



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ESTATÍSTICA E MATEMÁTICA APLICADA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM E MÉTODOS
QUANTITATIVOS
MESTRADO ACADÊMICO EM MODELAGEM E MÉTODOS QUANTITATIVOS

WILL ANDERSON MARTINS RODRIGUES

ESCALONAMENTO DE PROJETOS COM RESTRIÇÕES DE RECURSOS:
MODELAGEM MATEMÁTICA E APLICAÇÕES PRÁTICAS NA GESTÃO DE
PROJETOS

FORTALEZA

2025

WILL ANDERSON MARTINS RODRIGUES

ESCALONAMENTO DE PROJETOS COM RESTRIÇÕES DE RECURSOS:
MODELAGEM MATEMÁTICA E APLICAÇÕES PRÁTICAS NA GESTÃO DE
PROJETOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem e Métodos Quantitativos do Centro de Ciências da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Modelagem e Métodos Quantitativos. Área de Concentração: Modelagem e Métodos Quantitativos.

Orientador: Prof. Dr. Albert Einstein
Fernandes Muritiba.

FORTALEZA

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

R617e Rodrigues, Will Anderson Martins.

Escalonamento de projetos com restrições de recursos: modelagem matemática e aplicações práticas na gestão de projetos / Will Anderson Martins Rodrigues. – 2025.
75 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Programa de Pós-Graduação em Modelagem e Métodos Quantitativos, Fortaleza, 2025.

Orientação: Prof. Dr. Albert Einstein Fernandes Muritiba.

1. Escalonamento de projetos. 2. Restrição de recursos. 3. RCPSP. 4. Metaheurísticas. I. Título.

CDD 510

WILL ANDERSON MARTINS RODRIGUES

ESCALONAMENTO DE PROJETOS COM RESTRIÇÕES DE RECURSOS:
MODELAGEM MATEMÁTICA E APLICAÇÕES PRÁTICAS NA GESTÃO DE
PROJETOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem e Métodos Quantitativos do Centro de Ciências da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Modelagem e Métodos Quantitativos. Área de Concentração: Modelagem e Métodos Quantitativos.

Orientador: Prof. Dr. Albert Einstein Fernandes Muritiba.

Aprovado em: 28/04/2025

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Albert Einstein Fernandes Muritiba (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Michael Ferreira de Souza
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Tales Paiva Nogueira
Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)

AGRADECIMENTOS

A jornada até a conclusão deste trabalho foi marcada por desafios, aprendizado e superação. Esse feito não teria sido alcançado sem o apoio e incentivo de pessoas essenciais ao longo do caminho.

Agradeço à minha esposa, Edivânia Rodrigues, que esteve ao meu lado em todos os momentos, oferecendo suporte incondicional e compreensão nos períodos mais exigentes desta caminhada. Seu amor, paciência e incentivo foram fundamentais para que eu seguisse firme até a conclusão deste trabalho. À minha filha, Elouise Rodrigues, que, mesmo tão pequena, trouxe ainda mais significado e motivação para cada passo dessa trajetória.

À minha mãe, Luísa Martins, que, mesmo enfrentando um momento difícil, nunca deixou de acreditar no meu potencial e torcer pelo meu sucesso. Obrigado por ter me ensinando desde cedo o valor do conhecimento e da dedicação. Seu esforço e incentivo foram fundamentais para que eu chegasse até aqui.

Ao Prof. Dr. Albert Einstein Fernandes Muritiba, agradeço pela paciência, pelo apoio e pela disponibilidade ao longo desta jornada acadêmica. Seu suporte foi essencial para que eu pudesse concluir este trabalho.

Aos meus colegas de curso, pela parceria, troca de conhecimentos e apoio ao longo dessa caminhada. A todos os membros do Departamento de Estatística e Matemática Aplicada, incluindo professores e funcionários, pela valiosa contribuição para minha formação e pelo ambiente de aprendizado enriquecedor.

À empresa onde trabalho, por permitir que eu conciliasse meus estudos com minha trajetória profissional e pelo suporte ao longo desse período.

“Excellence is never an accident; it is the result of high intention, sincere effort, and intelligent execution.”

(A excelência nunca é um acidente; é o resultado de uma intenção elevada, esforço sincero e execução inteligente.)

(Aristóteles)

RESUMO

O escalonamento de projetos com restrições de recursos representa um desafio frequente na gestão moderna de projetos, demandando métodos eficazes para otimizar simultaneamente tempo, custo e qualidade em ambientes complexos. Métodos tradicionais, como o PERT (*Program Evaluation and Review Technique*) e CPM (*Critical Path Method*), demonstram limitações significativas ao lidarem com múltiplos modos de execução e variações dinâmicas na disponibilidade dos recursos. Neste contexto, o presente estudo investiga como técnicas de modelagem matemática combinadas a metaheurísticas avançadas podem potencializar o escalonamento de projetos, permitindo uma alocação mais eficiente e adaptativa dos recursos disponíveis. Adotou-se como metodologia uma revisão bibliográfica sistemática, abrangendo publicações dos últimos dez anos em bases científicas renomadas como CAPES, ScienceDirect, SciELO e IEEE Xplore. Foram analisados artigos relevantes sobre o problema clássico denominado *Resource-Constrained Project Scheduling Problem* (RCPSP), focando especialmente nas técnicas de heurísticas e metaheurísticas, como algoritmos genéticos, busca tabu e *Particle Swarm Optimization* (PSO). Os resultados da revisão indicam que abordagens híbridas, principalmente aquelas integrando algoritmos evolutivos com técnicas de busca local, demonstram desempenho superior aos métodos tradicionais, especialmente em termos de flexibilidade e adaptação às mudanças imprevistas nos projetos. Adicionalmente, tendências observadas na literatura sugerem que a integração com técnicas de aprendizado de máquina pode potencialmente reduzir a complexidade computacional e melhorar a eficácia dos modelos empregados. O estudo conclui que a combinação entre modelagem matemática e heurísticas avançadas representa um avanço significativo não apenas para a alocação otimizada dos recursos, mas também para o desenvolvimento de estratégias computacionais inovadoras, especialmente aplicáveis a setores como construção civil, manufatura e tecnologia da informação.

Palavras-Chave: escalonamento de projetos; restrição de recursos; RCPSP; modelagem matemática; metaheurísticas; otimização combinatória.

ABSTRACT

Project scheduling under resource constraints is a recurrent challenge in contemporary project management, demanding effective methods to simultaneously optimize time, cost, and quality in complex environments. Traditional techniques such as PERT (*Program Evaluation and Review Technique*) and CPM (*Critical Path Method*) show significant limitations in handling multiple execution modes and dynamic variations in resource availability. In this context, this study investigates how mathematical modeling combined with advanced metaheuristics can enhance project scheduling, enabling a more efficient and adaptive allocation of available resources. The methodology adopted was a systematic literature review, covering publications from the past ten years in prominent scientific databases such as CAPES, SciELO, and IEEE Xplore. Relevant articles addressing the classical Resource-Constrained Project Scheduling Problem (RCPSP) were analyzed, with special attention to heuristic and metaheuristic techniques, including genetic algorithms, tabu search, and particle swarm optimization (PSO). The findings indicate that hybrid approaches, particularly those integrating evolutionary algorithms with local search techniques, consistently outperform traditional methods, especially regarding flexibility and adaptability to unforeseen project changes. Additionally, emerging trends identified in the literature suggest that integrating machine learning techniques could potentially reduce computational complexity and enhance the effectiveness of the employed models. The study concludes that combining mathematical modeling with advanced heuristics represents a significant advancement, not only in optimizing resource allocation but also in fostering innovative computational strategies, particularly applicable to sectors such as construction, manufacturing, and information technology.

Keywords: project scheduling; resource constraints; RCPSP; mathematical modeling; metaheuristics; combinatorial optimization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Diagrama de rede integrado de 3 projetos de um portfólio.....	16
Figura 2 -	Exemplo de Diagrama de Rede CPM (Notação AON) com caminho crítico destacado em vermelho.....	26
Figura 3 -	Fluxograma de um Algoritmo Genético.....	33
Figura 4 -	Representação gráfica do movimento das partículas no algoritmo PSO em busca da solução ótima.....	35
Figura 5 -	Diagrama de Fluxo da Revisão Sistemática segundo o PRISMA 2020.....	42

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Distribuição dos estudos por abordagem metodológica (n=60)	51
Gráfico 2 - Distribuição dos estudos por ano de publicação (n=60)	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação entre Métodos Heurísticos e Metaheurísticos no Escalonamento de Projetos.....	36
Tabela 2 - Comparação Qualitativa de Abordagens para o RCPSP.....	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

1-PRCPSP	<i>Single-Project Resource-Constrained Project Scheduling Problem</i>
ACO	<i>Ant Colony Optimization</i>
AON	<i>Activity-on-Node</i>
B&B	<i>Branch and Bound</i>
BDTD	<i>Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações</i>
BFSM-GA	<i>Backward Forward Scheduling Method – Genetic Algorithm</i>
CAPES	<i>Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior</i>
CP	<i>Constraint Programming</i>
CPM	<i>Critical Path Method</i>
GA	<i>Genetic Algorithm</i>
HAntCO	<i>Hybrid Ant Colony Optimization</i>
IA	<i>Inteligência Artificial</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
LNS	<i>Large Neighborhood Search</i>
ML	<i>Machine Learning</i>
NP	<i>Nondeterministic Polynomial</i>
NPV	<i>Net Present Value</i>
PERT	<i>Program Evaluation and Review Technique</i>
PRISMA	<i>Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses</i>
PSO	<i>Particle Swarm Optimization</i>
PSPLIB	<i>Project Scheduling Problem Library</i>
RCPSP	<i>Resource-Constrained Project Scheduling Problem</i>
SAT	<i>Satisfiability Solver</i>
SciELO	<i>Scientific Electronic Library Online</i>
SGS	<i>Serial Generation Scheme</i>
SRE	<i>Statistical Regression Equations</i>
VLNS	<i>Very Large Neighborhood Search</i>
XAI	<i>Explainable Artificial Intelligence</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Apresentação	13
1.2	Motivação	14
1.3	Descrição do Problema	15
1.3.1	<i>Formulação Matemática do Problema</i>	<i>17</i>
1.3.2	<i>Objetivos</i>	<i>18</i>
1.4	Estrutura do Trabalho	19
2	FUNDAMENTOS DO ESCALONAMENTO DE PROJETOS E REVISÃO DA LITERATURA.....	20
2.1	Introdução à Fundamentação Teórica	20
2.2	Conceitos Fundamentais de Escalonamento de Projetos	22
2.2.1	<i>Definição e Caracterização</i>	<i>22</i>
2.2.2	<i>Importância do Escalonamento na Gestão de Projetos</i>	<i>22</i>
2.2.3	<i>Classificação dos Problemas de Escalonamento.....</i>	<i>23</i>
2.2.4	<i>Métodos para a Solução do RCPSP</i>	<i>24</i>
2.2.4.1	<i>Heurísticas e Metaheurísticas:</i>	<i>24</i>
2.2.4.2	<i>Programação por Restrições</i>	<i>24</i>
2.2.4.3	<i>Integração com Inteligência Artificial</i>	<i>25</i>
2.3	Métodos Tradicionais de Escalonamento	25
2.3.1	<i>Critical Path Method (CPM).....</i>	<i>26</i>
2.3.2	<i>Program Evaluation and Review Technique (PERT)</i>	<i>27</i>
2.3.3	<i>Modelagem Matemática no Escalonamento de Projetos</i>	<i>28</i>
2.3.4	<i>Resumo Crítico</i>	<i>29</i>
2.4	Técnicas Computacionais para Escalonamento.....	30
2.4.1	<i>Heurísticas Básicas.....</i>	<i>30</i>
2.4.1.1	<i>Regras de Prioridade.....</i>	<i>30</i>
2.4.1.2	<i>Algoritmos Gulosos.....</i>	<i>31</i>
2.4.2	<i>Metaheurísticas Avançadas.....</i>	<i>31</i>
2.4.2.1	<i>Algoritmos Genéticos.....</i>	<i>32</i>
2.4.2.2	<i>Busca Tabu</i>	<i>34</i>
2.4.2.3	<i>Particle Swarm Optimization (PSO).....</i>	<i>34</i>
2.4.3	<i>Comparação entre Métodos Heurísticos e Metaheurísticos</i>	<i>35</i>
2.4.4	<i>Considerações Finais.....</i>	<i>36</i>

2.5	Aplicações do Escalonamento de Projetos	37
2.5.1	<i>Construção Civil: Planejamento de Obras e Alocação de Mão de Obra</i>	37
2.5.2	<i>Engenharia de Software: Organização de Sprints e Alocação de Desenvolvedores</i>	38
2.5.3	<i>Manufatura e Indústria: Planejamento de Produção e Logística de Suprimentos.....</i>	39
2.5.4	<i>Conclusão sobre Aplicações do Escalonamento</i>	39
2.6	Considerações Finais.....	40
3	METODOLOGIA.....	42
3.1	Questão de Pesquisa e Critérios de Elegibilidade.....	43
3.2	Fontes de Informação e Estratégia de Busca	45
3.3	Processo de Seleção dos Estudos	46
3.4	Processo de Extração e Análise dos Dados	47
3.5	Limitações da Revisão	48
3.6	Rigor e Relevância da Metodologia	49
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
4.1	Caracterização geral dos estudos selecionados	51
4.2	Análise Comparativa das Abordagens Metodológicas	53
4.3	Discussão Crítica dos Resultados	55
4.3.1	<i>Métodos Exatos</i>	55
4.3.2	<i>Heurísticas Simples.....</i>	55
4.3.3	<i>Metaheurísticas.....</i>	56
4.3.4	<i>Métodos Híbridos</i>	58
4.3.5	<i>Síntese e Implicações Práticas</i>	59
4.4	Desafios e Limitações na Aplicação Prática	59
4.5	Implicações dos Resultados e Perspectivas Futuras	60
4.5.1	<i>Diretrizes Práticas para a Gestão de Projetos</i>	61
4.5.2	<i>Perspectivas para Pesquisas Futuras</i>	61
5	CONCLUSÕES	64
	REFERÊNCIAS	67

1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação

A gestão de projetos é fundamental para o planejamento e execução de atividades organizacionais, assegurando o uso eficiente dos recursos para alcançar objetivos estratégicos. No entanto, cerca de 70% dos projetos falham em cumprir prazos, custos ou escopo devido a falhas no planejamento e na alocação inadequada de recursos (Standish Group, 2021). Esses desafios evidenciam a necessidade de métodos mais eficazes para a distribuição e o uso otimizado de recursos ao longo do ciclo de vida dos projetos. Nesse contexto, o escalonamento de projetos com restrições de recursos surge como um dos problemas mais complexos da área, pois envolve a alocação eficiente de recursos limitados entre atividades interdependentes, garantindo a viabilidade operacional e o cumprimento dos prazos estabelecidos.

Nesse cenário, destaca-se o escalonamento de projetos sob restrições de recursos, frequentemente referido na literatura como *Resource-Constrained Project Scheduling Problem* (RCPSP). O RCPSP constitui um problema clássico em otimização combinatória, cujo objetivo principal é encontrar o cronograma ideal das atividades do projeto, minimizando o tempo total necessário (*makespan*) e respeitando limitações na disponibilidade de recursos, como mão de obra especializada, materiais e equipamentos.

Falhas no planejamento e na alocação de recursos estão entre as principais causas de atrasos e ineficiências em projetos, especialmente nos de construção e infraestrutura. Segundo Mehta *et al.* (2022), a má gestão de recursos compromete a produtividade e impacta diretamente o desempenho do cronograma. Esse problema é especialmente relevante em setores como construção civil, engenharia de *software* e manufatura, onde atrasos e estouros de orçamento podem comprometer a viabilidade do projeto. A constatação de que desvios superiores a 30% são comuns em projetos complexos (Flyvbjerg *et al.*, 2003) reforça a dimensão do problema, e análises recentes confirmam a persistência desses impactos (Álvarez-Pozo *et al.*, 2024).

Historicamente, técnicas clássicas como o *Critical Path Method* (CPM) e o *Program Evaluation and Review Technique* (PERT) foram amplamente utilizadas

para a modelagem e análise de cronogramas de projetos. Contudo, essas abordagens apresentam limitações significativas em cenários que envolvem múltiplos modos de execução e variações dinâmicas na disponibilidade de recursos, o que compromete a eficácia da tomada de decisões no gerenciamento de projetos. Como alternativa, heurísticas e metaheurísticas vêm sendo exploradas como ferramentas promissoras para solucionar o RCPSP, permitindo maior flexibilidade na alocação de recursos e adaptabilidade a mudanças ao longo do ciclo de vida dos projetos.

Com o avanço da computação e das técnicas de inteligência artificial (IA), a aplicação de metaheurísticas híbridas, como algoritmos genéticos, busca tabu e otimização por enxame de partículas, do inglês *Particle Swarm Optimization* (PSO), tem mostrado resultados promissores na obtenção de soluções eficientes para o escalonamento de projetos com restrições de recursos. Estudos recentes, como o de Rabet *et al.* (2024), demonstram a eficácia de abordagens híbridas. Ao combinar um modelo de simulação com um algoritmo genético, os autores alcançaram uma redução de 12,7% na duração do projeto em comparação com métodos tradicionais, evidenciando o potencial dessas técnicas para aumentar a eficiência na alocação de recursos e no cumprimento de prazos.

Diante desse contexto, o presente estudo se propõe a investigar como a modelagem matemática e as técnicas computacionais avançadas podem contribuir para a otimização do escalonamento de projetos sujeitos a restrições de recursos, visando não apenas um melhor planejamento, mas também maior eficiência operacional e redução de desperdícios no uso de recursos escassos.

