permitindo uma integração eficiente com o Ansys para a realização de otimizações e simulações da roda gigante. O processo de otimização ao longo das gerações é ilustrado

na Figura 23, nessa configuração de otimização com 200 gerações a convergência foi alcançada próximo a geração 175, é possível visualizar a evolução dos resultados em cada iteração do algoritmo.

Figura 23 – Processo de otimização.



Fonte: Autor

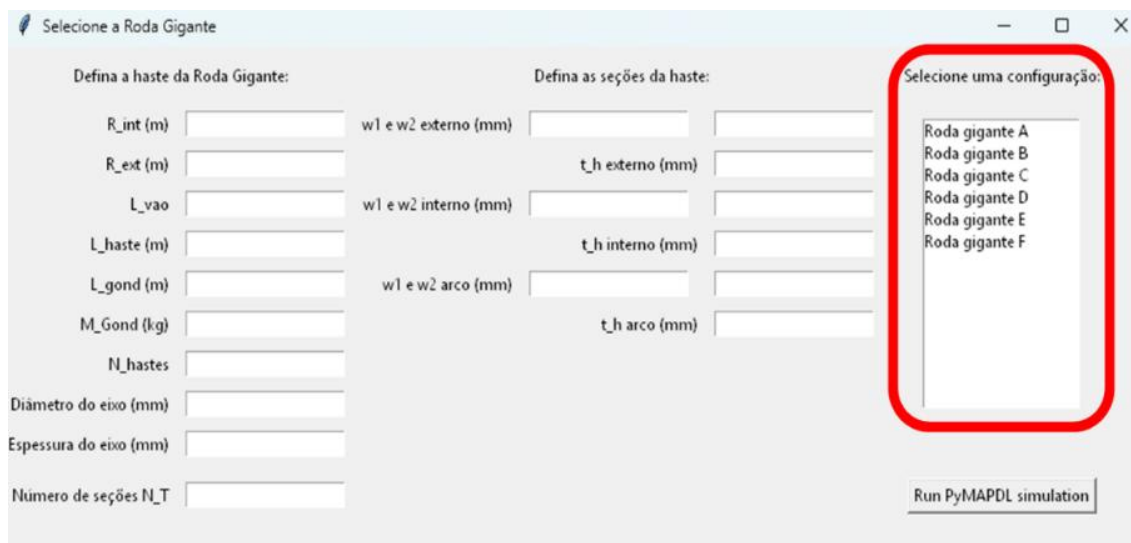
A aptidão, definida na Equação 28, é calculada pela razão entre o fator de segurança e a massa estrutural, esta última elevada a um expoente de ponderação. No gráfico, apresenta-se a aptidão normalizada dos melhores indivíduos em cada geração. Essa implementação não só garante a interação fluida entre o Python e o Ansys, mas também possibilita a implementação de um fluxo de trabalho automatizado. Assim, o processo de execução das otimizações e simulações é simplificado, permitindo que o algoritmo seja executado de forma contínua e sem interrupções, o que agiliza a análise de múltiplas possíveis soluções da otimização, as configurações da estrutura da roda gigante.

$$fit = \frac{FS}{m^{p_{massa}}} = \frac{\frac{\sigma_e}{\sigma_{m\acute{a}x}}}{m^{p_{massa}}} \quad \text{Equação (28)}$$

Além disso, foi desenvolvida uma interface gráfica (GUI), Figura 24, que facilita o estudo de casos de otimização. A interface gráfica, permite a inserção de maneira ágil e intuitiva das dimensões da roda gigante a serem avaliadas, tornando o processo de configuração e análise mais acessível e eficiente. Além disso, a GUI tem uma função que permite salvar configurações de rodas gigantes pré-definidas, exibidas na lateral direita

da interface destacada em vermelho, essa funcionalidade apresenta um valor significativo no estudo da análise dinâmica, pois possibilita o armazenamento das seis configurações estudadas na análise dinâmica. Isso permite a alternância rápida entre as diferentes configurações com apenas um clique, facilitando a comparação e a avaliação das diversas soluções.

Figura 24 – Interface gráfica (GUI)



Fonte: Autor.

3.4.1 Modelo próprio de algoritmo genético

Inicialmente são definidos os parâmetros do AG, que controlam o comportamento e a execução do processo de otimização. Esses parâmetros incluem:

- N_{ger} : quantidade de gerações a serem executadas na otimização. Esse parâmetro define o número máximo de iterações do algoritmo;
- N_{ind} : quantidade de indivíduos presentes em cada geração, controla o tamanho da população, influenciando a diversidade genética e a capacidade de explorar o espaço de soluções;
- N_{diz} : número de gerações após o qual a dizimação será aplicada;
- p_{diz} : porcentagem de indivíduos da população que serão dizimados a cada evento de dizimação, controla o grau de eliminação e, conseqüentemente, a pressão seletiva aplicada sobre a população;
- p_{elit} : porcentagem de indivíduos da população que são preservados para a geração seguinte, garantindo a preservação das melhores soluções;

- p_{mut} : probabilidade de mutação aleatória dos genes dos indivíduos, responsável pela frequência com que os genes sofrerão alterações aleatórias, promovendo a diversificação genética;
- p_c : probabilidade de cruzamento entre os indivíduos, controla a taxa de recombinação genética, que permite a troca de informações entre os pais para gerar novos descendentes.

O algoritmo genético segue com o processo de seleção, neste estudo utiliza-se o método da “Roleta” (*Roulette-Wheel*). Em seguida, aplica-se o elitismo mantendo os indivíduos mais aptos para a próxima geração.

Após essa etapa, realizam-se as operações de cruzamento e mutação para a formação do restante da nova geração. A mutação ocorre quando a probabilidade de mutação é inferior a um valor aleatório gerado. O cruzamento, por sua vez, é realizado quando a probabilidade de cruzamento é maior que outro valor aleatório, distinto do utilizado para a mutação. No código, o usuário pode escolher entre três métodos de cruzamento: o *Blend Crossover* (BLX- α), o *One-Point Crossover* e o *Two-Point Crossover*, dependendo das características específicas do problema de otimização.

O crossover BLX e a mutação, implementados por Colherinhas (2019), foram projetados para problemas contínuos com ponto flutuante, sendo altamente eficazes na otimização de variáveis reais. No entanto, dado que o problema principal nessa dissertação, a otimização da roda gigante com valores da seção padronizados pela indústria, é discreto, foi necessário realizar uma adaptação para garantir que o algoritmo fosse compatível com esse tipo de representação. Essa adaptação consiste na aplicação de um processo de arredondamento dos valores gerados durante as etapas de cruzamento e mutação dos cromossomos, de modo a evitar valores de ponto flutuante nas gerações de novos indivíduos, assegurando que os cromossomos gerados permaneçam dentro do conjunto de valores discretos permitidos, o que é essencial para garantir a validade das soluções no contexto de problemas discretos. Os métodos *One-Point* e *Two-Point*, que foram concebidos para problemas discretos, não necessitam de adaptação, uma vez que operam diretamente sobre valores discretos, garantindo que os cromossomos gerados durante o cruzamento permaneçam dentro do conjunto finito de possibilidades definidas para o problema.

Após a etapa de crossover, o procedimento segue para a fase de criação de uma nova população. Nessa fase, a função responsável pela geração de novos indivíduos escolhe aleatoriamente valores do vetor de cromossomos. Esses valores selecionados

formam um conjunto inicial de soluções, que constitui a nova população para a próxima geração. O processo de seleção aleatória garante que a população seja renovada com uma combinação de soluções previamente exploradas e novas soluções geradas, promovendo a diversificação genética e permitindo o algoritmo explorar amplamente o espaço de soluções.

Após a execução das operações evolutivas e a dizimação, a população de cromossomos é atualizada. Para cada cromossomo, a nova solução é obtida a partir dos índices que indicam as escolhas de cromossomos na população de acordo com os limites definidos. A atualização da população envolve a seleção de indivíduos com base em suas aptidões, preservando os melhores e permitindo que as novas soluções geradas sejam incorporadas à população.

A cada geração, o indivíduo com a maior nota de aptidão (*fitness*) da população é identificado, sendo armazenado na matriz chamada *fittest*, ao final da otimização essa matriz apresenta o número de indivíduos igual ao número de gerações. A nota de aptidão é calculada pela razão entre o fator de segurança e a massa total da estrutura. Adicionalmente, aplicasse um fator de ponderação associado à massa, de modo a ajustar a penalização de soluções mais pesadas e direcionar o processo de otimização para alternativas estruturalmente seguras e, simultaneamente, mais leves. As informações associadas ao melhor indivíduo são registradas de maneira detalhada, incluindo a nota do cromossomo, que reflete sua aptidão relativa, o deslocamento máximo, a massa, a tensão máxima de cada solução ótima encontrada na otimização. Sendo fundamental para o monitoramento do progresso da otimização ao longo das gerações, permitindo que o algoritmo acompanhe a evolução da qualidade das soluções.

3.4.2 Roteiro de otimizações

Inicialmente, são selecionados os parâmetros para as primeiras otimizações, cujos valores, apresentados na Tabela 1, são definidos com base na literatura e verificados. As primeiras otimizações possuem como objetivo principal determinar o tipo de cruzamento que será utilizado nas otimizações subsequentes. Assim, avalia-se qual o tipo de cruzamento apresenta melhor variabilidade genética e resultados de otimização, considerando a aptidão das soluções geradas, além disso é considerado o grau de dificuldade de implementação de cada tipo de cruzamento. Para cada tipo de cruzamento, *BLX- α* , *One Point* e *Two Point*, são realizadas três otimizações. A quantidade de divisões

do pórtico radial na roda gigante é variada entre três e quatro divisões, totalizando assim, dezoito otimizações efetuadas, permitindo uma comparação detalhada entre os diferentes tipos de cruzamento.

Tabela 1 – Parâmetros das otimizações iniciais.

| Entradas do AG | | | | | | |
|----------------|-----------|-----------|-----------|------------|-------|-------|
| N_{ger} | N_{ind} | N_{diz} | P_{diz} | P_{elit} | P_m | P_c |
| 200 | 200 | 20 | 0,2 | 0,02 | 0,05 | 0,70 |

Fonte: Autor.

Após a seleção do tipo de cruzamento e, se necessário, ajustes em algum parâmetro do AG, são realizadas dez otimizações para cada configuração a seguir:

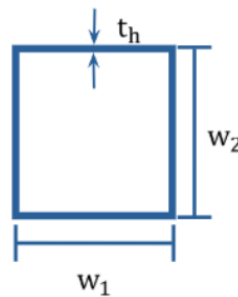
- Número de divisões do pórtico radial = 3 & Peso da massa = 1;
- Número de divisões do pórtico radial = 3 & Peso da massa = 5;
- Número de divisões do pórtico radial = 4 & Peso da massa = 1;
- Número de divisões do pórtico radial = 4 & Peso da massa = 5.

A alteração do peso da massa na função aptidão busca observar como a priorização da massa em relação ao fator de segurança afeta a otimização estrutural.

Os parâmetros, otimizados neste estudo, são as seções transversais dos tubos de aço, podendo ser quadradas ou retangulares. A análise das três seções transversais permite que a otimização seja efetuada de maneira específica para cada componente, de acordo com as características e exigências de desempenho de cada parte da estrutura. O estudo busca otimizar a distribuição dos materiais e as dimensões dessas seções transversais para garantir uma solução estrutural que maximize a eficiência material, rigidez e segurança, ao mesmo tempo que atende aos critérios de projeto definidos.

Na Figura 25, é representado a seção transversal com as dimensões a serem otimizadas durante o processo. As dimensões otimizadas, a largura (w_1), a altura (w_2) e espessura (t_h) são os parâmetros fundamentais para a definição da geometria transversal. Para este estudo, seleciona-se as dimensões específicas das seções transversais, avaliadas ao longo do processo de otimização. As espessuras (t_h) variam entre os seguintes valores discretos em milímetros: [2,00; 2,25; 2,65; 3,00; 3,35; 3,75; 4,25; 4,50; 4,75; 6,30]. As dimensões da largura (w_1) e altura (w_2) são variadas entre os seguintes valores discretos em milímetros: [30; 40; 50; 60; 70; 80]. Dessa forma, a combinação desses vetores forma o espaço de busca discretizado, no qual algoritmo genético explorará ajustando as variáveis de largura, altura e espessura nas três seções transversais para encontrar a solução ótima.

Figura 25 – Seção transversal dos tubos de aço.

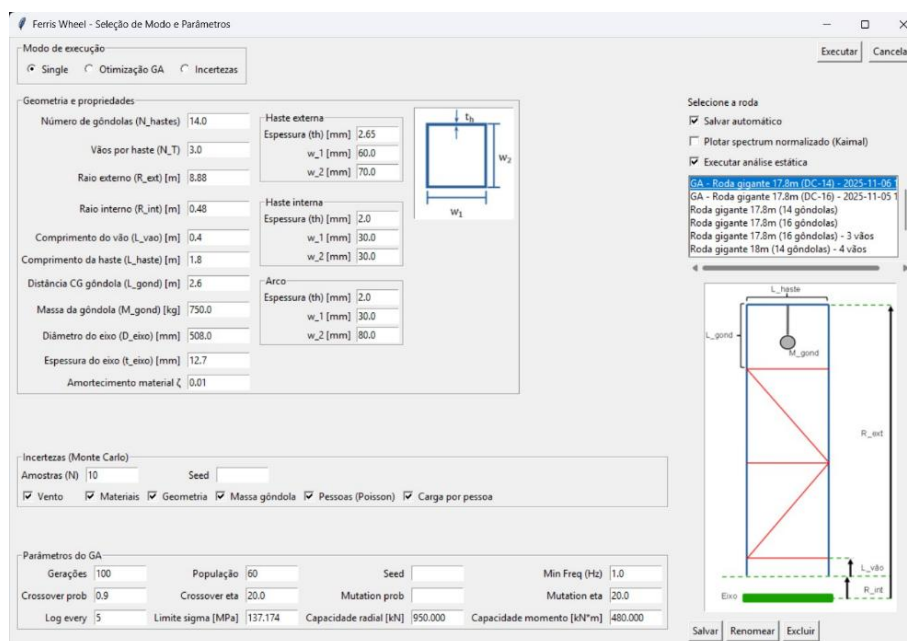


Fonte: Autor.

