LVI SBPO SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL
DE 04 ATÉ 07 NOVEMBRO 2024
FORTALEZA | CEARÁ

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

Clarisse da Silva Vieira
Universidade Federal de Ouro Preto
R. Diogo de Vasconcelos, 122, CEP 35400-000 - Ouro Preto, MG, Brasil
clarisse@ufop.edu.br

João Vitor Alves Costa Marques Welerson
Universidade Federal de Ouro Preto
R. Diogo de Vasconcelos, 122, CEP 35400-000 - Ouro Preto, MG, Brasil
joao.welerson@aluno.ufop.edu.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 e profissionais da indústria.

PALAVRAS CHAVE. Sequenciamento. Modelos Matemáticos. Gerenciamento de Projetos.

Tópicos (AD&GP - PO na Administração e Gestão da Produção, PM - Programação Matemática, AO - Outras aplicações em PO)

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. Scheduling. Mathematical Models. Project Management.

Paper topics (AD&GP, PM, OA)

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193895
https://proceedings.science/p/193895?lang=pt-br

1. Introdução

O Gerenciamento de Projetos (GP) 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 e Rabechini 2019]. 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 e 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 et al. 2002], 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.

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.

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 [Dinsmore 1996]. No contexto do gerenciamento de projetos, dentre os diversos problemas, está o *Resource-Constrained Project*

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193895
https://proceedings.science/p/193895?lang=pt-br

Scheduling Problem (RCPSP) - Problema de Sequenciamento em Projetos com Restrição de Recurso (PSPRR).

2. Sequenciamento em Projeto com Restrição de Recurso (PSPRR)

O Problema de Sequenciamento em Projeto com Restrição de Recurso (PSPRR) é um problema clássico de otimização combinatória no campo do gerenciamento de projetos [Brucker et al. 1999]. O RCPSP 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 RCPSP é minimizar a duração total do projeto, ou seja, o tempo necessário para concluir todas as atividades [Brucker et al. 1999].

O RCPSP 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* - PCPSP), que considera apenas as relações de precedência entre as atividades, sem levar em conta as restrições de recursos. Posteriormente, foi estudado por diversos autores que propuseram algoritmos e abordagens heurísticas para sua resolução.

O RCPSP 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 RCPSP, como a técnica de geração de prioridades [Kolisch e Hartmann 1999], a busca tabu [Tschupke 2002] e os algoritmos genéticos [Hartmann 1998].

O RCPSP é aplicável em diversos contextos de gerenciamento de projetos, como na construção civil, desenvolvimento de produtos, manufatura e serviços [Herroelen e 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].

2.1. 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 e 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.

[Mingozzi et al. 1998] propuseram um modelo para representar 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 para representar 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

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193895
https://proceedings.science/p/193895?lang=pt-br

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, a 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 et al. 1988], é outra maneira 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, proposições 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 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].

2.2. 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 e Rao 1993]. Nestes métodos, o problema é formulado como um modelo de programação inteira

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193895
https://proceedings.science/p/193895?lang=pt-br

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. 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**
			Português				
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
			Inglês				
Resource-Constrained Project Scheduling	-	-	3.360	17.900	1	808	22.070

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193895
https://proceedings.science/p/193895?lang=pt-br

Problem							
Resource-Constrained Project Scheduling Problem	AND	*Mathematical Model*	358	19.300	-	204	19.862
Resource-Constrained Project Scheduling Problem	AND	*Solution Method*	263	17.900	-	273	18.436
		Espanhol					
Problema de Programación de Proyectos con Recursos Restringidos	-	-	844	15.700	-	4	16.548
Problema de Programación de Proyectos con Recursos Restringidos	AND	*Modelo Matemático*	102	16.700	-	-	16.802
Problema de Programación de Proyectos con Recursos Restringidos	AND	*Método de Solución*	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, escolhidos conforme o número de citações informado 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	*A Resource Constrained Project Scheduling Problem with Bounded Multitasking*	Cavalcante, Cardonha e Herrmann	2013	14
2	*Resource constrained project scheduling problem with discounted earlinessi tardiness penalties: Mathematical modeling and solving procedure*	Khoshjahan, Najafi e Afshar-Nadjafi	2013	47
3	*An Energy-efficient Mathematical*	Hosseinian e Baradaran	2018	8

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193895
https://proceedings.science/p/193895?lang=pt-br