1.2 Motivação

A eficiência na gestão de projetos tornou-se um diferencial competitivo essencial, especialmente em ambientes de alta complexidade operacional e grande demanda por integração entre áreas e recursos. A má distribuição de recursos pode resultar em atrasos significativos, aumento de custos e comprometimento da qualidade das entregas. Entretanto, ao assumirem uma alocação estática de recursos, métodos tradicionais como PERT e CPM tornam-se pouco eficazes frente à variabilidade e dinamicidade características dos projetos modernos. (Pinedo, 1995).

Para superar essas limitações, abordagens computacionais mais avançadas têm sido exploradas, proporcionando maior adaptabilidade e eficiência no escalonamento de projetos com restrições de recursos. Nos últimos anos, o avanço das técnicas de otimização computacional tem impulsionado o desenvolvimento de soluções mais eficazes, incluindo metaheurísticas bio-inspiradas, como algoritmos genéticos, otimização por enxame de partículas e busca tabu. Essas técnicas demonstram a capacidade de encontrar soluções viáveis em um tempo computacional reduzido, mesmo para problemas de grande porte. Além disso, a integração dessas abordagens com aprendizado de máquina abre novas possibilidades, permitindo ajustes dinâmicos conforme as condições do projeto evoluem.

1.3 Descrição do Problema

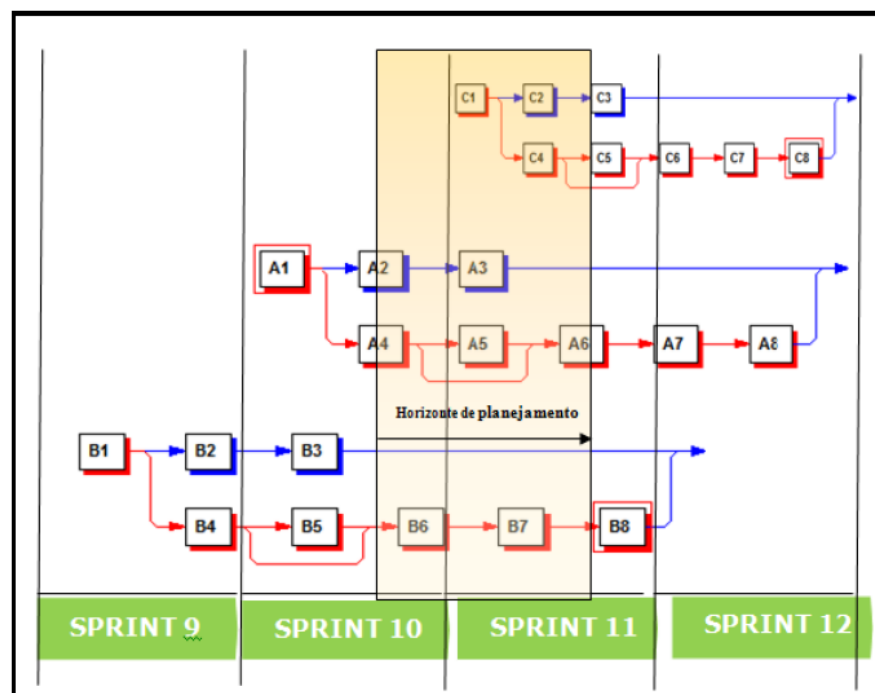
Embora a gestão de projetos tenha evoluído significativamente, a otimização do escalonamento de atividades sob restrições de recursos continua sendo um desafio crítico. Em cenários reais, a disponibilidade de recursos raramente é fixa e previsível, tornando métodos tradicionais, como PERT e CPM, insuficientes para lidar com a complexidade dos projetos modernos. Esses modelos assumem uma alocação estática de recursos, sem considerar variações inesperadas que podem surgir ao longo da execução.

Esse problema manifesta-se em diversos setores. Na construção civil, por exemplo, atividades como escavação, fundação, instalações elétricas e acabamento dependem de recursos específicos, como mão de obra especializada e materiais, cuja disponibilidade pode ser limitada. Um atraso na entrega de um insumo essencial pode gerar períodos de inatividade para equipes inteiras, aumentando os custos operacionais e comprometendo prazos. De modo semelhante, na engenharia de *software*, o desenvolvimento de um sistema exige a participação de programadores, testadores e analistas de qualidade em diferentes etapas. Se uma falha crítica identificada nos testes exigir ajustes no código, mas os desenvolvedores já tiverem sido realocados para outras tarefas, a falta de flexibilidade no escalonamento poderá gerar atrasos significativos na entrega do produto.

A complexidade da alocação de recursos intensifica-se ainda mais quando há múltiplos projetos concorrendo pelos mesmos recursos compartilhados

dentro de um portfólio. A necessidade de balancear a distribuição eficiente desses recursos exige um planejamento detalhado para evitar gargalos operacionais. A Figura 1 ilustra um cenário típico no qual três projetos interligados compartilham os mesmos recursos ao longo das *sprints*. Esse diagrama destaca como as restrições de recursos podem criar conflitos de prioridade entre atividades, exigindo técnicas avançadas de escalonamento para garantir a conclusão dos projetos sem atrasos excessivos.

Figura 1 – Diagrama de rede integrado de 3 projetos de um portfólio



Fonte: (Adaptado de Negreiros e Barbosa, 2013).

Diante desses desafios, torna-se evidente que as estratégias tradicionais de escalonamento não são suficientes para lidar com ambientes dinâmicos e interdependentes. Métodos mais avançados, como heurísticas e metaheurísticas, surgem como alternativas promissoras, proporcionando maior flexibilidade na alocação de recursos e aprimorando a previsibilidade das entregas. Assim, este estudo investiga como a modelagem matemática e as abordagens computacionais avançadas podem contribuir para um escalonamento eficiente, otimizando tempo, custo e qualidade.

1.3.1 Formulação Matemática do Problema

O RCPSP é um problema clássico de otimização combinatória, no qual se busca minimizar o tempo total de execução de um projeto (*makespan*), garantindo que todas as restrições de precedência e disponibilidade de recursos sejam respeitadas. Esse problema pode ser modelado matematicamente da seguinte forma:

Seja um projeto composto por um conjunto de atividades $N = \{1, 2, \dots, n\}$, onde cada atividade i possui um tempo de duração d_i , e requer uma quantidade específica de recursos $r_{i,k}$, com k representando os diferentes tipos de recursos disponíveis. A alocação dos recursos deve respeitar a capacidade limitada R_k , disponível para cada unidade de tempo.

Restrições do problema:

1. Precedência entre atividades:

Algumas atividades possuem relações de dependência, ou seja, uma atividade j só pode iniciar após a conclusão da atividade i , conforme expresso por:

$$S_j \geq S_i + d_i, \forall (i, j) \in P$$

onde S_i representa o tempo de início da atividade i e P é o conjunto de pares de atividades com restrições de precedência.

2. Capacidade dos Recursos:

Em qualquer instante t , a soma dos recursos alocados às atividades em execução não pode exceder a capacidade total disponível:

$$\sum_{i \in N} r_{i,k} \cdot x_{i,t} \leq R_k, \forall k, \forall t$$

onde $x_{i,t}$ é uma variável binária que assume o valor 1 se a atividade i estiver no tempo t , e 0 caso contrário.

3. Objetivo de otimização:

O objetivo principal do RCPSP é minimizar o tempo total de conclusão do projeto (*makespan*):

$$\min \max_{i \in N} (S_i + d_i)$$

As dificuldades na resolução do RCPSP decorrem da sua complexidade combinatória, pois o número de possíveis cronogramas cresce exponencialmente conforme aumenta o número de atividades e restrições. Assim, métodos exatos como *branch-and-bound* são inviáveis para instâncias grandes, e abordagens heurísticas e metaheurísticas são frequentemente utilizadas para encontrar soluções próximas do ótimo de forma eficiente.

1.3.2 Objetivos

O objetivo geral deste estudo é investigar e analisar abordagens matemáticas e computacionais para o escalonamento de projetos sujeitos a restrições de recursos, por meio da revisão e comparação de modelos existentes, examinando suas contribuições para a alocação eficiente de recursos escassos e a mitigação de impactos negativos, como atrasos e sobrecarga operacional.

Para alcançar esse objetivo, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Caracterizar o problema RCPSP, identificando suas variantes e os principais desafios enfrentados na alocação de recursos em projetos complexos;
- Analisar os métodos tradicionais de escalonamento, como PERT e CPM, destacando suas limitações diante de ambientes dinâmicos e sujeitos a incertezas;
- Investigar heurísticas e metaheurísticas aplicadas ao RCPSP, avaliando seu desempenho e aplicabilidade prática em diferentes cenários;
- Examinar abordagens de aprendizado de máquina e algoritmos híbridos no contexto do RCPSP, avaliando sua evolução na literatura e seu potencial para aprimorar a eficiência na resolução do problema;
- Sistematizar diretrizes para a aplicação dessas abordagens, fornecendo recomendações para gestores e pesquisadores que enfrentam desafios recorrentes na alocação de recursos.

1.4 Estrutura do Trabalho

Esta dissertação está estruturada em cinco capítulos. No Capítulo 2, são apresentados os fundamentos teóricos do escalonamento de projetos com restrições de recursos, abordando desde métodos tradicionais (PERT e CPM) até heurísticas, metaheurísticas e tendências emergentes, como a aplicação de aprendizado de máquina.

O Capítulo 3 descreve a metodologia da pesquisa, incluindo a revisão sistemática da literatura, os critérios de seleção dos estudos analisados e os métodos empregados para comparar diferentes técnicas de escalonamento.

No Capítulo 4, são discutidos os principais achados da pesquisa, comparando abordagens e avaliando suas vantagens e limitações no contexto do RCPSP.

Por fim, o Capítulo 5 apresenta as conclusões, ressaltando as contribuições teóricas e práticas do estudo, além de apontar limitações e direções para pesquisas futuras.

2 FUNDAMENTOS DO ESCALONAMENTO DE PROJETOS E REVISÃO DA LITERATURA

O presente capítulo estabelece os conceitos fundamentais e o embasamento teórico necessários para compreender o problema de pesquisa. A fundamentação teórica desempenha um papel essencial na construção do conhecimento sobre escalonamento de projetos com restrições de recursos, fornecendo as bases conceituais para a metodologia adotada no Capítulo 3.

2.1 Introdução à Fundamentação Teórica

O escalonamento de projetos com restrições de recursos é amplamente estudado na literatura de otimização combinatória e gestão de projetos. Esse tema tornou-se particularmente relevante diante do cenário atual, no qual a eficiência na alocação de recursos e o cumprimento de prazos representam desafios constantes, tanto no setor privado quanto na administração pública. A alocação inadequada de recursos pode comprometer cronogramas, gerar custos adicionais e impactar a qualidade das entregas. Dessa forma, compreender as metodologias e técnicas disponíveis é fundamental para aprimorar a previsibilidade e a eficiência dos processos de gestão.

A modelagem matemática desempenha um papel crucial na resolução desse problema, oferecendo ferramentas para a construção de cronogramas otimizados e adaptáveis às restrições existentes. No contexto brasileiro, observa-se uma crescente adoção de metodologias ágeis e híbridas, que buscam alinhar-se às demandas de um ambiente empresarial dinâmico e tecnológico (Kerbes *et al.*, 2023). Por outro lado, a administração pública enfrenta desafios específicos, como a aquisição de ferramentas de gestão, a comunicação eficaz e a adaptação à cultura organizacional (Lira e Lima, 2024), tornando o escalonamento de projetos uma questão estratégica para garantir eficiência e transparência na execução de políticas públicas.

A complexidade do escalonamento se reflete em diferentes áreas, desde projetos de infraestrutura de grande porte (Pinto e Teixeira, 2016) até iniciativas urbanas voltadas à mobilidade e uso racional de recursos públicos (Paranaíba e

Bulhões, 2021).

Além das aplicações práticas, o estudo do escalonamento de projetos fundamenta-se em modelos teóricos como o RCPSP, que estende as abordagens clássicas de análise de rede, como CPM e PERT, para cenários com recursos limitados. Para a resolução do RCPSP, diversas heurísticas e metaheurísticas têm sido desenvolvidas, destacando-se algoritmos como a Busca Tabu, que são amplamente utilizados para encontrar soluções eficientes que equilibram tempo, custo e disponibilidade de recursos (Tchao, 2007).

Assim, este capítulo explora os principais conceitos, metodologias e aplicações do escalonamento de projetos, abordando desde os fundamentos da gestão de projetos e restrições de recursos até a modelagem matemática e as heurísticas aplicadas à solução do RCPSP. A estrutura do capítulo está organizada da seguinte forma:

Seção 2.2 – Apresenta os fundamentos da gestão de projetos e os desafios impostos pelas restrições de recursos.

Seção 2.3 – Explora a modelagem matemática aplicada ao escalonamento de projetos, discutindo abordagens determinísticas e estocásticas.

Seção 2.4 – Analisa os métodos de solução do RCPSP, incluindo heurísticas baseadas em regras de prioridade, metaheurísticas e algoritmos avançados.

Seção 2.5 – Revisa estudos de caso apresentados na literatura sobre o escalonamento de projetos em setores como construção civil, engenharia de *software* e manufatura, destacando os resultados obtidos com a aplicação de técnicas computacionais.

Seção 2.6 – Apresenta as considerações finais do capítulo, sintetizando os principais achados sobre o RCPSP e introduzindo a metodologia de revisão sistemática que será detalhada no capítulo seguinte.

A seguir, apresenta-se um panorama geral sobre a gestão de projetos e a relevância do escalonamento em diferentes contextos organizacionais.

2.2 Conceitos Fundamentais de Escalonamento de Projetos

2.2.1 Definição e Caracterização

O escalonamento de projetos é um processo essencial na gestão de projetos, responsável por organizar e sequenciar atividades ao longo do tempo, garantindo que os objetivos sejam atingidos dentro dos prazos e das restrições de recursos. A forma como o escalonamento é realizado pode variar conforme a disponibilidade dos recursos, podendo ser classificado em duas categorias principais:

- Escalonamento com recursos ilimitados: ocorre quando não há restrições quanto à quantidade de trabalhadores, materiais ou equipamentos disponíveis. Nesse cenário, as atividades podem ser distribuídas de forma otimizada com base apenas em suas durações e relações de precedência, representando o modelo mais fundamental do escalonamento de projetos (Habibi *et al.*, 2018).
- Escalonamento com restrições de recursos: trata-se de um dos desafios mais complexos no gerenciamento de projetos, em que a alocação das atividades deve respeitar limitações de recursos, como orçamento, mão de obra qualificada e disponibilidade de equipamentos. Esse tipo de escalonamento exige abordagens avançadas, como heurísticas e metaheurísticas, para encontrar soluções viáveis e eficientes (Hartmann e Briskorn, 2010; Sprecher *et al.*, 1997). Estudos recentes, como o de Goncharov (2025), apontam o uso de algoritmos híbridos que combinam estratégias evolutivas e busca local para otimizar a resolução do RCPSP.

2.2.2 Importância do Escalonamento na Gestão de Projetos

O escalonamento eficaz impacta diretamente a eficiência organizacional e pode determinar o sucesso dos projetos. Entre os principais benefícios de um escalonamento bem planejado, destacam-se:

- Redução de custos: a otimização no uso de recursos evita desperdícios financeiros e operacionais, permitindo que os projetos sejam concluídos

dentro do orçamento previsto (Schutt *et al.*, 2012);

- Robustez na alocação de recursos: estratégias de escalonamento sob incerteza buscam melhorar a confiabilidade do cronograma, reduzindo o impacto de gargalos e interrupções no uso de recursos (Herroelen e Leus, 2005). Em setores como infraestrutura e energia, por exemplo, Zhang *et al.* (2024) demonstraram que modelos baseados em análise de risco, como *Value at Risk*, permitem decisões mais robustas e eficazes quanto à alocação de recursos e cumprimento de prazos;
- Cumprimento de prazos: a organização estruturada das atividades minimiza atrasos e garante que as entregas sejam realizadas conforme o planejamento (Tormos e Lova, 2001).

Além desses benefícios, a aplicação de técnicas avançadas de escalonamento permite que empresas e instituições adaptem seus projetos às mudanças no ambiente de negócios, otimizando processos e tornando a execução mais estratégica e eficiente.

2.2.3 Classificação dos Problemas de Escalonamento

Os problemas de escalonamento podem ser categorizados de diversas maneiras, dependendo de seus objetivos e da natureza das restrições envolvidas. As principais classificações incluem:

- Determinísticos vs. Estocásticos: problemas determinísticos assumem que os tempos de execução das atividades são conhecidos com precisão, enquanto os estocásticos consideram incertezas e variabilidades nos prazos e na disponibilidade de recursos (Demeulemeester e Herroelen, 2002). Modelos estocásticos são amplamente utilizados para prever cenários realistas e lidar com imprevistos, sendo fundamentais em ambientes dinâmicos, conforme indicam (Borsuk e Lee, 2009).
- Mono-objetivo vs. Multiobjetivo: alguns problemas buscam otimizar um único critério, como a minimização do *makespan* (tempo total de execução do projeto), enquanto outros envolvem múltiplos objetivos, como a redução simultânea de custos, o aumento da qualidade e a

maximização da satisfação do cliente (Debels e Vanhoucke, 2007).