3.5 Modelagem PBWE e avaliação de desempenho por Monte Carlo

A interface gráfica, Figura 26, centraliza a configuração e a execução das análises da roda gigante, permitindo ao usuário escolher o modo de operação, análise única, otimização por algoritmo genético ou simulações de incertezas via Monte Carlo, possibilita definir a geometria global e as seções estruturais, selecionar modelos previamente salvos e controlar opções de saída como salvar automaticamente e executar análise estática. Além disso, disponibiliza campos para parâmetros do algoritmo genético e limites de projeto, apresenta um esquema visual para conferência dimensional e inclui funções de gestão de casos, como salvar, renomear e excluir, facilitando a organização e a reprodutibilidade dos estudos.

Figura 26 – Interface gráfica (GUI)



Fonte: Autor.

Na modelagem probabilística, foram adotados os procedimentos descritos nas seções de 3.2.1 a 3.2.4, contemplando os carregamentos associados às condições de operação e as ações aerodinâmicas incidentes sobre a roda-gigante. Neste segundo método, o Algoritmo Genético (AG) desenvolvido internamente foi substituído pela biblioteca *PyMoo*. A integração com o *PyMoo* foi estruturada para tratar um problema de otimização discreto associado à seleção de seções comerciais e parâmetros geométricos do modelo numérico da roda-gigante, permitindo explorar, de forma automatizada, combinações de projeto sob restrições estruturais e de desempenho. Essa substituição deve-se, principalmente, à maior flexibilidade e à facilidade de implementação de restrições que a estrutura do *PyMoo* oferece ao usuário, tanto na definição de limites e desigualdades quanto na gestão de penalizações e estratégias de viabilidade. Nesta etapa, alguns parâmetros do procedimento de otimização foram ajustados, a velocidade do vento é adotada como constante, igual a 10 m/s, as modificações adotadas encontram-se sintetizadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros definidos para o *PyMoo*.

| N_{ger} | N_{ind} | P_{elit} | P_m | P_c |
|------------------------|------------------------|-------------------------|----------------------|----------------------|
| 100 | 60 | 0,02 | 1/n _{var} | 0,90 |

Fonte: Autor.

As restrições consideradas no problema de otimização, implementadas no *PyMoo*, foram definidas para assegurar simultaneamente resistência, desempenho dinâmico, conforto humano e compatibilidade com limites de componentes comerciais. Em termos de resistência, impôs-se que a tensão equivalente máxima (Von Mises) permanecesse abaixo de $\sigma_{adm} = 137$ MPa. Esse valor foi definido a partir do limite de escoamento do aço ASTM A36 ($f_y = 250$ MPa) e aplicando fatores parciais conforme a BS EN 13814 (2004), resultando em $\sigma_{adm} = f_y / (1,35 \cdot 1,35)$.

Além disso, para evitar configurações excessivamente flexíveis e susceptíveis a respostas ressonantes sob excitação eólica, foi exigido que a frequência modal dominante atendesse $f_{min} \geq 1,0$ Hz. No controle de serviço sob vento, adotou-se como variável de desempenho o pico de resposta dinâmica estrutural r_p , definido como o deslocamento máximo da estrutura nas direções longitudinal e transversal ao vento. Para manter a resposta compatível com níveis aceitáveis de movimentação e vibração percebida, impôs-se que o pico na direção longitudinal satisfizesse $r_{p,\parallel}^{max} \leq 0,4\%$ do raio externo da roda, enquanto o pico na direção transversal satisfizesse $r_{p,\perp}^{max} \leq 4\%$ do mesmo raio externo.

Essa parametrização percentual permite que o limite escale naturalmente com o porte geométrico da roda-gigante e restringe respostas excessivas que poderiam comprometer a operação e a percepção dos ocupantes.

O conforto humano foi tratado por meio da aceleração ponderada total $a_{w,tot}$, com a restrição $a_{w,tot}^{max} \leq 0,945 \text{ m/s}^2$. Esse limiar foi estabelecido a partir das faixas indicativas do Anexo C da ISO 2631-1, em que $0,315 \text{ m/s}^2$ é associado a condição não desconfortável. Logo, adotou-se um critério último conservador equivalente a três vezes superior para limitar soluções, pois, embora estruturalmente seguras, apresentem vibrações com potencial de desconforto. Esse critério foi adotado com base em uma velocidade média de vento de 10 m/s, valor superior às condições usuais observadas em operação normal. Tal escolha visa incorporar uma margem de segurança, considerando que velocidades superiores tendem a ocorrer apenas em situações excepcionais, como eventos extremos ou desastres naturais.

Por fim, as restrições associadas ao mancal foram impostas para garantir compatibilidade com o componente selecionado em catálogo. Em particular, a reação radial máxima no mancal foi limitada a $R_b^{max} \leq 0,95 \text{ MN}$ e o momento de tombamento máximo foi limitado a $M_b^{max} \leq 0,48 \text{ MN}\cdot\text{pm}$, valores extraídos do catálogo do fabricante para a coroa de orientação VU360680 de contato em quatro pontos, sem dentes, da Schaeffler (INA). Essas restrições conectam diretamente o processo de otimização a uma solução realizável do ponto de vista de projeto mecânico, evitando configurações que excedam a capacidade do conjunto de apoio e orientação.

A metodologia incluiu, de forma deliberada, a obtenção de um projeto ótimo determinístico por meio do algoritmo genético, associado a um caso de projeto com premissas operacionais específicas. O caso analisado corresponde à configuração com 14 gôndolas, DC 14. Buscou-se o conjunto de seções que simultaneamente minimiza a massa total e atende às restrições de tensão admissível, frequência mínima, limites de deslocamento relativo ao longo e transversal ao vento e conforto segundo a ISO 2631 (1997), e capacidade nos mancais, força radial e momento. Essa configuração foi adotada como referência para as etapas subsequentes de avaliação, permitindo analisar o atendimento aos critérios de desempenho e as implicações do ótimo obtido em termos de rigidez, conforto e esforços nos apoios.

O projeto ótimo determinístico foi tratado como referência para a etapa probabilística. Ao adotar a configuração DC 14, assegura-se que a avaliação de incertezas

incida sobre uma solução já eficiente em termos de massa e viável quanto às restrições adotadas. Com o ótimo definido, realizou-se uma campanha de simulações de Monte Carlo, propagando incertezas relacionadas a carregamentos, interação aero estrutural e parâmetros estruturais. As variáveis aleatórias foram agrupadas em medidas de intensidade (IM), parâmetros de interação (IP) e parâmetros estruturais (SP), adotando-se distribuições probabilísticas compatíveis com a variabilidade física de cada grandeza (por exemplo, *Weibull*, normal, lognormal e *Poisson*), com referência nos valores médios do modelo determinístico. Em consonância com a estrutura PBWE, as IM representam a excitação ambiental e operacional, como variações de velocidade e direção do vento e demanda de passageiros, as IP modelam fatores que influenciam a transferência de carregamentos, como amortecimento estrutural e massas das gôndolas, e as SP descrevem dispersões mecânicas e geométricas, como módulo de elasticidade, densidade e variações dimensionais. Os resultados foram pós-processados por meio de histogramas e funções de distribuição acumulada complementar (CCDF), permitindo quantificar probabilidades de excedência associadas à massa, tensões, deslocamentos, conforto e reações.

No domínio probabilístico, a análise baseou-se em CCDFs e histogramas, priorizando indicadores diretamente associados à operação, conforto e deslocamentos, e à integridade mecânica, tensões e reações. Essa estrutura permite concluir não apenas qual alternativa é mais leve, mas também qual apresenta maior robustez frente às incertezas inerentes ao vento e à ocupação, subsidiando a escolha entre configurações operacionais.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Inicialmente, procede-se à avaliação comparativa da massa total, da tensão máxima e do deslocamento máximo da estrutura, considerando-se os dois casos extremos de dimensionamento das seções transversais, as configurações com as maiores e as menores dimensões adotadas, Tabela 3.

Tabela 3 - Resultados para os dimensionamentos extremos.

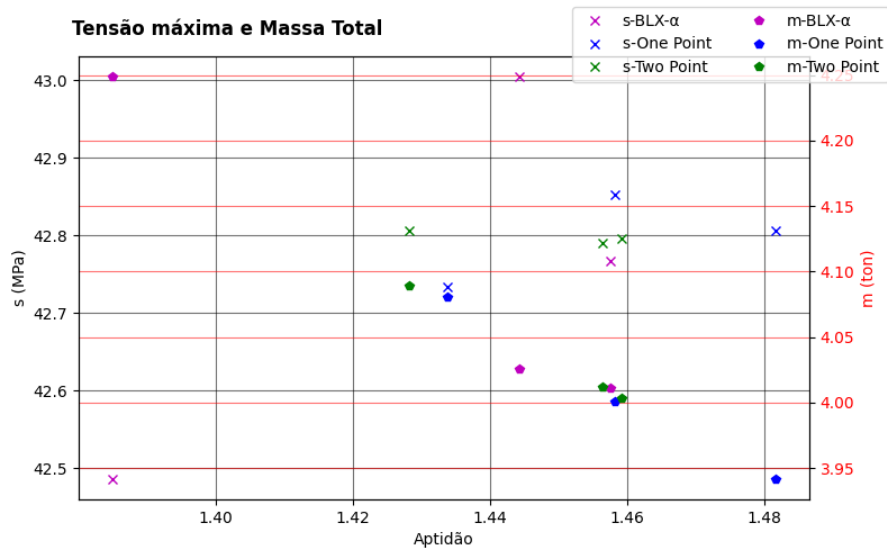
| Config. | Externo [mm] | Interno [mm] | Aro [mm] | $\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa) | M Total (ton) | M apenas estrutura (ton) |
|---------------------------|--------------|--------------|------------|------------------------------|---------------|--------------------------|
| Maiores dimensões, 3 vãos | 6,30;80;80 | 6,30;80;80 | 6,30;80;80 | 27,12 | 22,77 | 10,77 |
| Maiores dimensões, 4 vãos | 6,30;80;80 | 6,30;80;80 | 6,30;80;80 | 26,93 | 23,62 | 11,62 |
| Menores dimensões, 3 vãos | 2,0;30;30 | 2,0;30;30 | 2,0;30;30 | 66,71 | 14,50 | 2,50 |
| Menores dimensões, 4 vãos | 2,0;30;30 | 2,0;30;30 | 2,0;30;30 | 65,99 | 14,60 | 2,60 |

Fonte: Autor.

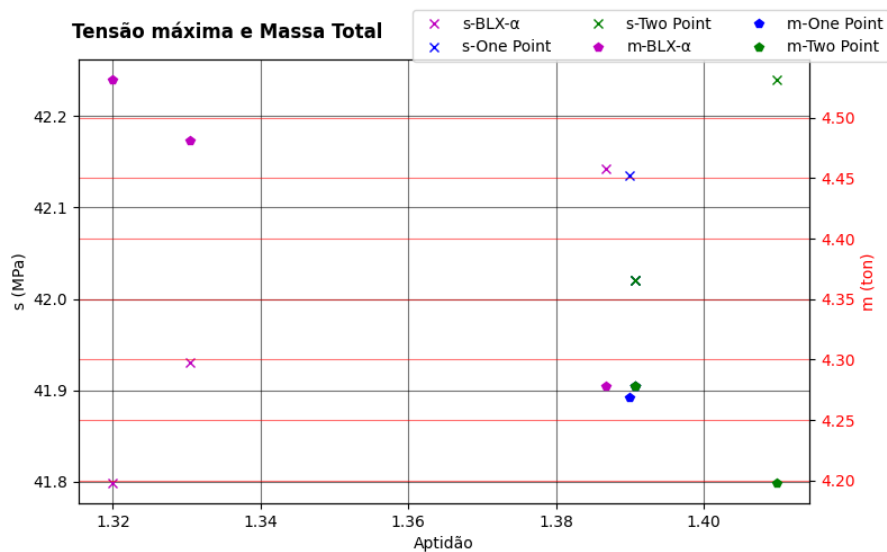
Dessa forma, torna-se possível verificar se a otimização por Algoritmos Genéticos (AG) é efetiva na minimização da massa estrutural, sem comprometer os níveis admissíveis de tensão equivalente de Von Mises, assegurando, assim, a integridade estrutural da roda-gigante.

4.1 Análise dos tipos de cruzamento

São analisados os resultados das otimizações para os três tipos de cruzamento, *BLX- α* , *One Point* e *Two Point*. Considerando os resultados da tensão máxima, a massa total da estrutura. As massas das gôndolas são constantes independente da configuração da roda gigante, e a aptidão dos indivíduos selecionados, conforme Figuras 27 e 28. Os marcadores de formato x representam a tensão máxima de cada tipo de cruzamento. Enquanto os marcadores de formato pentagonal representam a massa total da roda gigante.

Figura 27 – Análise tipos de cruzamento, $N_T = 3$.

Fonte: Autor.

Figura 28 – Análise tipos de cruzamento, $N_T = 4$.

Fonte: Autor.

Nota-se que o crossover BLX- α , em geral, apresenta indivíduos com a menor aptidão em comparação com os outros tipos de cruzamento. Esse comportamento pode ser uma consequência da adaptação efetuada para aplicar esse método em problemas discretos, visto que inicialmente o crossover BLX- α foi proposto para problemas contínuos de ponto flutuantes.

