



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

JOÃO VITOR ALVES COSTA MARQUES WELERSON

**MODELOS MATEMÁTICOS NO CONTEXTO DO PROBLEMA DE
SEQUENCIAMENTO EM PROJETO COM RESTRIÇÃO DE RECURSO: UM
ESTUDO BIBLIOMÉTRICO**

**OURO PRETO
2023**

JOÃO VITOR ALVES COSTA MARQUES WELERSON

**MODELOS MATEMÁTICOS NO CONTEXTO DO PROBLEMA DE
SEQUENCIAMENTO EM PROJETO COM RESTRIÇÃO DE RECURSO: UM
ESTUDO BIBLIOMÉTRICO**

Monografia de conclusão de curso para obtenção do grau de Engenheiro de Produção na Universidade Federal de Ouro Preto, como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheira de Produção.

Área de concentração:

Orientadora: Dra. CLARISSE DA SILVA VIEIRA CAMELO DE SOUZA

**OURO PRETO
2023**

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

W443m Welerson, Joao Vitor Alves Costa Marques.

Modelos matemáticos no contexto do problema de sequenciamento em projeto com restrição de recurso [manuscrito]: um estudo bibliométrico. / Joao Vitor Alves Costa Marques Welerson. - 2023. 40 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientadora: Profa. Dra. CLARISSE DA SILVA VIEIRA CAMELO DE SOUZA.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Produção .

1. Problema de Sequenciamento em Projetos com Restrição de Recursos (PSPRR). 2. Modelos Matemáticos. 3. Administração de projetos. I. SOUZA, CLARISSE DA SILVA VIEIRA CAMELO DE. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 658.5

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO,
ADMINISTRAÇÃO E ECON



FOLHA DE APROVAÇÃO

João Vitor Alves Costa Marques Welerson

Modelos Matemáticos no Contexto do Problema de Sequenciamento em Projeto com Restrição de Recurso: Um Estudo Bibliométrico

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Produção da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro de Produção

Aprovada em 31 de Agosto de 2023

Membros da banca

- [Doutora] - Clarisse da Silva Vieira Camêlo de Souza - Orientadora (Universidade Federal de Ouro Preto)
[Doutora] - Irce Fernandes Gomes Guimarães - (Universidade Federal de Ouro Preto)
[Mestra] - Samantha Rodrigues de Araújo - (Universidade Federal de Minas Gerais)

Clarisse da Silva Vieira Camêlo de Souza, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 14/09/2023.



Documento assinado eletronicamente por **Clarisse da Silva Vieira Camelo de Souza, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 15/09/2023, às 05:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0584033** e o código CRC **68340038**.

Referência: Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.011646/2023-12

SEI nº 0584033

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35402-163
Telefone: 3135591540 - www.ufop.br

RESUMO

Este estudo aborda os modelos matemáticos aplicados ao Problema de Sequenciamento em Projeto com Restrição de Recurso (PSPRR), uma questão vital no gerenciamento de projetos. Por meio de uma revisão sistemática combinada com análise bibliométrica, a pesquisa investiga as abordagens e métodos de solução utilizados para resolver o PSPRR, considerando publicações dos últimos dez anos em território nacional e internacional. O trabalho revela a importância dos modelos matemáticos na otimização de recursos, controle de prazos e eficiência na execução de projetos. A análise quantitativa fornece insights sobre os autores mais influentes, as publicações mais citadas, e as áreas geográficas com maior produção científica. Este estudo contribui para o entendimento do PSPRR, evidenciando a necessidade de pesquisa contínua e interdisciplinar, e servindo como referência para acadêmicos.

Palavras-chave: Problema de Sequenciamento em Projeto com Restrição de Recurso; Modelos Matemáticos; Gerenciamento de Projetos.

ABSTRACT

This study addresses the mathematical models applied to the Resource-Constrained Project Scheduling Problem (RCPSP), a crucial issue in project management. Through a systematic review combined with bibliometric analysis, the research investigates the approaches and solution methods used to solve the RCPSP, considering publications from the last ten years in both national and international territory. The work reveals the importance of mathematical models in resource optimization, deadline control, and project execution efficiency. The quantitative analysis provides insights into the most influential authors, the most cited publications, and the geographical areas with the highest scientific production. This study contributes to the understanding of the RCPSP, highlighting the need for continuous and interdisciplinary research, and serving as a reference for academics and industry professionals.

Keywords: Resource-Constrained Project Scheduling Problem; Mathematical Models; Project Management.

LISTA DE QUADROS

| | |
|--|----|
| Quadro 1 - Estudos selecionados conforme o número de citações..... | 26 |
| Quadro 2 - Países de origem de cada publicação | 28 |
| Quadro 3 - Modelos utilizados por cada estudo | 29 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Número de estudos relacionados por palavras-chave e bases científicas..... | 25 |
|---|----|

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Linha do tempo do gerenciamento de projetos | 13 |
|--|----|

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| 1 INTRODUÇÃO | 9 |
| 1.1 Contextualização | 9 |
| 1.2 Objetivos | 10 |
| <i>1.2.1 Objetivo geral</i> | 10 |
| <i>1.2.2 Objetivos específicos</i> | 10 |
| 1.1 Justificativa | 11 |
| 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 12 |
| 2.1 Gerenciamento de Projetos: panorama histórico, conceitual e principais tipos | 12 |
| 2.2 Sequenciamento em Projeto com Restrição de Recurso (PSPRR) | 18 |
| 2.3 Formulações Propostas pelos autores para o PSPRR | 19 |
| 2.4 Métodos de Solução para PSPRR | 21 |
| 3 METODOLOGIA | 23 |
| 3.1 Definição dos critérios de busca | 23 |
| 3.2 Seleção dos Estudos | 23 |
| 3.3 Extração de Dados e Análise Bibliométrica | 23 |
| 3.4 Organização e Representação dos Resultados | 23 |
| 3.5 Avaliação da Qualidade | 24 |
| 3.6 Síntese e Interpretação | 24 |
| 4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DA BIBLIOMETRIA | 25 |
| 5 CONCLUSÃO | 32 |
| REFERÊNCIAS | 33 |

1 INTRODUÇÃO

Nesse tópico, iremos abordar uma breve introdução e contextualização sobre o tema proposto.

1.1 Contextualização

O planejamento de um projeto é um processo complexo que envolve a determinação do sequenciamento de suas atividades, definição das datas de início de cada uma delas, alocação dos recursos utilizados e a determinação da sua duração total. No entanto, muitos fatores podem interferir e comprometer um planejamento eficiente. Em um ambiente de mercado altamente competitivo e tecnológico, identificar gargalos em processos é essencial para aprimorá-los, uma vez que pequenos ganhos em produtividade podem resultar em importantes reduções nos custos (CARLIER, 2006). No cenário brasileiro, esses ganhos podem significar a sobrevivência da empresa. Assim, o gerenciamento de projetos se tornou uma prática fundamental encontrada pelas empresas para criar vantagens em relação à eficiência da produtividade.

No contexto da Pesquisa Operacional (PO), este tem sido um campo essencial no desenvolvimento e aprimoramento das técnicas de gerenciamento de projetos. Originada durante a Segunda Guerra Mundial, a PO concentra-se no uso de modelos matemáticos e estatísticos para analisar sistemas complexos e auxiliar na tomada de decisões (HILLIER; LIEBERMAN, 2014). No âmbito do gerenciamento de projetos, a PO contribui no planejamento, controle e alocação de recursos, ajudando a minimizar custos e otimizar a eficiência. Em particular, métodos de programação linear e inteira, teoria das filas, simulação e otimização têm sido aplicados para abordar vários problemas no gerenciamento de projetos, como a programação de atividades, a gestão de riscos e a alocação de recursos (WINSTON, 2004).

Adentrando na Modelagem Matemática, esta tem desempenhado um papel crítico no gerenciamento de projetos, uma vez que permite a representação formal de problemas complexos e contribui para a aplicação de técnicas de otimização. Ela envolve a abstração de um problema real em uma representação matemática, que pode então ser analisada e resolvida usando métodos matemáticos (GIORDANO; FOX; WEIR, 2014).

A modelagem pode incluir a definição de variáveis de decisão, a formulação de funções objetivo e a imposição de restrições. No contexto do gerenciamento de projetos, modelos matemáticos têm sido empregados para representar e resolver problemas de programação de

atividades, gestão de custos, alocação de recursos e análise de redes, entre outros (ELMAGHRABY, 2000).

Dentre os diversos problemas, dentro deste contexto, está o *Resource-Constrained Project Scheduling Problem* (RCPSp) - Problema de Sequenciamento em Projetos com Restrição de Recurso (PSPRR) - que consiste no sequenciamento das atividades de um projeto, juntamente com a alocação de recursos necessários para executá-las. De acordo com Blazewicz, Lenstra & Kan (1983), Brucker et al. (1999), Agarwal, Colak & Erenguc (2011), Schutt et al. (2013) e Hartmann (2013), o PSPRR é um problema de otimização combinatória que abrange uma grande variedade de situações de programação "clássicas".