2.2.4 Métodos para a Solução do RCPSP

Além dessas classificações, diversos métodos têm sido propostos na literatura para solucionar o RCPSP. Entre as principais abordagens estão:

2.2.4.1 Heurísticas e Metaheurísticas:

Os métodos heurísticos e metaheurísticos são amplamente utilizados na solução do RCPSP, principalmente para instâncias de grande porte. Destacam-se:

- Busca Tabu: técnica baseada na exploração de soluções vizinhas, evitando ciclos repetitivos e melhorando a convergência para soluções otimizadas. Embora não aplicada diretamente, é mencionada por Hartmann (1998) como uma abordagem relevante entre as heurísticas comparadas.
- Algoritmos Genéticos: inspirados na evolução natural, esses métodos aplicam operadores genéticos, como *crossover* e mutação, para encontrar soluções robustas para problemas de escalonamento (Gonçalves *et al.*, 2005). Estudos indicam que a introdução de operadores de *crossover* adaptativos pode melhorar significativamente a qualidade das soluções obtidas (Zhang *et al.*, 2007).
- Otimização por Enxame de Partículas e Colônia de Formigas: abordagens baseadas em inteligência coletiva, frequentemente aplicadas para otimizar o escalonamento de projetos e melhorar a alocação de recursos (Merkle *et al.*, 2002).

2.2.4.2 Programação por Restrições

A programação por restrições é uma técnica que modela o RCPSP como um conjunto de restrições a serem satisfeitas, permitindo uma solução estruturada e precisa. Essa abordagem tem sido aplicada com sucesso em projetos industriais e de tecnologia, otimizando a alocação de recursos (Laborie, 2005). Exemplos

incluem:

- Modelos de programação por restrições utilizados para escalonamento de tarefas na indústria (Baptiste *et al.*, 2001);
- Aplicações recentes que analisam precedências generalizadas em projetos complexos (Azevedo, 2017).

2.2.4.3 Integração com Inteligência Artificial

O avanço da inteligência artificial tem impulsionado novas abordagens para o escalonamento de projetos. Modelos baseados em aprendizado de máquina estão sendo integrados a heurísticas e metaheurísticas para aprimorar a eficiência e a adaptabilidade dos algoritmos, conforme mapeado por Bahroun *et al.* (2023), em uma revisão sistemática e bibliométrica sobre aplicações de IA no RCPSP e variantes. Essas técnicas permitem:

- Ajustes dinâmicos na alocação de recursos conforme mudanças no ambiente do projeto;
- Predição de gargalos operacionais e otimização de cronogramas com base em padrões históricos.

2.3 Métodos Tradicionais de Escalonamento

A gestão eficiente do tempo em projetos é um dos fatores mais críticos para seu sucesso, especialmente quando há restrições de recursos. Para lidar com esse desafio, diversos métodos de escalonamento foram desenvolvidos ao longo dos anos, sendo os mais tradicionais o CPM e o PERT. Esses métodos são amplamente utilizados para estruturar a execução de projetos, proporcionando maior controle sobre os cronogramas e auxiliando na previsão de prazos.

No entanto, apesar de sua popularidade e aplicabilidade, essas abordagens apresentam limitações significativas quando se trata da alocação eficiente de recursos escassos. O CPM e o PERT assumem, em grande parte, que os recursos necessários para a execução das atividades estão sempre disponíveis, o que nem sempre reflete a realidade dos projetos. Essa limitação levou ao

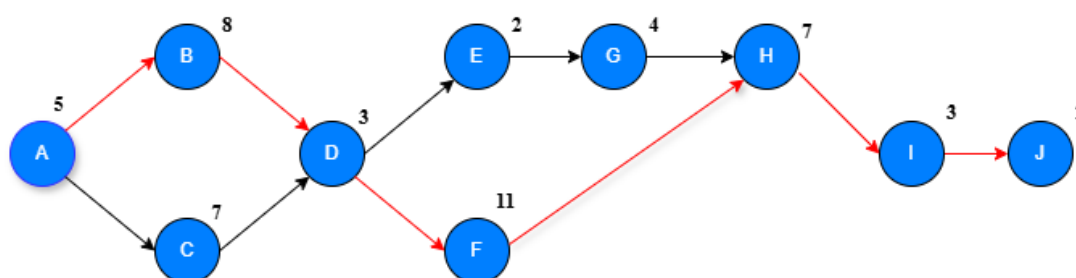
desenvolvimento de técnicas mais sofisticadas, como modelagem matemática e heurísticas computacionais, que permitem um tratamento mais eficiente das restrições de recursos, proporcionando soluções mais realistas e adaptáveis aos desafios da gestão de projetos.

2.3.1 Critical Path Method (CPM)

O CPM foi desenvolvido na década de 1950 pela DuPont Corporation para otimizar cronogramas de produção industrial. Seu princípio central consiste na identificação do caminho crítico dentro de um conjunto de atividades interdependentes, ou seja, a sequência de tarefas que determina o menor tempo necessário para a conclusão do projeto. O CPM permite que gestores identifiquem quais atividades podem sofrer atrasos sem impactar o prazo final e quais devem ser monitoradas de perto para evitar desvios no cronograma.

Para visualizar esses conceitos, a Figura 2 apresenta um exemplo de diagrama de rede utilizando a notação *Activity-on-Arrow* (AOA), comum na aplicação do CPM.

Figura 2 – Exemplo de Diagrama de Rede CPM (Notação AOA) com caminho crítico destacado em vermelho



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

No diagrama da Figura 2, os círculos (nós) representam as atividades do projeto (A a J) e os números dentro deles indicam suas respectivas durações (por exemplo, a atividade A tem duração 5, a atividade B tem duração 8, etc.). As setas mostram as relações de precedência necessárias entre as atividades. Através da análise das dependências e durações (realizando os cálculos de tempo de início/fim mais cedo e mais tarde), identifica-se o caminho crítico como a sequência A-B-D-F-H-I-J, destacada em vermelho. Este é o caminho mais longo através da rede,

determinando a duração total mínima do projeto, que neste exemplo é de 39 unidades de tempo. Atividades que pertencem a este caminho (A, B, D, F, H, I, J) são ditas críticas, pois qualquer atraso na sua execução impactará diretamente o prazo final do projeto. Atividades fora do caminho crítico (como C, E e G neste exemplo) possuem folga (*float* ou *slack*), o que significa que podem sofrer algum atraso sem necessariamente afetar a data de término do projeto.

A principal vantagem do CPM reside, portanto, na clareza com que organiza as atividades sequenciais e interdependentes, fornecendo um planejamento estruturado. Ele permite a identificação inequívoca das tarefas críticas (como as do caminho A-B-D-F-H-I-J na Figura 2) que não podem ser postergadas sem comprometer a entrega do projeto, bem como quantificar a flexibilidade (folga) das demais atividades. Essa metodologia tem sido empregada em setores como construção civil, manufatura, engenharia e tecnologia da informação, onde a previsibilidade do cronograma é essencial.

No entanto, uma limitação significativa do CPM é que ele não considera restrições de recursos. O método assume que todos os insumos necessários (mão de obra, materiais e equipamentos) estão sempre disponíveis no momento em que as atividades precisam ser iniciadas. Na prática, essa suposição raramente se verifica, pois projetos frequentemente competem por recursos limitados. Em ambientes dinâmicos, onde há necessidade de priorização de atividades de acordo com a disponibilidade de recursos, o CPM pode gerar cronogramas inviáveis sem ajustes adicionais.

2.3.2 Program Evaluation and Review Technique (PERT)

O PERT, desenvolvido pela Marinha dos Estados Unidos no final da década de 1950, foi concebido para lidar com projetos caracterizados por um alto grau de incerteza, como o desenvolvimento de novos sistemas de armamento. Diferentemente do CPM, que utiliza uma única estimativa de tempo para cada atividade, o PERT adota uma abordagem probabilística, modelando as durações das tarefas com base em três estimativas:

- Tempo otimista (T_o): a menor duração possível para a conclusão da atividade;

- Tempo mais provável (T_m): o tempo estimado considerando condições normais de execução;
- Tempo pessimista (T_p): a maior duração esperada, considerando eventuais atrasos e imprevistos.

O tempo esperado (T_e) para cada atividade é calculado com a seguinte fórmula:

$$T_e = \frac{T_o + 4T_m + T_p}{6}$$

Essa abordagem probabilística permite uma previsão mais realista dos prazos do projeto, sendo particularmente útil em áreas como pesquisa e desenvolvimento, inovação tecnológica e engenharia de *software*, onde há uma alta variabilidade nas estimativas de duração das atividades.

Embora o PERT seja uma ferramenta poderosa para lidar com incertezas, ele também não considera restrições de recursos, assumindo que todos os insumos estarão disponíveis sempre que uma atividade for iniciada. Essa limitação reduz sua aplicabilidade em projetos nos quais a gestão eficiente de recursos é um fator crítico para o sucesso.

2.3.3 Modelagem Matemática no Escalonamento de Projetos

Diante das limitações do CPM e do PERT na consideração de restrições de recursos, a modelagem matemática tornou-se uma ferramenta fundamental para o escalonamento de projetos, proporcionando uma abordagem mais realista e eficiente para a alocação de recursos escassos. Esse campo de estudo tem evoluído significativamente nas últimas décadas, impulsionado pela necessidade de otimizar a distribuição de recursos em projetos de alta complexidade.

A modelagem matemática no escalonamento de projetos envolve a formulação de problemas de otimização, nos quais se busca encontrar a melhor forma de alocar atividades e recursos, respeitando restrições de precedência e disponibilidade. Segundo Vieira *et al.* (2017), a utilização de modelos matemáticos permite que decisões sejam tomadas de forma fundamentada, utilizando dados quantitativos para prever impactos e ajustar estratégias.

Um dos principais desafios da modelagem matemática no escalonamento de projetos é a necessidade de lidar com múltiplas restrições simultaneamente. Como apontam Ribeiro (2024) e Ferreira *et al.* (2016), a integração de técnicas matemáticas com algoritmos heurísticos tem demonstrado grande eficácia na resolução desses problemas, permitindo encontrar soluções próximas do ótimo em um tempo computacional viável.

Além disso, a crescente disponibilidade de dados e o avanço das ferramentas computacionais têm impulsionado o uso de técnicas mais sofisticadas, como aprendizado de máquina e inteligência artificial, no escalonamento de projetos. Segundo Taboada *et al.* (2023), essas tecnologias são úteis para aprimorar os domínios de desempenho de planejamento, medição e incerteza, fornecendo capacidades promissoras de previsão e tomada de decisão, tornando a gestão de projetos mais dinâmica e eficiente.

2.3.4 Resumo Crítico

Os métodos tradicionais de escalonamento, CPM e PERT, representam marcos no gerenciamento de projetos e continuam sendo amplamente utilizados para a organização e o planejamento de cronogramas. No entanto, conforme discutido nas seções anteriores, apresentam limitações importantes quando se trata da alocação eficiente de recursos em cenários realistas.

Diante dessas limitações, a modelagem matemática emergiu como uma abordagem mais robusta e adaptável, permitindo a otimização da alocação de recursos e a minimização do tempo de execução dos projetos. Ao integrar técnicas de otimização e algoritmos heurísticos, os gestores conseguem planejar de maneira mais realista, levando em consideração a escassez de insumos e as restrições operacionais.

Nos próximos capítulos, serão exploradas técnicas computacionais avançadas, incluindo heurísticas e metaheurísticas, amplamente aplicadas na resolução do Problema de Programação de Projetos com Restrição de Recursos. Esses métodos representam um avanço significativo em relação ao CPM e ao PERT, oferecendo soluções mais eficazes para projetos que operam sob condições reais de restrição de recursos.

2.4 Técnicas Computacionais para Escalonamento

A crescente complexidade dos projetos e a necessidade de alocar recursos de forma eficiente motivaram o desenvolvimento de métodos computacionais mais avançados para o escalonamento. Esses métodos integram algoritmos de otimização ao planejamento de atividades, permitindo soluções mais realistas e eficazes.

De modo geral, podem ser classificados em duas grandes categorias:

- Heurísticas básicas: fornecem soluções rápidas e computacionalmente leves, embora possam não ser as mais próximas do ótimo;
- Metaheurísticas avançadas: aplicam modelos mais sofisticados, equilibrando exploração e intensificação para encontrar soluções próximas do ótimo global.

Ao longo das últimas décadas, surgiram aplicações variadas dessas técnicas em contextos organizacionais complexos, especialmente em ambientes com alta demanda por decisões rápidas e eficazes na alocação de recursos. A seguir, exploramos essas abordagens em maior detalhe.

2.4.1 Heurísticas Básicas

As heurísticas básicas são regras de decisão simples que ajudam a encontrar rapidamente soluções viáveis para problemas de escalonamento. Embora não garantam a solução ótima, seu baixo custo computacional as torna úteis em projetos nos quais a velocidade de processamento é mais importante do que a precisão absoluta.

2.4.1.1 Regras de Prioridade

As regras de prioridade são amplamente aplicadas no Problema de Programação de Projetos com Restrição de Recursos, determinando a ordem de execução das atividades com base em critérios específicos, tais como:

- Menor tempo de duração: atividades mais curtas são escalonadas primeiro;

- Maior prioridade de recurso: tarefas que utilizam recursos mais escassos têm preferência;
- Menor folga no cronograma: atividades com menor margem de atraso são priorizadas.

Segundo Chen *et al.* (2018), heurísticas baseadas em regras de prioridade são úteis para reduzir o tempo de busca por soluções viáveis, sendo frequentemente utilizadas como ponto de partida para algoritmos mais avançados.

2.4.1.2 Algoritmos Gulosos

Os algoritmos gulosos constituem uma classe de heurísticas que constroem soluções de forma iterativa, selecionando sempre a opção que parece mais promissora no momento. No entanto, essa abordagem pode levar a soluções subótimas, pois não considera impactos de decisões futuras.

Gao *et al.* (2024) desenvolveram uma matheurística baseada no algoritmo guloso iterativo, aplicada a uma versão complexa do RCPSP com múltiplos modos de execução e incertezas na duração das atividades. A abordagem demonstrou alta eficácia na obtenção de soluções robustas, otimizando a alocação de recursos e reduzindo o tempo total do projeto em instâncias de grande porte.

Embora sejam técnicas eficientes para problemas de pequena escala, heurísticas básicas apresentam limitações em projetos complexos, nos quais a interação entre atividades e recursos pode gerar cenários inesperados. Para lidar com essas limitações, são necessárias abordagens mais sofisticadas, como as metaheurísticas, que serão discutidas na próxima seção.

2.4.2 Metaheurísticas Avançadas

As metaheurísticas são algoritmos de otimização que utilizam princípios inspirados na natureza ou em modelos matemáticos para buscar soluções próximas do ótimo global. Essas técnicas são especialmente úteis para problemas *NP-hard* (uma classe de problemas de otimização para os quais não se conhece algoritmos eficientes para encontrar a solução ótima), como o RCPSP, nos quais o número de combinações possíveis cresce exponencialmente com o aumento do número de

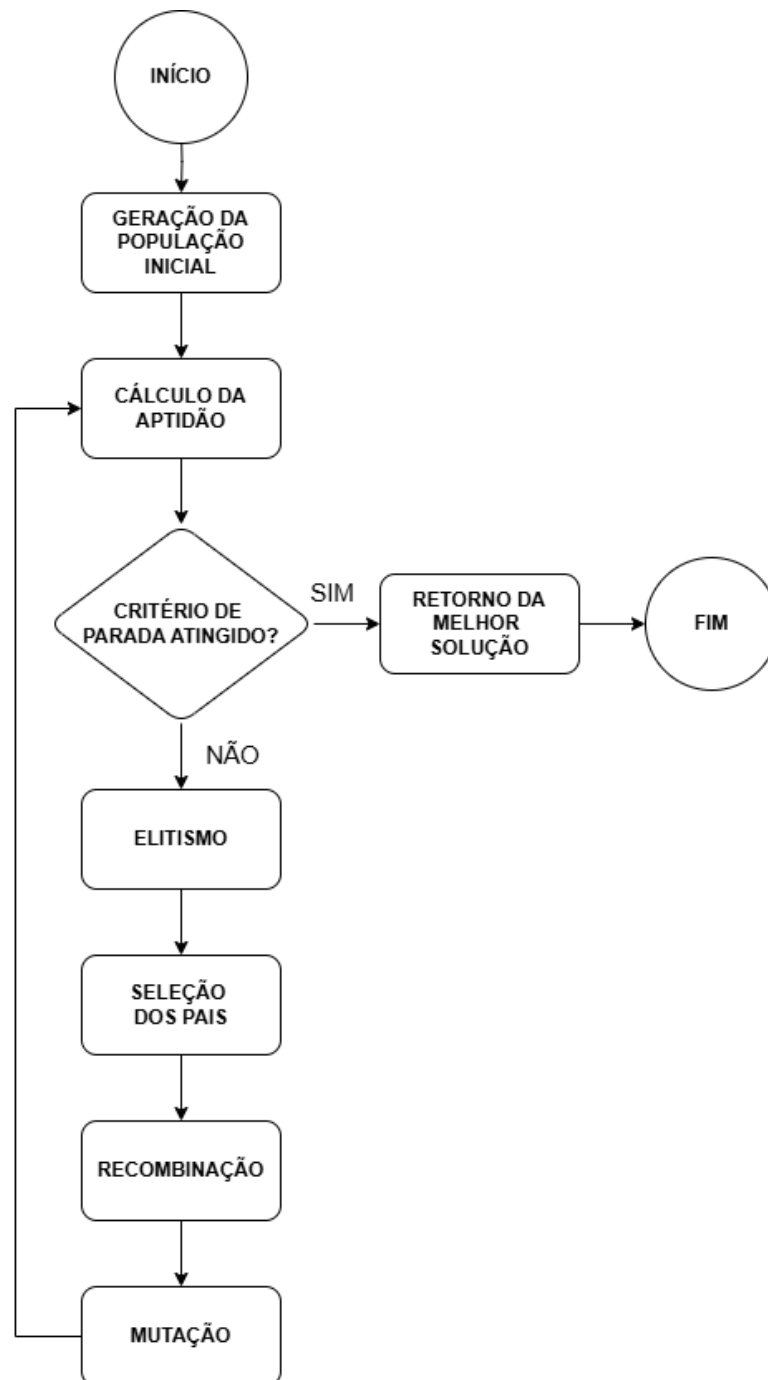
atividades e restrições.