Os cruzamentos One Point e Two Point, apresentaram resultados bastante semelhantes, com diferenças mais sutis na qualidade das soluções geradas. Na configuração de pórtico radial com três divisões, Figura 27, o indivíduo com a melhor

aptidão foi gerado na otimização que aplicava a técnica de cruzamento One Point. Por outro lado, na configuração de pórtico radial com quatro divisões, Figura 28, o indivíduo mais apto surgiu da otimização que aplicava o método de cruzamento Two Point. Com base nesses resultados, na proximidade dos valores obtidos pelas técnicas One Point e Two Point, optou-se por fixar o tipo de cruzamento em One Point, priorizando um operador mais simples e amplamente consolidado na literatura de algoritmos genéticos, sem prejuízo significativo da qualidade das soluções.

4.2 Análise determinística com AG próprio

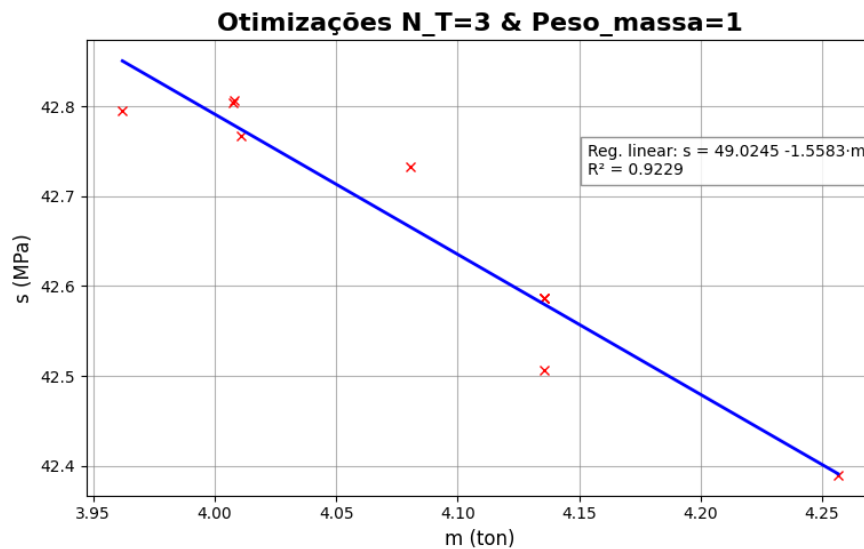
Os parâmetros fixados no AG estão apresentados na Tabela 4. Além da definição do cruzamento como One Point, o número de gerações foi alterado para 300. Notou-se que, em algumas otimizações, ocorreu mudança no melhor indivíduo nas gerações próximas de 200, surgiu configurações de roda-gigante com uma aptidão maior que as demais configurações anteriormente. Assim, ao ampliar o número de gerações permite uma exploração mais ampla do espaço de soluções e diminui a probabilidade de convergência prematura, o que possibilita mais oportunidades ao algoritmo de encontrar soluções melhores e evite ficar preso em ótimos locais.

Tabela 4 – Parâmetros definidos para o AG.

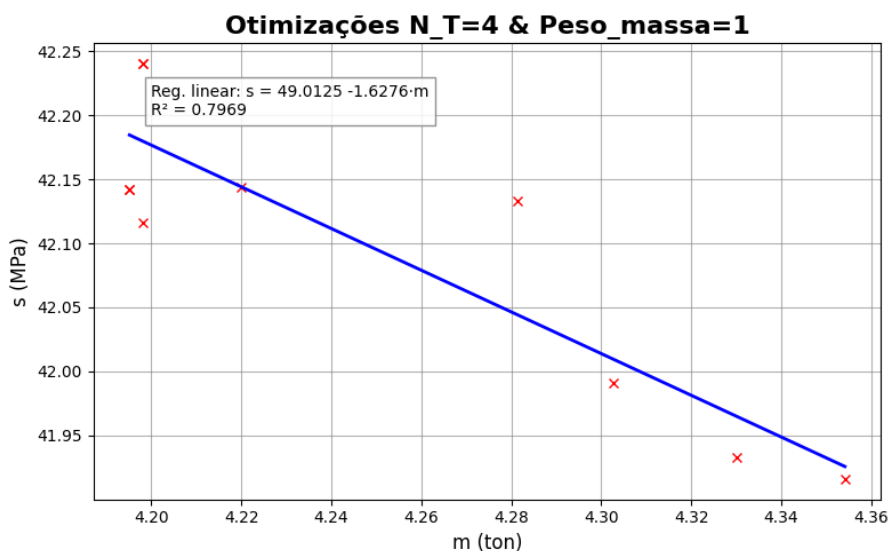
| Entradas do AG | | | | | | | |
|----------------|-----------|-----------|-----------|------------|-------|-------|------------|
| N_{ger} | N_{ind} | N_{diz} | p_{diz} | p_{elit} | p_m | p_c | Cruzamento |
| 300 | 200 | 20 | 0,2 | 0,02 | 0,05 | 0,70 | One Point |

Fonte: Autor.

São realizadas novas otimizações, com um total de dez otimizações para cada combinação, cada combinação conforme definida na seção 3.3 Roteiro de Otimizações, com o intuito de avaliar as diferenças nos resultados ao alterar o peso da massa no cálculo da função de aptidão, bem como comparar pórticos radiais com três ou quatro treliças verificando qual das configurações proporciona a melhor solução em termos de eficiência estrutural e custo material. Assim, essa análise permite verificar a influência de cada um desses parâmetros nas soluções encontradas pelo algoritmo genético, garantindo que o impacto das variáveis seja devidamente avaliado e compreendido. A seguir, são apresentados os resultados dessas otimizações, que fornecerão informações detalhadas sobre o comportamento da estrutura sob diferentes condições de projeto.

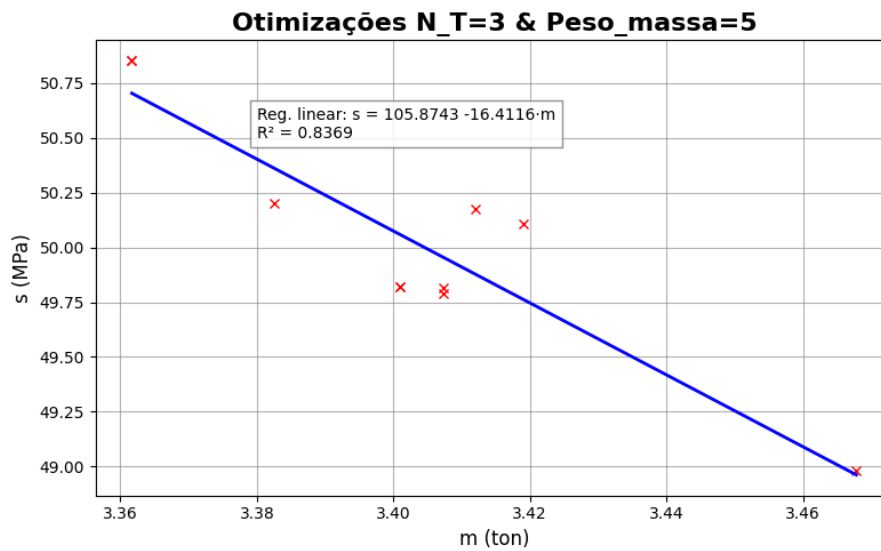
Figura 29 – Resultados otimização, $N_T = 3$ & $p_m = 1$.

Fonte: Autor.

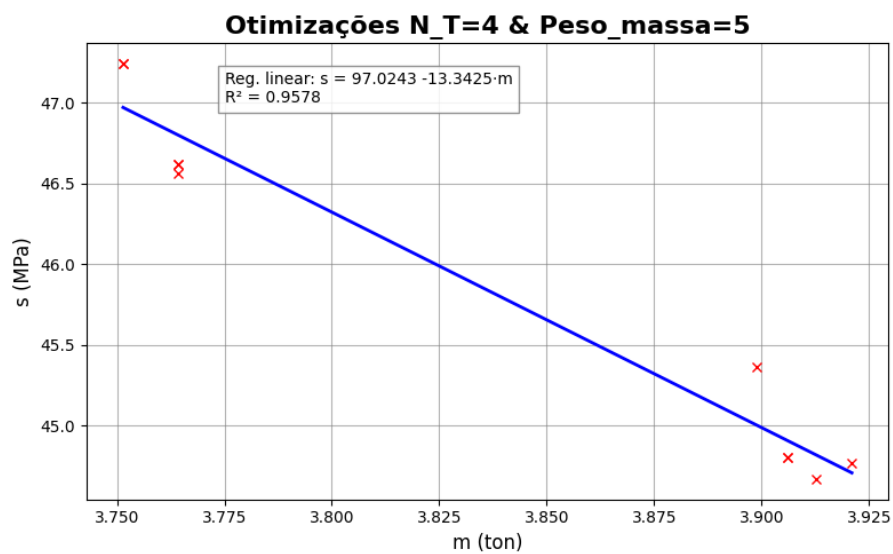
Figura 30 – Resultados otimização, $N_T = 4$ & $p_m = 1$.

Fonte: Autor.

Ao analisar as otimizações com o peso da massa igual a 1, nota-se que a tensão máxima tende a ser inversamente proporcional a massa, apresentando um coeficiente de correlação negativo, com valor superior a 95% nas configurações que utilizam pórtico radial com três divisões, e próximo de 90% na configuração com pórtico radial de quatro divisões. Assim, à medida que uma roda gigante apresente uma massa total maior, conseqüentemente apresentará uma tensão máxima menor, evidenciando a importância de balancear esses dois parâmetros durante o processo de otimização para alcançar a melhor solução estrutural.

Figura 31 – Resultados otimização, $N_T = 3$ & $p_m = 5$.

Fonte: Autor.

Figura 32 – Resultados otimização, $N_T = 4$ & $p_m = 5$.

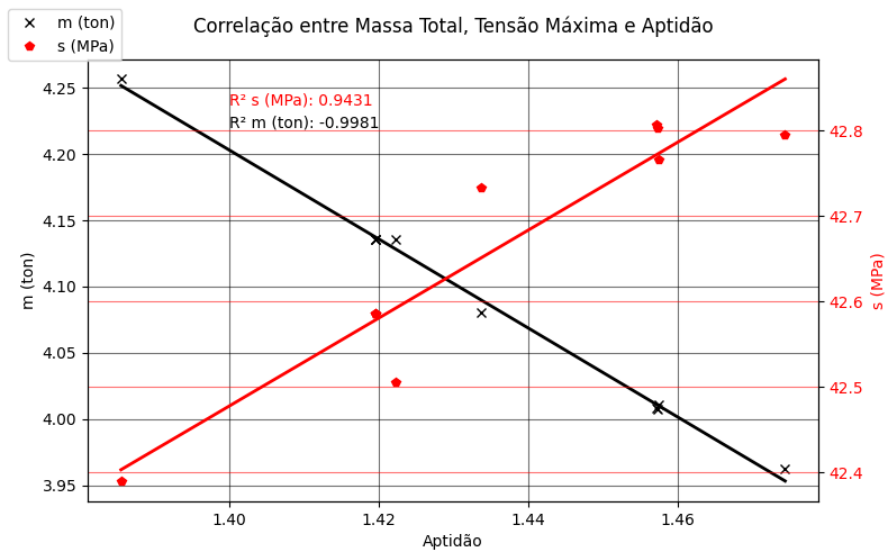
Fonte: Autor.

Ao analisar as otimizações conduzidas com peso da massa igual a cinco, observam-se tendências coerentes com aquelas identificadas na configuração anterior (peso unitário). Todavia, destaca-se uma alteração significativa na sensibilidade estrutural do sistema. Verifica-se que o coeficiente angular da regressão linear, que expressa a taxa de variação da resposta estrutural em função da massa, apresentou incremento superior a oito vezes quando comparado ao caso com peso da massa igual a um. Esse resultado indica que, ao se intensificar a penalização associada à massa na função objetivo, o

modelo passa a responder de forma mais pronunciada às variações desse parâmetro, ampliando a inclinação da reta de ajuste.

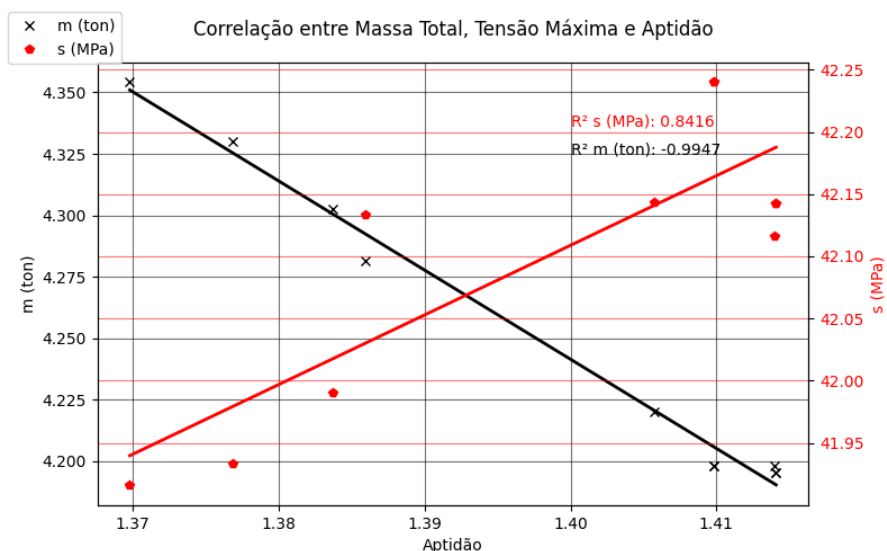
Com a finalidade de identificar de maneira mais clara e explícita essa relação entre a massa total e a tensão máxima são gerados gráficos, Figura 33 a 34, desses parâmetros em eixos Y diferentes e no eixo X a aptidão do indivíduo.

