



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

JERUSA CRISTINA GUIMARÃES DE MEDEIROS

**MODELO DE DECISÃO PARA SELEÇÃO DE SUBCONTRATADOS E
SEQUENCIAMENTO DE ATIVIDADES EM PROJETOS USANDO FITRADEOFF E
ALGORITMOS GENÉTICOS**

Recife
2020

JERUSA CRISTINA GUIMARÃES DE MEDEIROS

**MODELO DE DECISÃO PARA SELEÇÃO DE SUBCONTRATADOS E
SEQUENCIAMENTO DE ATIVIDADES EM PROJETOS USANDO FITRADEOFF E
ALGORITMOS GENÉTICOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Área de Concentração: Pesquisa Operacional.

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª Luciana Hazin de Alencar.

Coorientador: Prof. Dr. Raphael Harry Frederico Ribeiro Kramer.

Recife

2020

Catálogo na fonte
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

M488m Medeiros, Jerusa Cristina Guimarães de.
Modelo de decisão para seleção de subcontratados e sequenciamento de atividades em projetos usando *FITradeoff* e algoritmos genéticos / Jerusa Cristina Guimarães de Medeiros - 2020.
109 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientadora: Prof^a. Dr^a Luciana Hazin de Alencar.
Coorientador: Prof. Dr. Raphael Harry Frederico Ribeiro Kramer.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, 2020.
Inclui Referências e Apêndice.

1. Engenharia de Produção. 2. Gerenciamento de projetos. 3. Seleção de subcontratados. 4. Apoio multicritério à decisão. 5. Método *FITradeoff*. 6. Algoritmos genéticos. I. Alencar, Luciana Hazin de (Orientadora). II. Kramer, Raphael Harry Frederico Ribeiro (Coorientador). III. Título.

UFPE

658.5 CDD (22. ed.)

BCTG/2020-275

JERUSA CRISTINA GUIMARÃES DE MEDEIROS

**MODELO DE DECISÃO PARA SELEÇÃO DE SUBCONTRATADOS E
SEQUENCIAMENTO DE ATIVIDADES EM PROJETOS USANDO FITRADEOFF E
ALGORITMOS GENÉTICOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Aprovada em: 21/08/2020.

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dr^a. Luciana Hazin Alencar (Orientadora)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^a. Dr^a. Maísa Mendonça da Silva (Examinadora Interna)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Luciano Carlos Azevedo da Costa (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

A minha avó **Julieta Nunes** que, para mim, é a personificação do amor!

AGRADECIMENTOS

Bom mesmo é agradecer, primeiramente, à Deus por providenciar força para encarar os desafios, sabedoria para entender que todo propósito debaixo do céu tem o seu tempo, luz divina para concluir este trabalho e por me permitir viver essa experiência.

À minha avó Julieta Nunes por todo amor, por me ensinar a ser forte e determinada, a correr atrás dos meus sonhos e por todos os valores.

À minha mãe Rose Mary Nunes por todo amor, por ensinar que a maior herança é a educação, por suas palavras de incentivo e por ser meu exemplo de mulher empoderada. Ao meu irmão Moisés Guimarães, que sempre me apoia e me inspira como pessoa e profissional.

À professora Luciana Hazin, minha orientadora, que me acompanhou nessa aventura. Agradeço a dedicação, a confiança, os ensinamentos e o incentivo para continuar almejando novos desafios. Ao meu co-orientador professor Raphael Kramer pelo conhecimento, motivação e pelas significativas contribuições à esta pesquisa. E aos demais professores do PPGEP que contribuíram de alguma forma, para estar concluindo essa fase.

À minha família, que sempre me apoia nas minhas decisões. Em especial às minhas tias e aos meus primos e primas mais próximos.

Aos meus amigos do PPGEP, pessoas maravilhosas que tive o prazer de compartilhar essa caminhada de aprendizado, de noites viradas estudando e de jogar conversa fora bebendo uma cerveja bem gelada. Em especial à Jhove, parceiro de estudo, de jogar buraco e xadrez, de beber cerveja e de fazer feira, à Lays, parceira forte de estudo, à Gabriela, Daniela, Ana Luiza, Heloísa e Juliana do laboratório NSID, e à Hélder, Daniel, Adolfo e Júnior do laboratório PMD.

À minha amiga Maria Eduarda e seus pais, a quem chamo com muito carinho de tia Lúcia e tio Fernando, por me receberem tão bem em Recife e serem altamente queridos!!

À CAPES pelo apoio financeiro que proporcionou à elaboração desta pesquisa.

Por fim, à todos os meus amigos da vida, em especial àqueles que “furei o rolê” porque tinha que estudar!