Conforme já apresentado na seção 2.2.4.1, diferentes metaheurísticas vêm sendo aplicadas à resolução do RCPSP, especialmente em cenários de alta complexidade e grande número de atividades. Nesta seção, opta-se por aprofundar a análise de três abordagens amplamente referenciadas na literatura: algoritmos genéticos (GA), busca tabu e otimização por enxame de partículas (PSO). A escolha recai sobre essas técnicas não apenas pela frequência com que aparecem entre os estudos analisados, mas também por representarem diferentes estratégias de busca: os algoritmos genéticos baseiam-se em processos evolutivos, a busca tabu utiliza memória adaptativa, e o PSO se inspira no comportamento coletivo de populações. Além disso, essas abordagens são amplamente aplicadas em contextos diversos, como engenharia, *software* e manufatura, e frequentemente servem de base para modelos híbridos, o que reforça sua relevância na resolução de problemas complexos de escalonamento com restrições de recursos.

2.4.2.1 Algoritmos Genéticos

Os Algoritmos Genéticos (AG) são metaheurísticas que simulam o processo de evolução biológica, aplicando operadores como seleção, recombinação (*crossover*) e mutação para otimizar soluções para problemas complexos. No contexto do escalonamento de projetos, cada cronograma possível pode ser representado como um "indivíduo" (cromossomo) dentro de uma população. Esta população evolui ao longo de sucessivas gerações, onde as soluções de maior qualidade têm maior probabilidade de gerar descendentes, até que um critério de parada predefinido seja atingido.

Figura 3 – Fluxograma de um Algoritmo Genético



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A Figura 3 ilustra o fluxograma de um Algoritmo Genético canônico, que opera por meio de um ciclo evolutivo para refinar uma população de soluções. O processo inicia-se com a geração e avaliação de uma população inicial. A cada geração subsequente, o algoritmo primeiro verifica se um critério de parada foi atingido, como o número de gerações. Caso negativo, aplica-se o elitismo para

preservar as melhores soluções, seguido pelos operadores de seleção, recombinação (*crossover*) e mutação para formar uma nova população. Esta nova geração é então reavaliada, dando continuidade ao ciclo até a convergência e o retorno da melhor solução encontrada.

Shuvo *et al.* (2021) desenvolveram um algoritmo genético híbrido para o escalonamento de projetos com restrição de recursos. Os resultados demonstraram uma redução significativa do *makespan*, evidenciando a eficácia da abordagem na otimização do escalonamento sob restrições de recursos.

2.4.2.2 Busca Tabu

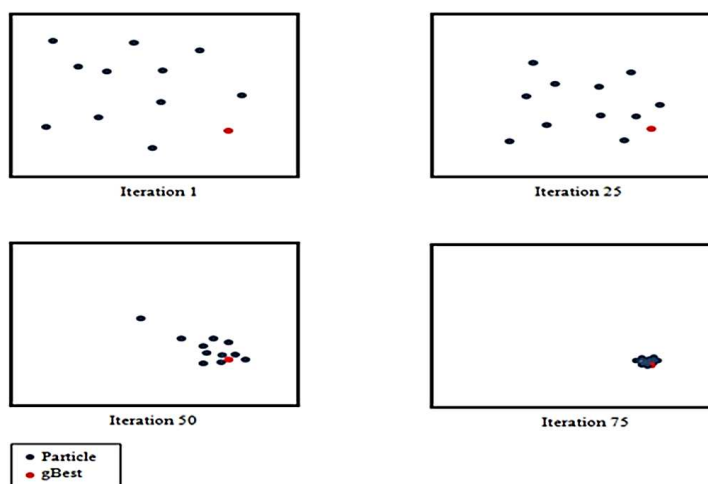
A busca tabu é uma técnica de otimização baseada em memória adaptativa, projetada para evitar a repetição de soluções já exploradas e permitir que o algoritmo escape de mínimos locais. Essa metaheurística tem sido amplamente reconhecida como uma abordagem eficaz na resolução de problemas complexos de escalonamento com restrições de recursos, conforme evidenciado em estudos aplicados, como o de (Sroka *et al.*, 2021).

Para lidar com a complexidade do escalonamento de projetos com recursos flexíveis, Ma *et al.* (2023) desenvolveram um algoritmo baseado em Busca Tabu. Os experimentos demonstraram que a abordagem heurística foi significativamente mais eficiente que os métodos exatos para instâncias de grande porte, resultando em melhorias na robustez do cronograma e na qualidade das soluções geradas em um menor tempo de processamento.

2.4.2.3 Particle Swarm Optimization (PSO)

PSO é um método de otimização inspirado no comportamento coletivo de grupos, como bandos de pássaros e cardumes de peixes. Cada solução potencial (partícula) desloca-se pelo espaço de busca, ajustando sua posição com base em experiências anteriores e nas melhores soluções encontradas por outras partículas do enxame. Esse mecanismo permite uma exploração eficiente do espaço de soluções, equilibrando exploração global e refinamento local.

Figura 4 – Representação gráfica do movimento das partículas no algoritmo PSO em busca da solução ótima



Fonte: Adaptado de Wahab, Nefti-Meziani e Atyabi (2015).

A Figura 4 ilustra visualmente o comportamento convergente do enxame ao longo das iterações do algoritmo PSO. Nota-se que as partículas (pontos azuis), que iniciam dispersas no espaço de busca (Iteração 1), tendem a se agrupar progressivamente em torno da melhor solução global encontrada até o momento (*gBest*, ponto vermelho), como pode ser observado nas Iterações 25, 50 e 75. Isso demonstra graficamente o processo de exploração e intensificação característico do PSO na busca pela solução ótima.

Kumar e Vidyarthi (2016) aplicaram a PSO adaptativa combinada com heurísticas baseadas em regras de prioridade, otimizando projetos sujeitos a flutuações na disponibilidade de recursos. Os resultados demonstraram melhorias na adaptação dos cronogramas e na eficiência da alocação de recursos.

2.4.3 Comparação entre Métodos Heurísticos e Metaheurísticos

A Tabela 1 apresenta um comparativo entre as principais abordagens heurísticas e metaheurísticas, destacando suas vantagens, desvantagens e aplicações, com base em estudos recentes.

Tabela 1 - Comparação entre Métodos Heurísticos e Metaheurísticos no Escalonamento de Projetos

Método	Tipo	Vantagens	Desvantagens	Aplicações	Referências
Regras de Prioridade	Heurística	Simples e rápida	Pode gerar soluções subótimas	Projetos de baixa complexidade	Chen <i>et al.</i> (2018)
Algoritmos Gulosos	Heurística	Fácil implementação	Não considera efeitos futuros	Planejamento de curto prazo	Issa <i>et al.</i> (2023)
Algoritmos Genéticos	Metaheurística	Explora múltiplas soluções	Alto custo computacional	Escalonamento de projetos com restrições de recursos	Shuvo <i>et al.</i> (2021)
Busca Tabu	Metaheurística	Evita mínimos locais	Dependente de parâmetros	Otimização de cronogramas	Ma <i>et al.</i> (2023)
PSO	Metaheurística	Boa adaptação a mudanças	Sensível à escolha de parâmetros	Projetos dinâmicos	Kumar e Vidyarthi (2016)

Fonte: Adaptado de Chen *et al.* (2018), Issa *et al.* (2023), Shuvo *et al.* (2021), Ma *et al.* (2023) e Kumar e Vidyarthi (2016).

2.4.4 Considerações Finais

A crescente complexidade dos projetos modernos demanda métodos computacionais avançados para realizar o escalonamento de maneira eficiente. Enquanto as heurísticas básicas fornecem soluções rápidas e computacionalmente leves, as metaheurísticas avançadas são mais robustas e eficazes na busca por soluções próximas do ótimo global.

Estudos recentes, como os de Shuvo *et al.* (2021) e Kumar e Vidyarthi (2016), demonstram que a combinação de diferentes metaheurísticas pode resultar em soluções ainda mais eficientes para o RCPSP, proporcionando um bom equilíbrio entre a eficiência computacional e a qualidade das soluções obtidas.

A contínua evolução dessas abordagens, somada ao desenvolvimento de

novos modelos híbridos, sugere um futuro promissor para a aplicação de técnicas computacionais na otimização de cronogramas de projetos sujeitos a restrições de recursos.

2.5 Aplicações do Escalonamento de Projetos

Nos capítulos anteriores, foram discutidas as principais técnicas computacionais aplicadas à resolução de problemas de escalonamento de projetos, incluindo heurísticas, metaheurísticas e modelos matemáticos avançados. No entanto, a aplicabilidade dessas técnicas abrange diversos setores, nos quais a alocação eficiente de recursos e o cumprimento de prazos representam desafios recorrentes.

O escalonamento de projetos é amplamente aplicado em setores industriais e tecnológicos, como a construção civil, a engenharia de *software* e a manufatura, onde diferentes abordagens são empregadas para otimizar a execução de atividades, reduzir custos e aumentar a produtividade. A seguir, exploram-se exemplos práticos da aplicação dessas metodologias.

2.5.1 Construção Civil: Planejamento de Obras e Alocação de Mão de Obra

No setor da construção civil, o escalonamento de projetos desempenha um papel fundamental na garantia da entrega dentro do prazo e na utilização eficiente dos recursos disponíveis. O planejamento de obras envolve diversas atividades interdependentes, como fundação, alvenaria, instalações elétricas e hidráulicas, acabamento e paisagismo. Cada uma dessas etapas demanda diferentes tipos de recursos, incluindo mão de obra qualificada, materiais e equipamentos, tornando o escalonamento um desafio crítico para os gestores.

A literatura sobre o tema, conforme revisado por Vieira *et al.* (2017), mostra que a aplicação de heurísticas baseadas em regras de prioridade tem sido amplamente utilizada para ordenar a execução das atividades, priorizando tarefas críticas e minimizando atrasos. Além disso, métodos estocásticos, como o PERT, permitem considerar a incerteza na duração das atividades, proporcionando previsões mais realistas sobre os cronogramas.

Estudos de caso na literatura demonstram a eficácia de modelos de otimização no escalonamento de grandes empreendimentos. Monteiro (2018), por exemplo, aplicou um modelo de programação linear inteira mista para minimizar o tempo total de execução de um projeto na construção civil, considerando múltiplos modos e restrições de recursos. Os resultados indicaram uma redução significativa nos atrasos, evidenciando a superioridade das abordagens baseadas em otimização matemática.

2.5.2 Engenharia de Software: Organização de Sprints e Alocação de Desenvolvedores

No desenvolvimento de *software*, o escalonamento de atividades desempenha um papel fundamental na entrega pontual de produtos, especialmente em ambientes baseados em metodologias ágeis, como o *Scrum*. Nessas abordagens, as equipes de desenvolvimento organizam seu trabalho em *sprints*, ciclos curtos nos quais um conjunto de funcionalidades deve ser implementado. A complexidade desse planejamento reside na alocação eficiente dos desenvolvedores, levando em conta suas especialidades e a complexidade das tarefas atribuídas.

Diferentes heurísticas são empregadas para otimizar esse processo. Abordagens como heurísticas gulosas são exploradas na literatura para distribuir tarefas de forma equilibrada entre os membros da equipe, reduzindo a sobrecarga. Além disso, técnicas mais sofisticadas como a Busca Tabu têm sido aplicadas para refinar a alocação de tarefas e minimizar tempos ociosos, como demonstrado por Téllez *et al.* (2018) no contexto de balanceamento de carga e tarefas em ambientes computacionais dinâmicos.

A utilização de metaheurísticas, como o PSO, tem demonstrado eficiência na otimização de aspectos cruciais do desenvolvimento de *software*. Em um estudo de Alanis-Tamez *et al.* (2020), um algoritmo PSO foi aplicado para otimizar os parâmetros de equações de regressão estatística (SRE, do inglês *Statistical Regression Equations*) na previsão do esforço de desenvolvimento de *software*. O modelo proposto resultou em maior precisão na previsão do esforço em diversos conjuntos de dados, o que realça o potencial das metaheurísticas para aprimorar o

planejamento e orçamento no desenvolvimento de *software*.

2.5.3 Manufatura e Indústria: Planejamento de Produção e Logística de Suprimentos

Na manufatura e indústria, o escalonamento de projetos desempenha um papel fundamental na eficiência da linha de produção e no gerenciamento da cadeia de suprimentos. A complexidade desse processo reside na necessidade de coordenar diversas máquinas, operadores e insumos, evitando gargalos produtivos e otimizando a utilização dos recursos.

Modelos determinísticos, como o CPM, são amplamente empregados para estruturar processos produtivos e identificar atividades críticas que determinam a duração total da produção, especialmente em ambientes com recursos renováveis e disponibilidade fixa ao longo do tempo (Watermeyer; Zimmermann, 2023). No entanto, a incerteza inerente à disponibilidade de insumos e ao tempo de processamento faz com que métodos estocásticos sejam frequentemente adotados para aprimorar a previsibilidade e a flexibilidade do planejamento.

Em um estudo de Schnabel *et al.* (2018), o uso de algoritmos genéticos aliados à busca local demonstrou ganhos significativos na otimização do uso de recursos em projetos industriais com capacidade flexível, permitindo o balanceamento entre aumento de produtividade e controle de custos via horas extras. A abordagem possibilitou análises mais realistas de *trade-offs* entre tempo de entrega e custo operacional, reforçando sua aplicabilidade em ambientes produtivos complexos.

Na logística de suprimentos, a aplicação de programação por restrições tem se mostrado eficaz na coordenação do transporte de insumos. Segundo Oliveira (2019), a integração de modelos estocásticos no planejamento logístico permite prever atrasos, ajustar cronogramas dinamicamente e garantir que a produção não seja interrompida por falta de materiais.

2.5.4 Conclusão sobre Aplicações do Escalonamento

A análise das aplicações do escalonamento de projetos nos setores da

construção civil, engenharia de *software* e manufatura evidencia que, embora métodos tradicionais como o CPM e o PERT continuem sendo utilizados, sua eficácia é frequentemente limitada em contextos que envolvem múltiplas restrições e elevada variabilidade dos recursos disponíveis. Consequentemente, verifica-se uma crescente demanda por técnicas computacionais mais avançadas, incluindo heurísticas, metaheurísticas e programação por restrições, capazes de lidar eficientemente com a complexidade desses cenários, otimizando processos, reduzindo custos operacionais e aprimorando a alocação de recursos.

Nesse sentido, torna-se fundamental aprofundar a compreensão das diferentes abordagens metodológicas, especialmente aquelas que combinam técnicas tradicionais com métodos computacionais modernos, promovendo soluções mais robustas e adaptativas para os desafios encontrados na gestão contemporânea de projetos.

2.6 Considerações Finais

O estudo sobre o escalonamento de projetos com restrições de recursos abrange diversas metodologias, desde técnicas tradicionais, como o CPM e o PERT, até abordagens mais avançadas, incluindo heurísticas e metaheurísticas computacionais. A revisão da literatura realizada neste capítulo permitiu identificar os principais desafios associados à alocação eficiente de recursos, além das soluções mais frequentemente adotadas para otimizar cronogramas e aumentar a previsibilidade na execução dos projetos.

As técnicas computacionais discutidas demonstraram ampla aplicabilidade em diferentes contextos industriais e tecnológicos que demandam alto desempenho na coordenação de recursos e prazos, ressaltando a importância do desenvolvimento contínuo de ferramentas mais sofisticadas capazes de lidar com problemas realistas e dinâmicos. Contudo, a diversidade das abordagens existentes e a rápida evolução dessas metodologias indicam a necessidade de estudos estruturados e embasados na literatura recente, visando consolidar as melhores práticas e identificar lacunas relevantes para futuras investigações.

Nesse contexto, o próximo capítulo (Capítulo 3 – Metodologia) apresentará a abordagem adotada nesta pesquisa, fundamentada em uma revisão

bibliográfica sistemática. Esse método permitirá sintetizar e analisar criticamente os principais modelos matemáticos, algoritmos e estratégias computacionais aplicados ao RCPSP. Além disso, a revisão sistemática possibilitará identificar as tendências mais recentes da literatura, oferecendo uma base sólida para a discussão e comparação crítica das técnicas empregadas na resolução desse problema.