Figura 33 – Correlação para $N_T = 3$ & $p_m = 1$.



Fonte: Autor.

Figura 34 – Correlação para $N_T = 4$ & $p_m = 1$.

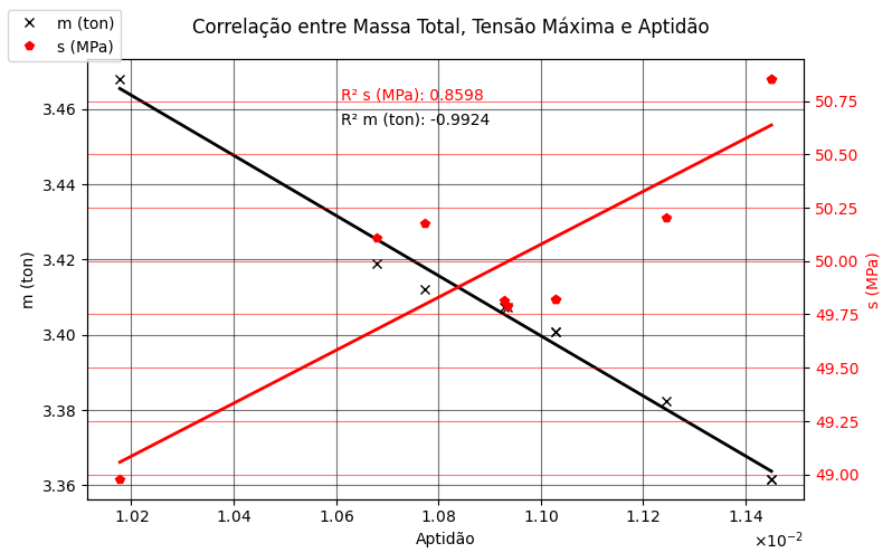


Fonte: Autor.

Ao analisar os gráficos das otimizações com o peso da massa igual a um, Figura 33 e 34, nota-se que uma otimização da configuração de pórtico radial com três divisões apresenta uma nota de aptidão inferior a 1,40, enquanto duas otimizações da configuração

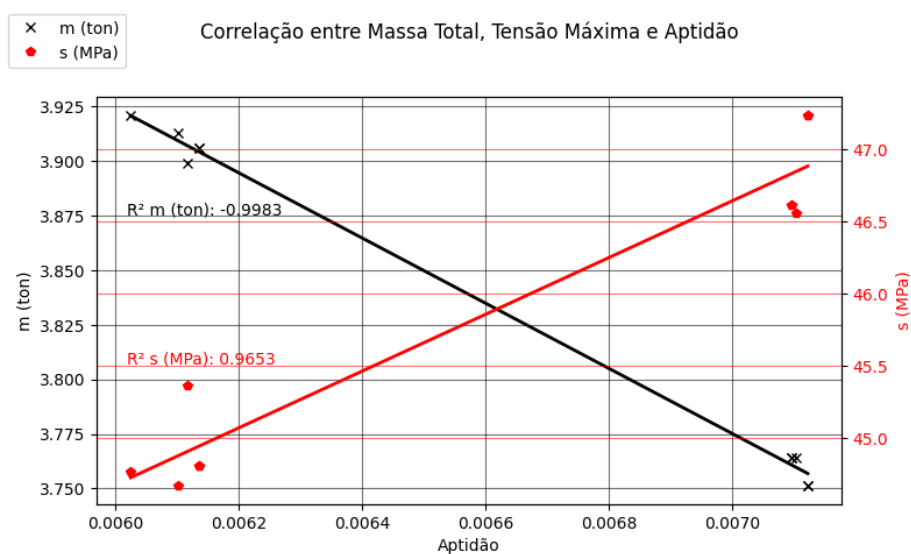
de pórtico radial com quatro divisões obtiveram aptidões superior a 1,40. Esse resultado mostra um ponto destoante, visto que era esperado das rodas gigantes que utilizam pórtico radial com três divisões menores massas e consequentemente uma maior aptidão quando comparadas com a outra configuração de roda gigante. Assim, nota-se que mesmo as configurações com quatro divisões podem em alguns casos apresentarem uma aptidão superior a configuração de três divisões.

Figura 35 – Correlação para $N_T = 3$ & $p_m = 5$.



Fonte: Autor.

Figura 36 – Correlação para $N_T = 4$ & $p_m = 5$.



Fonte: Autor.

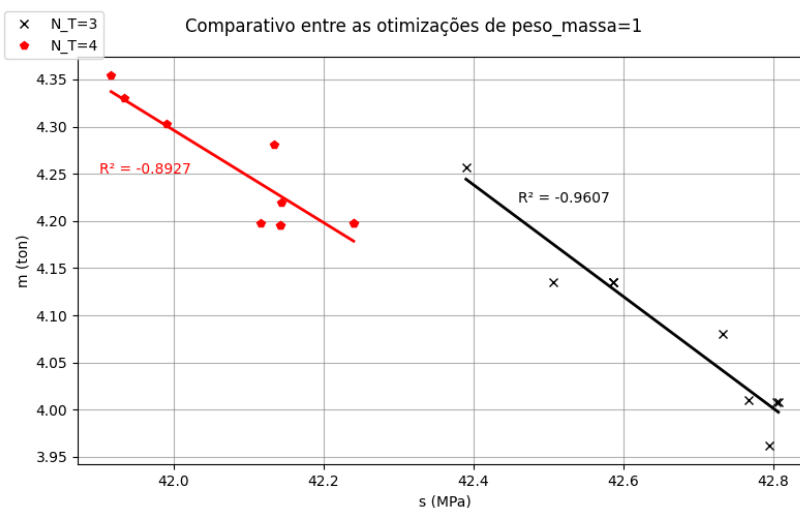
No comparativo das duas configurações de pórtico radial, porém agora o peso da massa igual a cinco, Figuras 35 e 36, é possível observar que não há uma intersecção nos

valores de aptidões das otimizações entre configurações diferentes e que os valores de aptidão das otimizações dos pórticos radiais com três divisões apresentaram maior aptidão conforme esperado pelo cálculo da nota de aptidão dos indivíduos.

No geral observa-se nos gráficos tendências interessantes sobre o comportamento das soluções. É possível observar que a aptidão tende a ser mais elevada quando a tensão máxima é maior, por outro lado a aptidão aumenta quando a massa total da roda gigante diminui. As correlações da massa total e da tensão máxima em relação a aptidão são superiores a 80%, sendo a correlação da massa total com a aptidão negativa e a correlação da tensão máxima com a aptidão positiva.

Com a finalidade de comparar as otimizações entre si, são analisadas as otimizações com o mesmo peso da massa para as duas configurações de pórticos radiais, com três e quatro divisões, conforme apresentado nas Figuras 37 e 38. Essas comparações permitem avaliar as diferenças no desempenho estrutural das duas configurações, levando em consideração a massa total e a tensão máxima. Além disso, também são comparados os resultados para cada configuração de pórtico radial, considerando dois valores distintos para o peso da massa: 1 e 5, conforme ilustrado nas Figuras 39 e 40. Essa análise possibilita avaliar como o aumento do peso da massa na otimização impacta positivamente na redução global da massa, penalizando as tensões associadas.

Figura 37 – Comparativo configurações do pórtico radial, peso da massa igual a 1.

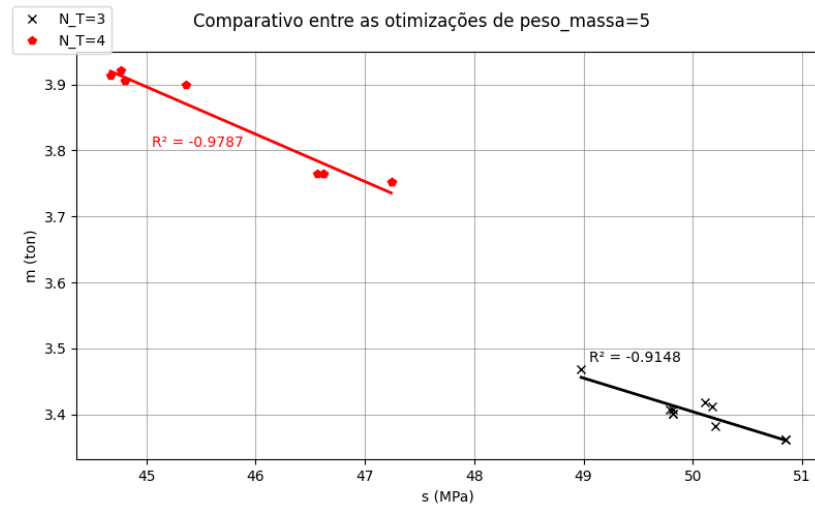


Fonte: Autor

Ao analisar a Figura 37 observa-se que os resultados das duas configurações de pórtico radial apresentam uma interseção. Na configuração com pórtico radial de três divisões, uma das otimizações apresentou uma massa superior a outras otimizações com

configuração de pórtico radial de quatro divisões. No entanto, de forma geral, a configuração de rodas gigantes com pórtico radial de três divisões tende a apresentar menores massas e maiores tensões máximas.

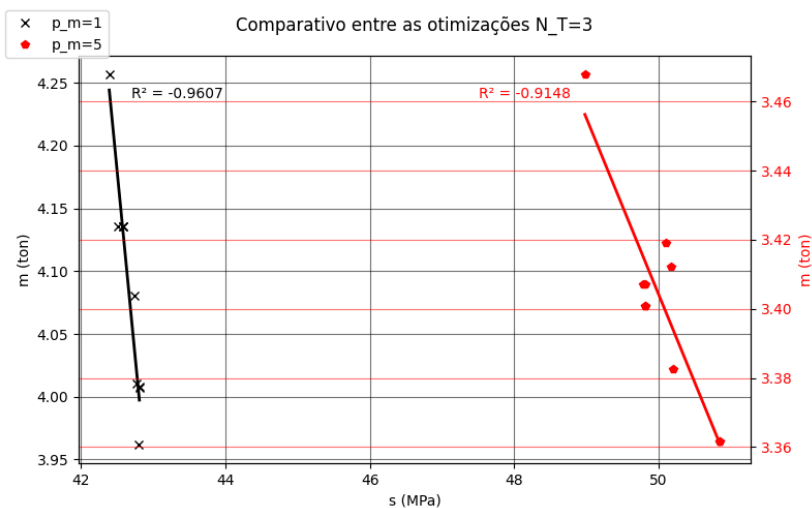
Figura 38 – Comparativo configurações do pórtico radial, peso da massa igual a 5.



Fonte: Autor.

No comparativo das duas configurações de pórtico radial utilizando peso da massa igual a cinco, Figura 38, observa-se que a diferença entre os valores das configurações com três ou quatro divisões é ampliada, quando comparado ao estudo realizado com o peso da massa igual a um, sendo possível notar uma distância maior entre as otimizações no eixo X, a tensão máxima, e no eixo Y, a massa total da roda gigante. Assim, não há interseção entre os resultados das duas configurações.

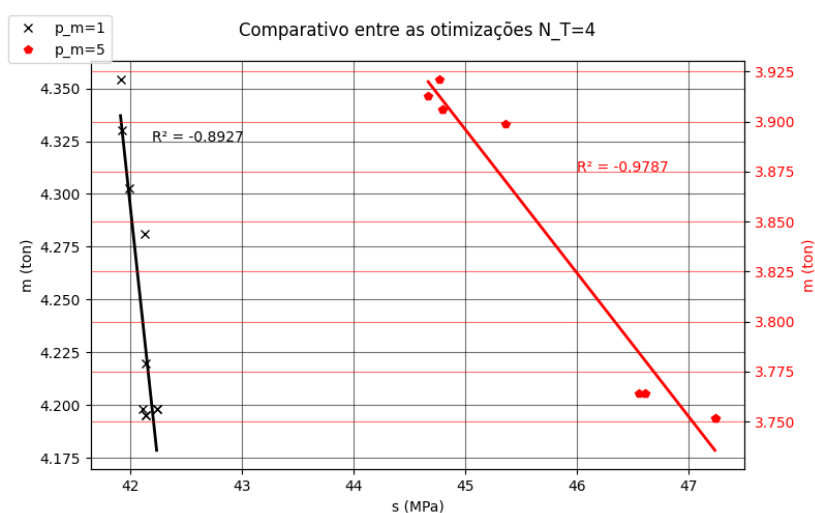
Figura 39 – Análise do peso da massa no pórtico radial com três divisões.



Fonte: Autor.

Na Figura 39, para a configuração de pórtico radial com três divisões, observa-se que a variação das tensões máximas entre os diferentes pesos atribuídos à massa supera 5 MPa. As otimizações com peso da massa igual a um apresentam maior concentração no eixo da tensão máxima, indicando valores bastante próximos entre si, enquanto o peso igual a cinco resulta em maior dispersão. Quanto à massa total, a diferença entre a menor massa obtida com peso igual a um e a maior massa com peso igual a cinco é de aproximadamente 0,5t, evidenciando potencial de redução de material e, conseqüentemente, de custo.

Figura 40 – Análise do peso da massa no pórtico radial com quatro divisões.



Fonte: Autor.