RESUMO

A construção civil é um setor estratégico e impulsionador do desenvolvimento socioeconômico do país, com fortes encadeamentos produtivos. Caracterizado como dinâmico e complexo, o setor apresenta dificuldades para alcançar indicadores de *performances*, sendo destacados como principais ineficiências: a superação dos custos, o escorregamento do cronograma e, por vezes, a qualidade abaixo do esperado pelo cliente final. Quanto maior, mais fracionado é o projeto, com vários atores envolvidos, conseqüentemente, maior a complexidade de gerenciar e desenvolver cronogramas, que atendam objetivos múltiplos. O fracionamento do projeto dar-se com o propósito de alcançar melhor desempenho em termos de custo, de duração e de qualidade, ocorrendo assim a subcontratação dos pacotes de trabalho. Neste sentido, evidencia-se duas problemáticas, a primeira consiste na complexidade de formulação de cronogramas que atendam restrições de recursos financeiros e de duração. A segunda compreende a seleção de subcontratados, destacando a importância da seleção do subcontratado certo para atividade. Ambas as problemáticas convergem para o objetivo mútuo de elaboração do cronograma considerando critérios que influenciam o sucesso. Nesse contexto, dar-se as motivações para a formulação de uma metodologia para seleção e sequenciamento de subcontratados em projetos. A metodologia é composta por três fases: a primeira consiste na definição do problema, a segunda no ordenamento dos subcontratados através do método *FITtradeoff*, tendo em vista a relação de *tradeoff* entre os critérios custo, duração e qualidade, cooperação e *know-how*, e a terceira, e última, consiste na utilização da metaheurística Algoritmo Genético para selecionar o subcontratado e obter, conseqüentemente, o cronograma do projeto dentro das restrições. O resultado desta pesquisa é a construção de uma metodologia para seleção e sequenciamento de subcontratados, considerando a subjetividade do decisor e a construção de cronogramas otimizados.

Palavras-chave: Gerenciamento de projetos. Seleção de subcontratados. Apoio multicritério à decisão. Método *FITtradeoff*. Algoritmos genéticos.

ABSTRACT

Civil construction is a strategic sector that drives the country's socio-economic development with strong productive links. Characterized as dynamic and complex, the sector presents difficulties to achieve performance indicators, being highlighted as main inefficiencies the overcoming of costs, the slippage of the schedule and, sometimes, the quality below that expected by the final customer. The more fractionated the project is with several actors involved, the more complex it is to manage and develop schedules that meet multiple objectives. The fractionation of the project takes place with the purpose of achieving better performance in terms of cost, duration and quality, thus taking place the subcontracting of work packages, is when criteria such as cooperation and know-how they directly influence the success of the project. In this sense, two problems are posted, the first is the complexity of formulating schedules that meet constraints of financial resources and duration. The second comprises the subcontractors selection highlighting the importance of selecting the right subcontractor for activity. Both problems converge to the mutual goal of drafting the schedule considering criteria that influence success. In this context, motivations are given for the formulation of a methodology for selecting and sequencing subcontractors in projects. The methodology consists of three phases : the first consists of the definition of the problem, the second in the ordering of subcontractors through the FITradeoff method, considering the relationship of the tradeoff between the criteria cost, duration and quality, cooperation and know-how. The third is the use of the metaheuristic Genetic Algorithm to select the subcontractor and obtain, consequently, the project schedule within the constraints. The result of this research is the construction of a methodology for selecting and sequencing subcontractors, considering the subjectivity of the decision maker and the construction of optimized schedules.

