

# Gêmeo Digital com Módulo de Otimização da Movimentação de Braço Robótico Utilizando a Heurística de Lin-Kernighan

## Digital Twin with Optimization Module for Robotic Arm Movement using the Lin-Kernighan Heuristic

Gabriel Ludke<sup>1</sup>, Rodrigo V. Andreão<sup>1</sup>, Mário Mestria<sup>1</sup>, Saulo Ribeiro<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Curso Superior em Engenharia Elétrica  
Instituto Federal do Espírito Santo (Ifes) – Vitória, ES – Brasil

<sup>2</sup>Departamento de Ciência da Computação – Universidade de Vila Velha (UVV) – Vila Velha, ES - Brasil

gabrielludke@gmail.com, {rodrigo.varejão, mmestria}@ifes.edu.br,  
saulo.ribeiro@uvv.br

**Abstract.** *This work proposes a Digital Twin application with a process optimization module coupled to a virtual plant simulator. The physical process has been reproduced in a virtual environment to simulate various operating conditions and the movement of the robotic arm. The optimization module comes into play to generate a route that minimizes the total distance of the trajectory. The optimal operation is then applied to the physical plant that reproduces the simulated movement. The results obtained in the simulation environment confirmed the role of the optimization module in increasing the efficiency of the robotic arm's operation.*

**Resumo.** *Este trabalho propõe uma aplicação de Gêmeo Digital dotado de módulo de otimização de processo acoplado ao simulador da planta virtual. O processo físico foi reproduzido em ambiente virtual de forma a possibilitar a simulação de diversas condições de operação e movimentação do braço robótico. O módulo de otimização entra em ação para gerar uma rota que minimiza a distância total da trajetória. Em seguida, a operação ótima é aplicada à planta física que reproduz o movimento simulado. Os resultados obtidos em ambiente de simulação confirmaram o papel do módulo de otimização no aumento da eficiência da operação do braço robótico.*

### 1. Introdução

A Indústria 4.0 representa um estágio da revolução industrial que envolve a criação de produtos, procedimentos e processos inteligentes que se comunicam entre si, resultando nas chamadas fábricas inteligentes (Kagermann *et al.*, 2013). Com o advento das linhas de produção, as indústrias passaram a ter demanda tecnológica para poder analisar e tomar decisões a respeito de seus produtos e processos (Schleich *et al.*, 2017). Uma das tecnologias criadas para otimização de análises é o Gêmeo Digital. Um Gêmeo Digital se mostra, portanto, como um sistema altamente complexo envolvendo a integração de

um sistema físico com seu modelo virtual. Sendo assim, este trabalho busca responder à pergunta de pesquisa: “Como utilizar o Gêmeo Digital para realizar o planejamento de trajetórias de um braço robótico e obter ganho por meio da redução da distância total de deslocamento?”. Dessa maneira, o objetivo geral deste trabalho é analisar os ganhos de distância obtidos por meio de otimização da trajetória do braço robótico com auxílio de aplicação de Gêmeo Digital.

## 2. Materiais e Métodos

O trabalho usou o braço robótico modelo *Dobot Magician* de uma planta didática de manufatura DK20/892F da Minipa (Minipa, 2023). A Figura 1 apresenta a planta física e o seu gêmeo digital.

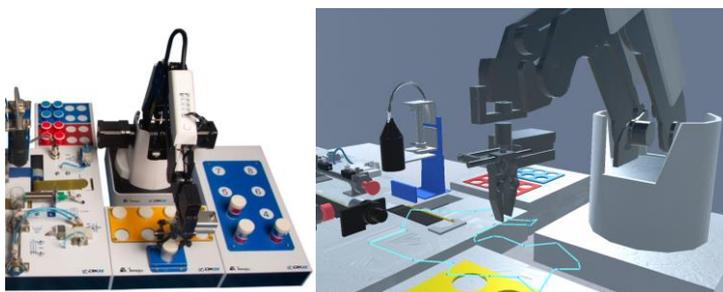


Figura 1. Planta física com braço robótico e o seu gêmeo digital

O gêmeo digital desenvolvido conta com um módulo de otimização que neste estudo tem seu fluxo de funcionamento ilustrado no diagrama da Figura 2. Detalhes da operação do módulo de otimização é apresentado na seção a seguir.

