LIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional
João Pessoa - PB, 3 a 5 de novembro de 2021

PROBLEMA INTEGRADO DE AJUSTE DE FLUXO DE CAIXA E SEQUENCIAMENTO DE PROJETOS

Soraya Quaresma Santos
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção
Universidade Federal de Ouro Preto
soraya.santos@aluno.ufop.edu.br

Thiago Augusto de Oliveira Silva
Departamento de Engenharia de Produção (ICEA)
Universidade Federal de Ouro Preto
thiago@ufop.edu.br

Alexandre Xavier Martins
Departamento de Engenharia de Produção (ICEA)
Universidade Federal de Ouro Preto
xmartins@ufop.edu.br

RESUMO

A viabilização e a rentabilidade econômica e financeira de projetos, em especial projetos de construção, dependem de múltiplos fatores e da contínua tomada de decisão ao longo da execução do empreendimento. Neste sentido, é importante que o planejamento das atividades e recursos estejam integrados com o planejamento financeiro do projeto. Neste artigo abordamos o problema integrado de sequenciamento de projetos com decisões de financiamento, restrições de recursos e restrições de fluxo de caixa. O objetivo é a maximização do Valor Presente Líquido do empreendimento. Como resultado, apresentamos um novo modelo como alternativa aos apresentados na literatura e discutimos sua aplicação em uma instância pequena. Ademais, criamos um gerador de instâncias para simular a execução de instâncias de tamanho real. Após os testes, percebeu-se que o modelo é adequado e pode ser aplicável a contextos complexos a fim de melhorar o processo de tomada de decisão dos gestores de grandes empreendimentos. No entanto, é necessário que sejam desenvolvidos métodos de soluções mais eficientes do ponto de vista computacional.

PALAVRAS CHAVE. Sequenciamento de Projetos, Viabilidade Econômica e Financeira, Programação Linear Inteira Mista.

ABSTRACT

The economic and financial profitability and viability of projects, especially the construction ones, are dependent on multiple factors and continuous decision-making throughout the project's execution. In this sense, it is important that the planning of activities and resources be integrated with the project's financial planning. In this paper, we address the integrated resource-constrained project scheduling problem with financing decisions and cash flow constraints. The objective is to maximize the Net Present Value of the project. As a result, we present a new model as an alternative to those presented in the literature and discuss its application in a small instance.

Furthermore, we created an instance generator to test the model in real-size instances. The model has shown adequate to be applied in complex contexts, and it can improve the decision-making process of project management. However, from a computational point of view, it is necessary to develop more efficient solution approaches.

KEYWORDS. Project Scheduling, Economic and Financial Viability, Mixed Integer Linear Problem

1. Introdução

Na construção civil, a Gestão de Projetos deve focar na aplicação de técnicas para o controle eficiente de indicadores relacionados ao tempo, ao custo, à qualidade, ao meio ambiente e à segurança. Todos esses indicadores são avaliados desde a fase de planejamento do projeto até o término da execução e, nos casos de necessidade, durante a manutenção. Quanto maior o projeto, mais fatores devem ser considerados durante o planejamento tornando a tomada de decisão mais difícil e sujeita a riscos. Neste sentido, o fluxo de caixa do projeto precisa ser cuidadosamente planejado visando, não só a viabilidade econômica e financeira, mas também a maximização do retorno [Koo et al., 2015].

A Construção Civil é um setor amplo que atua em diferentes tipos de obras, que engloba desde pequeno porte, como construção de casas e pequenas reformas, até obras de grande porte como as voltadas para políticas habitacionais ou envolvendo infraestrutura de cidades como viadutos, pontes, estradas e barragens [Nunes et al., 2020].

Em Nunes et al. [2020], os autores afirmam que, na primeira metade da década passada, o setor teve considerável avanço devido à realização dos eventos esportivos. Atualmente, o setor se encontra em crise como reflexo da retração econômica brasileira e os autores ponderam que ”(...) o Brasil não se preparou no âmbito econômico e no setor específico da construção civil para ter um desempenho sustentável após o término de megaeventos, vide os atuais reflexos da crise.(...)”.