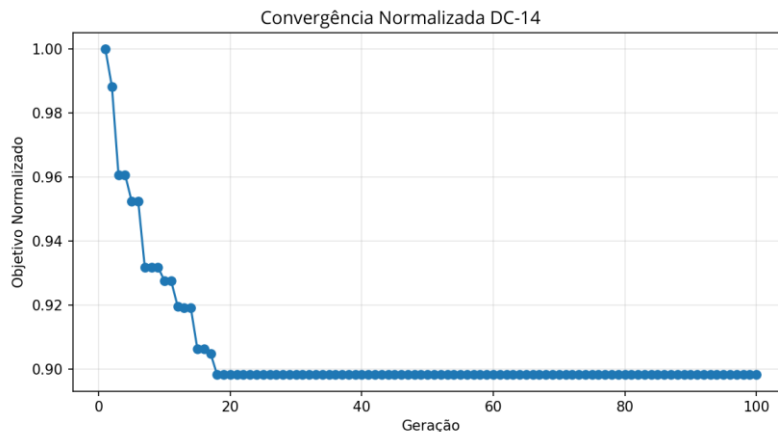
Ao analisar a Figura 40, os resultados das otimizações da configuração de pórtico radial com quatro divisões, comparando os diferentes pesos da massa, constata-se uma diferença na tensão máxima menor que 3 MPa, com uma redução quando comparada com a configuração do pórtico radial de três divisões, que apresentou uma diferença superior a 5 MPa. Além disso, de maneira análoga à Figura 38, os resultados provenientes do peso da massa igual a um estão mais concentrados no eixo X, da tensão máxima, enquanto os resultados do peso da massa igual a cinco estão mais dispersos ao longo desse eixo. No entanto, no eixo Y, da massa total da estrutura, não se verifica o mesmo comportamento observado na Figura 38 observa-se uma variação na massa muito próxima de 0,175 toneladas tanto para as otimizações com peso da massa igual a um quanto para as otimizações onde o peso da massa é igual a cinco.

4.3 Avaliação de Desempenho

4.3.1 Convergência do AG e obtenção do caso ótimo DC-14

A Figura 41, que apresenta a convergência do objetivo normalizado, evidencia o comportamento típico do AG discreto implementado no PyMoo, com redução acentuada do valor da função objetivo nas primeiras gerações, seguida de estabilização em um patamar praticamente constante. No caso ilustrado, observa-se que a maior parte do ganho é obtida até aproximadamente a 18ª a 20ª geração, a partir da qual o melhor indivíduo passa a se estabilizar, indicando convergência do melhor cromossomo visitado. Esse comportamento é coerente com a estratégia de cache adotada e com o caráter discreto do espaço de busca, no qual melhorias adicionais tendem a se tornar mais raras à medida que a população se aproxima de combinações de seções já visitadas e factíveis. Concluídas as campanhas do AG, o melhor indivíduo foi definido como o projeto ótimo determinístico correspondente à configuração DC 14, com 14 gôndolas.

Figura 41 - Resultados de convergência da otimização.



Fonte: Autor.

No caso analisado, o algoritmo convergiu para a alternativa com três divisões por pórtico radial, sugerindo preferência por uma discretização menos subdividida, combinada com ajustes direcionados nas áreas efetivas das seções. O resultado ótimo encontrado DC-14 é apresentado na Tabela 5, enquanto os resultados determinísticos para o DC-14 são apresentados na Tabela 6. Ao relacionar esses valores com os limites de projeto, verifica-se que a solução permanece abaixo do limite de tensão admissível, com $\sigma_{adm} \leq 137$ MPa, e atende aos limites de capacidade em mancais, porém com margens de serviço mais restritas. Observa-se que a configuração DC 14 se aproxima dos limites

operacionais associados ao fator de pico ao longo do vento, com limite de 35,5 mm, e ao conforto segundo a ISO 2631 (1997), com limite de 0,945 m/s², evidenciando que a minimização de massa, ainda que atendendo às restrições, tende a reduzir as folgas disponíveis em critérios de desempenho em serviço.

Tabela 5 – Resultados das seções transversais.

| Projeto | Externo [mm] | Interno [mm] | Aro [mm] |
|---------|--------------|--------------|--------------|
| DC-14 | 2,65; 60; 70 | 2,00; 30; 30 | 2,00; 30; 80 |

Fonte: Autor

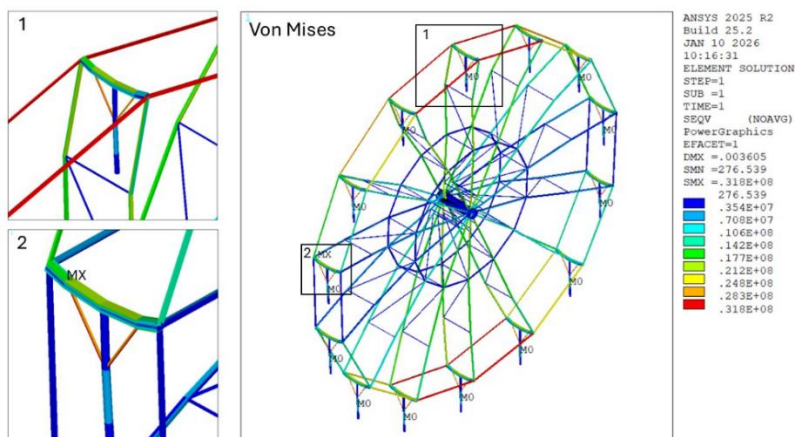
Tabela 6 – Resultados determinísticos do DC-14.

| Projeto | Ngond | NT | Mass (ton) | $\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa) | Rp, (mm) | a _{w,tot} (m/s ²) | R _b (kN) | M _b (kN.m) |
|---------|-------|----|------------|------------------------------|------------------------|----------------------------------------|---------------------|-----------------------|
| DC-14 | 14 | 3 | 13,87 | 31,84 | 34,43 | 0,936 | 89,29 | 19,20 |

Fonte: Autor.

Na Figura 42 observa-se que a tensão equivalente de Von Mises indica uma concentração clara de tensões nos trechos periféricos da roda, com valores mais elevados principalmente na região superior e também na porção inferior do aro. Além disso, observa-se um ponto crítico de tensão máxima, destacado como MX, associado ao nó de ligação do pórtico radial a gôndola, onde ocorre um pico localizado de tensão equivalente, típico de regiões com mudança de rigidez e introdução de carregamento. Em síntese, a resposta sugere que o dimensionamento é governado por poucos pontos de concentração, sobretudo no aro e nas ligações periféricas, enquanto a maior parte dos elementos internos permanece em níveis mais baixos de tensão.

Figura 42 – Tensão de Von Mises do DC-14.

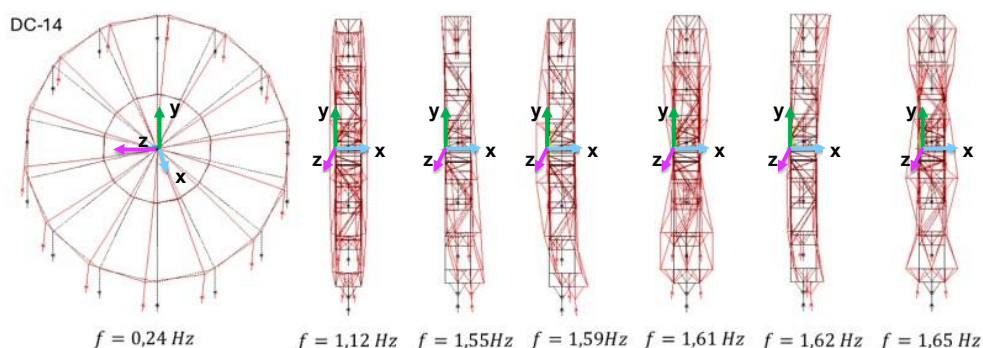


Fonte: Autor.

4.3.2 Avaliação dinâmica

Os resultados da análise modal são apresentados na Figura 43 em que a forma modal associada as frequências estão em vermelho, indica os padrões de deformação associados às frequências naturais do sistema. A análise modal do DC-14 revelou um espectro de frequências naturais que caracteriza o comportamento dinâmico da roda gigante, destacando-se o primeiro modo fundamental em uma frequência significativamente baixa de 0,24 Hz. Este modo inicial é predominantemente caracterizado por uma deformação no plano (XY), indicando uma flexibilidade inerente da estrutura em seu plano principal de rigidez. À medida que o espectro de frequências evolui para o intervalo entre 1,12 Hz e 1,65 Hz, observa-se a transição para modos de vibração fora do plano e comportamentos de flexão complexa. Notavelmente, a proximidade entre as frequências superiores, como os modos de 1,55 Hz a 1,65 Hz, sugere um fenômeno de acoplamento modal, comum em estruturas com alto grau de simetria axial.

Figura 43 - Análise Modal.

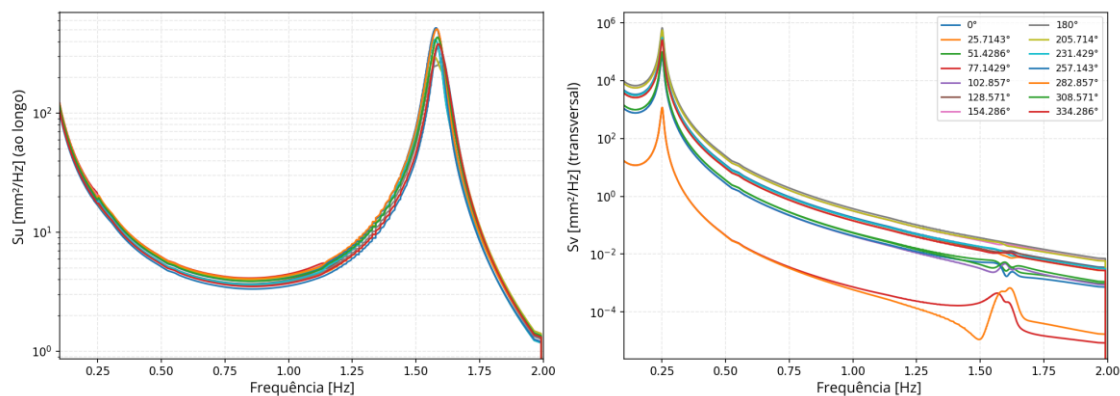


Fonte: Autor.

A análise espectral complementa a leitura determinística ao explicitar como a energia da excitação turbulenta se distribui nas frequências dominantes e em diferentes posições azimutais das gôndolas. Na Figura 44, observa-se que as PSDs de deslocamento por gôndola indicam que, na direção transversal ao vento, o projeto apresenta um pico dominante em baixa frequência, com níveis reduzidos de aceleração, reforçando que o conforto tende a ser governado por um mecanismo de oscilação lateral de caráter quase estático. Já na direção ao longo do vento, a resposta dominante concentra-se em um pico principal, cuja intensidade e largura refletem a influência combinada das propriedades dinâmicas do sistema e da excitação turbulenta, permitindo interpretar, de forma mais

direta, quais faixas de frequência controlam os deslocamentos e, por consequência, os critérios de serviço e conforto adotados.

Figura 44 - Resposta espectral (PSDs).



Fonte: Autor.

4.3.3 Simulações Monte Carlo

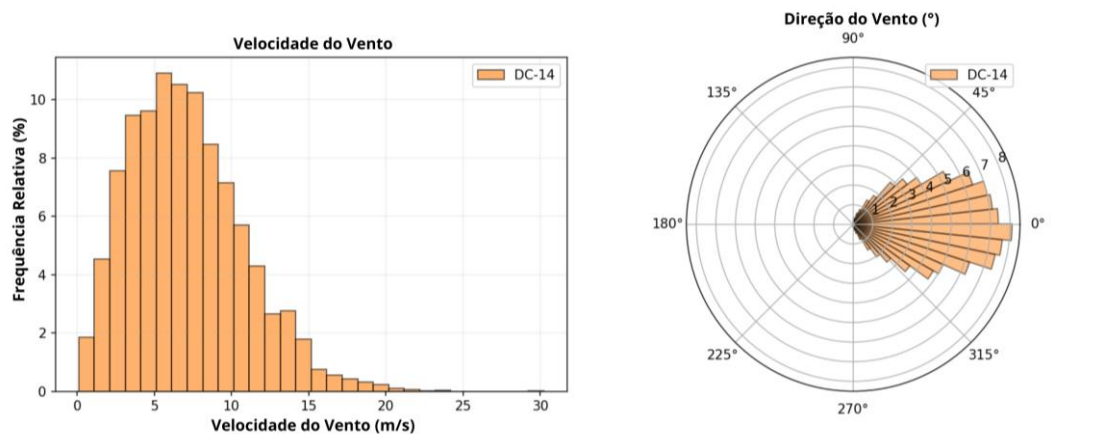
Na Figura 45 são apresentados os histogramas das variáveis de entrada associadas às medidas de intensidade (IM) e aos parâmetros estruturais (SP), contemplando grandezas relacionadas à excitação ambiental, às propriedades mecânicas e às características geométricas do modelo. Enquanto a Figura 46 reúne as distribuições amostradas especificamente para as massas das gôndolas e para o número de ocupantes por cabine, permitindo uma análise mais detalhada das variáveis vinculadas à demanda operacional.

Esses histogramas exercem papel fundamental no controle de qualidade do processo de simulação de Monte Carlo, funcionando como instrumento de verificação visual da consistência estatística das amostras geradas. Por meio deles, é possível avaliar se as distribuições probabilísticas previamente definidas, como Weibull, normal, lognormal ou Poisson, estão sendo adequadamente reproduzidas na prática amostral.