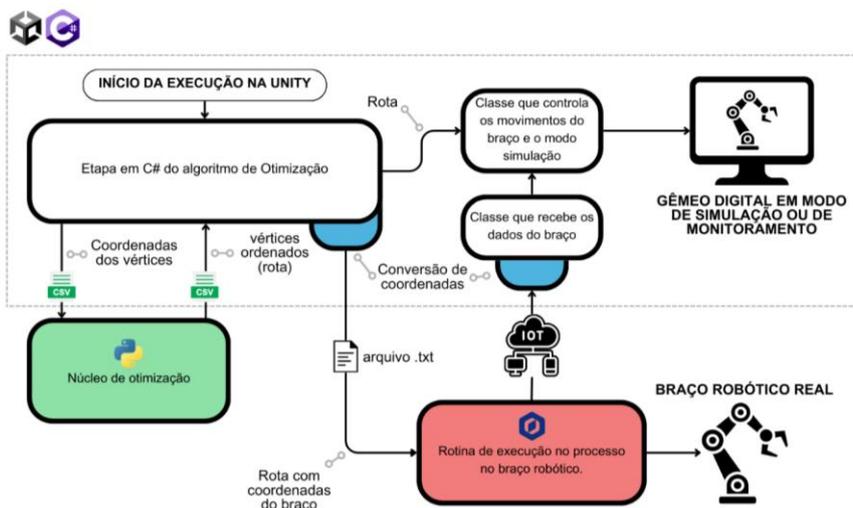


Figura 2. Diagrama de blocos da aplicação do Gêmeo Digital

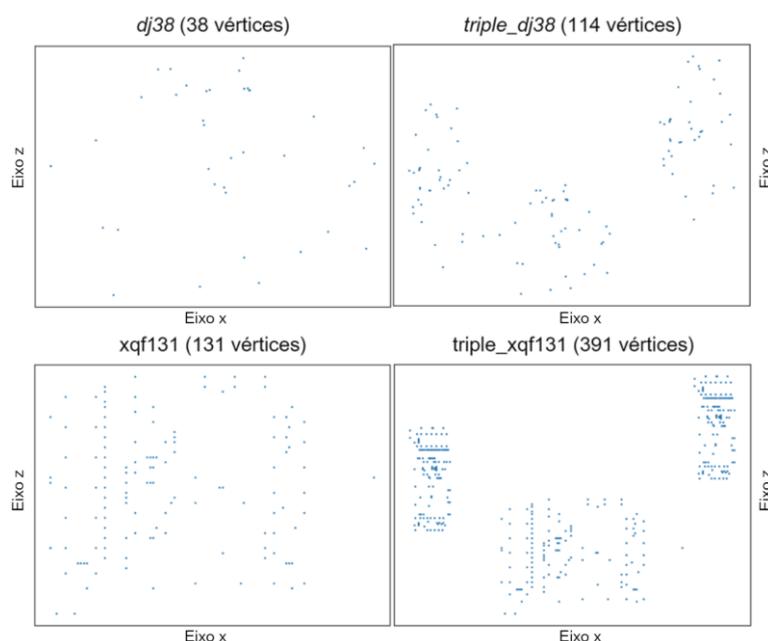
### 2.1. Princípio de Funcionamento do Módulo de Otimização do Gêmeo Digital

O Gêmeo Digital na plataforma *Unity* executa o algoritmo de otimização que irá retornar a rota (ver Figura 2). Após isso, é gerado um arquivo de texto com coordenadas do braço robótico para a execução da rotina no *DobotStudio* (por limitação do *software*, o conteúdo do arquivo de texto precisa ser inserido de forma manual).

A rota gerada pelo algoritmo de otimização é enviada para a classe responsável pela realização dos movimentos do braço na *Unity*. Porém, caso a execução seja no modo de monitoramento, a aplicação aguarda as informações enviadas do braço robótico utilizando a estrutura desenvolvida previamente com o protocolo MQTT. Recebendo as informações de posição, após a conversão de coordenadas, os movimentos são replicados na *Unity*.

## 2.2 Otimização do Gêmeo Digital no Modo Simulação

Foram realizados vários testes e aqui apresentamos quatro instâncias, Figura 3. Dessa maneira foi possível analisar o desempenho do programa frente às diversas situações que ele poderia encontrar na prática. Assim, foram obtidas 10 rotas por instância utilizando a heurística de Lin-Kernighan (Helsgaun, 2000) e analisados os custos de distância. Para cada instância, com base em Bottin *et al* (2022), foram calculados os valores médios com os respectivos desvios padrão. Foram feitas também comparações com soluções obtidas pela heurística do vizinho mais próximo (Hurkens e Woeginger, 2004).