De acordo com Carevetti [2020], até maio de 2020 a indústria da construção civil já havia sofrido uma queda de 2,4% em relação ao ano anterior. Neste cenário de instabilidade econômica e escassez de recursos financeiros - perceptíveis em diversos mercados-, a disponibilidade de capital para a execução de projetos de construção foi reduzida.

Atrasos em execução de projetos, tanto no setor público como no privado, são comuns e, na maioria dos casos, se devem à dificuldade de cumprir com as obrigações financeiras [Ng e Zhang, 2008]. Em se tratando de obras públicas, um planejamento ruim do projeto pode resultar em dificuldades para entregar a obra. Nesse contexto, as opções de financiamento se tornaram cada vez mais atrativas e são consideradas aliadas no enfrentamento de crises.

Juntamente com o planejamento financeiro, o planejamento da execução das atividades e alocação de recursos são determinantes para o sucesso do projeto. De um modo geral, atrasos na finalização de projetos leva ao aumento dos custos e, de forma análoga, a possibilidade de adiantar a entrega pode reduzir também os custos [Ng e Zhang, 2008].

O Problema Integrado de Ajuste de Fluxo de Caixa e Sequenciamento de Projetos - PIAFCSP abordado nesta pesquisa envolve o sequenciamento de projetos com restrição de recursos, tem como foco a maximização do Valor Presente Líquido (VPL) ao final do horizonte de planejamento e inclui opções de financiamentos com variações de prazo e custo como fonte de capitalização para os projetos. A proposta é selecionar opções de financiamento no intuito de viabilizar financeiramente e maximizar o VPL.

Um método para a solução deste problema é, portanto, uma ferramenta útil para auxiliar empresas na gestão de seus projetos e, possivelmente, evitar atrasos e falhas relacionados ao orçamento. Neste sentido, a contribuição deste trabalho é apresentar um novo modelo capaz de integrar decisões de financiamento com restrições de fluxo de caixa com o, já bem estudado, problema de sequenciamento de projetos com restrições de recursos.

A seguir, na Seção 2 apresentamos uma breve revisão de literatura focando em trabalhos correlatos a este artigo, buscamos também, nesta seção, explicitar as diferenças do modelo apresentado e dos existentes na literatura. Na Seção 3 o problema é descrito e o modelo matemático desenvolvido é apresentado. Na Seção 4 uma aplicação do modelo em um pequena instância é dis-

cutida e a condução de testes computacionais em instâncias de tamanho real geradas aleatoriamente é apresentada. Os resultados obtidos através dos testes computacionais podem ser analisados na Seção 5. Por fim, na Seção 6 são apresentadas as considerações finais.

2. Revisão de Literatura

A integração de análise de fluxos de caixa e a programação de projetos tem recebido pouca atenção na literatura. No entanto, é possível encontrar estudos que busquem otimizar os custos dos projetos juntamente com formas de aprimorar a utilização dos recursos financeiros. Grande parte dos modelos apresentados nestes estudos tem por objetivo a maximização dos lucros ou da disponibilidade de caixa.

O problema de sequenciamento de projetos com restrições de recurso é um conhecido problema da classe NP-Difícil com sua versão mais clássica apresentada por Demeulemeester e Herroelen [1992]. Inúmeros trabalhos foram apresentados para abordar tanto os aspectos de modelagem quanto métodos de solução para o problema. Duas boas revisões podem ser vistas em Hartmann e Briskorn [2010] e, mais recentemente, [Habibi et al., 2018]. Por outro lado, problema de ajuste de fluxo de caixa, foi apresentado por Kocherlakota et al. [1988] e consiste em escolher investimentos durante os períodos de planejamento de modo que seja possível cumprir com as obrigações já projetadas e visando a minimização o custo da carteira de investimentos.

A junção dos dois problemas é bem menos frequente e, geralmente, ocorre de forma parcial na literatura. Apesar disto, Liu e Wang [2010] salientam que a integração de problemas de fluxo de caixa e sequenciamento de projetos é uma necessidade para várias empresas por precisarem lidar com mais de um projeto simultaneamente. A preocupação, segundo os autores, não deve se concentrar apenas na quantidade de fluxo de caixa e o momento em que o desembolso ocorre é um fator crítico para a gestão eficiente. É possível programar o momento para solicitar financiamentos de forma a amenizar os conflitos orçamentários.