	Model for the Resource-constrained Project Scheduling Problem: An Evolutionary Algorithm			
4	*An event-based reactive scheduling approach for the Resource Constrained Project Scheduling Problem with unreliable resources*	Chakrabortty et al.	2020	20
5	*A lexicographic approach to the robust resource-constrained project scheduling problem*	Palacio e Larrea	2016	31
6	*New continuous-time and discrete-time mathematical formulations for resource-constrained project scheduling problems*	Kopanos, Kyriakidi e Georgiadis	2014	67
7	*A hybrid approach for solving multi-mode resource-constrained project scheduling problem in construction*	Rosȣn e Kulejewski	2019	19
8	*The Multimode Resource Constrained Project Scheduling Problem for Repetitive Activities in Construction Projects*	García-Nieves e Salcedo-Bernal	2018	46
9	*Resource-constrained project scheduling problem with uncertain durations and renewable resources*	Ma et al.	2015	55
10	*An efficient genetic algorithm to solve the resource-constrained project scheduling problem with transfer times: The single mode case*	Kadri e Boctor	2018	178
11	*An optimization model to solve the resource constrained project scheduling problem RCPSP in new product development projects*	Ortiz-Pimiento e Diaz-Serna	2020	5
12	*A Review of Resource-Constrained Project Scheduling Problems (RCPSP) Approaches and Solutions*	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	Souza	2020	-

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193895
https://proceedings.science/p/193895?lang=pt-br

	aplicada ao escalonamento de tarefas com restrição de recursos em projeto de software			
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 - Cavalcante, Cardonha e Herrmann, em 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	Chakrabortty 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	2014	Brasil

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193895
https://proceedings.science/p/193895?lang=pt-br

	Sakuraba		
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.

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	Chakrabortty 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	Rosgn 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 *uncertainty-theory-based project scheduling*
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.

A partir do quadro, ao realizar o balanço no quesito do número de vezes que os modelos utilizados apareceram nos estudos selecionados, encontra-se como os mais adotados: Programação Linear Inteira Mista e Meta-heurístico. Isso pode ser justificado 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

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193895
https://proceedings.science/p/193895?lang=pt-br

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 utilizados 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.

Em conclusão, esta pesquisa contribui 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.

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193895
https://proceedings.science/p/193895?lang=pt-br

Referências

Artigues, C., Michelon, P. e Reus, L. (2003). Insertion Techniques for Static and Dynamic Resource-Constrained Project Scheduling. European Journal of Operational Research, 149(2), 249-267.

Araujo, A. M. B. (2013). Uma revisão histórica do gerenciamento de projetos. In: Congresso Brasileiro de Gestão de Desenvolvimento de Produto. Anais [...]. Bento Gonçalves: Universidade de Caxias do Sul.

Bartusch, M., Möhring, R. e 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. R. e 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. e 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.

Carvalho, Marly Monteiro e Rabechini, J. Roque (2019). Fundamentos em gestão de projetos: construindo competências para gerenciar projetos. 4. ed. Atlas.

Demeulemeester, E. 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. (1996). Como se tornar um profissional em gerenciamento de projetos. Rio de Janeiro: Qualitymark.

Drexl, A. e Kimms, A. (2001). Lot sizing and scheduling - Survey and extensions. European Journal of Operational Research, 99(2), 221-235.

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.

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

Herroelen, W. e Leus, R. (2005). Project scheduling under uncertainty: Survey and research potentials. European Journal of Operational Research, v. 165, n. 2, p. 289-306.

Kanzow, C., Klein, M. e Tilk, C. (2016). Generalized Nash Equilibrium Problems, Bilevel Programming and MPEC. Mathematical Programming, 157(2), 297-319

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193895
https://proceedings.science/p/193895?lang=pt-br

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

Kolisch, R. e Hartmann, S. (1999). 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. p. 147-178.

Kolisch, R. e Padman, R. (2001). An Integrated Survey of Deterministic Project Scheduling. Omega, 29(3), 249-272.

Mingozzi, A., Maniezzo, V., Ricciardelli, S. e 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.

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

Patterson, J.H., Huber, N. e Messmer, A. (1993). Resource-constrained project scheduling: Priority rule performance revisited. International Journal of Production Research, 31(8), 1817-1835.

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

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

Silva, José Vanderli e Almeida, João Roberto Ferreira (2014). Gestão de projetos: teoria e prática. São Paulo: Atlas.

Slowinski, R. (1980). 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.

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

Tormos, P. e 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. (2002). A Tabu Search Algorithm for the Resource-Constrained Project Scheduling Problem. Master's thesis, University of Kaiserslautern.

Vanhoucke, M. e 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 (2016). Gestão de projetos: estabelecendo diferenciais competitivos. 5. ed. Bookman.

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193895
https://proceedings.science/p/193895?lang=pt-br