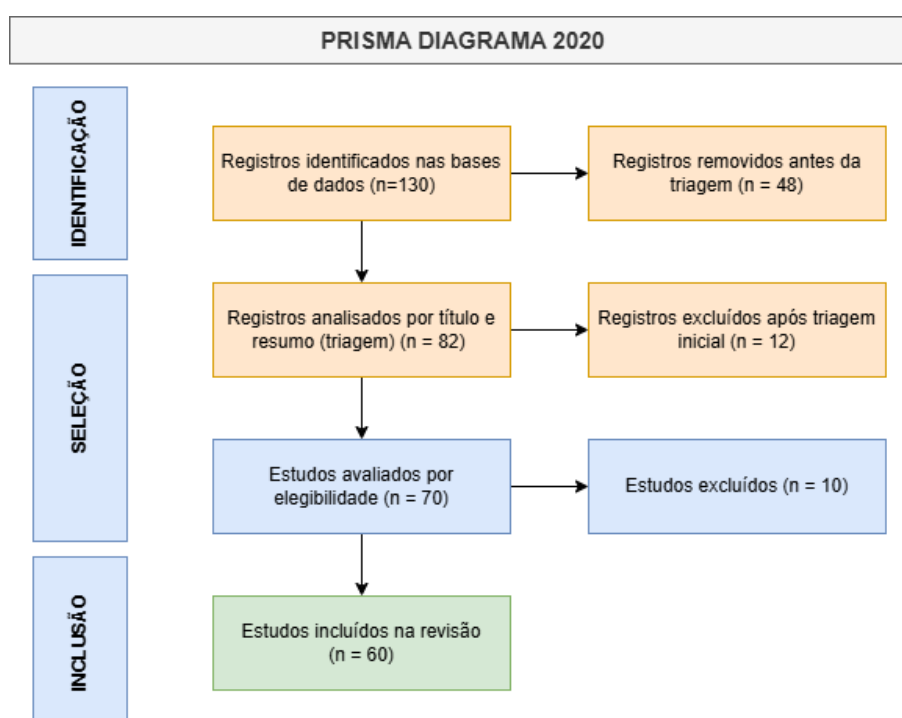
3 METODOLOGIA

A metodologia adotada para o desenvolvimento deste estudo sobre escalonamento de projetos com restrições de recursos foi baseada em uma revisão bibliográfica sistemática. Essa abordagem permite explorar de forma ampla e crítica a produção científica recente, possibilitando uma análise estruturada dos métodos, técnicas e resultados aplicados em contextos variados. Além disso, a revisão sistemática possibilita identificar lacunas no conhecimento, mapear tendências e orientar futuras pesquisas, consolidando-se como ferramenta essencial para a construção de uma base teórica sólida.

O procedimento seguido foi estruturado com base nas diretrizes do protocolo PRISMA 2020 (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*), que fornece recomendações atualizadas para garantir transparência e reprodutibilidade em revisões sistemáticas (Page *et al.*, 2021).

A Figura 5 detalha o fluxo completo do processo de revisão, desde a identificação inicial dos estudos nas bases de dados até a inclusão final dos trabalhos que compõem a síntese qualitativa desta dissertação.

Figura 5 – Diagrama de Fluxo da Revisão Sistemática segundo o PRISMA 2020



Fonte: Adaptado de Page *et al.* (2021), elaborado pelo autor (2025).

3.1 Questão de Pesquisa e Critérios de Elegibilidade

Este estudo tem como objetivo central investigar e analisar abordagens matemáticas e computacionais aplicadas ao RCPSP, com foco na comparação de modelos existentes e na avaliação de suas contribuições para a alocação eficiente de recursos escassos, mitigando atrasos e sobrecargas operacionais. Para isso, foi conduzida uma revisão bibliográfica sistemática, orientada por uma pergunta de pesquisa estruturada para refletir os objetivos definidos, apresentada a seguir:

Como as abordagens de modelagem matemática e as técnicas computacionais (como heurísticas, metaheurísticas, híbridas e aprendizado de máquina) têm sido aplicadas ao RCPSP na literatura recente, e como se comparam em termos de desempenho, aplicabilidade e limitações?

Para garantir consistência metodológica e foco nos objetivos da pesquisa, foram definidos os critérios de elegibilidade para seleção dos estudos, sendo considerados como critérios de inclusão:

- Trabalhos com abordagem direta ao RCPSP, incluindo variantes relevantes;
- Aplicação de métodos computacionais ou matemáticos, como: modelagem exata, heurísticas, metaheurísticas, algoritmos híbridos ou técnicas de *machine learning*;
- Descrição metodológica suficiente para permitir análise técnica e comparação;
- Publicações entre 2014 e 2024, com exceção de estudos anteriores considerados clássicos ou amplamente reconhecidos por sua relevância teórica;
- Documentos publicados em português ou inglês, incluindo artigos de periódicos, artigos de conferência, dissertações e teses acadêmicas.

Complementarmente, foram definidos os seguintes critérios de exclusão:

- Estudos sem foco específico em RCPSP ou que tratem apenas de gestão de projetos de forma genérica;

- Trabalhos com abordagem puramente qualitativa, sem técnicas matemáticas ou computacionais;
- Artigos incompletos, duplicados ou com informações insuficientes para análise;
- Estudos cujo texto completo não estava disponível para consulta.

Embora o recorte principal tenha priorizado publicações dos últimos dez anos (2014 a 2024), também foram incluídos estudos anteriores a esse período, considerados clássicos por sua relevância teórica e alta frequência de citação na literatura contemporânea. Essas referências históricas serviram como base conceitual para contextualizar a evolução das abordagens aplicadas ao problema RCPSP, complementando a análise dos avanços metodológicos mais recentes. Entre os principais exemplos, destacam-se:

- Hartmann (1998) – Introdução de *benchmark* robusto e abordagem baseada em algoritmos genéticos;
- Sprecher *et al.* (1997) – Discussão sobre conjuntos de instâncias padrão para comparação de métodos;
- Demeulemeester e Herroelen (2002) – Análise profunda sobre modelagem exata aplicada ao RCPSP;
- Herroelen e Leus (2005) – Estudo seminal sobre o impacto de incertezas e robustez no RCPSP.

Esses estudos, apesar de antigos, ainda são amplamente utilizados como referência em pesquisas atuais, sendo citados em diversos trabalhos analisados nesta revisão. Sua inclusão reforça a consistência histórica da análise e amplia a compreensão da evolução metodológica do campo.

Adicionalmente, foi incorporado um estudo com data de publicação prevista para 2025, disponível publicamente na forma de *preprint* no repositório arXiv, sem DOI, mas com conteúdo completo acessível. Apesar de ainda não ter sido submetido à revisão por pares, sua inclusão foi justificada pela pertinência temática e contribuição técnica ao escopo desta pesquisa.

Além dos 60 estudos que compõem o núcleo da análise sistemática,

foram utilizadas outras 21 publicações como apoio técnico. Essas obras, embora não tenham atendido integralmente aos critérios para inclusão formal na revisão sistemática, contribuíram para a construção do embasamento teórico e metodológico da dissertação, servindo de suporte complementar à análise e discussão dos resultados.

Esses critérios e justificativas nortearam todas as etapas subsequentes do processo metodológico da revisão, desde a identificação nas bases de dados, passando pela triagem e análise aprofundada, até a categorização e síntese dos estudos incluídos.

3.2 Fontes de Informação e Estratégia de Busca

As buscas foram realizadas em bases científicas reconhecidas nacional e internacionalmente, selecionadas por sua relevância, abrangência temática e qualidade das publicações. O acesso se deu, majoritariamente, por meio do Portal de Periódicos da CAPES, que integra diversas plataformas de pesquisa, incluindo *ScienceDirect*, *SpringerLink*, *IEEE Xplore*, SciELO, Scopus e a Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações (BDTD). Essa abordagem permitiu contemplar tanto estudos internacionais quanto produções acadêmicas nacionais, como dissertações e teses.

A estratégia de busca foi construída com base em palavras-chave cuidadosamente selecionadas para refletir os principais eixos do estudo. Foram utilizados termos em português e inglês, tais como:

- Escalonamento de projetos/*Project Scheduling/RCPSP*
- Restrição de recursos/*Resource Constrained*
- Modelagem matemática/*Mathematical Modeling*
- Heurísticas/Metaheurísticas/*Priority Rule-Based Heuristics*
- Aplicações práticas em gestão de projetos/*Practical Applications in Project Management*

Esses termos foram combinados com operadores booleanos para estruturar as pesquisas de forma eficiente. O operador *OR* foi utilizado para agrupar

sinônimos e ampliar o alcance, enquanto o operador *AND* foi empregado para restringir os resultados à intersecção dos conceitos-chave. Um exemplo de combinação aplicada foi: (“Escalonamento de projetos” *OR* “*Project Scheduling*” *OR* RCPSP) *AND* (“Restrição de recursos” *OR* “*Resource Constrained*”) *AND* (“Heurísticas” *OR* “Metaheurísticas” *OR* “*Mathematical Modeling*”).

Foram aplicados filtros adicionais, sempre que disponíveis nas plataformas, incluindo:

- Período de publicação entre 2014 e 2024 (com exceções justificadas na Seção 3.1);
- Idioma, restringindo-se a português e inglês;
- Tipo de documento, priorizando artigos de periódicos, artigos de conferência, dissertações e teses com acesso ao texto completo;
- Área do conhecimento, com ênfase em Ciência da Computação, Pesquisa Operacional e Engenharia de Produção.

Essa estratégia buscou equilibrar abrangência e especificidade, garantindo a recuperação de estudos tecnicamente relevantes ao problema de escalonamento de projetos com restrições de recursos. Como resultado, foram identificados aproximadamente 130 registros iniciais, posteriormente submetidos à triagem conforme os critérios definidos na Seção 3.3.

A lista completa dos registros identificados, bem como os 60 estudos selecionados para a análise sistemática, está disponível publicamente no seguinte repositório: <https://github.com/willmrodrigues/rcpsp-dataset-dissertacao-2025>

3.3 Processo de Seleção dos Estudos

O processo de seleção dos estudos seguiu as etapas metodológicas apresentadas no fluxograma da Figura 5, fundamentado no protocolo PRISMA 2020. A seleção foi conduzida em duas etapas principais: triagem e elegibilidade.

Na primeira etapa (triagem), os títulos e resumos dos registros identificados foram avaliados. Aqueles que não atendiam claramente aos critérios de inclusão, definidos na Seção 3.1, foram descartados. Na segunda etapa

(elegibilidade), os textos completos dos estudos que passaram pela triagem inicial foram lidos na íntegra para uma avaliação final e detalhada, confirmando se todos os critérios de elegibilidade eram atendidos.

Como resultado do processo completo, dos 130 registros identificados inicialmente, 60 estudos foram selecionados para compor a análise sistemática. As decisões de inclusão e exclusão, bem como as respectivas justificativas, estão documentadas na planilha de triagem disponível no repositório mencionado na Seção 3.2.

3.4 Processo de Extração e Análise dos Dados

Após a seleção final dos 60 estudos, iniciou-se o processo de extração de dados, planejado para coletar sistematicamente as informações relevantes para responder à pergunta de pesquisa. Para cada artigo incluído, foi utilizado um formulário de extração de dados para registrar os seguintes aspectos-chave:

- Tipo de abordagem metodológica: classificação do método principal (exato, heurística, metaheurística, híbrido, entre outros);
- Variante do problema: identificação da variante do RCPSP abordada, como, por exemplo, RCPSP com múltiplos modos, RCPSP com incerteza, entre outras;
- Métricas de desempenho: indicadores utilizados para avaliar a eficácia da solução, tais como *makespan*, custo, robustez;
- Aplicação prática: menção a contextos ou exemplos de aplicação prática, quando discutidos pelos autores;
- Vantagens e limitações: pontos fortes e fracos da abordagem, conforme reportado nos estudos.

Com base nos dados extraídos, os estudos foram organizados em categorias temáticas para facilitar a análise comparativa. A classificação foi definida a partir da natureza fundamental do método de solução proposto em cada trabalho, resultando nas seguintes classes principais:

- Métodos Exatos: Abordagens com garantia teórica de otimalidade,

projetadas para encontrar a melhor solução possível através de uma busca sistemática;

- Heurísticas: Métodos aproximados, geralmente baseados em regras de prioridade ou construção;
- Metaheurísticas: Estratégias de busca iterativa e de alto nível para encontrar soluções de alta qualidade;
- Métodos Híbridos: Trabalhos que combinam explicitamente técnicas de diferentes paradigmas (por exemplo, metaheurísticas com métodos exatos ou com outras metaheurísticas);
- Revisões/Estado da Arte: Estudos cujo objetivo principal é a síntese, classificação ou comparação da literatura existente.

Adicionalmente, foi criada a categoria 'Outros' para agrupar trabalhos cujas abordagens se baseiam em modelos teóricos distintos dos métodos de otimização tradicionais ou em tecnologias de computação emergentes. Essa estrutura de extração e categorização fundamentou a análise qualitativa e quantitativa desenvolvida no capítulo de resultados, permitindo uma comparação estruturada das estratégias adotadas na literatura recente sobre RCPSP.

3.5 Limitações da Revisão

Apesar do rigor metodológico adotado, é fundamental reconhecer algumas limitações inerentes ao escopo e ao processo de seleção, que podem influenciar a abrangência dos resultados.

Primeiramente, a restrição por idioma, que considerou apenas estudos em português e inglês, pode ter resultado na exclusão de contribuições relevantes publicadas em outras línguas. Dada a força da pesquisa operacional em outros centros acadêmicos, trabalhos em idiomas como alemão, francês ou chinês poderiam oferecer perspectivas adicionais.

Em segundo lugar, a revisão esteve limitada à disponibilidade de acesso ao texto completo dos documentos. Alguns trabalhos potencialmente relevantes foram excluídos por estarem indisponíveis nas plataformas consultadas ou

protegidos por barreiras de acesso pago (*paywalls*). Essa limitação pode ter impactado a representatividade total da amostra.

Um terceiro ponto refere-se ao viés de publicação, uma tendência da literatura acadêmica em favorecer a publicação de estudos com resultados positivos ou estatisticamente significativos. Consequentemente, abordagens que se mostraram menos eficazes podem estar sub-representadas no conjunto de artigos analisados.

Adicionalmente, o processo de triagem e categorização, embora guiado por um protocolo estruturado, contém um elemento de subjetividade. A análise de elegibilidade e a classificação metodológica envolvem julgamentos interpretativos que podem variar entre pesquisadores.

Por fim, a própria natureza da revisão, focada em publicações acadêmicas, pode não capturar integralmente os desenvolvimentos práticos ou industriais mais recentes, que nem sempre são formalizados em artigos de periódicos ou conferências.

O reconhecimento dessas limitações é essencial para uma interpretação crítica e contextualizada dos achados desta dissertação e serve como um guia para futuras pesquisas que busquem superar essas barreiras.

3.6 Rigor e Relevância da Metodologia

A adoção da revisão bibliográfica sistemática, guiada pelo protocolo PRISMA 2020, foi fundamental para garantir a transparência, a rastreabilidade e a consistência deste estudo. Essa abordagem estruturada permitiu mapear a produção científica recente sobre o RCPSP e, ao mesmo tempo, realizar uma análise crítica e comparativa das diferentes abordagens computacionais e matemáticas.

O rigor metodológico foi reforçado por um conjunto de práticas, como a definição explícita dos critérios de elegibilidade, a consulta a múltiplas bases de dados para mitigar vieses e a sistematização do processo de extração de dados. Além disso, o compromisso com a reprodutibilidade científica foi um pilar deste trabalho, evidenciado pela disponibilização pública dos artefatos gerados, como a lista de registros e a planilha de extração dos 60 estudos. Essa prática permite que

outros pesquisadores possam verificar, reutilizar ou expandir os resultados aqui apresentados.

Dessa forma, considera-se que a metodologia detalhada neste capítulo oferece o suporte necessário para conferir validade e confiabilidade às análises e conclusões desenvolvidas a seguir.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

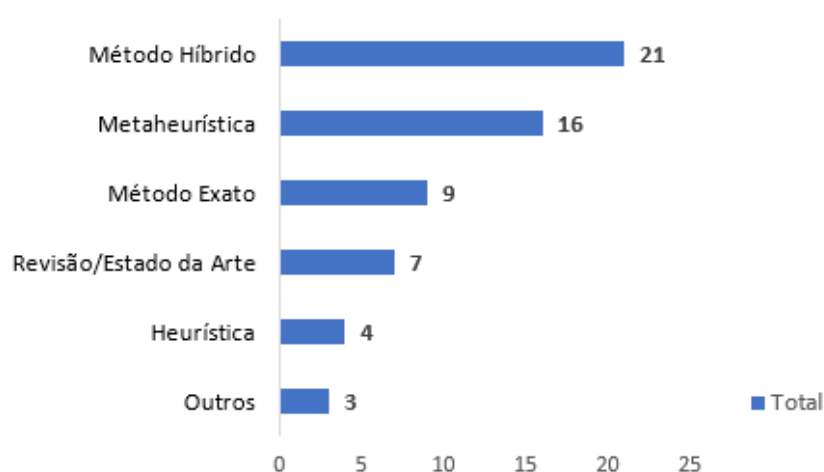
Este capítulo apresenta os resultados da revisão sistemática da literatura sobre o Problema de Escalonamento de Projetos com Restrições de Recursos. A análise está estruturada para, primeiramente, caracterizar o conjunto de 60 estudos selecionados. Em seguida, realiza-se uma análise comparativa das principais abordagens metodológicas encontradas, seguida por uma discussão crítica sobre suas vantagens, limitações e desafios de aplicação prática. Por fim, são delineadas implicações para a gestão de projetos e direções para futuras pesquisas na área.

4.1 Caracterização geral dos estudos selecionados

A revisão sistemática da literatura resultou na seleção de 60 estudos que atendem aos critérios de elegibilidade definidos no Capítulo 3. Estes trabalhos formam o conjunto de estudos para a análise deste capítulo. A primeira etapa dos resultados consiste em uma caracterização quantitativa deste portfólio de publicações, a fim de identificar as principais tendências metodológicas e temporais.

A análise da distribuição dos estudos por abordagem metodológica, conforme as categorias definidas na Seção 3.4, revela uma clara tendência na literatura recente. O Gráfico 1 apresenta a distribuição dos trabalhos analisados.