Com primeira edição em 2001, o livro Kimms [2012] discute a modelagem, aspectos matemáticos e computacionais do problema de sequenciamento de projetos com restrições de recursos e considerações de fluxo de caixa e do problema de seleção de projetos mediante a restrições orçamentárias.

Em 2001, Ulusoy et al. [2001] apresentou modelos para sequenciamento de projetos com restrições de recursos que consideravam o valor presente líquido do fluxo de caixa descontado. Os autores apresentaram quatro diferentes maneiras de representar o retorno do projeto: pagamento único ao final do projeto, pagamentos vinculados a eventos, pagamentos vinculados a períodos e pagamentos progressivos. Como método de solução, os autores propuseram uma metaheurística baseada em Algoritmos Genéticos.

Liu e Wang [2008] propuseram um modelo de definição de modo de execução de projeto com recursos limitados considerando o fluxo de caixa. O modelo integra restrições de recursos e de fluxo de caixa no planejamento dos projetos para atender as necessidades de gerenciamento como limites de crédito e recursos buscando a maximização do valor presente líquido. As decisões estão focadas no fluxo de caixa acumulado, nos recursos a serem obtidos por pagamentos de atividades e na definição de um limite de crédito máximo. O problema apresentado, no entanto, não aborda o sequenciamento das atividades.

Os mesmos autores abordaram, em 2010, o problema sob a perspectiva do portfólio de projetos. Liu e Wang [2010] apresentam um modelo para decidir quais projetos devem ser executados a cada momento, considerando o impacto da execução de cada um no fluxo de caixa e objetivando otimização do lucro. Os autores propuseram um procedimento iterativo baseado em

Constraint Programming e utilizaram três projetos hipotéticos como instância e realização dos testes.

Em 2011, Jiang et al. [2011] apresentam uma abordagem multiobjetivo para maximizar o fluxo e de caixa e minimizar o custo de execução do projeto. O problema considera restrições de créditos, diferentes formas de financiamento e permite decidir sobre o horizonte de execução do projeto. Não há decisões referentes ao sequenciamento de projetos e alocação de outros recursos. Os autores testaram o modelo em dois pequenos projetos reais de construção e discutiram os resultados através de análises de sensibilidade.

Martins [2017] apresenta um modelo para o sequenciamento de projetos mediante à considerações de fluxo de caixa e financiamento. O autor considera a possibilidade de empréstimos sobrepostos, com vencimentos diversos e que cubram os custos financeiros de realização das atividades e existe um limite de endividamento máximo em cada período. No modelo, todas as atividades realizadas geram retorno, no entanto, as atividades não devem obrigatoriamente ser realizadas sendo opção do próprio modelo definir até que ponto do projeto será executado até o final do horizonte de planejamento. A decisão é, portanto, posta em três dimensões: i) decisão de realização das atividades, ii) decisões de financiamentos iii) decisões de sequenciamento, considerando restrições de recursos e precedência. O autor utilizou o pacote computacional CPLEX 12 para resolver uma instância fictícia e posteriormente, analisar os resultados.

Alavipour e Arditi [2018] apresenta um problema onde o foco é selecionar as melhores alternativas de investimento dentre as opções que são oferecidas pelas instituições financeiras. Dessa forma, eles apresentam um modelo que tem por objetivo minimizar os custos provenientes de financiamentos considerando todas as alternativas e um cronograma de atividades a serem executadas. O projeto é sequenciado através do Método do Caminho Crítico (CPM) e não apresenta restrições de recursos além dos financeiros.

Gholizadeh e Afshar Najafi [2018] formularam o problema de sequenciamento de projetos com restrições de recursos e considerações de fluxo de caixa de forma bi-objetivo. O modelo apresentado busca a minimização da duração do projeto juntamente com a maximização dos VPL. Os autores validaram o problema com o uso do GAMS em instâncias geradas aleatoriamente e, para resolver instâncias de maior porte, implementaram uma versão do NSGA-II. Neste trabalho as decisões de financiamento não foram consideradas.

Seyfi Sariqaya et al. [2019] por sua vez, abordam o sequenciamento de projetos com decisão de modos de execução e decisão do instante (evento) de pagamento parcial do projeto pelo contratante. O fluxo de caixa é considerado e ajustado de acordo com as possibilidades de pagamentos. O objetivo é a maximização do VPL. Os autores propuseram um procedimento heurístico hierárquico para resolver o problema. Uma instância com 12 atividades foi utilizada para exemplificar o uso do método.

