57º SBPO
SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL
Gramado • RS
DE 5 A 9 DE OUTUBRO DE 2025

Aprimorando Forma e Função: Explorando Design Generativo com Otimização Multiobjetivo para Engenharia de Quadros de Bicicletas

Rafael Franco Silva Pinto
Pontifícia Universidade Católica do Paraná
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, Rua Imaculada Conceição 1155, Curitiba, PR, Brasil
franco.pinto@pucpr.edu.br

Gilberto Reynoso Meza
Pontifícia Universidade Católica do Paraná
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, Rua Imaculada Conceição 1155, Curitiba, PR, Brasil
g.reynosomeza@pucpr.br

RESUMO

Esta pesquisa propõe uma nova abordagem para o design de quadros de bicicleta, integrando Design Generativo (DG) e Otimização Multiobjetivo (OMO). O estudo foca na criação de um quadro otimizado em estética e desempenho. Utilizando o software Rhinoceros 3D e o Grasshopper, foi desenvolvido um modelo paramétrico definido por variáveis de design e uma medida numérica estética que promove a diversidade de designs generativos. A otimização foi realizada com o algoritmo SPEA-2, via plug-in Octopus, gerando soluções Pareto-ótimas que equilibram peso, comprimento dos tubos e estética.

PALAVRAS CHAVE. Design Generativo, Otimização Multiobjetivo, Design Estrutural, Modelo Paramétrico, Grasshopper.

Design Generativo, Otimização Multiobjetivo , Design Estrutural.

https://proceedings.science/p/212406?lang=pt-br

1. Introdução

Esta pesquisa investiga o uso de ferramentas computacionais para aprimorar o processo de design de estruturas, focando em quadros de bicicleta. Parte-se da premissa de que métodos tradicionais, baseados em experiência e intuição, limitam a eficiência e criatividade no projeto. Propõe-se integrar Design Generativo (DG) e Otimização Multiobjetivo (OMO), considerando a Otimização Topológica (OT) como referência conceitual para comparação.

O DG é uma abordagem computacional que explora espaços de design, gerando soluções variadas com base em múltiplos objetivos, como funcionalidade, estética e viabilidade econômica, superando limitações humanas [McKnight, 2017].

A OT, por outro lado, busca a melhor distribuição de material dentro de um espaço de projeto predefinido, com o objetivo de otimizar o desempenho estrutural sob restrições específicas [Bendsøe e Kikuchi, 1988]. A OT explora várias configurações de material visando maximizar a rigidez ou resistência, ou minimizar o peso estrutural, resultando em soluções inovadoras de design, sendo usada neste trabalho como referência para contrastar com o DG.

A distinção central entre DG e OT está no objetivo final. O DG busca gerar diversas alternativas viáveis, explorando o espaço de soluções [Oh et al., 2019], enquanto a OT visa obter uma única solução ideal para restrições e objetivos definidos, priorizando a minimização de massa. Já o DG pode considerar diferentes quantidades de material [Jang et al., 2022].

Complementando essas abordagens, a OMO trata de objetivos conflitantes, gerando soluções Pareto-ótimas que compõem a Frente de Pareto e representam os melhores *trade-offs* [Reynoso Meza, 2014]. Neste estudo, busca-se conciliar leveza, eficiência estrutural e qualidades visuais. A Fórmula 1 define o problema por vetor de decisão, funções objetivo e restrições.

$$\begin{aligned} &\text{Minimize } \boldsymbol{J}(\mathbf{x}) = [J_1^+(\mathbf{x}), \ldots, J_m^+(\mathbf{x})] \\ &\text{subject to } \boldsymbol{K}(\mathbf{x}) \leq 0 \text{ and } \boldsymbol{L}(\mathbf{x}) = 0, \\ &\text{where } \mathbf{x} = [x_1^+, x_2^+, \ldots, x_n^+] \end{aligned} \tag{1}$$

O foco deste estudo está na geração de quadros de bicicleta usando plataformas CAD, como Rhinoceros 3D e *plugin* Grasshopper, para gerar e avaliar formas quanto à viabilidade estrutural e estética, com base em critérios computacionais. A motivação é melhorar a tomada de decisão inicial do design, superando métodos de tentativa e erro que limitam eficiência e criatividade.