Gráfico 1 – Distribuição dos estudos por abordagem metodológica (n=60)

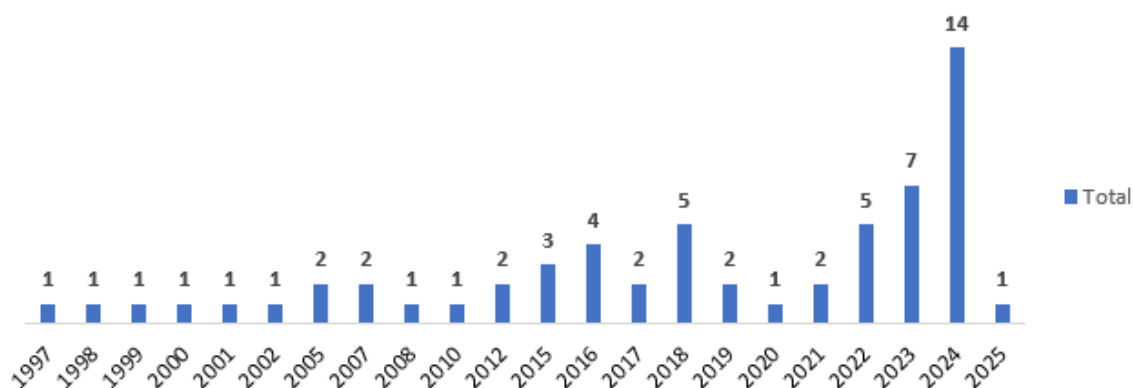


Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Conforme ilustrado no Gráfico 1, os Métodos Híbridos constituem a categoria mais representativa, com 21 estudos (35%), seguidos pelas Metaheurísticas, com 16 estudos (26,7%). A soma dessas duas classes corresponde a mais de 60% do total de trabalhos analisados, o que indica um foco da pesquisa contemporânea no desenvolvimento e na combinação de algoritmos de busca avançados. Os Métodos Exatos (9 estudos, 15%) mantêm sua relevância como base teórica e ferramenta de benchmark, enquanto as demais categorias, compostas por Revisão/Estado da Arte (7 estudos, 11,7%), Heurísticas (4 estudos, 6,7%) e Outros (3 estudos, 5%), completam o panorama.

A análise da distribuição temporal das publicações, apresentada no Gráfico 2, permite contextualizar a evolução do interesse no tema. O gráfico abrange tanto estudos clássicos, incluídos por sua relevância teórica e alto impacto na área, quanto a produção da última década, que constitui o foco principal da revisão.

Gráfico 2 – Distribuição dos estudos por ano de publicação (n=60)



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Observa-se uma produção científica contínua ao longo do período, com um salto significativo no número de publicações a partir de 2022, iniciando uma tendência de forte crescimento. O ano de 2024 se destaca, concentrando 14 dos 60 estudos analisados (23,3%). Esse crescimento recente pode estar associado à consolidação de técnicas computacionais mais sofisticadas, como as abordagens híbridas, que se tornaram predominantes no período.

Essa caracterização inicial, tanto metodológica quanto temporal, serve

como ponto de partida para a análise comparativa detalhada das diferentes abordagens, que será apresentada na seção seguinte.

4.2 Análise Comparativa das Abordagens Metodológicas

A partir da caracterização geral apresentada na seção anterior, esta seção aprofunda a análise por meio de uma comparação qualitativa das principais classes de algoritmos aplicados ao RCPSP. Conforme as categorias metodológicas definidas na Seção 3.4, a Tabela 2 sintetiza as características gerais de cada abordagem, avaliando-as segundo critérios de desempenho e aplicabilidade comumente discutidos na literatura.

As classificações na Tabela 2 representam uma generalização das tendências observadas na literatura revisada. É importante notar que o desempenho real pode variar conforme a implementação específica, a parametrização e as características da instância do problema. Os critérios adotados são:

- **Tempo de Execução:** Reflete a ordem de grandeza do esforço computacional tipicamente necessário;
- **Qualidade da Solução:** Indica a capacidade usual de aproximação da solução ótima;
- **Complexidade Computacional:** Considera a dificuldade de implementação e ajuste de parâmetros;
- **Aplicabilidade:** Sugere os cenários e tipos de problema mais adequados para a abordagem.

Tabela 2 - Comparação Qualitativa de Abordagens para o RCPSP

Algoritmo	Tempo de Execução	Qualidade da Solução	Complexidade Computacional	Aplicabilidade
CPM	Muito Baixo	Baixa (não considera restrições)	Baixa	Projetos Simples
Regras de Prioridade (Exemplo: Tempo de Folga)	Baixo	Média	Baixa	Projetos Pequenos/Médios com restrições moderadas
Metaheurísticas (GA, PSO, Busca Tabu etc.)	Médio	Alta	Média	Projetos de média a grande escala com múltiplos modos
Métodos Híbridos (Matheurísticas)	Alto	Muito Alta	Alta	Projetos Complexos, otimização robusta, portfólios
Métodos Exatos (Exemplo: Programação Inteira/B&B)	Muito Alto	Ótima (Solução Exata)	Muito Alta	Instâncias pequenas com alta exigência de otimalidade

Fonte: Elaborado pelo autor com base em estudos clássicos (Brucker et al., 1999; Hartmann, 1998; Kolisch et al., 1999; Debels & Vanhoucke, 2007) e recentes (Shuvo et al., 2021; Servranckx & Vanhoucke, 2019; Naderi et al., 2022; Hatami-Moghaddam et al., 2024; Liu et al., 2024; Tian et al., 2024; Torba et al., 2024; Li & Linna, 2022; Cai et al., 2023).

A tabela evidencia o clássico *trade-off* entre a qualidade da solução e o tempo de execução. Enquanto métodos exatos oferecem garantia teórica de otimalidade a um custo elevado, as abordagens aproximadas, como Heurísticas e Metaheurísticas, apresentam um balanço mais pragmático para problemas de grande escala. Os Métodos Híbridos, por sua vez, surgem como uma tentativa de combinar as forças de diferentes paradigmas, buscando soluções de altíssima qualidade, ainda que com maior complexidade.

A seção seguinte aprofundará a discussão sobre as vantagens e limitações de cada uma dessas classes, com base nos achados da revisão.

4.3 Discussão Crítica dos Resultados

A análise comparativa das diferentes abordagens metodológicas evidencia que não existe uma solução universal para o problema de escalonamento de projetos com restrições de recursos. A escolha do método mais adequado depende fortemente das características específicas do problema, como o tamanho das instâncias, a disponibilidade de tempo computacional e as exigências de qualidade das soluções.

4.3.1 Métodos Exatos

Os métodos exatos, que representam 15% dos estudos analisados, oferecem a vantagem inegável de garantir a obtenção de soluções ótimas. Técnicas como programação linear inteira e *branch-and-bound* tornam-se fundamentais como referência para avaliar a qualidade de métodos aproximados e para resolver instâncias menores ou com estruturas particulares onde a otimalidade é crucial. Contudo, sua limitação principal, conforme apontado por Kolisch, Schwindt e Sprecher (1999), é o elevado custo computacional que cresce exponencialmente com o tamanho do problema, tornando-os frequentemente inviáveis para as instâncias de grande escala encontradas na prática industrial.

4.3.2 Heurísticas Simples

Para superar as limitações dos métodos exatos, heurísticas simples foram desenvolvidas, representando 6,7% da literatura revisada. Essas abordagens, como as regras de prioridade baseadas no tempo de folga ou na duração das atividades, destacam-se pela simplicidade e extrema rapidez de implementação, conforme destacado por Hartmann (1998). Complementando essa perspectiva, Hartmann e Kolisch (2000) realizaram um estudo experimental comparando diversas heurísticas e metaheurísticas aplicadas ao RCPSP, oferecendo diretrizes úteis sobre combinações de estratégias com melhor desempenho. No entanto, sua limitação

evidente é a falta de garantia na qualidade da solução, que pode ser significativamente subótima em cenários complexos, especialmente quando múltiplos modos de execução e recursos heterogêneos estão envolvidos.

Além das regras de prioridade, outra linha importante de desenvolvimento em heurísticas simples foca no aprimoramento dos mecanismos de construção de cronogramas. Uma contribuição relevante nesta área é o trabalho de Ballestín *et al.* (2008), que propuseram adaptações no esquema de geração de cronogramas (SGS), como o uso de serial SGS e *double justification*, para melhorar o desempenho em problemas com preempção de atividades (1-PRCPSP), com resultados expressivos em benchmarks clássicos da PSPLIB (*Project Scheduling Problem Library*), como as instâncias j30 e j120.

Mais recentemente, heurísticas construtivas com foco na geração de cronogramas viáveis em cenários mais realistas vêm sendo propostas. Karnebogen e Zimmermann (2024), por exemplo, desenvolveram heurísticas específicas para o RCPSP/max- π , capazes de lidar com restrições como turnos de trabalho e feriados, com bom desempenho mesmo sem garantia de otimalidade. Isso demonstra que, apesar de sua simplicidade conceitual, as heurísticas continuam a ser uma ferramenta relevante e adaptável para desafios contemporâneos no escalonamento de projetos.

4.3.3 Metaheurísticas

As metaheurísticas constituem uma das categorias mais expressivas da revisão, com 26,7% dos estudos dedicados a elas. A proeminência de algoritmos como GA, PSO e Busca Tabu na literatura analisada demonstra sua consolidação como abordagens centrais para resolver o RCPSP em cenários realistas.

A Busca Tabu, conforme evidenciado por Ma *et al.* (2023), destaca-se pela capacidade de gerar cronogramas robustos e de alta qualidade, utilizando mecanismos de memória que evitam o retorno a soluções previamente exploradas. Sua eficiência em problemas complexos deriva da capacidade de escapar de ótimos locais através da exploração controlada de soluções proibidas temporariamente.

Os Algoritmos Genéticos, por sua vez, demonstram particular eficácia em problemas com múltiplos modos de execução, conforme observado em diversos

estudos da revisão. Sua capacidade de evoluir populações de soluções através de operadores de seleção, cruzamento e mutação permite a exploração eficiente de vastos espaços de solução, mantendo diversidade e convergindo para soluções de alta qualidade.

O PSO emerge como uma alternativa promissora, especialmente em cenários que envolvem otimização contínua de recursos e cronogramas. Sua inspiração no comportamento coletivo de enxames permite uma exploração balanceada entre intensificação e diversificação, características essenciais para problemas de escalonamento complexos.

A principal vantagem dessas metaheurísticas é a capacidade de explorar de forma inteligente vastos espaços de solução, encontrando soluções de alta qualidade em tempo computacional razoável para problemas de grande escala. Sua versatilidade permite a incorporação de variáveis estocásticas e diferentes perfis de recursos, conforme discutido por Ramos *et al.* (2023), em contraste com métodos tradicionais. Contudo, as limitações incluem a necessidade de ajuste cuidadoso de parâmetros, exigindo experimentação computacional significativa para validação, como sugere o trabalho de Shuvo *et al.* (2021), e o risco de convergência prematura para ótimos locais.

A pesquisa em metaheurísticas para o RCPSP também explora abordagens alternativas e combinações inovadoras que ampliam as fronteiras do campo. Uma contribuição relevante, por exemplo, é o estudo de Nemmich *et al.* (2019), que aplicaram uma versão modificada do *Bees Algorithm* com representação baseada em listas de atividades, alcançando alta efetividade em instâncias da PSPLIB e reduzindo a necessidade de ajuste extensivo de parâmetros. Em outra frente, a combinação de metaheurísticas com regras heurísticas também tem mostrado resultados promissores, como no trabalho de Myszkowski *et al.* (2015), que propuseram o HAntCO, uma abordagem que integra *Ant Colony Optimization* com regras de prioridade para otimizar *makespan* e custo com desempenho superior ao ACO clássico. Além disso, a aplicação se estende a cenários complexos e realistas: Wang *et al.* (2015) utilizaram algoritmos genéticos sob incerteza, Zhao *et al.* (2016) integraram modelos de risco financeiro com algoritmos evolutivos, e mais recentemente, Liu *et al.* (2023) propuseram uma heurística evolutiva simples com foco em desempenho prático sem necessidade de ajustes complexos.

4.3.4 Métodos Híbridos

Os métodos híbridos representam a categoria mais numerosa, com 35% dos estudos analisados, refletindo a tendência atual da pesquisa em combinar as forças de diferentes paradigmas. Particularmente, as matheurísticas que integram programação matemática com heurísticas e metaheurísticas buscam unir o melhor de dois mundos: a capacidade de exploração das metaheurísticas com a precisão dos modelos exatos.

Exemplos concretos incluem a abordagem de Procópio (2016), cuja combinação ofereceu maior flexibilidade para lidar com recursos de capacidade variável, e o algoritmo genético híbrido de Shuvo *et al.* (2021), que demonstrou alta eficiência ao integrar a otimização por reação química. Resultados como os de Phuntsho e Gonsalves (2024) também apontam para a obtenção de soluções de alta qualidade em problemas complexos através da hibridização adaptativa de diferentes metaheurísticas.

Contudo, a complexidade inerente desses métodos apresenta desafios significativos. Além da dificuldade de implementação, observa-se o desafio de gerenciar a comunicação e a latência em ambientes de computação paralela, conforme destacado pelos próprios autores. A integração eficaz entre componentes distintos pode ser um desafio técnico, e a parametrização torna-se mais complexa, envolvendo o ajuste de parâmetros de múltiplos algoritmos e de sua interação. Além disso, novas propostas vêm explorando tecnologias emergentes. Um exemplo é o estudo de Pérez Armas *et al.* (2024), que investigaram o uso incipiente de computação quântica para resolver instâncias do RCPSP, apontando potencial para problemas de pequeno e médio porte. Essa complexidade combinada pode limitar a aplicabilidade prática direta em ambientes empresariais que não dispõem de tempo ou *expertise* em pesquisa operacional para implementar e manter tais soluções customizadas.

Outra proposta híbrida que reforça esse panorama é apresentada por Delgoshaei *et al.* (2015), por meio do método BFSM-GA, que combina uma busca *backward-forward* com algoritmo genético em duas etapas. O modelo, não linear e com atividades preemptíveis, foi avaliado em problemas de diferentes escalas e demonstrou ganhos na eficiência do uso de recursos, além de apresentar boa

adaptabilidade em contextos diversos. A proposta se baseia em fundamentos sólidos da literatura e ilustra a evolução das abordagens híbridas em direção a soluções mais flexíveis e eficazes para o RCPSP.

4.3.5 Síntese e Implicações Práticas

A revisão da literatura aponta claramente que o uso integrado de modelagem matemática e algoritmos avançados constitui um avanço expressivo em relação aos métodos tradicionais. A predominância dos métodos híbridos na literatura recente (35% dos estudos) sugere uma maturação do campo em direção a soluções mais sofisticadas e eficazes. Essa integração possibilita otimizar simultaneamente recursos e prazos, contribuindo diretamente para os objetivos centrais da gestão eficiente de projetos.

A análise evidencia que, enquanto métodos exatos permanecem essenciais para problemas de menor escala e como referência de qualidade, as metaheurísticas consolidaram-se como a abordagem mais equilibrada para a maioria dos cenários práticos. Os métodos híbridos, embora promissores, ainda enfrentam barreiras de complexidade que limitam sua adoção generalizada, sugerindo oportunidades para pesquisas futuras focadas na simplificação e padronização dessas abordagens.

4.4 Desafios e Limitações na Aplicação Prática

Apesar dos significativos avanços identificados, persistem desafios consideráveis para a aplicação prática das técnicas estudadas. A complexidade computacional permanece uma das principais barreiras, particularmente destacada nos estudos de Bahroun *et al.* (2024). Os métodos híbridos, por sua vez, exigem calibração detalhada e um esforço significativo de implementação, tornando a sua aplicação mais complexa em cenários industriais.

Além disso, questões específicas, como a convergência prematura de soluções em metaheurísticas e as dificuldades de parametrização das heurísticas baseadas em regras de prioridade, limitam sua efetividade em problemas reais de grande escala.

Adicionalmente, outras dificuldades importantes identificadas são:

- Escalabilidade: métodos exatos se tornam impraticáveis para instâncias maiores devido ao elevado tempo de execução exigido;
- Dependência de parâmetros: metaheurísticas frequentemente exigem ajustes complexos, demandando tempo considerável e expertise técnica específica;
- Dados reais e incertezas: a qualidade dos dados disponíveis nem sempre é precisa ou suficiente, comprometendo a eficácia e aplicabilidade prática dos modelos;
- Requisitos computacionais elevados: algoritmos avançados geralmente requerem *hardware* especializado ou capacidade computacional significativa, limitando sua adoção em determinados contextos empresariais.

A literatura existente exemplifica as aplicações práticas dessas técnicas em setores variados como logística, construção civil, manufatura e tecnologia da informação. Por exemplo, Ferreira *et al.* (2012) destacaram a eficácia de metaheurísticas bio-inspiradas na coleta e gestão de dados espaciais, enquanto Kumar e Vidyarthi (2016) apresentaram resultados promissores usando algoritmos híbridos para gerenciar recursos com disponibilidades flutuantes.

Ademais, no contexto específico de projetos multimodo, abordagens baseadas em programação por restrições e modelos híbridos têm demonstrado eficácia no tratamento de atividades opcionais, durações estocásticas e condições dinâmicas. Liu *et al.* (2022) aplicaram uma combinação de algoritmos genéticos com PSO sob incerteza *fuzzy*, enquanto Geibinger *et al.* (2024) utilizaram programação por restrições com VLNS em ambientes com múltiplos projetos e recursos especializados, reforçando o potencial prático dessas metodologias em contextos reais e complexos.

4.5 Implicações dos Resultados e Perspectivas Futuras

A análise comparativa realizada neste capítulo evidencia claramente que o RCPSP é um campo em constante evolução e crescimento. A combinação de

abordagens analíticas tradicionais com técnicas avançadas, como metaheurísticas e heurísticas adaptativas, mostra-se eficaz tanto para solucionar questões práticas quanto para endereçar desafios teóricos fundamentais.