Klimek [2019] trata do problema de sequenciamento de projetos com restrição de recursos onde o objetivo é maximizar o fluxo de caixa. Os autores apresentam cinco heurísticas para a solução do problema e testaram o desempenho destas em 960 instâncias geradas aleatoriamente com 30 ou 90 atividades.

O modelo apresentado se difere dos existentes na literatura ao incorporar ao problemas de sequenciamento de projetos com restrições de recursos as decisões de financiamento e de ajuste do fluxo de caixa. Dentre os modelos encontrados na literatura, dois trabalhos são mais parecidos com o apresentado neste artigo. O modelo de Martins [2017] é similar ao proposto, porém a não obrigatoriedade de execução de todas atividades de um projeto possui implicações práticas e computacionais significativas. Já o problema trabalhado em Alavipour e Arditi [2018] não considera

restrições de recursos.

3. Definição do Problema

Para compreender o problema, é necessário considerar que as decisões de financiamento e investimento são distintas para garantir assertividade na tomada de decisão. Em finanças, um conceito importante é o do Teorema da Separação no qual afirma-se que "(...) o sucesso ou insucesso do projeto deve ser determinado considerando unicamente seu próprio potencial de geração de renda econômica, independentemente do modo como será financiado(...)" [Samanez, 2009, p. 96]. Dessa forma, os conceitos de Viabilidade Econômica e Viabilidade Financeira devem ser compreendidos de forma separada pois tratam de análises distintas.

A viabilidade econômica é a análise do custo benefício de um empreendimento, garantindo que os projetos escolhidos sejam rentáveis considerando até mesmo os custos de oportunidade. Assim, identifica a capacidade de produção de receita desconsiderando as transações financeiras que podem ocorrer durante o projeto [Do Rosário, 2014]. Em contrapartida, o estudo da viabilidade financeira está relacionado à estimativa do custo total para execução do projeto. Como afirma Eick et al. [2010], se a decisão de investir ou não se basear nos recursos, ou seja, na disponibilidade dos mesmos e com objetivo de obter um equilíbrio entre entradas e saídas incorporando o fluxo de caixa, trata-se de viabilidade financeira.

O estudo de viabilidade econômica e financeira identifica os benefícios esperados em determinados investimentos a fim de tomar conhecimento da viabilidade de sua implementação. A partir desses pontos pode-se concluir que um projeto é viável econômica e financeiramente quando o fluxo de caixa é positivo além do investidor receber um retorno do capital superior ao despendido.

De acordo com Hirschfeld [2000], uma forma convencional de análise de viabilidade financeira é utilizar o método do valor presente líquido, ou seja, se o $VPL > 0$ entende-se que o projeto é viável financeiramente. Neste sentido, o modelo proposto na presente pesquisa se apresenta como uma alternativa para garantir a viabilidade de projetos com o objetivo de maximizar o VPL por meio da seleção de financiamentos que viabilizem o empreendimento.

O modelo foi construído considerando uma quantidade determinada de atividades a serem executadas em um período de tempo também definido, sendo as atividades respeitando a ordem de precedência para execução. Além disso, o modelo também incorpora possibilidade de financiamentos ao longo do horizonte de planejamento que permitem que todas as atividades/projetos sejam executados e garante ainda que ao fim do horizonte de planejamento, toda a dívida tenha sido quitada. Os componentes do modelo são apresentados na Tabela 1.

A formulação do PIAFCSP está descrita através das expressões 2 a 12, sendo a expressão 1 a função objetivo, que é representada pelo valor presente da diferença entre a sobra de recursos e o valor de quitação de todos os financiamentos.

$$\max VPL = \left[S_{t_{max}} - \sum_{f \in F} D_{ft_{max}} \right] FD_{t_{max}} \tag{1}$$

As expressões de 2 a 5 são relacionadas ao fluxo de caixa do problema, considera as sobras de períodos anteriores, custos fixos, valor financeiro tomado por empréstimo, retorno das atividades remuneradas, custo de execução de cada atividade e também os valores amortizados da dívida ao longo do período.