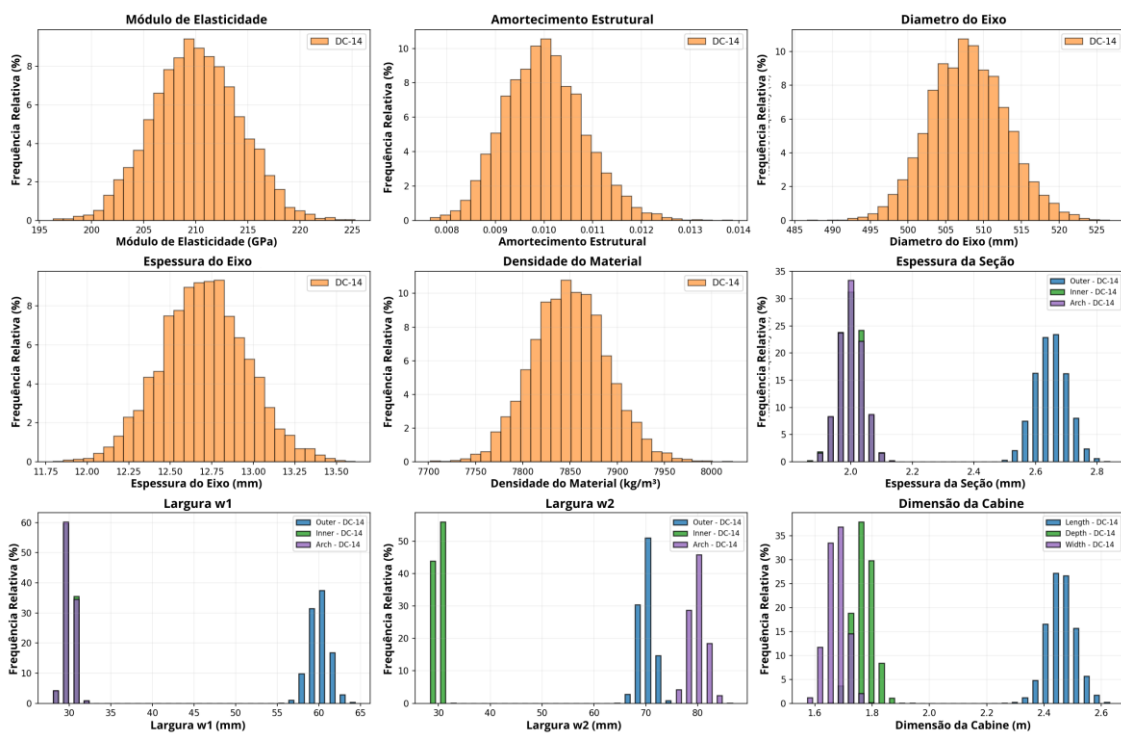
No contexto deste estudo, os gráficos também permitem validar a hipótese de ocupação modelada por distribuição de Poisson, ao evidenciar a assimetria característica desse tipo de variável discreta. Ademais, tornam explícita a diferenciação entre as massas das gôndolas, destacando a presença da cabine acessível, cuja massa nominal é superior às demais em função dos requisitos de acessibilidade. Por fim, tais representações gráficas servem como base comparativa entre diferentes campanhas de simulação, possibilitando

verificar a estabilidade estatística das entradas e garantindo reprodutibilidade e coerência metodológica na análise probabilística orientada ao desempenho.

Figura 45 - Histogramas das variáveis de entrada.



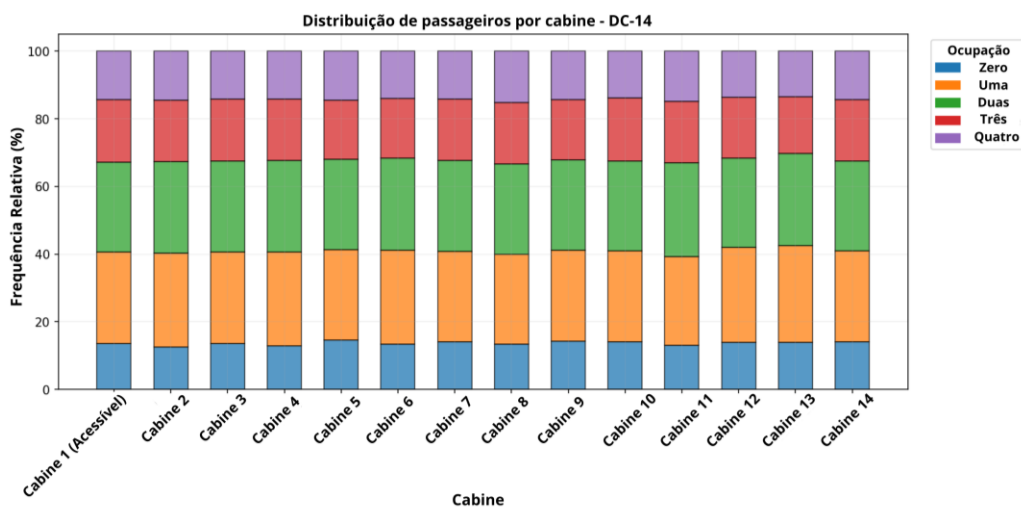
(a) Medidas de Intensidade (IM).



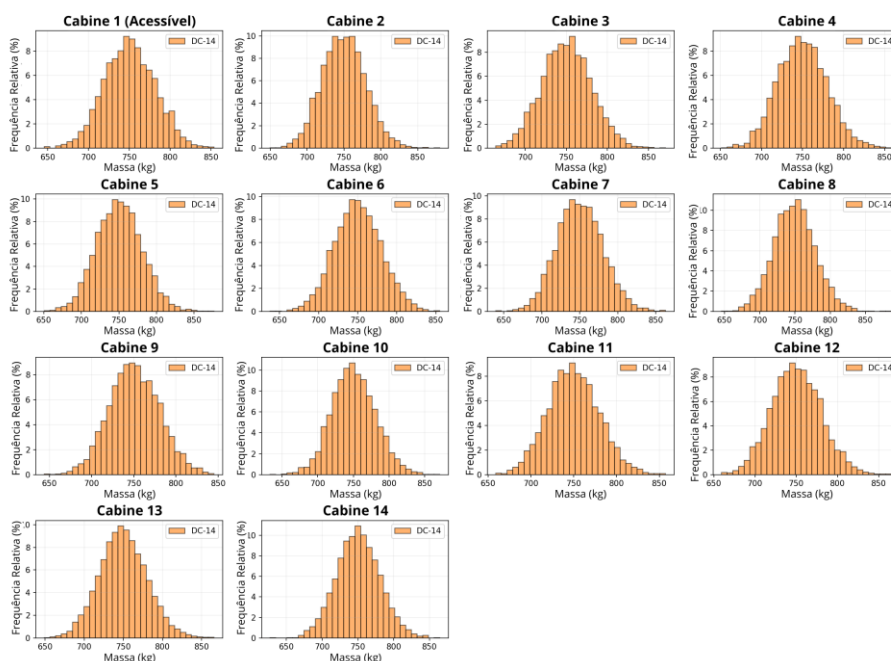
(b) Parâmetros Estruturais (SP).

Fonte: Autor.

Figura 46 - Histogramas das massas e ocupação das gôndolas.



(a) Ocupação por gôndola.



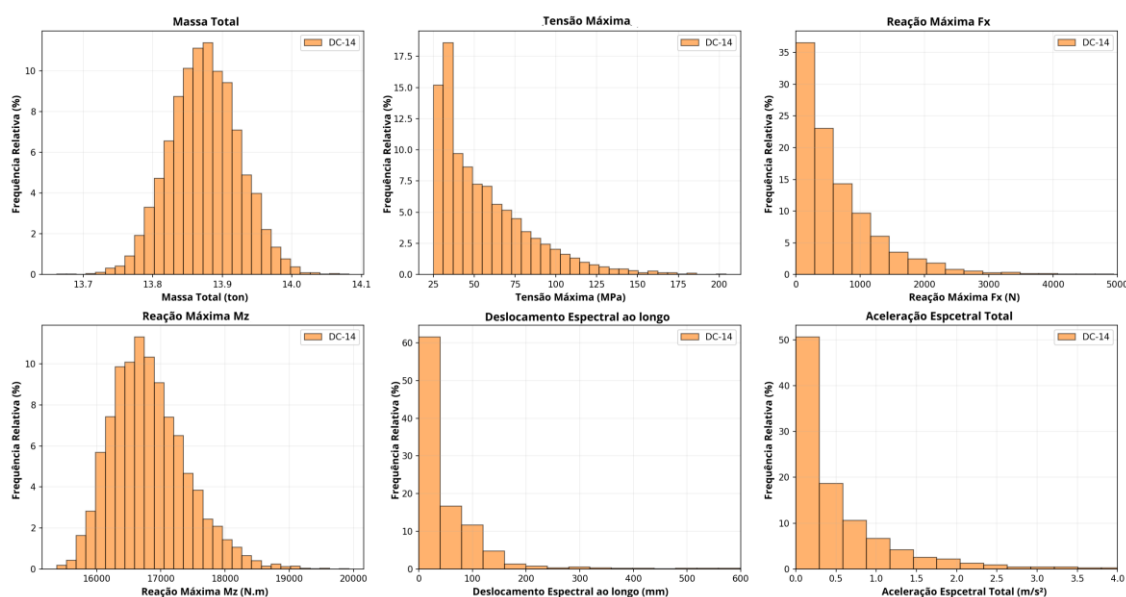
(b) Massa das gôndolas.

Fonte: Autor.

Os histogramas apresentados na Figura 47 evidenciam como as amostras se agrupam em torno dos valores determinísticos e como a dispersão se manifesta para cada variável de interesse. Observa-se que a massa tende a apresentar distribuição relativamente estreita, refletindo a menor sensibilidade desse indicador às incertezas consideradas quando comparada às respostas de serviço. Em contrapartida, as distribuições de deslocamentos e acelerações tornam explícito o alargamento da resposta, indicando maior variabilidade e maior ocorrência de realizações em faixas próximas aos

valores críticos de desempenho. Para as solicitações nos mancais, verifica-se que a dispersão está associada tanto à variabilidade dos carregamentos quanto às condições de interação aero-estrutural, podendo ocorrer incrementos esporádicos de força horizontal quando a direção instantânea da rajada se alinha à direção mais desfavorável de resposta da estrutura. Além disso, a distribuição da aceleração evidencia a presença de probabilidade não desprezível em faixas intermediárias a altas, compatíveis com a proximidade do limite de conforto adotado, reforçando a relevância da avaliação probabilística para caracterizar margens operacionais sob variabilidade ambiental e operacional.

Figura 47 - Histogramas dos resultados.

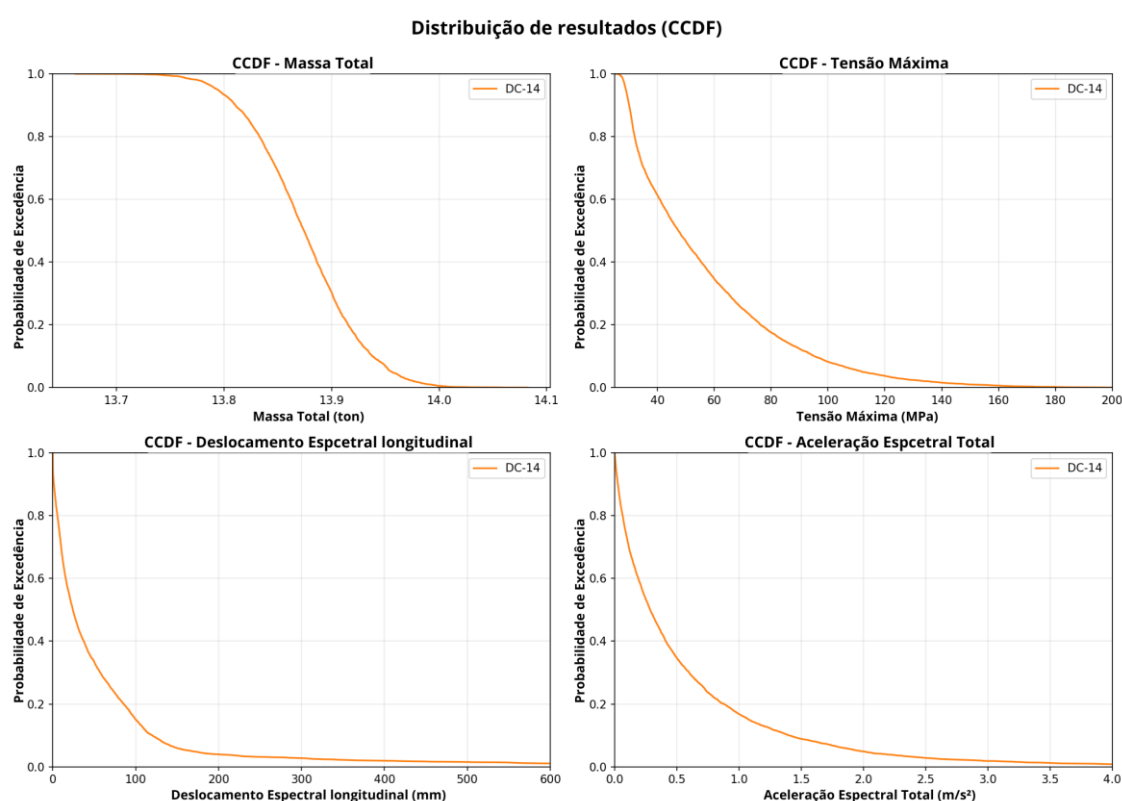


Fonte: Autor.

As CCDFs apresentadas na Figura 48 consolidam o efeito das incertezas ao quantificar a probabilidade de excedência das respostas para diferentes níveis de demanda. No caso analisado, a CCDF de massa apresenta mediana de 13,87 toneladas, confirmando o ganho associado à solução mais leve obtida na otimização determinística. Em contrapartida, para variáveis de serviço, em especial os deslocamentos espectrais ao longo do vento e a aceleração máxima avaliada segundo a ISO 2631 (1997), as curvas decaem de forma mais precoce, evidenciando maior propensão relativa a excedências nessas métricas quando comparadas às respostas de resistência. A análise das caudas indica que as probabilidades de atingir os limites determinísticos de tensão, pico e conforto permanecem inferiores a 10^{-2} no conjunto de simulações, e que as tensões

exibem percentil 95% da ordem de 112 MPa, sugerindo que a variabilidade dos parâmetros estruturais exerce influência relevante na dispersão da demanda de tensões, mesmo com atendimento ao critério admissível. Ademais, as métricas centradas no ocupante apresentam caudas mais amplas, com o percentil 95% do deslocamento espectral ao longo do vento atingindo aproximadamente 167 mm e a aceleração espectral alcançando cerca de 1,97 m/s², reforçando a sensibilidade do desempenho em serviço às incertezas consideradas.