4.5.1 Diretrizes Práticas para a Gestão de Projetos

Além das contribuições teóricas, os achados desta pesquisa oferecem diretrizes aplicáveis à prática gerencial, especialmente em contextos com múltiplos projetos e restrições de recursos. Com o objetivo de traduzir os resultados em ações aplicáveis, apresentam-se as seguintes recomendações:

- Avaliar a complexidade antes de agir: Antes de escolher as ferramentas de planejamento, recomenda-se que os gestores avaliem o grau de complexidade de seus projetos, considerando fatores como incertezas, compartilhamento de recursos e interdependência entre tarefas;
- Começar com ganhos rápidos (*Quick-Wins*): A adoção de regras de prioridade simples pode gerar ganhos iniciais significativos na alocação de recursos com baixo esforço de implementação;
- Buscar soluções híbridas para cenários complexos: Em cenários desafiadores, o uso de soluções que combinem algoritmos otimizadores com flexibilidade para ajustes manuais e análise de cenários representa um avanço relevante sobre os métodos tradicionais;
- Planejar para a incerteza: Aumentar a confiabilidade dos cronogramas incorporando incertezas desde o início, seja através de *buffers* estratégicos ou simulações de cenários;
- Validar com um projeto piloto: Aplicar novas abordagens em projetos de escopo reduzido para facilitar a adaptação das equipes, validar os benefícios esperados e promover uma adoção mais consistente e fundamentada no contexto organizacional.

4.5.2 Perspectivas para Pesquisas Futuras

A integração bem-sucedida de métodos estocásticos, heurísticas

baseadas em regras de prioridade e metaheurísticas híbridas responde positivamente à questão inicial de pesquisa, mostrando ser possível conciliar eficiência e viabilidade na gestão de projetos complexos. Contudo, trabalhos futuros devem priorizar esforços para reduzir a complexidade computacional e aprimorar a escalabilidade dos algoritmos propostos, facilitando a adoção mais ampla dessas soluções. Por exemplo, a abordagem proposta por Goli (2024), que integra aprendizado de máquina e metaheurísticas híbridas com múltiplos objetivos, representa um avanço nessa direção, mas ainda enfrenta limitações relacionadas à complexidade de parametrização e modelagem detalhada.

Uma perspectiva particularmente promissora para futuras pesquisas envolve a aplicação de técnicas avançadas de aprendizado de máquina (*Machine Learning* – ML), como Aprendizado por Reforço ou Redes Neurais, para automatizar a calibração de parâmetros de metaheurísticas ou mesmo para auxiliar na tomada de decisões de escalonamento em tempo real. O modelo de Goli (2024), por exemplo, já emprega clusterização baseada em ML, evidenciando o potencial dessas abordagens para suporte à decisão em ambientes de incerteza.

Além disso, para avançar o estado da arte, futuros estudos poderiam investigar com maior profundidade tópicos específicos ainda não plenamente explorados, como:

- Desenvolvimento de modelos de otimização robusta ou estocástica com múltiplas incertezas interdependentes, como ilustrado por Banihashemi & Khalilzadeh (2022), que trataram simultaneamente incertezas em tempo e custo com abordagem biobjetivo, considerando o Valor Presente Líquido (*Net Present Value* – NPV) e a variação de uso de recursos;
- Arquiteturas híbridas que integrem Programação por Restrições (*Constraint Programming* – CP) e Busca em Vizinhança Ampla (*Large Neighborhood Search* – LNS), a exemplo de Servranckx *et al.* (2024), que empregaram uma combinação entre GA e Solução por Satisfatibilidade (SAT *Solver*), permitindo tratar subgrafos alternativos e estruturas complexas de precedência;
- Modelagem de fatores humanos (como fadiga ou curva de aprendizado), ainda ausente nos estudos atuais, representando uma lacuna relevante

para estudos aplicados em ambientes com recursos humanos multiquificados;

- Estudos de caso com acompanhamento longitudinal em setores específicos, como feito por Feng *et al.* (2022), que aplicaram um modelo de jogo dinâmico para coordenar atividades e fornecimento de recursos em um projeto hidrelétrico real de grande porte na China;
- Aplicações de técnicas de Inteligência Artificial Explicável (*Explainable Artificial Intelligence – XAI*) para tornar mais transparentes os modelos preditivos e heurísticos aplicados ao RCPSP, temática ainda incipiente, mas compatível com a tendência de integração entre algoritmos de aprendizado e apoio à decisão já indicada por Goli (2024).

Esses direcionamentos podem contribuir significativamente para o desenvolvimento de soluções de escalonamento de projetos ainda mais eficazes, robustas e aplicáveis aos desafios do mundo real.

5 CONCLUSÕES

Este estudo sobre escalonamento de projetos com restrições de recursos revelou a relevância da modelagem matemática e das técnicas computacionais avançadas na resolução de problemas complexos relacionados à gestão eficaz de projetos. A revisão da literatura evidenciou que métodos tradicionais, como o PERT e o CPM, embora ainda sejam aplicáveis em situações mais simples, apresentam limitações significativas ao lidar com projetos que envolvem restrições dinâmicas, múltiplos modos de execução e variabilidade na disponibilidade dos recursos. Essas limitações motivam a busca por abordagens mais robustas, como metaheurísticas, heurísticas baseadas em regras de prioridade e métodos estocásticos multimodo, capazes de oferecer soluções mais flexíveis e eficientes.

Os resultados obtidos nesta pesquisa ressaltam que a integração entre técnicas matemáticas e algoritmos computacionais avançados permite um escalonamento mais preciso e efetivo dos projetos, favorecendo a melhor alocação de recursos, a otimização de custos e o cumprimento de prazos em ambientes organizacionais complexos. Estudos como os de Procópio (2016) e Ma *et al.* (2023) destacam que a combinação de modelagem matemática com heurísticas gera resultados promissores, enfatizando a necessidade de aprofundar investigações nessa linha metodológica. Além disso, as abordagens híbridas que combinam metaheurísticas com métodos exatos demonstraram ampliar significativamente a capacidade de lidar com projetos multimodais e recursos com disponibilidade variável.

Do ponto de vista prático, os avanços em modelagem matemática e otimização têm impacto direto e positivo em setores estratégicos, como construção civil, logística, manufatura e tecnologia da informação. A literatura revisada apresentou casos concretos em que a aplicação de algoritmos genéticos híbridos, técnicas de busca local iterativa e programação por restrições resultaram em ganhos substanciais de eficiência, redução significativa de custos operacionais e melhor utilização dos recursos disponíveis. Esses achados reforçam a aplicabilidade prática das técnicas estudadas e evidenciam sua adaptabilidade a diferentes contextos organizacionais, contribuindo diretamente para uma tomada de decisões mais estratégica e fundamentada.

Contudo, alguns desafios importantes ainda persistem. A complexidade computacional permanece como um fator limitante para a aplicação de determinadas técnicas, sobretudo em grandes instâncias do problema. Além disso, há uma necessidade constante de personalização e calibração cuidadosa dos algoritmos em função dos contextos específicos de aplicação. Tais desafios incluem, conforme destacado por Golab (2023), questões como a convergência prematura em metaheurísticas e o equilíbrio ideal entre exploração e intensificação durante o processo de otimização, elementos que representam barreiras contínuas para a eficácia desses métodos em problemas complexos, dada a dependência da qualidade das soluções iniciais e a demanda por extensas gerações de populações.

Nesse sentido, a integração de técnicas de aprendizado de máquina com métodos tradicionais de otimização desponta como uma área promissora para aprimorar a eficiência e eficácia dos modelos existentes. Trabalhos recentes, como o de Hamad *et al.* (2022), indicam que a otimização de hiperparâmetros em redes neurais utilizando algoritmos metaheurísticos pode resultar em soluções mais precisas, eficientes e adaptáveis a diferentes problemas de classificação. Esses avanços reforçam a importância de continuar investindo em pesquisas que explorem a interseção entre inteligência artificial, aprendizado de máquina e modelagem matemática.

Considerando essas observações, surgem diversas oportunidades para futuras investigações. Uma dessas oportunidades envolve a realização de experimentos computacionais mais abrangentes aplicados a estudos de caso reais, permitindo validar empiricamente as metodologias discutidas e fornecer dados concretos sobre o desempenho comparativo das diferentes abordagens em contextos reais. Adicionalmente, estudos futuros poderiam explorar com maior profundidade a criação de modelos híbridos que integrem aprendizado de máquina e métodos tradicionais de otimização matemática, reduzindo a necessidade de ajustes manuais dos parâmetros e aumentando a eficiência e escalabilidade dos algoritmos.

Por fim, conclui-se que o escalonamento de projetos com restrições de recursos permanece um desafio central na gestão contemporânea de projetos. Entretanto, o desenvolvimento contínuo das técnicas matemáticas e computacionais tem proporcionado soluções progressivamente mais eficazes e adaptáveis às necessidades das organizações modernas.

Este estudo contribui significativamente para a consolidação do conhecimento sobre o tema, identificando tendências emergentes, reconhecendo desafios ainda não totalmente solucionados e destacando aplicações práticas promissoras.

Desse modo, oferece diretrizes importantes para fortalecer a tomada de decisões estratégicas e operacionais em projetos complexos, reafirmando a relevância do escalonamento de projetos como um campo fundamental para promover inovação e eficiência organizacional.

REFERÊNCIAS

- ALANIS-TAMEZ, M. D.; LÓPEZ-MARTÍN, C.; VILLUENDAS-REY, Y. Particle Swarm Optimization for Predicting the Development Effort of Software Projects. **Mathematics**, Basel, v. 8, n. 1819, p. 1-18, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/math8101819>. Acesso em: 22 dez. 2024.
- ÁLVAREZ-POZO, A. H.; PARMA-GARCÍA, M. I.; ORTIZ-MARCOS, I.; BAUTISTA, L. F.; ATANES-SÁNCHEZ, E. Analysis of Causes of Delays and Cost Overruns as Well as Mitigation Measures to Improve Profitability and Sustainability in Turnkey Industrial Projects. **Sustainability**, v. 16, n. 1449, p. 1-21, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su16041449>. Acesso em: 27 dez. 2024.
- AZEVEDO, G. H. I. **Escalonamento de projetos com restrição de recursos e precedências generalizadas: um método exato de resolução**. 2017. 133 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Escola de Engenharia, Universidade Federal Fluminense, Niterói. 2017. Disponível em: https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/UFF-2_6d6634e64d17dba3a893b2f69400aacb. Acesso em: 20 dez. 2024.
- BAHROUN, Z.; AS'AD, R.; TANASH, M. The multi-skilled resource-constrained project scheduling problem: systematic review and an exploration of future landscapes. **Management Systems in Production Engineering**, [s. l.], 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.2478/mspe-2024-0012>. Acesso em: 28 dez. 2024.
- BAHROUN, Z.; TANASH, M.; AD, R. A.; ALNAJAR, M. Artificial intelligence applications in project scheduling: A systematic review, bibliometric analysis, and prospects for future research. **Management Systems in Production Engineering**, [s. l.], v. 31, n. 2, p. 109–120, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.2478/mspe-2023-0017>. Acesso em: 22 dez. 2024.
- BALLESTÍN, F.; VALLS, V.; QUINTANILLA, S. Preemption in resource-constrained project scheduling. **European Journal of Operational Research**, [s. l.], v. 189, n. 3, p. 1136–1152, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.07.052>. Acesso em: 28 dez. 2024.
- BANIHASHEMI, S. A.; KHALILZADEH, M. A Robust Bi-objective Optimization Model for Resource Levelling Project Scheduling Problem with Discounted Cash Flows. **KSCE Journal of Civil Engineering**, [s. l.], v. 26, n. 6, p. 2539-2554, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12205-022-0679-z>. Acesso em: 28 dez. 2024.
- BAPTISTE, P.; LE PAPE, C.; NUIJTEN, W. **Constraint-based scheduling: applying constraint programming to scheduling problems**. Boston: Springer, 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1479-4>. Acesso em: 10 jan. 2025.
- BORSUK, M. E.; LEE, D. C. Stochastic population dynamic models as probability networks. In: JORGENSEN, Sven Erik; TANG, T.; XU, Fu-Liu (ed.). **Handbook of Ecological Modelling and Informatics**. Southampton: WIT Press, 2009. p. 199-220. Disponível em: <https://research.fs.usda.gov/treesearch/36762>. Acesso em: 22 fev. 2025.

BRUCKER, P.; DREXL, A.; MOHRING, R.; NEUMANN, K.; PESCH, E. Resource-constrained project scheduling: notation, classification, models and methods. **European Journal of Operational Research**, [s. l.], v. 112, n. 1, p. 3–41, 1999. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(98\)00204-5](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00204-5). Acesso em: 24 fev. 2025.

CAI, Junqi *et al.* A problem-specific parallel pareto local search for the reactive decision support of a special RCPSP extension. **Complex & Intelligent Systems**, v. 9, p. 7055–7073, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40747-023-01087-3>. Acesso em: 10 jan. 2025.

CHEN, Z.; DEMEULEMEESTER, E.; BAI, S.; GUO, Y. Efficient priority rules for the stochastic resource-constrained project scheduling problem. **European Journal of Operational Research**, [s. l.], v. 270, n. 3, p. 957–967, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.04.025>. Acesso em: 24 fev. 2025.

DEBELS, D.; VANHOUCKE, M. A decomposition-based genetic algorithm for the resource-constrained project scheduling problem. **Operations Research**, [s. l.], v. 55, n. 3, p. 457–469, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1287/opre.1060.0358>. Acesso em: 24 fev. 2025.

DELGOSHAEI, A.; ARIFFIN, M. K. M.; BAHARUDIN, B. T. H. B.; LEMAN, Z. Minimizing makespan of a resource-constrained scheduling problem: A hybrid greedy and genetic algorithms. **International Journal of Industrial Engineering Computations**, [s. l.], v. 6, p. 503-520, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.5267/j.ijiec.2015.5.002>. Acesso em: 10 jan. 2025.

DEMEULEMEESTER, E. L.; HERROELEN, W. S. **Project Scheduling: A Research Handbook**. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/b101924>. Acesso em: 24 fev. 2025.

FENG, C.; HU, S.; MA, Y.; LI, Z. A Project Scheduling Game Equilibrium Problem Based on Dynamic Resource Supply. **Applied Sciences**, [s. l.], v. 12, 9062, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app12189062>. Acesso em: 10 jan. 2025.

FERREIRA, J. A.; LIMA, D. D.; LORENZONI, L. L.; SANTOLIN, R. C. Aplicação do escalonamento de projetos com restrições de recursos e um único método de processamento na produção de tubos flexíveis. *In*: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 36., 2016, João Pessoa. **Anais [...]**. João Pessoa: ABEPRO, 2016. Disponível em: https://abepro.org.br/biblioteca/TN_STO_231_350_28723.pdf. Acesso em: 24 dez. 2024.

FERREIRA, R. P.; SASSI, R. J.; COSTA, F. M. Aplicando o algoritmo de otimização por colônia de formigas e os mapas auto-organizáveis de Kohonen na roteirização e programação de veículos. *In*: SIMPÓSIO DE PESQUISA OPERACIONAL E LOGÍSTICA DA MARINHA, 15., 2012, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: Marinha do Brasil, 2012. p. 897-910. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/spolm/sites/www.marinha.mil.br.spolm/files/102807.pdf>. Acesso em: 14 mar. 2025.

FLYVBJERG, B.; HOLM, M. K. S.; BUHL, S. L. How common and how large are cost overruns in transport infrastructure projects? **Transport Reviews**, [s. l.], v. 23, n. 1,

p. 71–88, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/01441640309904>. Acesso em: 24 dez. 2024.

GAO, Z.; ZHANG, L.; YU, P.; ZHANG, Z.; LI, Z. A matheuristic-oriented iterated greedy algorithm for multi-mode resource-constrained project scheduling problem under uncertainty. **Computers & Industrial Engineering**, [s. l.], v. 193, 110333, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.110333>. Acesso em: 10 jan. 2025.

GEIBINGER, Tobias; MISCHKE, Florian; MUSLIU, Nysret. Investigating constraint programming and hybrid methods for real world industrial test laboratory scheduling. **Journal of Scheduling**, [s. l.], v. 27, p. 607–622, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10951-024-00821-0>. Acesso em: 28 dez. 2024.

GOLAB, A. **Resource constrained project scheduling problem (RCPSP) using artificial intelligence**. 2023. Tese (Doutorado em Informática) – Université Bretagne Occidentale, [Brest]. Disponível em: https://theses.hal.science/tel-04354306/file/These-2023-MATHSTICBO-Informatique_et_architectures_numeriques-GOLAB_Amir.pdf. Acesso em: 06 mar. 2025.

GOLI, A. Efficient optimization of robust project scheduling for industry 4.0: A hybrid approach based on machine learning and meta-heuristic algorithms. **International Journal of Production Economics**, [s. l.], v. 278, 109427, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2024.109427>. Acesso em: 27 dez. 2024.

GONÇALVES, J. F.; MENDES, J. J. M.; RESENDE, M. G. C. A hybrid genetic algorithm for the job shop scheduling problem. **European Journal of Operational Research**, [s. l.], v. 167, n. 1, p. 77–95, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.03.012>. Acesso em: 20 mar. 2025.

GONCHAROV, E. **A hybrid heuristic algorithm for the resource-constrained project scheduling problem**. 2025. Preprint. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2502.18330>. Acesso em: 21 mar. 2025.

HABIBI, F.; BARZINPOUR, F.; SADJADI, S. J. Resource-constrained project scheduling problem: review of past and recent developments. **Journal of Project Management**, [S.l.], v. 3, p. 55–88, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.5267/j.jpm.2018.1.005>. Acesso em: 15 fev. 2025.