Tabela 1: Caracterização dos parâmetros e das variáveis do problema proposto

Símbolo	Descrição	Domínio
Conjuntos		
J	Conjunto de atividades.	$j \in J$
T	Conjunto de períodos.	$t \in T$
F	Conjunto de tipos de financiamento	
J_j^a	Conjunto dos antecessores das atividades j.	$j_a \in J$
J_b	Conjunto das atividades remuneradas.	$j_b \in J$
Parâmetros		
ES_j	Data mais cedo de início da atividade j	$ES_j \in T, \forall j \in J$
LF_j	Data mais tarde de fim da atividade j	$ES_j \in T, \forall j \in J$
d_j	Tempo necessário para realizar a atividade j	$ES_j \in T, \forall j \in J$
k_j^f	Montante necessário para executar a atividade j	$ES_j \in T, \forall j \in J$
V_j	Retorno da atividade j	
i_f	Taxa de juros do empréstimo f	$ES_j \in T, \forall j \in J$
a_{fim}	Índice da atividade terminal do problema	
t_{max}	Ultimo período	$ES_j \in T, \forall j \in J$
E_f^{max}	Limite de crédito para empréstimos	$ES_j \in T, \forall j \in J$
fix	custo fixo do projeto por período	≥ 0
n_{ft}	Prazo restante para cumprimento das obrigações.	
Variáveis		
S_t	Variável que indica a sobra de recursos não renováveis no tempo t.	≥ 0
x_{jt}	Variável binária que indica o término da atividade j no tempo t	$\in \{0, 1\}$
e_{ft}	Variável que indica a quantidade de empréstimos do tipo f no tempo t	≥ 0
A_{ft}	Variável que indica a quantidade financeira amortizada no tempo t do tipo f	≥ 0
D_{ft}	Variável que indica a dívida total de f no tempo t	≥ 0

$$S_1 + fix - \sum_{f \in F}(\delta_f z_{f1} + e_{f1}) - \sum_{j}^{J_b} V_j x_{j1} - I_0 + \sum_{j}^{J} k_j^f \sum_{q=1}^{d_j} x_{jq} = 0, \tag{2}$$

$$S_t + fix(1 - \sum_{\substack{q=0: \\ q \in R_j}}^{t} x_{j_{fim}q}) - \sum_{f \in F}(\delta_f z_{ft} + e_{ft}) + A_t -$$

$$\sum_{j}^{J_b} V_j x_{jt} - S_{t-1}(1 + i_a) + \sum_{j}^{J} k_j^f \sum_{q=t}^{t+d_j-1} x_{jq} = 0, \quad \forall t \in T : t > 1 \tag{3}$$

$$e_{ft} - z_{ft} * E_f^{max} \leq 0, \quad \forall t \in T, \forall f \in F \tag{4}$$

$$\sum_{j}^{J} k_{jr}^p \sum_{q=t}^{t+d_j-1} x_{jq} - k_{rt}^p \leq 0, \quad \forall r \in R, \forall t \in T \tag{5}$$

A restrição 6 estabelece um limite de crédito e garante que a dívida não ultrapasse esse valor limite. As restrições 7 e 8 dizem respeito ao fluxo da dívida, a primeira garante que a dívida no primeiro período seja a quantidade financeira emprestada no primeiro período e a segunda o fluxo nos demais períodos, considerando dividas em períodos anteriores, taxas de juros, quantidade financeira emprestada no período corrente e também a quantidade amortizada.

O limite de amortização é garantido pela expressão 9 que estabelece que o valor amortizado não deve ultrapassar a dívida no início período corrente. A restrição 10 que garante um pagamento mínimo da parcela do financiamento para que ocorra a amortização segundo uma série uniforme de pagamentos (Tabela Price).

$$D_{ft} - E_f^{max} \leq 0, \quad \forall t \in T, \forall f \in F \tag{6}$$

$$D_{f1} - e_{f1} = 0, \quad \forall f \in F \tag{7}$$

$$D_{ft} - D_{ft-1} * (1 + i_f) - A_{ft} + e_{ft} = 0 \quad \forall t \in T : t > 1, \forall f \in F \tag{8}$$

$$A_{ft} - (1 + i_f) D_{ft-1} \leq 0, \quad \forall t \in T : t > 1, \forall f \in F \tag{9}$$

$$A_{ft} - \frac{(1 + i_f) D_{ft-1} i_f (1 + i_f)^{n_{ft}}}{(i_f + 1)^{n_{ft}} - 1} \geq 0, \quad \forall t \in T : t > 1, \forall f \in F \tag{10}$$