2. Objetivos

A pesquisa propõe integrar DG e OMO para automatizar o design inicial, superando métodos de tentativa e erro e reduzindo a dependência da experiência e intuição humana, por meio da geração sistemática de alternativas paramétricas. Assim, busca modernizar práticas e ampliar a criatividade no design de produtos ao:

Desvincular o design das restrições da intuição humana, conectando tecnologia e criatividade, ao mesmo tempo desafiando paradigmas tradicionais via ferramentas de otimizacção computacional.

3. Metodologia para Design Generativo com o Procedimento de Otimização Multiobjetivo (MOOD)

O procedimento de Otimização Multiobjetivo (*Multiobjective Optimization Design* - MOOD), baseado em [Reynoso Meza, 2014], oferece uma abordagem estruturada para problemas complexos com múltiplos objetivos, integrando diferentes perspectivas no processo de design. O MOOD possui três etapas: medição, busca e tomada de decisão. Na medição, os objetivos são definidos e quantificados; na busca, um Problema de Otimização Multiobjetivo (POM) explora soluções ótimas na

Frente de Pareto com algoritmos avançados; por fim, a Tomada de Decisão Multicritério (MCDM) seleciona a solução ideal com base em preferências, visualizações e análise de *trade-offs*.

3.1. Etapa 1 - Problema de Otimização Multiobjetivo (POM)

Nesta etapa, define-se o problema de design do quadro de bicicleta a partir de um modelo paramétrico que representa suas características geométricas e dimensionais, permitindo a exploração sistemática de configurações. Cada parâmetro compõe o vetor de decisão $\mathbf{x}$, avaliado no espaço de solução viável X, com limites baseados em restrições geométricas, estruturais e de fabricação.

A função de custo considera três objetivos: minimizar o comprimento total dos tubos $f_1(x)$, o peso do quadro $f_2(x)$ e a medida estética $f_3(x)$, baseada na proporção áurea. O comprimento total reduz o uso de material; o peso é proporcional à densidade do material ρ; e a medida estética quantifica a proximidade das proporções do quadro com a razão áurea, calculada via fórmula [Suppapitnarm et al., 2004] (Eq. 2), implementada em Python e integrada ao Grasshopper. Valores maiores indicam menor estética.

$$A = \frac{2\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=i+1}^{n}\min|r_{ij} - G^m|}{n(n-1)} \tag{2}$$

onde r_{ij} é a razão entre membros i e j, $G = 1,618$ a razão áurea, n o número de membros e m o expoente que aproxima G^m de r_{ij}.

Assim, o vetor objetivo é:

$$F(x) = [f_1(x), f_2(x), f_3(x)]\,.$$

3.2. Etapa 2 - Busca

A otimização explora o espaço de design, refinando os parâmetros para identificar soluções ótimas. Neste estudo, utilizou-se o plugin *Octopus* para Grasshopper [Vierlinger, 2013], que integra o modelo paramétrico e emprega o algoritmo evolutivo SPEA-2, reconhecido por sua eficiência na convergência para a Frente de Pareto em problemas multiobjetivo.

3.3. Etapa 3 - Tomada de Decisão Multicritério (MCDM)

Na etapa final, o decisor analisa a Frente de Pareto, conjunto de soluções que representam os melhores *trade-offs* entre os objetivos conflitantes. Ferramentas de visualização, como o plugin *Octopus* integrado ao Rhinoceros, auxiliam na comparação intuitiva das soluções, facilitando a escolha informada do design ideal conforme as preferências do decisor.