O PSPRR estipula que as atividades sejam executadas sem preempção, implicando que, após iniciadas, devem ser concluídas sem interrupção. Tal critério reforça a importância da deliberação na fase de planejamento, pois o sequenciamento inadequado pode levar à ineficiência na utilização de recursos e, conseqüentemente, ao aumento da duração total do projeto.

Outra dimensão inerente ao PSPRR são as relações de precedência entre as atividades. Algumas atividades não podem ser iniciadas até que outras tenham sido concluídas. Estas relações de precedência são cruciais e devem ser rigorosamente respeitadas, pois representam, muitas vezes, restrições técnicas ou lógicas no fluxo de trabalho do projeto.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

- Investigar e diagnosticar as informações acerca dos problemas no contexto do PSPRR em território nacional e internacional.

1.2.2 Objetivos específicos

- Revisar a literatura sobre o *Resource-Constrained Project Scheduling Problem* (RCPSp), a fim de compreender conceitos e aspectos sobre esse problema;
- Realizar um levantamento analítico dos trabalhos na literatura para o RCPSp, utilizando as técnicas e abordagens estudadas na revisão bibliográfica,
- Analisar a literatura dos últimos 10 anos, buscando evidenciar as estratégias mais utilizadas em diferentes áreas da produção no Brasil e no mundo.

1.3 Justificativa

Com a crescente demanda por planejamentos mais eficientes e o aumento da complexidade dos projetos, a utilização de modelos matemáticos para a solução de problemas se torna uma prática cada vez mais presente no mundo corporativo. Nesse contexto, a aplicação do modelo proposto em uma pesquisa bibliométrica de planejamento da produção se apresenta como uma oportunidade para aprimorar e otimizar processos, identificando lacunas e criando possibilidades de melhorias (SCHUTT et al., 2013). Além disso, a aplicação do modelo, representando problemas reais, permite uma análise mais precisa e detalhada, considerando diversas variáveis e possibilitando a tomada de decisão embasada em dados e resultados obtidos por meio de cálculos e simulações.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A seção de fundamentação teórica é uma revisão crítica e organizada do conhecimento existente sobre o seu tema, aqui o intuito é orientar o leitor da necessidade da pesquisa.

2.1 Gerenciamento de Projetos: panorama histórico, conceitual e principais tipos

O gerenciamento de projetos é uma área de conhecimento em constante evolução, resultado de um longo histórico de desenvolvimento. O GP moderno surgiu durante a década de 1950, com o advento da técnica do caminho crítico (CPM) desenvolvida pela empresa DuPont, e com a técnica da análise de valor ganha (EVA) desenvolvida pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos durante os anos 1960 (PMBOK, 2017).

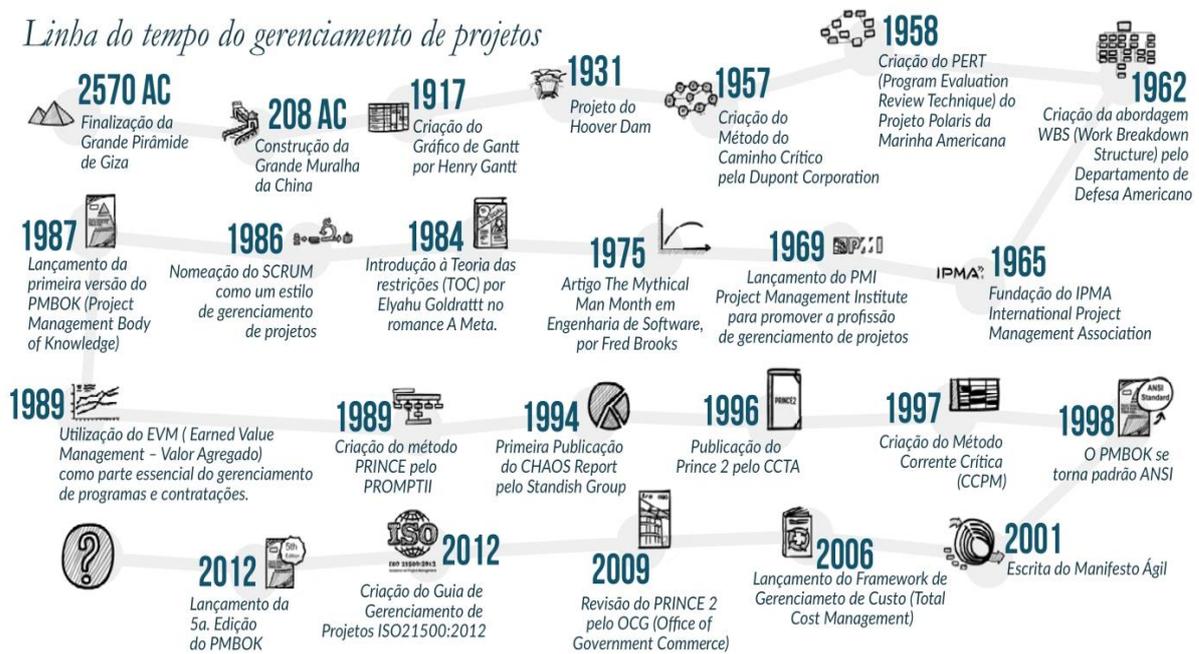
Outro grande marco na história do gerenciamento de projetos foi a criação da abordagem do PERT (*Program Evaluation and Review Technique*), desenvolvida pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos em colaboração com a empresa Booz-Allen Hamilton durante os anos 1950. O PERT consistia em uma técnica de redes e tinha como objetivo auxiliar na programação e controle de projetos de defesa (ARAUJO, 2013).

A partir da década de 1960, o GP começou a ser adotado por empresas privadas para gerenciar projetos complexos, com destaque para as empresas da indústria aeroespacial e de defesa (CARVALHO; RABECHINI JR, 2011). Nesse período, a técnica do CPM e a abordagem do PERT foram refinadas e adaptadas para atender às necessidades das companhias privadas em diferentes setores, o que levou ao desenvolvimento do Método do Caminho Crítico para Planejamento e Controle de Projetos (PERT/CPM), que é uma técnica que leva em consideração o tempo e o custo (SILVA; ALMEIDA, 2014).

Na década de 1980, houve uma crescente preocupação em relação ao gerenciamento de projetos em uma perspectiva mais ampla, envolvendo questões como qualidade, comunicação, risco e recursos humanos (PMBOK, 2017). Em 1987, foi criado o *Project Management Institute* (PMI), organização sem fins lucrativos que tem como objetivo promover o desenvolvimento e a disseminação das melhores práticas em gerenciamento de projetos. Em 1996, o PMI publicou a primeira edição do Guia PMBOK (*Project Management Body of Knowledge*), um conjunto de práticas reconhecidas como padrão internacional em gerenciamento de projetos (VERZUH, 2016).

Já no Brasil, o GP começou a ser mais difundido a partir da década de 1990, com a crescente necessidade de as empresas brasileiras se adaptarem às mudanças do mercado globalizado. Segundo Rabechini Jr. et al. (2016), a disciplina de gerenciamento de projetos foi introduzida no país por meio de cursos de especialização oferecidos por instituições estrangeiras, como a Universidade de Cranfield, no Reino Unido, e a George Washington University, nos Estados Unidos. A Figura 1 demonstra brevemente a evolução histórica do gerenciamento de projetos:

Figura 1 - Linha do tempo do gerenciamento de projetos



Fonte: Marcel Stanlei Monteiro – 2022

Com o tempo, os profissionais brasileiros começaram a se interessar cada vez mais pelo gerenciamento de projetos, o que levou à criação de entidades e associações, como a ABGP (Associação Brasileira de Gerenciamento de Projetos), que contribuíram para a disseminação do conhecimento e para a consolidação da área no país.

Além disso, a própria economia brasileira foi um fator que impulsionou o desenvolvimento deste campo. A partir da década de 2000, o Brasil passou por um período de crescimento econômico significativo, com a realização de grandes obras de infraestrutura, como a construção de hidrelétricas, aeroportos, rodovias e estádios de futebol, além de investimentos em setores como petróleo e gás e mineração. Tais empreendimentos exigiam uma gestão mais profissional e eficiente, o que reforçou a importância do gerenciamento.

De qualquer modo, a adoção do gerenciamento de projetos no Brasil ainda é um desafio, principalmente em pequenas e médias empresas, que muitas vezes ainda não reconhecem a importância dessa disciplina para o sucesso de seus empreendimentos. No entanto, a crescente demanda por profissionais qualificados na área e a maior conscientização sobre os benefícios do gerenciamento de projetos têm contribuído para a expansão e consolidação da disciplina no país.

No que tem relação ao panorama conceitual do Gerenciamento de Projetos, o PMI (2017) atribui como “a aplicação de conhecimentos, habilidades, ferramentas e técnicas às atividades do projeto para atender aos seus requisitos”. (PMI, 2017). Já de acordo com o PMBOK, a área é dividida em dez áreas de conhecimento: integração, escopo, tempo, custo, qualidade, recursos humanos, comunicação, risco, aquisições e partes interessadas. (PMI, 2017)

Para Dinsmore (1996), o Gerenciamento de Projetos é a aplicação de um conjunto de habilidades, ferramentas e técnicas para projetar e executar atividades planejadas de forma sistemática, com o objetivo de atingir objetivos específicos dentro de um prazo e orçamento pré-determinados. Para Kerzner (2006), a área envolve “a coordenação dos recursos de uma organização para alcançar os objetivos específicos de um projeto em um prazo predeterminado e dentro de um orçamento previamente acordado”.