Figura 48 - Distribuição de resultados CCDF.



Fonte: Autor.

Em síntese, os resultados indicam que a redução de gôndolas pode produzir diminuição relevante de massa, mas tende a penalizar a robustez em métricas operacionais, sobretudo conforto e deslocamentos ao longo do vento. No recorte determinístico, o DC-14 já se aproxima dos limites de pico e ISO 2631 (1997), e no recorte probabilístico suas caudas se tornam mais pronunciadas, evidenciando maior sensibilidade a combinações desfavoráveis de direção e intensidade de vento e ocupação. Assim, a decisão de adotar uma solução mais leve deve ser fundamentada não apenas no atendimento determinístico, mas no nível de excedência aceitável para a operação, em linha com o racional PBWE adotado nesta pesquisa.

5. CONCLUSÕES

Esta dissertação apresentou uma cadeia metodológica integrada e automatizada para modelagem, otimização e avaliação de desempenho de uma roda-gigante acessível. O fluxo proposto combinou um modelo paramétrico por Método dos Elementos Finitos (MEF) implementado programaticamente em Python e acoplado ao solver ANSYS via PyMAPDL, posteriormente uma etapa de otimização determinística baseada em Algoritmos Genéticos (AG) e uma etapa de avaliação probabilística de desempenho por simulações de Monte Carlo, com tratamento explícito das incertezas associadas ao vento, ocupação e parâmetros estruturais, alinhada ao racional de engenharia baseada em desempenho. O objetivo principal foi a redução da massa total da estrutura sem comprometer os níveis mínimos de segurança, assegurando o desempenho da estrutura sob condições estáticas e dinâmicas.

A adaptação do AG demonstrou ser eficaz para problemas estruturais discretos, possibilitando a exploração ampla do espaço de soluções com aplicação de operadores genéticos clássicos. Entre os métodos avaliados, o cruzamento *One Point* destacou-se por aliar a simplicidade de implementação a bons resultados de aptidão, sendo adotado nas otimizações posteriores. A função de aptidão proposta, baseada na relação entre fator de segurança e massa estrutural, permitiu direcionar o processo de otimização segundo diferentes prioridades de projeto. Revela-se que pesos maiores atribuídos à massa geram estruturas mais leves, porém com tensões mais elevadas. Evidencia-se a necessária conciliação entre leveza e resistência. Verifica-se a eficiência do processo de otimização ao se comparar a solução obtida com as configurações extremas do espaço de projeto. Em relação às seções de maiores dimensões, observa-se uma redução de massa da ordem de 8 toneladas. Por outro lado, quando comparada às configurações de menores dimensões, constata-se uma diminuição aproximada de 20 MPa na tensão equivalente de Von Mises, evidenciando simultaneamente ganho em desempenho estrutural e racionalização de material.

Na etapa probabilística, a substituição do AG próprio pelo PyMoo mostrou se vantajosa para a inclusão direta de restrições e para a obtenção de soluções factíveis sob múltiplos critérios simultâneos. As campanhas de otimização convergiram rapidamente, com ganhos concentrados nas primeiras gerações, e resultaram em um projeto determinístico de referência, DC 14, com 14 gôndolas, com preferência por pórticos radiais com três divisões, sugerindo que a otimização se beneficiou mais de ajustes nas

seções efetivas do que do aumento de subdivisões estruturais. No recorte determinístico, o DC 14 apresentou redução relevante de massa, com 13,87 toneladas, porém operou próximo dos limites de serviço, com fator de pico ao longo do vento de 34,43 mm frente ao limite de 35,5 mm, e aceleração máxima de conforto de 0,936 m/s² frente ao limite de 0,945 m/s², evidenciando que a solução ótima em massa foi obtida com margens reduzidas em critérios de desempenho em serviço.

A análise de Monte Carlo consolidou o efeito das incertezas. Embora o projeto DC 14 mantenha o ganho de massa, com curvas deslocadas para menores valores, ele apresenta caudas mais pronunciadas nas respostas operacionais, com aumento expressivo de percentis elevados de deslocamento e aceleração, indicando maior sensibilidade a combinações desfavoráveis de vento e ocupação. Em contrapartida, as distribuições de tensão mostraram se relativamente estáveis. No conjunto de hipóteses adotado, a variabilidade estrutural e de carregamento domina a dispersão de tensões, enquanto a avaliação de desempenho é governada principalmente por requisitos de serviço e conforto.

Sob a ótica da engenharia baseada em desempenho, a seleção do “melhor” projeto não deve se limitar à verificação determinística do atendimento a valores-limite, devendo incorporar explicitamente o risco operacional por meio de métricas probabilísticas, como níveis de confiabilidade e probabilidades de excedência admissíveis. Dessa forma, conclui-se que a metodologia proposta é adequada e eficiente para apoiar o desenvolvimento de rodas-gigantes estruturalmente otimizadas, possibilitando a redução de massa e o aumento da competitividade do projeto sem comprometer os requisitos de segurança e de desempenho em serviço.

6. TRABALHOS FUTUROS

Adicionalmente, sugere-se incorporar abordagens de otimização e verificação baseadas em confiabilidade (RBDO), de modo a permitir a definição direta de probabilidades-alvo de excedência e níveis de confiabilidade compatíveis com requisitos operacionais. Também é indicado avançar na modelagem dinâmica por meio de análises no domínio do tempo, utilizando séries sintéticas de vento espacialmente coerentes, incluindo efeitos transientes. Quando viável, recomenda-se a validação dos coeficientes aerodinâmicos e dos modelos de coerência por ensaios experimentais ou simulações CFD, elevando a aderência física dos carregamentos adotados. Por fim, propõe-se empregar representações mais realistas das gôndolas e das conexões estruturais, bem como incluir verificações de fadiga e maior detalhamento construtivo. Recomenda-se ainda investigar cenários operacionais adicionais, como estratégias de controle de operação em função da direção e intensidade do vento, além da sensibilidade do sistema a diferentes classes de terreno e condições topográficas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMUFTI, Ibrahim; WILLFORD, Michael; FERGUSON, Mary; ALLSOP, Andrew; KROLICKI, Jason. **Wind Comfort Studies for the Vegas High Roller Observation Wheel**. In: *Structures Congress 2013: Bridging Your Passion with Your Profession - Proceedings of the 2013 Structures Congress*, p. 1313–1322, 2013. ISBN: 9780784412848, DOI: 10.1061/9780784412848.116. Disponível em: <<https://ascelibrary.org/doi/10.1061/9780784412848.116>>. Acesso em: 09/abr./25.

ANSYS. **Ansys Help**. 2025. Disponível em: <https://ansyshelp.ansys.com/public/account/secured?returnurl=/Views/Secured/main_page.html?hl=1>. Acesso em: 25/maio/25

ARORA, Jasbir Singh. **Introduction to Optimum Design, Fourth Edition**. In: *Introduction to Optimum Design, Fourth Edition*. 4 ed. San Diego, Califórnia: Elsevier, 2017. 1–945 p. ISBN: 9780128008065, DOI: 10.1016/C2013-0-15344-5. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com:5070/book/9780128008065/introduction-to-optimum-design>>. Acesso em: 13/abr./25.

ARSLANIAN, Lucas Costa; CAMARGOS, Lucas Fernandes; JORGE, Ariosto Bretanha; COLHERINHAS, Gino Bertolluci; GIRÃO DE MORAIS, Marcus Vinicius. **Numerical Evaluation of Parametric Updating by Genetic Algorithm Implementation**. In: *Mechanisms and Machine Science*, v. 125 MMS, p. 398–407, 2022. ISBN: 9783031157578, ISSN: 22110992, DOI: 10.1007/978-3-031-15758-5_40. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/364240365_Numerical_Evaluation_of_Parametric_Updating_by_Genetic_Algorithm_Implementation>. Acesso em: 13/abr./25.

ATRNP. **As 4 maiores rodas-gigantes do Brasil - ATRNP | Associação de Turismo Rural do Noroeste Paulista**. 2025. Disponível em: <https://www.atrnp.com.br/blog/as-4-maiores-rodas-gigantes-do-brasil?st_source=ai_mode>. Acesso em: 07/fev./26

AUGUSTI, Giuliano; CIAMPOLI, Marcello. **Performance-Based Design in risk assessment and reduction**. In: *Probabilistic Engineering Mechanics*, v. 23, nº 4, p. 496–508, 2008. ISSN: 0266-8920, DOI: 10.1016/J.PROBENGMECH.2008.01.007. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0266892008000313?via%3Dihub>>. Acesso em: 13/nov./25.

BACK, Thomas. **Evolutionary algorithms in theory and practice : evolution strategies, evolutionary programming, genetic algorithms**. Nova Iorque: Oxford University Press, 1996. 314 p. ISBN: 0195099710. Acesso em: 09/abr./25.

BATHE, Klaus-Jürgen. **Finite element procedures**. 2 ed. Upper Saddle River: [Klaus-Jürgen Bathe], 2014. 1043 p. ISBN: 0979004950. Acesso em: 09/abr./25.

BAZARAA, Mokhtar S.; SHERALI, Hanif D.; SHETTY, C. M. **Nonlinear Programming: Theory and Algorithms**. In: *Nonlinear Programming: Theory and Algorithms*. 3 ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley and Sons, 2005. 1–853 p. ISBN: 0471486000, DOI: 10.1002/0471787779. Acesso em: 09/abr./25.

BELYTSCHKO, Ted; WING, |; LIU, Kam; MORAN, Brian; KHALIL, |; ELKHODARY, I; LIU, Belytschko; ELKHODARY, Moran; LIU, Wing Kam; ELKHODARY, Khalil I. **Nonlinear Finite Elements for Continua and Structures**. 2 ed. Hoboken, New Jersey: Wiley, 2014. ISBN: 1118632702. Disponível em: <www.wiley.com/go/belytschko>.

BS EN 13814. **BS EN 13814**. 2004. Acesso em: 07/fev./26

CAMP, C. V.; FARSHCHIN, M. **Design of space trusses using modified teaching-learning based optimization**. In: *Engineering Structures*, v. 62–63, p. 87–97, 2014. ISSN: 01410296, DOI: 10.1016/j.engstruct.2014.01.020.

CHETHAN, K.N.; MOHAMMAD, Zuber; SHYAMASUNDER, Bhat N.; SATISH, Shenoy B.; CHANDRAKANT, R. Kini,. **Static structural analysis of different stem designs used in total hip arthroplasty using finite element method**. In: *Heliyon*, v. 5, n° 6, p. e01767, 2019. ISSN: 2405-8440, DOI: 10.1016/J.HELIYON.2019.E01767. Acesso em: 09/abr./25.

CHOU, Jui Sheng; TRUONG, Dinh Nhat. **A novel metaheuristic optimizer inspired by behavior of jellyfish in ocean**. In: *Applied Mathematics and Computation*, v. 389, p. 125535, 2021. ISSN: 0096-3003, DOI: 10.1016/J.AMC.2020.125535. Acesso em: 09/abr./25.

CIAMPOLI, Marcello; PETRINI, Francesco. **Performance-based Aeolian risk assessment and reduction for tall buildings**. In: *Probabilistic Engineering Mechanics*, v. 28, p. 75–84, 2012. ISSN: 0266-8920, DOI: 10.1016/J.PROBENGMECH.2011.08.013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0266892011000683?via%3Dihub>. Acesso em: 13/nov./25.

CIVITATIS. **Ingresso da roda-gigante High Roller de Las Vegas - Civitatis Brasil**. 2023. Disponível em: <https://www.civitatis.com/br/las-vegas/ingresso-high-roller/?srsltid=AfmBOopv37EUUZZA24DZ11X_iVYC9bFm7DJHY01KLZ6thxhvRUX9bQJL>. Acesso em: 10/fev./26

COLHERINHAS, Gino Bertolucci. **Ferramenta de otimização via algoritmos genéticos com aplicações em engenharia**. 2016. DOI: 10.26512/2016.08.D.21832. Disponível em: <<http://repositorio.unb.br/handle/10482/21832>>. Acesso em: 09/abr./25.

COLHERINHAS, Gino Bertolucci. **Genetic-Algorithm-MATLAB-toolbox/main.m at master · Ginobc/Genetic-Algorithm-MATLAB-toolbox**. 2019. Disponível em: <<https://github.com/Ginobc/Genetic-Algorithm-MATLAB-toolbox/blob/master/main.m>>. Acesso em: 14/abr./25

COLHERINHAS, Gino Bertolucci; MORAIS, Marcus Vinicius Girão DE; PETRINI, Francesco. **Global vibration control of offshore wind turbines with a flexible monopile foundation using a pendulum-tuned mass damper: Risk mitigation and performance incrementation**. In: *Ocean Engineering*, v. 297, p. 117168, 2024. ISSN: 0029-8018, DOI: 10.1016/J.OCEANENG.2024.117168. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801824005055?via%3Dihub>>. Acesso em: 13/nov./25.

COOK, Robert D.; DAVID MALKUS S.; MICHAEL PLESHA E.; ROBERT WITT J. **Concepts and Applications of Finite Element Analysis**. 4 ed. Hoboken, New Jersey: [no publisher], 2001. ISBN: 0471356050. Acesso em: 09/abr./25.

COOKE, S. C.; COLEMAN, S.; DERRICK, J. **Exploring the potential for scripting with simulation in engineering education - practical examples using Python and Ansys**. In: *SEFI 2023 - 51st Annual Conference of the European Society for Engineering Education: Engineering Education for Sustainability, Proceedings*, 2023. [no place]: European Society for Engineering Education (SEFI). 2023. p. 1876–1884.