HAMAD, Q. S.; SAMMA, H.; SUANDI, S. A. Optimization of convolutional neural network hyperparameter for medical image diagnosis using metaheuristic algorithms: a short recent review (2019–2022). In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GLOBAL OPTIMIZATION AND ITS APPLICATIONS, 2022, Melaka. **Proceedings**. [Penang]: Universiti Sains Malaysia, 2022. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2412.17956>. Acesso em: 20 fev. 2025.

HARTMANN, S. A competitive genetic algorithm for resource-constrained project scheduling. **Naval Research Logistics**, [s. l.], v. 45, n. 7, p. 733–750, 1998. Disponível em: https://www.hsba.de/fileadmin/user_upload/bereiche/_dokumente/6-forschung/profs-publicationen/Hartmann_1998_A_competitive_genetic_algorithm_for_resource-constrained_project_scheduling.pdf. Acesso em: 28 dez. 2024.

HARTMANN, S.; BRISKORN, D. A survey of variants and extensions of the resource-constrained project scheduling problem. **European Journal of Operational Research**, [s. l.], v. 207, n. 1, p. 1-14, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.11.005>. Acesso em: 18 dez. 2024.

HARTMANN, S.; KOLISCH, R. Experimental evaluation of state-of-the-art heuristics for the resource-constrained project scheduling problem. **European Journal of Operational Research**, [s. l.], v. 127, n. 2, p. 394–407, 2000. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(99\)00485-3](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00485-3). Acesso em: 18 dez. 2024.

HATAMI-MOGHADDAM, L.; KHALILZADEH, M.; SHAHSAVARI-POUR, N.; SAJADI, S. M. Developing a Robust Multi-Skill, Multi-Mode Resource-Constrained Project Scheduling Model with Partial Preemption, Resource Leveling, and Time Windows. **Mathematics**, [s. l.], v. 12, 3129, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/math12193129>. Acesso em: 19 dez. 2024.

HERROELEN, W.; LEUS, R. Project scheduling under uncertainty: Survey and research potentials. **European Journal of Operational Research**, [s. l.], v. 165, n. 2, p. 289–306, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.04.002>. Acesso em: 24 dez. 2024.

ISSA, S. B.; PATTERSON, R. A.; TU, Y. Solving resource-constrained project scheduling problems under different activity assumptions. **Computers & Industrial Engineering**, [s. l.], v. 179, 109279, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109170>. Acesso em: 20 jan. 2025.

KARNEBOGEN, Mareike; ZIMMERMANN, Jürgen. Generation schemes for the resource-constrained project scheduling problem with partially renewable resources and generalized precedence constraints. **Annals of Operations Research**, [s. l.], v. 338, p. 173–192, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10479-023-05788-3>. Acesso em: 20 mar. 2025.

KERBES, J.; SILVA JUNIOR, O. F. P.; MARINHO, S. V. Desbravando o futuro do gerenciamento de projetos: tendências e oportunidades emergentes no contexto brasileiro. **Revista de Gestão e Projetos (GeP)**, [s. l.], v. 14, n. 3, p. 111-131, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.5585/gep.v14i3.25028>. Acesso em: 20 dez. 2024.

KOLISCH, R.; SCHWINDT, C.; SPRECHER, A. Benchmark Instances for Project Scheduling Problems. In: WĘGLARZ, J. (Ed.). **Project Scheduling**. Boston, MA: Springer, 1999. p. 197-212. (International Series in Operations Research & Management Science, v. 14). Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-1-4615-5533-9_9. Acesso em: 28 dez. 2024.

KUMAR, N.; VIDYARTHI, D. P. A model for resource-constrained project scheduling using adaptive PSO. **Soft Computing**, [s. l.], v. 20, n. 12, p. 4867–4884, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00500-015-1606-8>. Acesso em: 28 dez. 2024.

LABORIE, P. Complete MCS-based search: Application to resource constrained project scheduling. In: INTERNATIONAL JOINT CONFERENCE ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE, 19., 2005, Edinburgh. **Proceedings**. Edinburgh: Morgan Kaufmann, 2005. p. 181–186. Disponível em: <https://www.ijcai.org/Proceedings/05/Papers/0571.pdf>. Acesso em: 12 jan. 2025.

LI, Yi; LINNA, Wang. A genetic algorithm model for human resource management optimization in the internet marketing era. **Mathematical Problems in Engineering**, [s. l.], v. 2022, Art. ID 6931386, 9 p., 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2022/6931386>. Acesso em: 18 fev. 2025.

LIRA, F. P.; LIMA, S. M. B. Desafios enfrentados: gerenciamento de projetos na administração pública. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**, [s. l.], v. 9, n. 1, p. 117-128, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.32749/nucleodoconhecimento.com.br/administracao/projetos-na-administracao-publica>. Acesso em: 20 fev. 2025.

LIU, H.; FANG, Z.; LI, R. Credibility-based chance-constrained multimode resource-constrained project scheduling problem under fuzzy uncertainty. **Computers & Industrial Engineering**, [s. l.], v. 171, 108402, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108402>. Acesso em: 18 fev. 2025.

LIU, W.; ZHANG, H.; CHEN, Y.; QU, C.; ZHANG, J. Simulation-based hybrid genetic algorithms for the stochastic multi-mode resource-constrained project scheduling problem with minimized financial risk. **Applied Soft Computing**, [s. l.], v. 161, 111716, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2024.111716>. Acesso em: 10 fev. 2025.

LIU, Yongping *et al.* A late-mover genetic algorithm for resource-constrained project-scheduling problems. **Information Sciences**, [s. l.], v. 642, p. 119164, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ins.2023.119164>. Acesso em: 15 fev. 2025.

MA, Y.; HE, Z.; WANG, N.; DEMEULEMEESTER, E. Tabu search for proactive project scheduling problem with flexible resources. **Computers & Operations Research**, [s. l.], v. 157, 106262, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2023.106185>. Acesso em: 12 jan. 2025.

MEHTA, S. M.; CHANG, S.; OH, H. J.; KWON, J. H.; KIM, S. An investigation of construction project efficiency: perception gaps and the interrelationships of critical factors. **Buildings**, [s. l.], v. 12, n. 10, 1559, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/buildings12101559>. Acesso em: 10 jan. 2025.

MERKLE, D.; MIDDENDORF, M.; SCHMECK, H. Ant colony optimization for resource-constrained project scheduling. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, [s. l.], v. 6, n. 4, p. 333–346, 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TEVC.2002.802450>. Acesso em: 12 mar. 2025.

MONTEIRO, P. M. S. C. **Otimização do gerenciamento de tempo em projetos com restrições de recurso e múltiplos modos de processamento: estudo de caso na construção civil**. 2018. 144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/123456789/13823/1/Arquivototal.pdf>. Acesso em: 06 mar. 2025.

MYSZKOWSKI, Paweł B. *et al.* Hybrid ant colony optimization in solving multi-skill resource-constrained project scheduling problem. **Soft Computing**, [s. l.], v. 19, p. 3599–3619, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00500-014-1455-x>. Acesso em: 15 mar. 2025.

NADERI, S.; VAEZ-GHASEMI, M.; MOVAHEDI SOBHANI, F. Optimizing Resource-Constrained Project Scheduling Problem considering the Reliability Function. **Discrete Dynamics in Nature and Society**, [s. l.], v. 2022, 7711383, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2022/7711383>. Acesso em: 12 mar. 2025.

NEGREIROS, M.; BARBOSA, W. T. O Problema de Alocação de Recursos e Seleção de Múltiplos Projetos de TI. **Revista de Gestão e Projetos - GeP**, São Paulo, v. 4, n. 2, p. 27-49, maio/ago. 2013. Disponível em: <https://periodicos.uninove.br/gep/article/view/9577>. Acesso em: 06 jan. 2025.

NEMMICH, Mohamed Amine; DEBBAT, Fatima; SLIMANE, Mohamed. An enhanced discrete bees algorithms for resource constrained optimization problems. **Inteligência Artificial**, [s. l.], v. 22, n. 64, p. 123–134, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.4114/intartif.vol22iss64pp123-134>. Acesso em: 15 jan. 2025.

OLIVEIRA, J. B. **Gestão de Riscos Logísticos em Cadeias de Suprimentos: Otimização via Metamodelo de Simulação**. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/538562305.pdf>. Acesso em: 06 fev. 2025.

PAGE, M. J. *et al.* PRISMA 2020 explanation and elaboration: updated guidance and exemplars for reporting systematic reviews. **BMJ**, [s. l.], v. 372, n. n160, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1136/bmj.n160>. Acesso em 28 abr. 2025.

PARANAIBA, A. C.; BULHÕES, E. C. Priorização de projetos de infraestrutura em mobilidade urbana com base na configuração urbana e no escalonamento multidimensional. **Revista de Administração Mackenzie**, São Paulo, v. 22, n. 5, p. 1-34, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1678-6971/eRAMF210196>. Acesso em: 12 mar. 2025.

PÉREZ ARMAS, Luis Fernando; CREEMERS, Stefan; DELEPLANQUE, Samuel. Solving the resource constrained project scheduling problem with quantum annealing. **Scientific Reports**, [s. l.], v. 14, Art. 16784, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-67168-6>. Acesso em: 14 jan. 2025.

PHUNTSHO, T.; GONSALVES, T. **Metaheuristics Portfolio Optimization for Resource-Constrained Project Scheduling Problems with Milestones Payments**. 2024. Preprint. Disponível em: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4725224/v1>. Acesso em: 15 jan. 2025.

PINEDO, M. **Scheduling: theory, algorithms and systems**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1995. 378 p. ISBN 0-13-706757-7.

PINTO, D. G.; TEIXEIRA, M. A. C. A dimensão territorial no gerenciamento de grandes projetos de infraestrutura: o caso da Usina Hidrelétrica de Belo Monte, Pará, Brasil. **Cadernos EBAPE.BR**, Rio de Janeiro, v. 14, n. 4, p. 1034-1052, out./dez. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1679-395120210074x>. Acesso em: 17 jan. 2025.

PROCÓPIO, L. D. P. **Matheurísticas para o problema de custo de disponibilidade de recursos com múltiplos modos**. 2016. 56f. Dissertação (Mestrado em Informática) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa.

Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/tede/9269/2/arquivototal.pdf>. Acesso em: 15 mar. 2025.

RABET, R.; SAJADI, S. M.; TOOTOONCHY, M. A hybrid metaheuristic and simulation approach towards green project scheduling. **Annals of Operations Research**, [s. l.], 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10479-024-06291-z>. Acesso em: 15 fev. 2025.

RAMOS, A. S.; MIRANDA-GONZALEZ, P. A.; NUCAMENDI-GUILLÉN, S.; OLIVARES-BENITEZ, E. A Formulation for the Stochastic Multi-Mode Resource-Constrained Project Scheduling Problem Solved with a Multi-Start Iterated Local Search Metaheuristic. **Mathematics**, [s. l.], v. 11, n. 2, 337, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/math11020337>. Acesso em: 12 mar. 2025.

RIBEIRO, F. A. C. **Aplicação de técnicas de otimização ao escalonamento de projetos**. 2024. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Instituto Politécnico do Porto, Porto. Disponível em: https://recipp.ipp.pt/bitstream/10400.22/26542/1/Tese_5384.pdf. Acesso em: 24 dez. 2024.

RODRIGUES, W. **rcpsp-dataset-dissertacao-2025**. GitHub, 2025. Disponível em: <https://github.com/willmorodrigues/rcpsp-dataset-dissertacao-2025>. Acesso em 28 jul. 2025.

SCHNABEL, André; KELLENBRINK, Carolin; HELBER, Stefan. Profit-oriented scheduling of resource-constrained projects with flexible capacity constraints. **Business Research**, [s. l.], v. 11, p. 329–356, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40685-018-0063-5>. Acesso em: 20 jan. 2025.

SCHUTT, A.; CHU, G.; STUCKEY, P. J.; WALLACE, M. G. Maximising the net present value for resource-constrained project scheduling. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE INTEGRATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND OPERATIONS RESEARCH TECHNIQUES IN CONSTRAINT PROGRAMMING, 9., 2012, Nantes. **Lecture Notes in Computer Science**. Berlin: Springer, 2012. v. 7298, p. 170-185. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-642-29828-8_24. Acesso em: 16 jan. 2025.

SERVRANCKX, T.; COELHO, J.; VANHOUCKE, M. A genetic algorithm for the Resource-Constrained Project Scheduling Problem with Alternative Subgraphs using a boolean satisfiability solver. **European Journal of Operational Research**, [s. l.], v. 316, p. 815-827, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2024.02.041>. Acesso em: 15 jan. 2025.

SERVRANCKX, T.; VANHOUCKE, M. A tabu search procedure for the resource-constrained project scheduling problem with alternative subgraphs. **European Journal of Operational Research**, [s. l.], v. 273, n. 3, p. 841–860, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.09.005>. Acesso em: 16 jan. 2025.

SHUVO, O.; GOLDER, S.; ISLAM, M. R. A hybrid metaheuristic method for solving resource constrained project scheduling problem. **Evolutionary Intelligence**, [s. l.], 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12065-021-00675-x>. Acesso em: 12 mar. 2025.

SPRECHER, A.; HARTMANN, S.; DREXL, A. An exact algorithm for project scheduling with multiple modes. **OR Spektrum**, [s. l.], v. 19, p. 195–203, 1997. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BF01545587>. Acesso em: 15 jan. 2025.

SROKA, B. *et al.* Profit optimization for multi-mode repetitive construction project with cash flows using metaheuristics. **Archives of Civil and Mechanical Engineering**, [s. l.], v. 21, 67, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s43452-021-00218-2>. Acesso em: 8 jan. 2025.

STANDISH GROUP. **Chaos 2020: Beyond Infinity – Project Success Quick Reference Card**. Boston: The Standish Group, 2021. Disponível em: <https://standishgroup.myshopify.com/>. Acesso em: 7 jan. 2025.

TABOADA, I.; DANESHPAJOUH, A.; TOLEDO, N.; DE VASS, T. Artificial Intelligence Enabled Project Management: A Systematic Literature Review. **Applied Sciences**, Basel, v. 13, 5014, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app13085014>. Acesso em: 12 mar. 2025.

TCHAO, C. S. **Heurísticas para o problema de escalonamento de projetos com restrição de recursos**. 2007. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) – Universidade Federal Fluminense, Niterói. Disponível em: <https://www.ic.uff.br/wp-content/uploads/2021/11/351.pdf> Acesso em: 24 dez. 2024.

TÉLLEZ, N.; JIMENO, M.; SALAZAR, A.; NIÑO-RUIZ, E. A tabu search method for load balancing in fog computing. **International Journal of Artificial Intelligence**, [s. l.], v. 16, n. 2, p. 125–134, 2018. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/327752530> Acesso em: 10 jan. 2025.

TIAN, B.; ZHANG, J.; DEMEULEMEESTER, E.; LIU, H. A chance-constrained optimization approach integrating project scheduling and material ordering to manage the uncertain material supply. **Computers & Operations Research**, [s. l.], v. 166, 106624, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2024.106624>. Acesso em: 14 jan. 2025.

TORBA, R. *et al.* Solving a real-life multi-skill resource-constrained multi-project scheduling problem. **Annals of Operations Research**, v. 338, p. 69–114, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10479-023-05784-7>. Acesso em: 14 jan. 2025.

TORMOS, P.; LOVA, A. A competitive heuristic solution technique for resource-constrained project scheduling. **Annals of Operations Research**, [s. l.], v. 102, p. 65–81, 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.1023/A:1010997814183>. Acesso em: 15 fev. 2025.

VIEIRA, C. S.; COSTA, G. J. A. G.; COUTINHO, N. S.; BANDEIRA, V.; OLIVEIRA, V. R. Modelagem matemática no sequenciamento de projetos com restrição de recursos: um estudo de caso. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 49., 2017, Blumenau. **Anais [...]**. Blumenau: SOBRAPO, 2017. p. 66–77. Disponível em: <https://www.din.uem.br/sbpo/sbpo2017/pdf/168303.pdf>. Acesso em: 28 dez. 2024.

WAHAB, M. N. A.; NEFTI-MEZIANI, S.; ATYABI, A. A comprehensive review of swarm optimization algorithms. **PLoS One**, [s. l.], v. 10, n. 5, p. 1–36, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0122827>. Acesso em: 10 fev. 2025.

WANG, L.; HUANG, H.; KE, H. Chance-Constrained Model for RCPSP with Uncertain Durations. **Journal of Uncertainty Analysis and Applications**, [s. l.], v. 3, 12, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s40467-015-0034-8>. Acesso em: 18 jan. 2025.

WATERMEYER, K.; ZIMMERMANN, J. A constructive branch-and-bound algorithm for the project duration problem with partially renewable resources and general temporal constraints. **Journal of Scheduling**, [s. l.], v. 26, p. 95-111, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10951-022-00735-9>. Acesso em: 27 dez. 2024.

ZHANG, J.; CHUNG, H. S.-H.; LO, W. L. Clustering-based adaptive crossover and mutation probabilities for genetic algorithms. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, [s. l.], v. 11, n. 3, p. 326–335, jun. 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TEVC.2006.880727>. Acesso em: 8 jan. 2025.

ZHANG, Z. *et al.* Risk assessment and optimal scheduling of serial projects. **OR Spectrum**, [s. l.], v. 46, p. 709-736, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00291-023-00740-0>. Acesso em: 19 jan. 2025.

ZHAO, Chenkai; KE, Hua; CHEN, Zhiyi. Uncertain resource-constrained project scheduling problem with net present value criterion. **Journal of Uncertainty Analysis and Applications**, [s. l.], v. 4, n. 12, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s40467-016-0054-z>. Acesso em: 18 jan. 2025.