De forma geral, o Gerenciamento de Projetos é a aplicação de um conjunto de conhecimentos, habilidades, ferramentas e técnicas para atender aos requisitos de um projeto, garantindo que ele seja concluído dentro do escopo, prazo e orçamento definidos e atenda às expectativas do cliente. A área é composta por diversos grupos de conhecimento e requer a coordenação de recursos para atingir objetivos específicos. (PMI, 2017; DINSMORE, 1996; KERZNER, 2006).

Partindo desses pressupostos, é possível destacar, pelo menos, cinco formas de gerenciamento de projetos que são frequentemente utilizadas, quais seja, o Gerenciamento Tradicional de Projetos, o Gerenciamento Ágil de Projetos, o Gerenciamento de Projetos Lean, Gerenciamento de Projetos Six Sigma e o Gerenciamento de Projetos de Inovação (MURCH, 2001).

O Gerenciamento Tradicional de Projetos (GTP) é uma abordagem que tem suas raízes na Revolução Industrial, período em que ocorreu uma transformação na forma como os projetos eram conduzidos e gerenciados (MURCH, 2001). O GTP, também conhecido como gerenciamento por processos ou *waterfall*, fundamenta-se na premissa de que um projeto deve

ser planejado, executado e controlado em etapas sequenciais e bem definidas (KIOPPENBORG, 2002).

Dentre os aspectos históricos, é importante destacar o papel de Henry Gantt, que, em 1910, desenvolveu o Gráfico de Gantt, uma ferramenta essencial para o planejamento e controle de projetos na época (MURCH, 2001). No que diz respeito aos conceitos fundamentais do GTP, é possível destacar a divisão do projeto em cinco grupos de processos: iniciação, planejamento, execução, monitoramento e controle, e encerramento (PMBOK, 2017). Esses processos são organizados de forma sequencial, de modo que a conclusão de uma fase é pré-requisito para o início da próxima (MURCH, 2001).

De qualquer forma, GTP é aplicável em contextos nos quais o escopo do projeto é bem definido e há pouca incerteza em relação aos requisitos e à tecnologia utilizada (MURCH, 2001). Nesse sentido, projetos de construção civil, manufatura e engenharia em geral podem se beneficiar dessa abordagem (KIOPPENBORG, 2002). Contudo, o GTP é menos eficaz em ambientes onde há alta incerteza e mudanças frequentes nos requisitos, como no desenvolvimento de software (KIOPPENBORG, 2002).

Já o Gerenciamento Ágil de Projetos (GAP) surgiu como uma resposta às limitações do Gerenciamento Tradicional de Projetos (GTP), especialmente em contextos de alta incerteza e mudanças frequentes nos requisitos, como no desenvolvimento de software (MAFAKHERI, 2008). Historicamente, o GAP teve seu marco inicial com a publicação do Manifesto Ágil em 2001, um documento que reúne os princípios e valores fundamentais das metodologias ágeis (QUMER, 2018).

Os conceitos centrais do GAP incluem a adaptação às mudanças, a colaboração com os clientes e a entrega incremental de valor (QUMER, 2018). Nesse sentido, as metodologias ágeis priorizam a satisfação do cliente através da entrega contínua de software funcional, a capacidade de responder a mudanças de requisitos e a colaboração entre os membros da equipe software (MAFAKHERI, 2008)

Dentre as metodologias ágeis, o Scrum é uma das mais conhecidas e utilizadas (QUMER, 2018). O Scrum baseia-se em ciclos curtos de trabalho, chamados sprints, e na definição de metas tangíveis para cada sprint, permitindo uma maior adaptabilidade às mudanças e melhorias contínuas no produto (QUMER, 2018).

O GAP é particularmente adequado em contextos nos quais o escopo do projeto e os requisitos são incertos ou estão sujeitos a mudanças frequentes, como no desenvolvimento de produtos digitais, inovação e pesquisa software (MAFAKHERI, 2008). Além disso, o GAP é

eficaz em projetos que requerem um alto grau de interação e colaboração entre os membros da equipe e com os clientes (QUMER, 2018).

O Gerenciamento de Projetos Lean (GPL) tem suas origens no Sistema Toyota de Produção, desenvolvido no Japão no período pós-Segunda Guerra Mundial (WERKEMA, 2006). A abordagem Lean visa otimizar a eficiência dos processos, reduzir o desperdício e melhorar a qualidade dos produtos e serviços, tendo como base os princípios de melhoria contínua e respeito pelas pessoas (ROTONDARO, 2002). Ao longo das últimas décadas, os princípios Lean têm sido adaptados e aplicados a diversos setores, incluindo o gerenciamento de projetos (WERKEMA, 2006). As ferramentas de Lean Manufacturing são eficazes sempre que há uma seleção da ferramenta correta, genuinidade nos dados coletados, envolvimento das pessoas ao redor com uma mentalidade positiva, para trazer à tona e aceitar a mudança no método ou cultura de trabalho que levará a um melhor ambiente de trabalho (DHATRAK, 2020).

Conceitualmente, o GPL incorpora os princípios do pensamento Lean, tais como: identificar e eliminar desperdícios, maximizar o valor entregue ao cliente, criar fluxo contínuo, utilizar o "pull" para gerenciar a demanda e buscar a melhoria contínua (ROTONDARO, 2002). Ao aplicar esses princípios, o GPL busca aprimorar a eficiência do processo de gerenciamento de projetos e alcançar resultados mais rápidos e de maior qualidade (WERKEMA, 2006)

Além disso, o GPL enfatiza a importância da comunicação e colaboração entre os membros da equipe e demais stakeholders, promovendo a tomada de decisão compartilhada e a resolução de problemas em conjunto (ROTONDARO, 2002). Essa abordagem também incentiva a visualização e o compartilhamento de informações, por meio de ferramentas como o quadro Kanban, que auxiliam no acompanhamento do progresso do projeto e na identificação de gargalos e oportunidades de melhoria (WERKEMA, 2006).

O Gerenciamento de Projetos Lean é aplicável em diversos contextos, como na construção civil, desenvolvimento de produtos, manufatura e serviços (ROTONDARO, 2002). A abordagem tem demonstrado resultados positivos na redução de prazos, custos e retrabalho, além de melhorar a satisfação do cliente e a motivação das equipes envolvidas (ROTONDARO, 2002).

O Gerenciamento de Projetos Six Sigma é uma metodologia de gerenciamento e melhoria de processos desenvolvida pela Motorola na década de 1980 (PANDE et al., 2001). A abordagem Six Sigma busca reduzir a variabilidade dos processos e eliminar defeitos, com o

objetivo de melhorar a qualidade dos produtos e serviços e, conseqüentemente, aumentar a satisfação do cliente (KOTTER, 1997).

A metodologia Six Sigma é fundamentada em três pilares conceituais: medição, análise e melhoria (PANDE et al., 2001). O processo de medição consiste em identificar e quantificar as variáveis críticas que afetam a qualidade do produto ou serviço. A análise envolve a identificação das causas-raiz dos problemas e a determinação de possíveis soluções. Por fim, a melhoria consiste na implementação das soluções identificadas e no monitoramento do desempenho do processo (KOTTER, 1997).

O Gerenciamento de Projetos Six Sigma utiliza duas abordagens estruturadas: DMAIC (Definir, Medir, Analisar, Melhorar e Controlar) e DMADV (Definir, Medir, Analisar, Projetar e Verificar) (KOTTER, 1997). O DMAIC é aplicado na melhoria de processos existentes, enquanto o DMADV é utilizado no desenvolvimento de novos processos ou produtos (PANDE et al., 2001).

O contexto de uso do Gerenciamento de Projetos Six Sigma é bastante amplo, abrangendo diversos setores da indústria e serviços, como manufatura, saúde, finanças e telecomunicações (PANDE et al., 2001). A metodologia Six Sigma tem sido eficaz na redução de custos, no aumento da eficiência dos processos e na melhoria da qualidade dos produtos e serviços (KOTTER, 1997).

O Gerenciamento de Projetos de Inovação (GPI) tem ganhado crescente relevância à medida que as organizações enfrentam ambientes cada vez mais dinâmicos e competitivos, que exigem a criação de novos produtos, serviços e processos (RABECHINI et al., 2002). O GPI busca aplicar métodos, técnicas e ferramentas de gerenciamento de projetos para o desenvolvimento e implementação de iniciativas inovadoras, com o objetivo de alcançar vantagem competitiva e criar valor para os stakeholders (SEGISMUNDO; CARVALHO, 2006).

Historicamente, o gerenciamento de projetos de inovação tem evoluído desde a segunda metade do século XX, com a crescente importância da inovação como fator determinante para o sucesso das empresas (RABECHINI et al., 2002). Nesse contexto, surgiram abordagens como o Stage-Gate® de Cooper (1990) e o Gerenciamento da Inovação Aberta de Chesbrough (2003), que enfatizam a importância da colaboração, do aprendizado e da adaptação no processo de inovação.