COROPETCHI, Iulian Constantin; VASILE, Alexandru; SOROHAN, Stefan; PICU, Catalin Radu; CONSTANTINESCU, Dan Mihai. **Stiffness optimization through a modified greedy algorithm**. In: *Procedia Structural Integrity*, 2021. [no place]: Elsevier B.V. 2021. v. 37, n° C, p. 755–762.

DAVENPORT, A G. **Note on the distribution of the largest value of a random function**. In: *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, v. 28, n° 2, p. 187–196, 1964. DOI: 10.1680/iicep.1964.10112. Acesso em: 10/fev./26.

DEB, Kalyan. **Multiobjective Optimization Using Evolutionary Algorithms**. **Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms: An Introduction**. [no place]: [no publisher], 2014. Disponível em: <<http://www.iitk.ac.in/kangal/deb.htm>>.

EN 13814. **EN 13814: Fairground and amusement park machinery and structures - Safety**. [no place]: [no publisher], 2004.

ESHELMAN, Larry J.; SCHAFFER, J. David. **Real-Coded Genetic Algorithms and Interval-Schemata**. v. 2, p. 187–202, 1993. ISSN: 1081-6593, DOI: 10.1016/B978-0-08-094832-4.50018-0. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780080948324500180>>. Acesso em: 29/abr./25.

FERZIGER, Joel H.; PERIĆ, Milovan. **Computational Methods for Fluid Dynamics**. In: *Computational Methods for Fluid Dynamics*. 3 ed. Belim: Springer Berlin Heidelberg, 2002. DOI: 10.1007/978-3-642-56026-2. Acesso em: 13/abr./25.

GLOVER, Fred; KOCHENBERGER, Gary A. **Handbook of Metaheuristics**. In: GLOVER, Fred; KOCHENBERGER, Gary A. (orgs.). *International Series in Operations Research & Management Science*. 1 ed. Boston, MA: Springer US, 2003. ISBN: 978-1-4020-7263-5, DOI: 10.1007/B101874. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/b101874>>. Acesso em: 09/abr./25.

GOLDBERG, David E. **Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning** David E. Goldberg The University of Alabama T. In: *Machine Learning*. 1 ed. Boston, Massachusetts: Addison-Wesley Professional, 1989. v. 3, nº 2. ISBN: 0201157675, ISSN: 0014-4754. Acesso em: 09/abr./25.

GOLDBERG, David E.; DEB, Kalyanmoy. **A Comparative Analysis of Selection Schemes Used in Genetic Algorithms**. v. 1, p. 69–93, 1991. ISSN: 1081-6593, DOI: 10.1016/B978-0-08-050684-5.50008-2. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780080506845500082>>. Acesso em: 28/abr./25.

HERRERA, Francisco; LOZANO, Manuel. **Adaptive Control of the Mutation Probability by Fuzzy Logic Controllers**. In: *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, v. 1917, p. 335–344, 2000. ISBN: 978-3-540-45356-7, ISSN: 16113349, DOI: 10.1007/3-540-45356-3_33. Disponível em: <https://link.springer.com/chapter/10.1007/3-540-45356-3_33>. Acesso em: 29/abr./25.

HOLLAND, John H. **Adaptation in natural and artificial systems**. In: *Ann Arbor MI University of Michigan Press*. Cambridge, Massachusetts,: MIT Press, 1992. v. Ann Arbor, 1-200? p. ISBN: 0262581116. Disponível em: <<http://www.citeulike.org/group/664/article/400721%5Cnhttp://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Adaptation+in+Natural+and+Artificial+Systems#1>>. Acesso em: 09/abr./25.

HOLMES, John D.. **Wind loading of structures**. p. 412, 2018. ISBN: 1482229226. Acesso em: 10/fev./26.

HUGHES, Thomas J. R. **The Finite Element Method: Linear Static and Dynamic Finite Element Analysis**. Mineola, New York: Dover Publications, 2000. ISBN: 0486411818. Disponível em: <<http://www.amazon.com/The-Finite-Element-Method-Engineering/dp/0486411818>>. Acesso em: 09/abr./25.

ISO 2631. **ISO 2631 - Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part. 1**. 1997. Disponível em: <<https://cdn.standards.iteh.ai/samples/7612/0d54768e6e214481a8e814b20df83641/ISO-2631-1-1997.pdf>>. Acesso em: 15/dez./25

ISO/IEC GUIDE 98-1. **ISO/IEC Guide 98-1:2024(en), Guide to the expression of uncertainty in measurement — Part 1: Introduction**. 2024. Disponível em: <<https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso-iec:guide:98:-1:ed-2:v1:en>>. Acesso em: 13/nov./25

JONG, Kenneth Alan DE. **Analysis of the behavior of a class of genetic adaptive systems**. [no place]: [no publisher], 1975. Disponível em: <<http://deepblue.lib.umich.edu/handle/2027.42/4507>>. Acesso em: 14/abr./25.

KAIMAL, J. C.; COTE, O. R.; WYNGAARD, J. C.; IZUMI, Y. **Spectral characteristics of surface-layer turbulence**. In: *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 098, n° 417, p. 563–589, 1972. ISSN: 00359009, DOI: 10.1256/smsqj.41706. Disponível em: <<https://www.scienceopen.com/document?vid=aba4b868-a71e-4b3a-9d01-e9ab918470a1>>. Acesso em: 10/fev./26.

KROLICKI, Jason; SULLIVAN, Brandon; WILLFORD, Michael. **Vegas High Roller: Giant Observation Wheel Design**. In: *Structures Congress 2013: Bridging Your Passion with Your Profession - Proceedings of the 2013 Structures Congress*, p. 1338–1349, 2013. ISBN: 9780784412848, DOI: 10.1061/9780784412848.118. Disponível em: <<https://ascelibrary.org/doi/10.1061/9780784412848.118>>. Acesso em: 09/abr./25.

LIM, S. M.; SULAIMAN, Nasir; SULTAN, A. B. Md; MUSTAPHA, N.; TEJO, B. A. **A NEW REAL CODED GENETIC ALGORITHM CROSSOVER**. 2014. Acesso em: 29/abr./25.

MECHANICAL APDL. **Mechanical APDL**. 2023. Disponível em: <https://ansyshelp.ansys.com/public/account/secured?returnurl=///Views/Secured/corp/v242/en/wb2_help/wb2h_ANSYSapp.html?utm_source=chatgpt.com>. Acesso em: 13/abr./25

MICHALEWICZ, Zbigniew. **Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs**. 3 ed. Nova Iorque: Springer, 1996. ISBN: 3642082335. Acesso em: 09/abr./25.

MICHALEWICZ, Zbigniew; FOGEL, David B. **How to Solve It: Modern Heuristics**. 2 ed. Nova Iorque: Springer, 2010. ISBN: 3642061346. Acesso em: 09/abr./25.

MICHALEWICZ, Zbigniew.; JANIKOW, C. **Handling Constraints in Genetic Algorithms**. In: *International Conference on Genetic Algorithms*, 1991. Acesso em: 29/abr./25.

MILLER, Brad L.; GOLDBERG, David E. **Genetic Algorithms, Tournament Selection, and the Effects of Noise**. In: *Complex Systems*, v. 9, nº 3, 1995. Acesso em: 28/abr./25.

MITCHELL, Melanie. **An Introduction to Genetic Algorithms (Complex Adaptive Systems)**. In: *The MIT Press*. Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 1998. ISBN: 0262631857, ISSN: 08981221. Disponível em: <<http://www.amazon.ca/exec/obidos/redirect?tag=citeulike09-20&path=ASIN/0262631857>>. Acesso em: 09/abr./25.

MOAVENI, Saeed. **Finite element analysis : theory and application with ANSYS**. Londres: Pearson Prentice Hall : Pearson Education Taiwan, 2007. 861 p. ISBN: 0131890808. Acesso em: 09/abr./25.

MOGNON, Vilson Rodrigo. **Algoritmos genéticos aplicados na otimização de antenas**. 2004. Disponível em: <<https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/651>>. Acesso em: 22/maio/25.

NBR 6123. **NBR6123: Forças devidas ao vento em edificações**. 2023

NBR 15926-2. **NBR15926-2 : Equipamentos de parques de diversão - Parte 2: Requisitos de segurança do projeto e de instalação**. Rio de Janeiro, 2023. Acesso em: 14/abr./25

NOCEDAL, Jorge; WRIGHT, Stephen J. **Numerical Optimization**. Nova York: Springer, 2006. Disponível em: <https://books.google.com.br/books/about/Numerical_Optimization.html?hl=pt-BR&id=7wDpBwAAQBAJ&redir_esc=y>. Acesso em: 09/abr./25.

PETRINI, Francesco. **A probabilistic approach to performance-based wind engineering (PBWE)**. 2009. DOI: 10.3267/PETRINITHESIS. Disponível em: <https://www.academia.edu/2722196/A_probabilistic_approach_to_performance_based_wind_engineering_PBWE_>. Acesso em: 13/nov./25.

PYANSYS. **PyAnsys**. 2022. Disponível em: <https://docs.pyansys.com/?utm_source=chatgpt.com>. Acesso em: 13/abr./25

ROBERT, Christian P.; CASELLA, George. **Monte Carlo Statistical Methods**. In: *Springer Texts in Statistics*. New York, NY: Springer New York, 2004. ISBN: 978-1-4419-1939-7, DOI: 10.1007/978-1-4757-4145-2. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/978-1-4757-4145-2>>. Acesso em: 13/nov./25.

RODRIGUES, Hugo Ricardo Campolino. **Projeto de uma roda gigante acessível**. 2024, Goiânia. Goiânia: Universidade Federal de Goiás. 2024. Disponível em: <<https://anaisconpeex.ciar.ufg.br/edicoes/21/index.html#trabalhos>>. Acesso em: 09/jul./25.

SALEHI, Hadi; BURGUEÑO, Rigoberto. **Emerging artificial intelligence methods in structural engineering**. In: *Engineering Structures*, v. 171, p. 170–189, 2018. ISSN: 0141-0296, DOI: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2018.05.084. Acesso em: 09/abr./25.

SIMIUI, Emil; SCANLAN, Robert H. **Wind Effects on Structures**. Nova York: [no publisher], 1996. v. 148, 1–688 p. ISBN: 0471121576. Acesso em: 10/fev./26.

SMITH, I. M.; GRIFFITHS, D. V.; MARGETTS, Lee. **Programming the finite element method**. 5 ed. Hoboken, New Jersey: Wiley, 2013. ISBN: 9781118535929. Acesso em: 09/abr./25.

SOLARI, G.; PICCARDO, G. **Probabilistic 3-D turbulence modeling for gust buffeting of structures**. In: *Probabilistic Engineering Mechanics*, v. 16, nº 1, p. 73–86, 2001. ISSN: 02668920, DOI: 10.1016/S0266-8920(00)00010-2. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0266892000000102>>. Acesso em: 10/fev./26.

SONG, Chenxiao; KAWAI, Reiichiro. **Monte Carlo and variance reduction methods for structural reliability analysis: A comprehensive review**. In: *Probabilistic*

Engineering Mechanics, v. 73, p. 103479, 2023. ISSN: 0266-8920, DOI: 10.1016/J.PROBENGMECH.2023.103479. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0266892023000681?via%3Dihub>>. Acesso em: 15/nov./25.

TRAN, Trung Hieu; VU, Quoc Anh; TRUONG, Viet Hung; NGUYEN, Ngoc Thang. **Comparison of Multi-Objective Metaheuristics for Discrete Optimization of Steel Trusses Using Direct Analysis**. In: *Civil Engineering Journal*, v. 10, nº 12, p. 3926–3943, 2024. ISSN: 2476-3055, DOI: 10.28991/CEJ-2024-010-12-07. Disponível em: <<https://www.civilejournal.org/index.php/cej/article/view/5419>>. Acesso em: 14/abr./25.

VANDERPLAATS, G. N. **Design optimization - A powerful tool for the competitive edge**. In: *1st AIAA, Aircraft, Technology Integration, and Operations Forum*, 2001. DOI: 10.2514/6.2001-5214. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/269229828_Design_optimization_-_A_powerful_tool_for_the_competitive_edge>. Acesso em: 09/abr./25.

YADAV, Mansingh; APTE, Chaitanya; YELVE, Nitesh P.; GRIES, Thomas; TEWARI, Asim. **Exploring stress and deformation in filament-wound composite pressure vessel liners using PyMAPDL**. In: *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 71, p. 493–505, 2024. ISSN: 0360-3199, DOI: 10.1016/J.IJHYDENE.2024.05.290. Acesso em: 09/abr./25.

YIN, Hanfeng; XIAO, Youye; WEN, Guilin; QING, Qixiang; WU, Xin. **Crushing analysis and multi-objective optimization design for bionic thin-walled structure**. In: *Materials and Design*, v. 87, p. 825–834, 2015. ISSN: 18734197, DOI: 10.1016/j.matdes.2015.08.095.

YOU, Guimo; DING, Jiemin; YANG, Huizhu; HE, Zhijun. **Finite element analysis of a flexible Ferris wheel**. In: *Applied Mechanics and Materials*, v. 34–35, p. 751–755, 2010. ISSN: 16609336, DOI: 10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/AMM.34-35.751. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/253802274_Finite_Element_Analysis_of_a_Flexible_Ferris_Wheel>. Acesso em: 09/abr./25.

ZIENKIEWICZ, Olek; TAYLOR, Robert; ZHU, J. Z. **The Finite Element Method: its Basis and Fundamentals: Seventh Edition**. In: *The Finite Element Method: its Basis and Fundamentals: Seventh Edition*, p. 1–714, 2013. ISBN: 9781856176330, DOI: 10.1016/C2009-0-24909-9. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com:5070/book/9781856176330/the-finite-element-method-its-basis-and-fundamentals>>. Acesso em: 09/abr./25.