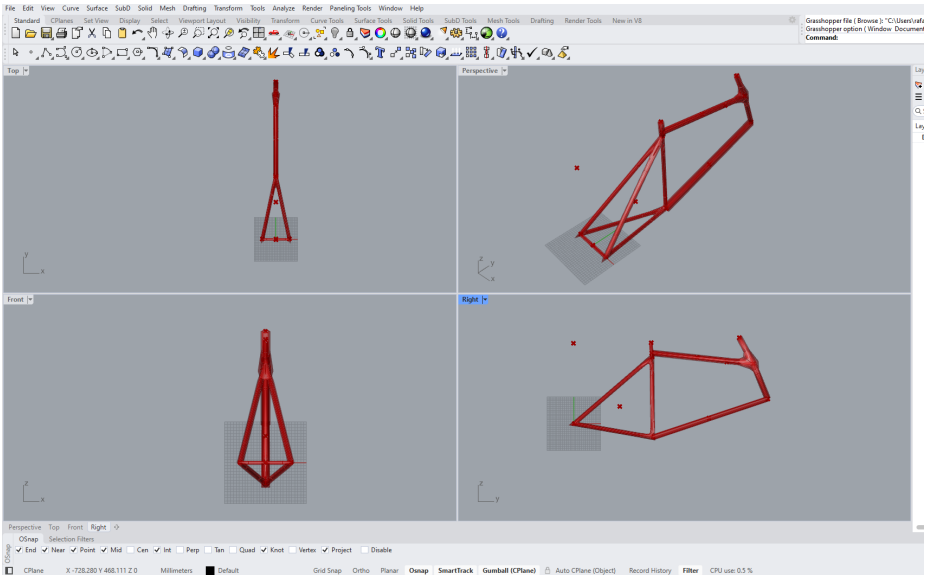
Um dos resultados finais das diversas soluções possíveis é apresentado na Figura 1, que ilustra o quadro paramétrico construído no Rhinoceros.

4. Resultados e Discussões

A implementação desta metodologia demonstrou a eficiência da integração de Design Generativo e Otimização Multiobjetivo para aprimorar o processo de design de estruturas, aplicada ao desenvolvimento de quadros de bicicleta. A abordagem permitiu explorar um amplo espaço de soluções, considerando simultaneamente eficiência de material e qualidades estéticas, quantificadas pela incorporação dos princípios da proporção áurea.

A utilização de ferramentas computacionais, como Rhinoceros e seu *plugin* Grasshopper, junto ao motor de otimização Octopus, permitiu gerar diversas alternativas de design, identificar soluções Pareto-ótimas que representam os melhores *trade-offs* entre objetivos conflitantes, e visualizar intuitivamente essas soluções para auxiliar a decisão do projetista. A flexibilidade para manipular parâmetros e incorporar métricas estéticas objetivas representa avanço sobre métodos tradicionais, muitas vezes limitados pela intuição e experiência do designer.

Figura 1: Quadro paramétrico construído



Fonte: O Autor, 2025.

Acknowledgments

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

"This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001."

Referências

Bendsøe, M. P. e Kikuchi, N. (1988). Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 71(2): 197–224.

Jang, S., Yoo, S., e Kang, N. (2022). Generative design by reinforcement learning: enhancing the diversity of topology optimization designs. *Computer-Aided Design*, 146:103225.

McKnight, M. (2017). Generative design: What it is? how is it being used? why itâsa game changer. *KnE Engineering*, p. 176–181.

Oh, S., Jung, Y., Kim, S., Lee, I., e Kang, N. (2019). Deep generative design: Integration of topology optimization and generative models. *Journal of Mechanical Design*, 141(11):111405.

Reynoso Meza, G. (2014). *Controller tuning by means of evolutionary multiobjective optimization: a holistic multiobjective optimization design procedure*. PhD thesis, Editorial Universitat Politècnica de València.

Suppapitnarm, A., Parks, G., Shea, K., e Clarkson, P. (2004). Conceptual design of bicycle frames by multiobjective shape annealing. *Engineering Optimization*, 36(2):165–188.

Vierlinger, R. (2013). Multi objective design interface. *University of Applied Arts Vienna*.