Conceitualmente, o GPI apresenta características específicas em relação ao gerenciamento de projetos tradicional, como a maior tolerância ao risco, a necessidade de

flexibilidade e a ênfase na criatividade e aprendizado (RABECHINI et al., 2002). Para apoiar o GPI, diversas abordagens e ferramentas têm sido desenvolvidas, como o Design Thinking (BROWN, 2008), o gerenciamento de portfólio de inovação (SEGISMUNDO; CARVALHO, 2006) e o gerenciamento ágil de projetos (RABECHINI et al., 2002) que buscam promover a colaboração, a experimentação e a adaptabilidade no desenvolvimento de projetos inovadores.

O contexto de uso do GPI abrange uma ampla gama de setores e tipos de organização, desde empresas de tecnologia e startups até organizações governamentais e sem fins lucrativos (SEGISMUNDO; CARVALHO, 2006). Em todos esses contextos, o GPI tem demonstrado ser uma abordagem eficaz para enfrentar os desafios associados à inovação, como a incerteza, a complexidade e a necessidade de colaboração entre diferentes áreas e parceiros (SEGISMUNDO; CARVALHO, 2006).

2.2 Sequenciamento em Projeto com Restrição de Recurso (PSPRR)

O Problema de Sequenciamento em Projeto com Restrição de Recurso (PSPRR), conhecido como *Resource-Constrained Project Scheduling Problem* (RCPSPP), é um problema clássico de otimização combinatória no campo do gerenciamento de projetos (KOLISCH; SRINIVASAN, 2006). O RCPSPP busca determinar uma programação ótima para as atividades de um projeto, considerando as restrições de precedência entre as atividades e as limitações nos recursos disponíveis (PINEDO, 2012). O objetivo do RCPSPP é minimizar a duração total do projeto, ou seja, o tempo necessário para concluir todas as atividades (BRUCKER et al., 1999).

O RCPSPP foi formulado pela primeira vez por Kelley (1961) como uma extensão do problema de programação de projetos com restrições de precedência (*Precedence-Constrained Project Scheduling Problem* - PCPSPP), que considera apenas as relações de precedência entre as atividades, sem levar em conta as restrições de recursos. O RCPSPP foi posteriormente estudado por diversos autores, como Elmaghraby (1977) e Slowinski (1980), que propuseram algoritmos e abordagens heurísticas para sua resolução.

O RCPSPP é um problema NP-difícil (BRUCKER et al., 1999), o que significa que sua solução exata se torna computacionalmente inviável para instâncias de grande porte. Por essa razão, diversos métodos heurísticos e meta-heurísticos têm sido propostos na literatura para solucionar o RCPSPP, como a técnica de geração de prioridades (KOLISCH; HARTMANN, 1999), a busca tabu (TSCHUPKE, 2002) e os algoritmos genéticos (HARTMANN, 1998).

O RCPSPP é aplicável em diversos contextos de gerenciamento de projetos, como na construção civil, desenvolvimento de produtos, manufatura e serviços (HERROELEN; LEUS,

2005). A solução do RCPSP auxilia os gerentes de projeto na tomada de decisões sobre a alocação de recursos e a sequência das atividades, de modo a otimizar a utilização dos recursos e minimizar a duração do projeto (PINEDO, 2012).

2.3 Formulações Propostas pelos autores para o PSPRR

Uma abordagem promissora para lidar com o RCPSP é a formulação de modelos matemáticos, que possibilitam a representação do problema em termos matemáticos e a aplicação de métodos de otimização para encontrar a solução ótima ou aproximada (DREXL & KIMMS, 2001).

Um dos modelos matemáticos mais reconhecidos para o RCPSP é o Modelo de Programação Linear Inteira Mista (PLIM) proposto por Kolisch e Padman (2001). Esse modelo utiliza variáveis binárias para representar o início das atividades e variáveis contínuas para representar a alocação dos recursos. O modelo inclui restrições que garantem que as relações de precedência sejam respeitadas e que os recursos disponíveis não sejam excedidos em nenhum período de tempo.

Além disso, há também o modelo *Time-Indexed Formulation*, apresentado por Demeulemeester e Herroelen (1992). Este modelo utiliza um conjunto de variáveis binárias para cada combinação possível de atividades e períodos de tempo, indicando se uma atividade específica começa em um determinado período. As restrições deste modelo garantem que cada atividade seja agendada uma vez, que as relações de precedência sejam satisfeitas e que as restrições de recursos sejam cumpridas.

Mingozi et al. (1998) propuseram um modelo baseado em grafos chamado “Poderoso Modelo de Grafos”. O modelo representa o RCPSP como um grafo acíclico dirigido, onde os nós representam os eventos (início ou término de uma atividade) e os arcos representam as atividades. Este modelo usa um conjunto de restrições para garantir que as atividades sejam executadas na sequência correta e que os recursos sejam alocados de forma apropriada.

Outro modelo matemático significativo para o RCPSP é a formulação baseada em eventos proposta por Talbot (1982). Este modelo difere da formulação baseada em tempo, pois focaliza os eventos (como o início e término das atividades) em vez de discretizar o tempo. Os eventos são usados para definir o status do projeto e os recursos consumidos entre os eventos. O modelo possui um conjunto de variáveis binárias que representam se um evento ocorre ou não e variáveis contínuas para os recursos consumidos entre os eventos. Isso permite uma

representação mais compacta e eficiente do problema, embora a complexidade computacional ainda seja um desafio para instâncias de grande porte.

Adicionalmente, há também o modelo de Programação Linear Inteira Multiobjetivo, que foi estudado por Tormos e Lova (2003). Este modelo estende a abordagem de Programação Linear Inteira Mista de Kolisch e Padman (2001) ao considerar múltiplos objetivos, como minimizar a duração do projeto e maximizar a satisfação do cliente. O modelo usa um conjunto de pesos para balancear os diferentes objetivos e buscar uma solução que seja um compromisso entre eles.

Outra abordagem de Decomposição de Benders, que foi aplicada ao RCPSP por Vanhoucke e Maenhout (2007). Este método é particularmente útil para grandes instâncias do problema, onde a decomposição do problema em subproblemas menores pode levar a soluções mais rapidamente. O método de Decomposição de Benders foca em encontrar uma solução viável para as variáveis de nível superior (como a alocação de recursos) e então resolve um subproblema para ajustar as variáveis de nível inferior (como o agendamento das atividades).

A formulação de caminho crítico generalizado, apresentada por Bartusch, Möhring e Radermacher (1988), é outra abordagem para modelar o RCPSP. Esta formulação integra as restrições de precedência e recursos em uma única estrutura, identificando os caminhos críticos que são afetados pela alocação de recursos. O objetivo é encontrar a programação que minimiza a duração total do projeto, garantindo que todos os caminhos críticos sejam satisfeitos e que os recursos sejam alocados de forma eficiente.

Além desses modelos, abordagens híbridas também têm sido desenvolvidas. Por exemplo, Artigues et al. (2003) propuseram uma abordagem que combina a Programação Linear Inteira Mista com técnicas meta-heurísticas para resolver o RCPSP. Esta abordagem procura tirar proveito das propriedades de otimização dos modelos matemáticos e da eficiência computacional das meta-heurísticas para resolver instâncias grandes do problema de forma eficiente.

Apesar da eficácia dos modelos matemáticos no tratamento do RCPSP, é importante ressaltar que tais modelos têm limitações, especialmente quando aplicados a problemas de grande escala. (BLAZEWICZ et al., 2007).

Para resolver instâncias reais e complexas do RCPSP, os profissionais e pesquisadores frequentemente recorrem a pacotes de software como por exemplo (CPLEX, Solver) especializados que incorporam algoritmos avançados. Esses pacotes permitem lidar com a

complexidade do problema e auxiliar os gerentes de projeto na tomada de decisões mais informadas sobre a programação e alocação de recursos em projetos (KANZOW et al., 2016).

2.4 Métodos de Solução para PSPRR

Dada a complexidade inerente ao Problema de Sequenciamento em Projeto com Restrição de Recurso (PSPRR), os métodos de solução se dividem em duas categorias principais: métodos exatos e métodos heurísticos e meta-heurísticos. Os métodos exatos buscam encontrar a solução ótima para o problema, enquanto os métodos heurísticos e meta-heurísticos são utilizados para encontrar soluções de boa qualidade em um tempo computacional razoável, especialmente para instâncias de grande porte (DREXL, 2005).

Métodos Exatos

Um dos métodos exatos mais conhecidos é o Branch and Bound (B&B), que foi aplicado ao PSPRR por Demeulemeester e Herroelen (1992). Este método envolve a enumeração sistemática de todas as possíveis soluções, efetuando cortes em ramos da árvore de busca que não podem levar à solução ótima. O B&B é teoricamente capaz de encontrar a solução ótima, mas é computacionalmente intensivo e pode não ser prático para instâncias grandes.