**Figura 3. Instâncias executadas pelo braço robótico no modo simulação**

Dessa maneira, foram feitas as simulações na Unity e para cada instância, além das 10 rotas obtidas pelo algoritmo, foram medidas as distâncias tanto para a rota ótima (no caso das instâncias acadêmicas, que possuem soluções conhecidas) como para a rota da heurística de vizinho mais próximo.

## 3. Resultados

As execuções do algoritmo para as instâncias testadas na prática foram feitas utilizando um *notebook* com processador *Intel® Core™ i9-13900H*, 32 GB de Memória RAM e 1TB de SSD. Além disso, foi usada a parametrização selecionada durante o processo de calibração. As instâncias testadas são mostradas na Figura 3. A Tabela 1 apresenta as relações de *gaps* em relação às soluções ótimas e ganhos de distância em relação às soluções obtidas com a heurística do vizinho mais próximo.

**Tabela 1. Resultados de *gaps* em relação às soluções ótimas e ganhos de distância em relação aos resultados da heurística do vizinho mais próximo**

<b>Instância</b>	<b>Gap<sub>dist, méd</sub></b>	<b>Ganho<sub>máx</sub></b>	<b>Ganho<sub>dist, méd</sub></b>
dj38	2,527% ± 0,887%	30,81%	29,96% ± 0,61%
triple_dj38	-	11,80%	10,05% ± 1,56%
xqf131	8,046% ± 1,445%	16,05%	13,67% ± 1,15%
triple_xqf131	-	14,64%	9,831% ± 1,833%

#### 4. Conclusão

Nesse trabalho foi desenvolvido um algoritmo de otimização utilizando a heurística de Lin-Kernighan e sua versão modificada (Helsgaun, 2000). A distância percorrida pelo braço robótico emula movimentos em aplicações de rebitagem, perfuração e soldagem. Nesse contexto, o roteamento dos pontos da trajetória é uma componente importante. Para as instâncias analisadas no braço, os resultados de otimização mostraram baixos *gaps* em relação aos valores ótimos. Ademais, a heurística de Lin-Kernighan apresentou soluções com ganhos significativos de distância.

Em trabalhos futuros, outros aspectos dinâmicos podem ser explorados, como a influência de diferentes perfis de movimento do braço robótico. Por fim, o modo de simulação do Gêmeo Digital pode ser refinado, de forma ao modelo dinâmico replicar com maior precisão o movimento real, o que poderia influenciar também os resultados em uma análise prática.

#### 5. Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq e à FAPES TO 1039/2022 pelo apoio financeiro.

#### Referências

- Bottin, M., Boschetti, G. and Rosati, G. (2022) Optimizing Cycle Time of Industrial Robotic Tasks with Multiple Feasible Configurations at the Working Points. *Robotics*, v. 11, n. 1, p. 16, 15 Jan.
- Helsgaun, K. (2000) An effective implementation of the Lin-Kernighan traveling salesman heuristic. *European Journal of Operational Research*, v. 126, n. 1, p. 106130, Out.
- Hurkens, C. A. J. and Woeginger, G. J. (2004) On the nearest neighbor rule for the traveling salesman problem. *Operations Research Letters*, v. 32, n. 1, p. 1–4, Jan.
- Kagermann, H., Wahlster, W. and Helbig, J. (2013) Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0. Final report of the Industrie 4.0 Working Group Munich Forschungsunion, Acatech. Disponível em: <<https://en.acatech.de/>>. Acesso em: 04 jul. 2024.
- Minipa (2023) PROPOSTA TÉCNICA - SISTEMA INTEGRADO DE MANUFATURA MODELO: DK20/892F. Belo Horizonte. Disponível em: <[https://www.minipa.com.br/images/proposta\\_tecnica/Proposta\\_Tecnica\\_MECHA\\_TROSYSTEM.pdf](https://www.minipa.com.br/images/proposta_tecnica/Proposta_Tecnica_MECHA_TROSYSTEM.pdf)>. Acesso em: 6 out. 2023.
- Schleich, B. *et al.* (2017) Shaping the digital twin for design and production engineering. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, v. 66, n. 1, p. 141–144.