Por fim, as restrições 11 e 12 garantem a execução de todas as tarefas previstas e ainda faz com que as precedências entre elas sejam respeitadas.

$$\sum_{t=ES_i+d_i-1}^{LF_i} t x_{it} - \sum_{t=ES_j+d_j-1}^{LF_j} (t - d_j + 1) x_{jt} \leq -1, \quad \forall i \in J_j^a, \forall j \in J \tag{11}$$

$$\sum_{t=ES_j+d_j-1}^{LF_j} x_{jt} = 1, \quad \forall j \in J \tag{12}$$

O modelo foi construído com base em modelos de referência dos trabalhos apresentados na revisão de literatura e tem como objetivo preencher a lacuna de integração do problema de escolha de financiamento, ajuste de fluxo de caixa, e sequenciamento de projetos com restrição de recursos.

4. Resultados

Nesta seção apresentaremos os resultados da execução do modelo proposto. Inicialmente faremos a análise do resultado de uma pequena instância e, em seguida, apresentaremos os resultados da execução do modelo em instância geradas aleatoriamente. O modelo foi implementado em Gubipy 9.0.2 utilizando a API para Python 3.9 e os testes foram realizados em um computador com processador Intel(R) Core(TM) i7-7500U com velocidade CPU de 2.90GHz, memória RAM de 8 GB com sistema operacional Windows 10 Home.

4.1. Exemplo de aplicação

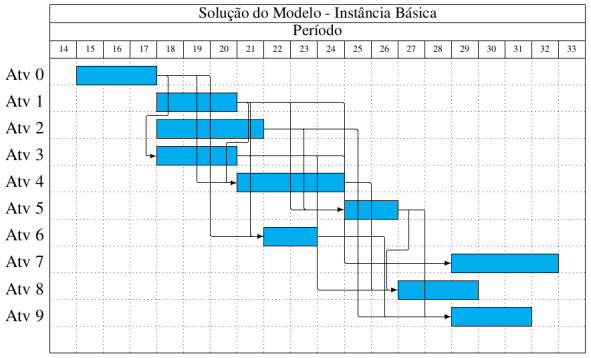
Com o objetivo de ilustrar os resultados, primeiramente foi gerada uma instância aleatória menor contendo apenas 10 atividades e dois financiamentos. Por meio da Tabela 2 é possível visualizar a composição da instância, bem como as precedências de cada uma das atividades.

Na Figura 1a, é possível ver o gráfico de Gantt obtido para a instância básica. Observa-se que a precedência foi respeitada na construção da solução e que as atividades iniciaram e terminaram dentro do horizonte de planejamento. O uso dos recursos renováveis foi também respeitado. Os resultados obtidos para o fluxo de caixa podem ser observados na Figura 1b. Por questões relativas ao espaço disponível, não apresentaremos um detalhamento deste fluxo.

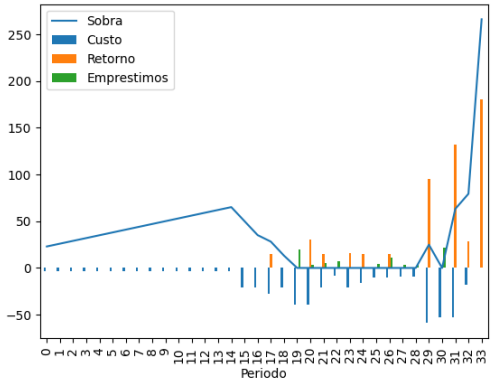
Em termos de tempo computacional, essa instância demandou apenas 15 segundos para encontrar uma solução ótima viável para o problema. A partir dos resultados encontrados, é possível validar o modelo ao passo em que o mesmo apresenta resultados satisfatórios para o PIAFCSP.