Métodos de programação inteira mista também têm sido aplicados ao PSPRR (PADMAN; RAO, 1993). Nestes métodos, o problema é formulado como um modelo de programação inteira mista e resolvido usando solvers especializados. No entanto, assim como o B&B, estes métodos podem ser computacionalmente inviáveis para grandes instâncias do problema.

Métodos Heurísticos e Meta-heurísticos

Por conta da complexidade computacional dos métodos exatos, métodos heurísticos e meta-heurísticos são frequentemente utilizados. Estes métodos buscam soluções de alta qualidade, mas não necessariamente ótimas.

Um exemplo popular de método heurístico é o algoritmo da Lista Prioritária (LPA) proposto por Patterson et al. (1993). Este algoritmo utiliza regras de prioridade para sequenciar as atividades e alocar recursos, resultando em uma solução rápida, mas possivelmente subótima.

Dentro dos métodos meta-heurísticos, a Busca Tabu, proposta inicialmente para o PSPRR por Bouleimen e Lecocq (2003), é uma técnica de busca local que explora a vizinhança de uma solução, mantendo uma memória das soluções visitadas para evitar ciclos e escapar de mínimos locais.

Algoritmos Genéticos, uma técnica inspirada nos processos de evolução natural, também têm sido aplicados ao PSPRR (Hartmann, 1998). Estes algoritmos utilizam operadores de seleção, cruzamento e mutação para evoluir uma população de soluções ao longo do tempo.

Colônia de Formigas, uma meta-heurística inspirada no comportamento das formigas na busca de alimentos, foi aplicada por Blum (2005) ao PSPRR. Esta abordagem utiliza feromônios e heurísticas para guiar a busca de soluções.

3 METODOLOGIA

A presente pesquisa consiste em uma revisão sistemática combinada com análise bibliométrica para investigar os trabalhos no contexto do Problema de Sequenciamento em Projeto com Restrição de Recurso (PSPRR). O método adotado contemplou a seleção, análise e síntese de publicações científicas relacionadas ao tema. A metodologia foi desenvolvida em várias etapas, conforme descrito abaixo:

3.1 Definição dos critérios de busca

Para a busca de literatura relevante, foram utilizadas as bases de dados Academia, Google Scholar, Scielo e Portal da CAPES. O termo principal utilizado foi "Problema de Sequenciamento em Projeto com Restrição de Recurso", e suas respectivas versões em inglês e espanhol. Esses termos foram combinados utilizando o operador booleano AND com os termos secundários "Modelo Matemático" e "Método de Solução", e suas correspondências em inglês e espanhol.

3.2 Seleção dos Estudos

Foram selecionados estudos publicados nos últimos dez anos (2013-2023), tanto no Brasil quanto no exterior. Os critérios de inclusão contemplaram a relevância dos trabalhos em relação ao tema de pesquisa, a utilização de modelos matemáticos para o PSPRR e a contribuição significativa para o campo de estudo.

3.3 Extração de Dados e Análise Bibliométrica

Os dados extraídos incluíram informações como autor, título, ano de publicação, país de publicação, número de citações, modelos utilizados, dentre outros. A análise bibliométrica incluiu a quantificação de indicadores, tais como número de publicações por ano, autores mais prolíficos, além do já mencionado número de citações.

3.4 Organização e Representação dos Resultados

Os resultados da revisão sistemática e da análise bibliométrica foram organizados em quadros, tabelas e gráficos. Esta representação visual permitiu uma compreensão mais clara e concisa das tendências, padrões e relações identificados nos estudos selecionados.

3.5 Avaliação da Qualidade

A avaliação da qualidade dos estudos selecionados foi realizada através da análise crítica da metodologia, da clareza dos objetivos, da validade e confiabilidade dos resultados e das contribuições para o campo de estudo.

3.6 Síntese e Interpretação

Por fim, uma síntese dos principais achados foi realizada, integrando os resultados da revisão sistemática com a análise bibliométrica. A interpretação focou na identificação dos modelos matemáticos mais utilizados, na descrição das técnicas e abordagens estudadas, e na avaliação das estratégias mais aplicadas no contexto nacional e internacional.

4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DA BIBLIOMETRIA

A partir das palavras-chave, da aplicação do operador booleano AND e dos critérios de inclusão e exclusão definidos, verificou-se que há mais de 65 mil estudos relacionados ao tema *Problema de Sequenciamento em Projeto com Restrição de Recurso*, considerando os idiomas português, inglês e espanhol. Neste contexto, a base científica com maior representatividade é o *Google Scholar*, como se observa na Tabela 1.

Tabela 1 - Número de estudos relacionados por palavras-chave e bases científicas

| Palavra-chave (principal) | Operador booleano | Palavra-chave (secundária) | Academia | Google Scholar | Scielo | Portal da CAPES | Total |
|--|-------------------|----------------------------|----------|----------------|--------|-----------------|--------|
| <i>Português</i> | | | | | | | |
| Problema de Sequenciamento em Projeto com Restrição de Recurso | - | - | 14.597 | 15.200 | - | - | 29.797 |
| Problema de Sequenciamento em Projeto com Restrição de Recurso | AND | Modelo Matemático | 37 | 8.410 | - | - | 8.447 |
| Problema de Sequenciamento em Projeto com Restrição de Recurso | AND | Método de solução | 802 | 14.900 | - | - | 15.702 |
| <i>Inglês</i> | | | | | | | |
| <i>Resource-Constrained Project Scheduling Problem</i> | - | - | 3.360 | 17.900 | 1 | 808 | 22.070 |
| <i>Resource-Constrained Project Scheduling Problem</i> | AND | <i>Mathematical Model</i> | 358 | 19.300 | - | 204 | 19.862 |
| <i>Resource-Constrained Project Scheduling Problem</i> | AND | <i>Solution Method</i> | 263 | 17.900 | - | 273 | 18.436 |
| <i>Espanhol</i> | | | | | | | |

| | | | | | | | |
|--|-----|---------------------------|-----|--------|---|---|--------|
| <i>Problema de Programación de Proyectos con Recursos Restringidos</i> | - | - | 844 | 15.700 | - | 4 | 16.548 |
| <i>Problema de Programación de Proyectos con Recursos Restringidos</i> | AND | <i>Modelo Matemático</i> | 102 | 16.700 | - | - | 16.802 |
| <i>Problema de Programación de Proyectos con Recursos Restringidos</i> | AND | <i>Método de Solución</i> | 44 | 18.200 | - | 2 | 18.246 |

Fonte: conforme as bases/plataformas em 07/2023.

Considerando, ainda, os dados supracitados, observa-se que a produção científica sobre o assunto é maior em língua inglesa e espanhola do que em português, se se compara a aplicação dos termos principais com as palavras-chave secundárias. Entretanto, ao ampliar mais o assunto e focar apenas no termo principal, sem a delimitação do assunto pelas palavras-chave secundárias, as publicações em português possui número maior.

Com o intuito de identificar os materiais que se apresentaram mais relevantes sobre o *Problema de Sequenciamento em Projeto com Restrição de Recurso*, especificamente no que tange à sua relação com os modelos matemáticos e métodos de solução, reuniu-se 20 estudos. Estes trabalhos foram escolhidos conforme o número de citações informados pelo *Google Scholar* e pela plataforma Elsevier. Os estudos juntos somam cerca de 550 menções pela comunidade científica, como se observa no Quadro 1.

Quadro 1 - Estudos selecionados conforme o número de citações

| | Título do material | Autores | Ano | Número de citações |
|----------|---|-------------------------------------|------------|---------------------------|
| 1 | <i>A Resource Constrained Project Scheduling Problem with Bounded Multitasking</i> | Cavalcante, Cardonha e Herrmann | 2013 | 14 |
| 2 | <i>Resource constrained project scheduling problem with discounted earliness-tardiness penalties: Mathematical modeling and solving procedure</i> | Khoshjahan, Najafi e Afshar-Nadjafi | 2013 | 47 |
| 3 | <i>An Energy-efficient Mathematical Model for the Resource-constrained Project Scheduling Problem: An Evolutionary Algorithm</i> | Hosseinian e Baradaran | 2018 | 8 |
| 4 | <i>An event-based reactive scheduling approach for the Resource Constrained Project Scheduling Problem with unreliable resources</i> | Chakraborty et al. | 2020 | 20 |

| | | | | |
|----|--|---------------------------------|------|-----|
| 5 | <i>A lexicographic approach to the robust resource-constrained project scheduling problem</i> | Palacio e Larrea | 2016 | 31 |
| 6 | <i>New continuous-time and discrete-time mathematical formulations for resource-constrained project scheduling problems</i> | Kopanos, Kyriakidi e Georgiadis | 2014 | 67 |
| 7 | <i>A hybrid approach for solving multimode resource-constrained project scheduling problem in construction</i> | Rosłon e Kulejewski | 2019 | 19 |
| 8 | <i>The Multimode Resource Constrained Project Scheduling Problem for Repetitive Activities in Construction Projects</i> | García-Nieves e Salcedo-Bernal | 2018 | 46 |
| 9 | <i>Resource-constrained project scheduling problem with uncertain durations and renewable resources</i> | Ma et al. | 2015 | 55 |
| 10 | <i>An efficient genetic algorithm to solve the resource-constrained project scheduling problem with transfer times: The single mode case</i> | Kadri e Boctor | 2018 | 178 |
| 11 | <i>An optimization model to solve the resource constrained project scheduling problem RCPSP in new product development projects</i> | Ortiz-Pimiento e Diaz-Serna | 2020 | 5 |
| 12 | <i>A Review of Resource-Constrained Project Scheduling Problems (RCPSP) Approaches and Solutions</i> | Abdolshah | 2014 | 54 |
| 13 | Modelagem e Solução de Problemas de Sequenciamento em Projetos com Restrição de Recursos | Silva, Vieira e Silva | 2017 | 2 |
| 14 | Proposições de Modelos Matemáticos para o Problema de Sequenciamento em Projetos com Restrição de Recursos e análise de desempenho | Rola e Vieira | 2022 | - |
| 15 | Modelos de programação linear inteira para variantes do problema de programação de projetos com restrição de recursos | Melo | 2018 | 1 |
| 16 | Geração de grade de horários para disciplinas de uma instituição de nível superior utilizando programação linear inteira multiobjetivo | Ribeiro, Aizemberg e Uchoa | 2013 | 1 |
| 17 | Metaheurísticas para o Problema de Sequenciamento em Projetos com Restrição em Recursos e Múltiplos Modos de Execução | Fernandes | 2017 | - |
| 18 | Otimização por colônia de formigas aplicada ao escalonamento de tarefas com restrição de recursos em projeto de software | Souza | 2020 | - |
| 19 | Metaheurísticas para a elaboração de grades horárias universitárias | Vasconcelos e Sakuraba | 2014 | 1 |
| 20 | Problema de escalonamento de projetos com restrição de recursos: uma aplicação no ramo de petróleo | Amorim | 2015 | - |

Fonte: conforme os estudos e as bases/plataformas em 07/2023.

Apesar dos estudos de número 14,17,18 e 20 não terem registros do número de menção, foram integrados do mesmo modo por se tratarem de materiais com conteúdo atualizado e relevante. De modo geral, os estudos que possuem maior número de citação são de origem do exterior. As pesquisas brasileiras (dos números 13 a 20), ainda que importantes, não são frequentemente citadas por autores internacionais. Um ponto que justifica esse aspecto é a barreira linguística. Em outras palavras, os pesquisadores internacionais podem ser desafiados a compreender os resultados dos estudos em português por não dominarem o idioma. No entanto, quando os brasileiros publicam seus resultados em inglês, o número de menções aparece em maior quantidade. É o que ocorre com o estudo 1 – de Cavalcante, Cardonha e Herrmann (2013) – que, por sua vez, possui 14 citações.

Complementando a reflexão anterior, o quadro 2 revela os países de origem de cada publicação. É possível averiguar que 65% (n = 13) dos textos mais populares são internacionais e apenas 30% (n=7) nacionais. Conforme o quadro abaixo, as pesquisas advindas do Irã e da Colômbia são frequentemente indicadas dentro do assunto em questão. De qualquer forma, é importante ressaltar que há um estudo canadense (estudo número 10) que lidera no número de citações (n = 178).

Quadro 2 - Países de origem de cada publicação

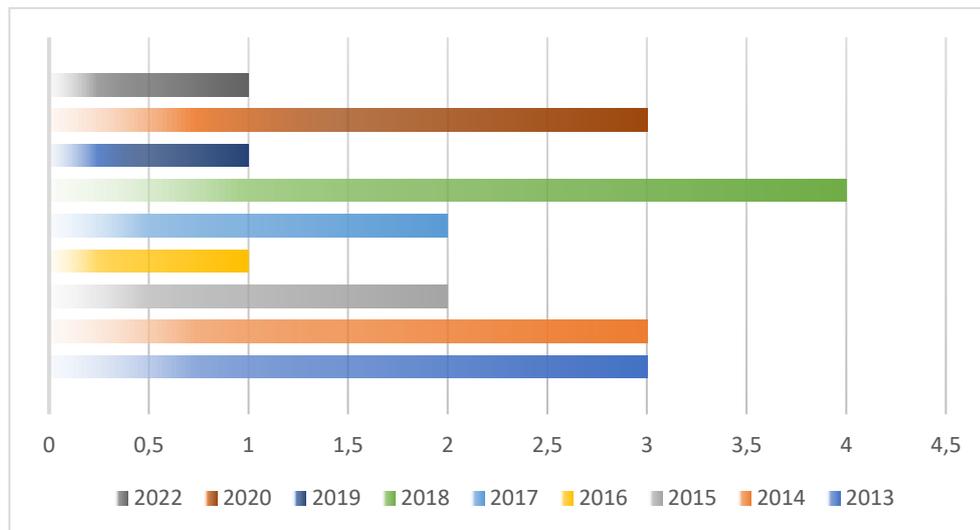
| | Autores | Ano | País de publicação |
|-----------|-------------------------------------|------------|----------------------------|
| 1 | Cavalcante, Cardonha e Herrmann | 2013 | Brasil |
| 2 | Khoshjahan, Najafi e Afshar-Nadjafi | 2013 | Irã |
| 3 | Hosseinian e Baradaran | 2018 | Irã |
| 4 | Chakraborty et al. | 2020 | Austrália / Estados Unidos |
| 5 | Palacio e Larrea | 2016 | Colômbia |
| 6 | Kopanos, Kyriakidi e Georgiadis | 2014 | Inglaterra / Grécia |
| 7 | Rosłon e Kulejewski | 2019 | Polônia |
| 8 | García-Nieves e Salcedo-Bernal | 2018 | Colômbia |
| 9 | Ma et al. | 2015 | China |
| 10 | Kadri e Boctor | 2018 | Canadá |
| 11 | Ortiz-Pimiento e Diaz-Serna | 2020 | Colômbia |
| 12 | Abdolshah | 2014 | Irã |
| 13 | Silva, Vieira e Silva | 2017 | Brasil |
| 14 | Rola e Vieira | 2022 | Brasil |
| 15 | Melo | 2018 | Brasil |
| 16 | Ribeiro, Aizemberg e Uchoa | 2013 | Brasil |
| 17 | Fernandes | 2017 | Brasil |
| 18 | Souza | 2020 | Brasil |
| 19 | Vasconcelos e Sakuraba | 2014 | Brasil |

| | | | |
|----|--------|------|--------|
| 20 | Amorim | 2015 | Brasil |
|----|--------|------|--------|

Fonte: conforme os estudos.

Avançando para o número de publicações por ano, tem-se que 2018 foi o mais profícuo, apresentando 4 materiais. Em seguida, apresentam-se os anos 2013, 2014 e 2020 com três publicações cada. Outras informações podem ser conferidas no Gráfico 1.

Gráfico 1 - Número de publicações por ano



Fonte: conforme os estudos.

Finalmente, no que concerne aos modelos e métodos utilizados no *Problema de Sequenciamento em Projeto com Restrição de Recurso*, verificam-se que os mais utilizados pela literatura foram a Programação Linear Inteira Mista e o Meta-heurístico, como se observa no Quadro 3.

Quadro 3 - Modelos utilizados por cada estudo

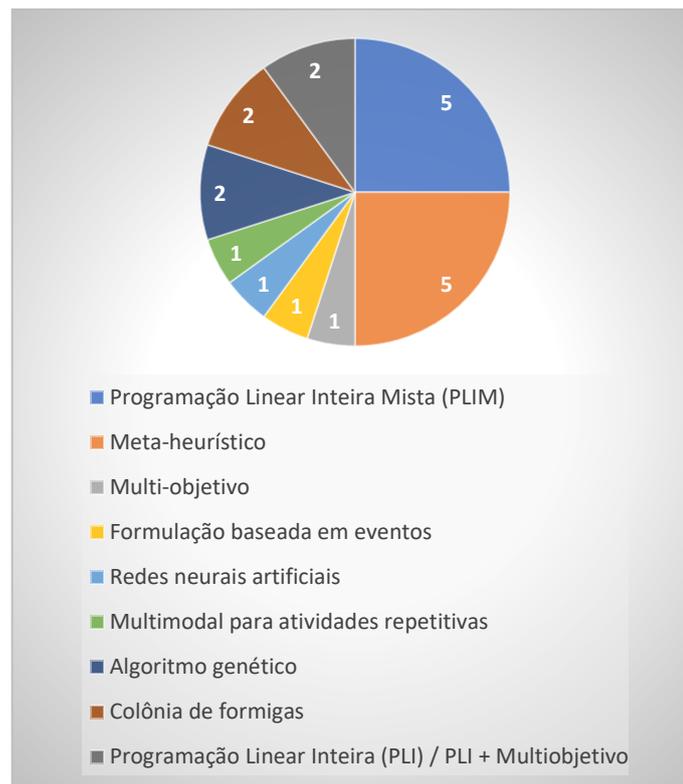
| | Nome dos Autores | Ano | Modelo / Métodos de solução utilizado no estudo |
|---|-------------------------------------|------|---|
| 1 | Cavalcante, Cardonha e Herrmann | 2013 | Programação Linear Inteira Mista (PLIM) |
| 2 | Khoshjahan, Najafi e Afshar-Nadjafi | 2013 | Meta-heurístico |
| 3 | Hosseinian e Baradaran | 2018 | Multi-objetivo |
| 4 | Chakraborty et al. | 2020 | Formulação baseada em eventos |
| 5 | Palacio e Larrea | 2016 | Programação Linear Inteira Mista (PLIM) |
| 6 | Kopanos, Kyriakidi e Georgiadis | 2014 | Modelos de tempo discreto de programação inteira binária e formulações de tempo contínuo de programação inteira mista baseadas em precedência |
| 7 | Roslon e Kulejewski | 2019 | Metaheurística e redes neurais artificiais |
| 8 | García-Nieves e Salcedo-Bernal | 2018 | Modelo multimodal para atividades repetitivas |