Tabela 2: Instância Básica

Atividades	Duração	Precedência
Atv 0	3	-
Atv 1	3	-
Atv 2	4	-
Atv 3	3	Atv 0
Atv 4	4	Atv 0 e Atv 1
Atv 5	2	Atv 1 e Atv 2
Atv 6	2	Atv 0, Atv 1 e Atv 3
Atv 7	4	Atv 1, Atv 2 e Atv 3
Atv 8	3	Atv 3, Atv 4 e Atv 5
Atv 9	3	Atv 2, Atv 5 e Atv 6



(a) Gráfico de Gantt - Instância Básica



(b) Fluxo de caixa

5. Testes de desempenho computacional

Para realização de testes mais complexos, foi construído um gerador de instâncias aleatórias em Python 3.9. Foram geradas 20 instâncias com tamanhos diferentes sendo: 10 instâncias com 80 atividades, 4 financiamentos e 2 recursos renováveis e outras 10 instâncias com 100 atividades, 4 financiamentos e 2 recursos renováveis. Os parâmetros passados para o gerador forneça as instâncias aleatórias são a quantidade de atividades, número máximo de precedentes por atividade, duração máxima das atividades, custo das atividades, quantidade de financiamentos e a taxa máxima que eles podem ter além de parâmetros como quantidade de recursos renováveis e valores de probabilidade e custo fixo. O gerador e o código estão disponíveis no link: (link a ser inserido após o processo de revisão).

Executando os testes, foram obtidos os alguns resultados que podem ser acompanhados na Tabela 3. A primeira coluna identifica a instância, a terceira apresenta o GAP da solução final obtida e a quarta o tempo computacional necessário para executar a instância. A segunda coluna demonstra o tamanho do horizonte de planejamento trabalhado. Ressalta-se que esse valor depende da duração média das atividades que, por sua vez, são parâmetros gerados aleatoriamente.

Conforme esperado, pela natureza do problema de sequenciamento de projetos com restrições de recursos, percebe-se que instâncias de maior porte podem demandar tempos computacionais significativamente maiores, mas todas as instâncias foram resolvidas com um gap de no máximo

Tabela 3: Resultado dos testes

Instância	Períodos	GAP	Tempo
I01	330	0.0030%	71s
I02	339	0.0093%	374s
I03	285	0.0014%	7s
I04	393	0.0020%	15s
I05	360	0.0002%	18s
I06	381	0.0031%	35775s
I07	369	0.0023%	149s
I08	351	0.0100%	10137s
I09	288	0.0011%	2802s
I10	345	0.0096%	1871s
I11	687	0.0041%	23363s
I12	579	0.0099%	11805s
I13	648	0.0095%	41951s
I14	654	0.0093%	5958s
I15	744	0.0092%	1503s
I16	753	0.0094%	7465s
I17	636	0.0049%	268s
I18	687	0.0096%	546s
I19	831	0.0091%	151s
I20	714	0.0085%	2815s

0.001% em menos de 42.000 segundos.

De uma forma geral não foi possível determinar exatamente as características que levam a um custo computacional maior. Os resultados sugerem que o horizonte de planejamento e o número de atividades são características importantes. No entanto, é necessário executar um conjunto significativamente maior de testes para compreender o efeito de outras características como, por exemplo, o efeito da disponibilidade de financiamentos.

6. Considerações Finais

O presente trabalho abordou, de forma integrada, o problema de financiamento e sequenciamento de projetos com restrições de recursos. Destaca-se a aplicabilidade do problema estudado na indústria de construção, setor importante para a economia nacional.

Recentemente, o problema vem sendo abordado de diferentes formas pela literatura, o que demonstra relevância do tópico. Neste sentido, a principal contribuição deste artigo é a construção de um modelo matemático de programação inteira mista que incorpora as decisões de financiamento e de ajuste do fluxo de caixa consideradas importantes no contexto da gestão de projetos.

O modelo apresentado se demonstrou adequado e pode ser aplicado em contextos complexos a fim de melhorar o processo de tomada de decisão dos gestores de grandes empreendimentos.

Conforme esperado, os resultados dos testes computacionais demonstraram que a dificuldade de solução do problema aumenta com o aumento do porte da instância e, em consequência, demanda mais processamento computacional. O número de atividades, o número de períodos no horizonte de planejamento e a quantidade de recursos renováveis são as principais características ligadas ao aumento da dificuldade.