| | | | |
|----|-----------------------------|------|--|
| 9 | Ma et al. | 2015 | Algoritmo genético e modelo <i>uncertainty-theory-based project scheduling</i> |
| 10 | Kadri e Boctor | 2018 | Algoritmo genético |
| 11 | Ortiz-Pimiento e Diaz-Serna | 2020 | Meta-heurístico |
| 12 | Abdolshah | 2014 | Variados |
| 13 | Silva, Vieira e Silva | 2017 | Programação Linear Inteira Mista (PLIM) |
| 14 | Rola e Vieira | 2022 | Programação Linear Inteira Mista (PLIM) |
| 15 | Melo | 2018 | Programação Linear Inteira (PLI) |
| 16 | Ribeiro, Aizemberg e Uchoa | 2013 | Programação Linear Inteira Multiobjetivo |
| 17 | Fernandes | 2017 | Meta-heurístico |
| 18 | Souza | 2020 | Colônia de formigas |
| 19 | Vasconcelos e Sakuraba | 2014 | Meta-heurístico |
| 20 | Amorim | 2015 | Colônia de formigas |

Fonte: conforme os estudos.

Ao realizar o balanço no quesito do número de vezes que os modelos utilizados apareceram nos estudos selecionados, encontra-se no gráfico:

Gráfico 2 - Número de menções dos modelos pelos estudos selecionados



Fonte: conforme os estudos.

A partir do quadro e do gráfico acima, a adoção da Programação Linear Inteira Mista e o Meta-heurístico pode ser justificada por, pelo menos, cinco razões, como já apontados no referencial teórico desta pesquisa:

1. **Complexidade do Problema:** O RCPSP é um problema NP-difícil, o que significa que não existe um algoritmo conhecido que possa resolvê-lo de forma eficiente para todas as instâncias possíveis. Isso torna a aplicação de métodos exatos, como a PLIM, e de métodos aproximados, como os Meta-heurísticos, adequada para encontrar soluções próximas do ótimo global em um tempo computacional razoável.
2. **Modelagem através da PLIM:** A Programação Linear Inteira Mista é capaz de modelar o problema de forma eficaz através do uso de variáveis inteiras e contínuas, restringindo as relações entre atividades e recursos. A modelagem matemática por meio de PLIM permite a aplicação de algoritmos eficientes de solução, fornecendo respostas exatas para instâncias menores ou soluções aproximadas para instâncias maiores.
3. **Flexibilidade dos Métodos Meta-heurísticos:** Os Meta-heurísticos, como algoritmos genéticos são técnicas de otimização que exploram o espaço de soluções de maneira eficiente. A flexibilidade e adaptabilidade destes métodos permitem que eles sejam aplicados a uma ampla gama de variações do RCPSP, incorporando facilmente diferentes restrições e objetivos.
4. **Complementaridade entre os Métodos:** A combinação da PLIM, que busca soluções ótimas, com métodos Meta-heurísticos, que exploram o espaço de solução de forma eficiente, pode resultar em uma abordagem híbrida robusta e eficaz. Enquanto a PLIM pode ser usada para resolver instâncias menores exatamente, os métodos Meta-heurísticos podem ser aplicados para instâncias maiores, onde a solução exata pode ser computacionalmente proibitiva.
5. **Amplo Suporte na Literatura:** Ambos os métodos têm sido extensivamente estudados e aplicados em várias áreas da pesquisa operacional, incluindo o problema de sequenciamento em projeto. Isso oferece uma base sólida de conhecimento e ferramentas para a implementação e ajuste destes métodos ao RCPSP.

Em suma, a Programação Linear Inteira Mista e os métodos Meta-heurísticos são utilizadas no Problema de Sequenciamento em Projeto com Restrição de Recurso devido à sua capacidade de modelar eficientemente o problema, sua flexibilidade na adaptação a diferentes cenários, e sua eficácia em fornecer soluções de qualidade em um tempo computacional aceitável. Essas características tornam esses métodos escolhas apropriadas para abordar a complexidade inerente do RCPSP.

5 CONCLUSÃO

A investigação acerca dos trabalhos no contexto do Problema de Sequenciamento em Projeto com Restrição de Recurso (PSPRR) revelou-se de fundamental importância para o entendimento das abordagens modernas no gerenciamento de projetos. Por meio de uma metodologia rigorosa que combinou revisão sistemática com análise bibliométrica, foi possível extrair insights valiosos sobre o estado atual do campo, assim como as tendências emergentes.

Observou-se que os modelos matemáticos aplicados ao PSPRR têm desempenhado um papel crucial na otimização de recursos, na eficiência na execução e no controle rigoroso de prazos. A complexidade do problema, juntamente com as variáveis e restrições inerentes, torna a utilização desses modelos uma ferramenta indispensável na prática de gerenciamento de projetos contemporâneos.

A revisão da literatura permitiu a identificação de várias abordagens matemáticas e métodos de solução aplicados ao PSPRR. A diversidade dessas técnicas reflete a complexidade e a pluralidade de situações enfrentadas no mundo real, bem como a evolução contínua da pesquisa neste campo.

A análise bibliométrica proporcionou uma perspectiva quantitativa sobre o tema, revelando os autores mais influentes, as publicações mais citadas, e as revistas e regiões geográficas com maior produção científica. Essas informações são úteis não apenas para a avaliação do impacto e da relevância dos trabalhos, mas também para orientar futuras pesquisas e colaborações.

Foi evidenciada a necessidade de pesquisas adicionais que explorem novas técnicas e metodologias, assim como a aplicação de modelos existentes em contextos inovadores ou pouco explorados. A pesquisa interdisciplinar, combinando insights de áreas como matemática, estatística, engenharia e gestão, pode resultar em contribuições ainda mais significativas para a prática e a teoria.

Em conclusão, esta pesquisa contribuiu para o enriquecimento do conhecimento no campo do PSPRR, destacando a relevância dos modelos matemáticos e suas diversas aplicações. Os resultados aqui apresentados podem servir como referência para acadêmicos, profissionais da indústria e tomadores de decisão, promovendo uma compreensão mais profunda do tema e incentivando o desenvolvimento contínuo de soluções eficazes e eficientes para o gerenciamento de projetos com restrição de recursos. A complexidade e a dinâmica do mundo dos projetos exigem uma constante evolução nas abordagens e métodos, e este estudo serve como um passo importante nessa jornada contínua de aprendizado e inovação.

REFERÊNCIAS

- ABGP. Associação Brasileira de Gerenciamento de Projetos. Disponível em: <https://www.abgp.org.br/>. Acesso em: 26 fev. 2023.
- AGARWAL, A., Colak, S., & Erenguc, S. S. (2011). Effective algorithms for the resource-constrained project scheduling problem with generalized precedence relations. *Journal of the Operational Research Society*, 62(2), 299-310.
- ARAUJO, A. M. B. Uma revisão histórica do gerenciamento de projetos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO, 6., 2013, Bento Gonçalves. Anais [...]. Bento Gonçalves: Universidade de Caxias do Sul, 2013.
- ARTIGUES, C.; MICHELON, P.; REUS, L. (2003). Insertion Techniques for Static and Dynamic Resource-Constrained Project Scheduling. *European Journal of Operational Research*, 149(2), 249-267.
- BARTUSCH, M.; MÖHRING, R.; RADERMACHER, F.J. (1988). Scheduling Project Networks with Resource Constraints and Time Windows. *Annals of Operations Research*, 16(1), 201-240.
- BLAZEWICZ, J., Lenstra, J. K., & Kan, A. H. (1983). Scheduling subject to resource constraints: classification and complexity. *Discrete Applied Mathematics*, 5(1), 11-24.
- BLAZEWICZ, J.; LENSTRA, J. K.; KAN, A. H. G. R.; ZWEGERS, A. Scheduling subject to resource constraints: Classification and complexity. *Discrete Applied Mathematics*, v. 5, n. 1, p. 11-24, 1993.
- BLAZEWICZ, J.; LENSTRA, J. K.; KAN, A. R.; KANZOW, C. (2007). Scheduling subject to resource constraints: classification and complexity. *Discrete Applied Mathematics*, 5(1), 11-24.
- BLUM, C. (2005). Ant colony optimization: Introduction and recent trends. *Physics of Life Reviews*, 2(4), 353-373.
- BOULEIMEN, K.; LECOCQ, P. (2003). A new efficient simulated annealing algorithm for the resource-constrained project scheduling problem and its multiple mode version. *European Journal of Operational Research*, 149(2), 268-281.

BRUCKER, P., Drexl, A., Möhring, R., Neumann, K., & Pesch, E. (1999). Resource-constrained project scheduling: notation, classification, models, and methods. *European Journal of Operational Research*, 112(1), 3-41.

BRUCKER, P.; DREXL, A.; MOHRING, R.; NEUMANN, K.; PESCH, E. Resource-constrained project scheduling: Notation, classification, models, and methods. *European Journal of Operational Research*, v. 112, n. 1, p. 3-41, 1999.

CARLIER, J. (2006). Exact algorithms for scheduling problems. *Discrete Applied Mathematics*, 153(1-3), 46-59.

CARVALHO, Marly Monteiro de; RABECHINI JR., Roque. *Fundamentos em gestão de projetos: construindo competências para gerenciar projetos*. 4. ed. Atlas, 2019.

DEMEULEMEESTER, E.; HERROELEN, W. (1992). A Branch-and-Bound Procedure for the Multiple Resource-Constrained Project Scheduling Problem. *Management Science*, 38(12), 1803-1818.

DEMEULEMEESTER, E.; HERROELEN, W. (1992). A branch-and-bound procedure for the multiple resource-constrained project scheduling problem. *Management Science*, 38(12), 1803-1818.

DINSMORE, Paul C. *Como se tornar um profissional em gerenciamento de projetos*. Rio de Janeiro: Qualitymark, 1996.

DINSMORE, Paul; CABANIS-BREWIN, Jeannette. *The AMA handbook of project management*. AMACOM, 2014.

DREXL, A. (2005). Heuristics for the resource-constrained project scheduling problem. In: R. Kolisch and J. Zimmermann (eds.), *Project Scheduling: Recent Models, Algorithms, and Applications*. Springer, 169-204.

DREXL, A.; KIMMS, A. (2001). Lot sizing and scheduling - Survey and extensions. *European Journal of Operational Research*, 99(2), 221-235.

ELMAGHRABY, S. E. (2000). On criticality and sensitivity in activity networks. *European Journal of Operational Research*, 127(2), 220-238.

ELMAGHRABY, S. E. Activity networks: Project planning and control by network models. New York: Wiley, 1977.

GIORDANO, F.R.; FOX, W.P.; WEIR, M.D. (2014). A First Course in Mathematical Modeling. Brooks/Cole.

GOMES, Eduardo de Oliveira. Gerenciamento de projetos em 7 passos: uma abordagem prática. 1. ed. Elsevier, 2019.

HARTMANN, S. (1998). A competitive genetic algorithm for resource-constrained project scheduling. *Naval Research Logistics (NRL)*, 45(7), 733-750.

HARTMANN, S. (2013). Resource-constrained project scheduling: exact methods for the multi-mode case. Springer Science & Business Media.

HARTMANN, S. A competitive genetic algorithm for resource-constrained project scheduling. *Naval Research Logistics*, v. 45, n. 7, p. 733-750, 1998.

HERROELEN, W.; LEUS, R. Project scheduling under uncertainty: Survey and research potentials. *European Journal of Operational Research*, v. 165, n. 2, p. 289-306, 2005.

HILLIER, F.S.; LIEBERMAN, G.J. (2014). Introduction to Operations Research. McGraw-Hill Science.

KANZOW, C.; KLEIN, M.; TILK, C. (2016). Generalized Nash Equilibrium Problems, Bilevel Programming and MPEC. *Mathematical Programming*, 157(2), 297-319.

KELLEY, J. E. The critical-path method: Resources planning and scheduling. In: *Industrial Scheduling*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1961. p. 347-365.

KERZNER, Harold. *Gestão de projetos: as melhores práticas*. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

KERZNER, Harold. *Gestão de projetos: as melhores práticas*. 3. ed. Bookman, 2013.

KIOPPENBORG, T., & OPFER, W. (2002). The current state of project management research: trends, interpretations and predictions. *Project Management Journal*, 33(2), 5-18

KLERIDES, E.; HADJICONSTANTINO, E. (2010). A Decomposition-Based Stochastic Programming Approach for the Project Scheduling Problem with Random Activity Times. *European Journal of Operational Research*, 207(2), 679-689.

KOLISCH, R.; HARTMANN, S. Heuristic algorithms for solving the resource-constrained project scheduling problem: Classification and computational analysis. In: WEGELARZ, J. (Ed.). *Project Scheduling: Recent Models, Algorithms, and Applications*. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1999. p. 147-178.

KOLISCH, R.; PADMAN, R. (2001). An Integrated Survey of Deterministic Project Scheduling. *Omega*, 29(3), 249-272.

KOLISCH, R.; SRINIVASAN, S. R. The general resource-constrained project scheduling problem: A state-of-the-art review. In: KOLISCH, R.; SRINIVASAN, S. R. (Eds.). *Handbook on Project Management and Scheduling*. New York: Springer, 2006. p. 51-83.

KOTTER, J. *Liderando Mudança*. Editora Campus, 1997.

MAXIMIANO, Antônio Cesar Amaru. *Administração de projetos: como transformar ideias em resultados*. 6. ed. Atlas, 2018.

MINGOZZI, A.; MANIEZZO, V.; RICCIARDELLI, S.; BIANCO, L. (1998). An Exact Algorithm for the Resource-Constrained Project Scheduling Problem Based on a New Mathematical Formulation. *Management Science*, 44(5), 714-729.

MURCH, R. (2001). *Project management: best practices for IT professionals*. New York: Prentice Hall Professional.

PADMAN, R.; RAO, M.R. (1993). Scheduling in project networks with resource constraints and time/resource trade-offs. *Computers & Operations Research*, 20(1), 25-40.

PANDE, P. S.; NEUMAN, R.P. e CAVANAGH, R.R. *Estratégia Seis Sigma*. Rio de Janeiro: Qualitymark. 2001.

PATTERSON, J.H.; HUBER, N.; MESSMER, A. (1993). Resource-constrained project scheduling: Priority rule performance revisited. *International Journal of Production Research*, 31(8), 1817-1835.

PINEDO, M. L. Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems. 4th ed. New York: Springer, 2012.

PMI - PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE. Guia PMBOK: Um Guia para o Conjunto de Conhecimentos em Gerenciamento de Projetos. 6. ed. Project Management Institute, 2018.

PMI. Project Management Institute. Disponível em: <https://www.pmi.org/>. Acesso em: 26 fev. 2023.

PRADO, Darci; ARCHER, Guilherme S.; SALVIANO, Sílvio F. Como planejar projetos e gerenciar pessoas. Atlas, 2017.

PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE. Um guia do conhecimento em gerenciamento de projetos (guia PMBOK). 6. ed. Newtown Square, PA: Project Management Institute, 2017.

QUMER, A., & Henderson-Sellers, B. (2008). An evaluation of the degree of agility in six agile methods and its applicability for method engineering. Information and Software Technology, 50(3), 280-295. <http://dx.doi.org/10.1016/j.infsof.2007.02.002>

RABECHINI, R.; CARVALHO M. M.; LAURINDO F. J. B. Fatores críticos para implementação de gerenciamento por projetos: o caso de uma organização de pesquisa. **Revista Produção**, v. 12, n. 2, 2002.

ROTONDARO RG. Seis Sigma: estratégia gerencial para a melhoria de processos, produtos e serviços. São Paulo: Atlas; 2002.

SCHUTT, A., Zimmermann, J., & Gottwald, R. L. (2013). An exact algorithm for the resource-constrained project scheduling problem based on a new mathematical formulation. European Journal of Operational Research, 224(1), 148-158.

SILVA, José Vanderli da; ALMEIDA, João Roberto Ferreira de. Gestão de projetos: teoria e prática. São Paulo: Atlas, 2014.

SLOWINSKI, R. Two approaches to problems of resource allocation among project activities - a comparative study. Journal of the Operational Research Society, v. 31, n. 9, p. 711-723, 1980.

TALBOT, F.B. (1982). Resource-Constrained Project Scheduling with Time-Resource Tradeoffs: The Nonpreemptive Case. *Management Science*, 28(10), 1197-1210.

TORMOS, P.; LOVA, A. (2003). A Competitive Heuristic Solution Technique for the Multiobjective Activity Network Problem. *European Journal of Operational Research*, 147(3), 630-652.

TSCHUPKE, W. A Tabu Search Algorithm for the Resource-Constrained Project Scheduling Problem. Master's thesis, University of Kaiserslautern, 2002.

VANHOUCHE, M.; MAENHOUT, B. (2007). An Artificial Intelligence Approach for Combinatorial Auctions: The Integration of Benders Decomposition and Meta-Heuristic Solution Techniques. *European Journal of Operational Research*, 180(2), 480-496.

VERZUH, Eric. *Gestão de projetos: estabelecendo diferenciais competitivos*. 5. ed. Bookman, 2016.

WERKEMA MC. *Lean Seis Sigma Introdugma: Estratégia gerencial manufacturing*. Rio de Janeiro: Wekema; 2006.

WINSTON, W. L. (2004). *Operations Research: Applications and Algorithms*. Brooks/Cole.