Na sequência da pesquisa, iremos verificar o impacto da disponibilidade de recursos não renováveis e de financiamentos no objetivo e na dificuldade de solução. Ademais, a implementação de uma heurística apresenta-se como uma boa opção para encontrar soluções com menor custo computacional.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES pelo apoio no desenvolvimento de trabalho.

Referências

Alavipour, S. R. e Arditi, D. (2018). Optimizing financing cost in construction projects with fixed project duration. *Journal of Construction Engineering and Management*, 144(4):04018012.

Carevetti, D. (2020). Pib da construção cai 2,4% e setor volta ao patamar de 2008. URL `https://smartus.com.br/construcao-pib-economia-2020/`.

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.

Do Rosário, L. (2014). Análise da viabilidade económica e financeira de projetos de investimento em cabo verde. B.S. thesis, INSTITUTO SUPERIOR DE CIÊNCIAS ECONÓMICAS E EMPRESARIAIS.

Eick, G. et al. (2010). Viabilidade econômica e financeira de uma pequena central hidrelétrica no brasil.

Gholizadeh, E. e Afshar Najafi, B. (2018). Solving a bi-objective multi-mode project scheduling problem with regard to payment planning and constrained resources using nsga-ii algorithm. *Journal of Industrial Management Perspective*, 8(2, Summer 2018):165–187.

Habibi, F., Barzinpour, F., e Sadjadi, S. (2018). Resource-constrained project scheduling problem: review of past and recent developments. *Journal of project management*, 3(2):55–88.

Hartmann, S. e Briskorn, D. (2010). A survey of variants and extensions of the resource-constrained project scheduling problem. *European Journal of operational research*, 207(1):1–14.

Hirschfeld, H. (2000). *Engenharia econômica e análise de custos: aplicações práticas para economistas, engenheiros, analistas de investimentos e administradores*. Atlas.

Jiang, A., Issa, R. R., e Malek, M. (2011). Construction project cash flow planning using the pareto optimality efficiency network model. *Journal of civil engineering and management*, 17(4):510–519.

Kimms, A. (2012). *Mathematical programming and financial objectives for scheduling projects*, volume 38. Springer Science & Business Media.

Klimek, M. (2019). Techniques of generating schedules for the problem of financial optimization of multi-stage project. *Applied Computer Science*, 15(1).

Kocherlakota, R., Rosenbloom, E., e Shiu, E. S. (1988). Tsa88v40pt1.

Koo, C., Hong, T., e Kim, S. (2015). An integrated multi-objective optimization model for solving the construction time-cost trade-off problem. *Journal of Civil Engineering and Management*, 21 (3):323–333.

Liu, S.-S. e Wang, C.-J. (2008). Resource-constrained construction project scheduling model for profit maximization considering cash flow. *Automation in Construction*, 17(8):966–974.

Liu, S.-S. e Wang, C.-J. (2010). Profit optimization for multiproject scheduling problems considering cash flow. *Journal of Construction Engineering and Management*, 136(12):1268–1278.

Martins, P. (2017). Integrating financial planning, loaning strategies and project scheduling on a discrete-time model. *Journal of Manufacturing Systems*, 44:217–229.

Ng, S. T. e Zhang, Y. (2008). Optimizing construction time and cost using ant colony optimization approach. *Journal of construction engineering and management*, 134(9):721–728.

Nunes, J. M., Longo, O. C., Alcoforado, L. F., e Pinto, G. O. (2020). O setor da construção civil no brasil e a atual crise econômica. *Research, Society and Development*, 9(9):e393997274–e393997274.

Samanez, C. P. (2009). *Engenharia econômica*. Pearson.

Seyfi Sariqaya, M., Chaharsooghi, S. K., Husseinzadeh Kashan, A., e Rahimnezhad, F. (2019). Multi-mode capital-constrained project payment scheduling problem with discounted cash flows. *International Journal of Industrial Engineering and Management Science*, 6(2):17–36.

Ulusoy, G., Sivrikaya-Şerifoğlu, F., e Şahin, Ş. (2001). Four payment models for the multi-mode resource constrained project scheduling problem with discounted cash flows. *Annals of Operations research*, 102(1-4):237–261.