Keywords: Project management. Subcontractor select. Multiple criteria decision making. Method FITradeoff. Genetic algorithms.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma da dinâmica do <i>FITradeoff</i> - seleção	34
Figura 2 - Fluxograma da dinâmica do DSS do <i>FITradeoff</i> - ordenamento.....	35
Figura 3 - Estrutura básica de um Algoritmo Genético.....	36
Figura 4 - Pseudocódigo do GA	37
Figura 5 - Representação do Indivíduo A.....	37
Figura 6 - Representação dos tipos de crossover.....	41
Figura 7 - Representação de uma mutação binária simples	42
Figura 8 - Metodologia para seleção e sequenciamento de subcontratados em projetos	55
Figura 9 - Rede do Projeto A.....	58
Figura 10 - Exemplos de aspectos para avaliação os critérios <i>Know how</i> e Cooperação.....	60
Figura 11 - Exemplo de escala de avaliação para o critério <i>Know how</i>	60
Figura 12 - Step 1: <i>Ranking</i> dos critérios	63
Figura 13 - Step 2: Questionamento quanto a preferência do decisor.....	64
Figura 14 - Metodologia para seleção e sequenciamento de subcontratados em projetos	65
Figura 15 - Pseudocódigo da Aplicação do Método <i>FITradeoff</i>	66
Figura 16 - Arquivo .lp da problemática de subcontratados	72
Figura 17 - Representação do cromossomo para o indivíduo do problema	73
Figura 18 - Cálculo do tempo de projeto: cronograma de projeto	74
Figura 19 - Cálculo do custo do projeto	75
Figura 20 - Melhor solução com o GA – Roleta 2	81
Figura 21 - Cronograma do projeto detalhado (GA – Roleta 2).....	82
Figura 22 - Desempenho dos indivíduos: Execução A e Execução B (GA – Roleta 2).....	83
Figura 23 - Solução ótima do modelo matemático.....	83
Figura 24 - Desempenho das roletas: parâmetro número de gerações (n).....	85
Figura 25 - Desempenho da melhor solução nos cinco critérios.....	85
Figura 26 - Instância 8 ¹⁶ : Representação gráfica do desempenhos das roletas	87
Figura 27 - SubSelect.GA <i>index</i>	88
Figura 28 - SubSelect.GA resultado	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Critérios para seleção de subcontratados.....	26
Tabela 2 - Abordagens operacionais para agregação de performance	31
Tabela 3 - Terminologia dos GA com a biologia	38
Tabela 4 - Atividades do projetos.....	56
Tabela 5 - Critérios escolhidos para a problemática de ordenamento dos subcontratados	59
Tabela 6 - Espaço de consequência genérico para dada atividade i	61
Tabela 7 - <i>Ranking</i> das constantes de escala dos critérios (<i>Step 1 – Método FITradeoff</i>)	80
Tabela 8 - Resultados do ranking dos subcontratados (<i>Step 2 – Método FITradeoff</i>)	80
Tabela 9 - Formação do Conjunto Fase 3.....	81
Tabela 10 - Desempenho do GA: Roleta 1 <i>versus</i> Roleta 2	84
Tabela 11 - Instância 8 ¹⁶ : Desempenho das roletas do GA proposto	86
Tabela 12 - Instância 8 ³² : Desempenho das roletas do GA proposto	87

LISTA DE ABREVIATURAS

AHP	Analytic Hierarchy Process
AI	Artificial Intelligence
AWA	Adaptive Weight Approach
CBIC	Câmara Brasileira da Indústria da Construção
CPM	Critical Path Method
DSS	Decision Support System
DTCTP	Discrete time-cost trade-off problem
EAP	Estrutura Analítica do Projeto
ELECTRE	Elimination et Choix Traduisant la Realite
ER	Evidential Reasoning
FD	Fuzzy Decision
FITradeoff	Método Tradeoff Flexível e Interativo
FPSI	PSI fuzzy
GA	Genetic Algorithm
ICC	Indústria da Construção Civil
LPP	Linear Programming Problem
MAUT	Multi-Attribute Utility Theory
MAVT	Multi-Attribute Value Score
MAWA	Modified Adaptive Weight Approach
MCDM	Multiple Criteria Decision Making
NP-hard	Non-Deterministic Polynomial time – hard
NSGA-II	Non-dominated Sorting Genetic Algorithm
PAC	Programa de Aceleração do Crescimento
PAMC	Procedimento de Agregação Multicritério
PERT	Program Evaluation and Review Technique
PIB	Produto Interno Bruto
PMI	Project Management Institute
PROMETHEE	Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations
PSI	Preference Selection Index
PSO	Particle Swarm Optimization
s.r.p	Sistemas Relacionais de Preferência

SMARTS	Simple Multi-Attribute Rating Technique
SMATER SMART	Exploiting Raking
TCO	Time -Cost Optimization
TCRO	Time-Cost-Resource Optimization
TCTP	Time-cost trade-off problems

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	JUSTIFICATIVAS E RELEVÂNCIA.....	15
1.2	OBJETIVOS.....	16
1.2.1	Objetivo geral	16
1.2.2	Objetivos específicos.....	16
2	BASE CONCEITUAL	18
2.1	DESEMPENHO EM GERENCIAMENTO DE PROJETOS.....	18
2.1.1	Desenvolvimento de cronograma em projetos.....	20
2.1.2	Orçamento de projetos.....	21
2.1.3	Relacionamento em projetos	22
2.2	SUBCONTRATAÇÃO NA CONSTRUÇÃO CIVIL	23
2.3	APOIO MULTICRITÉRIO À DECISÃO	28
2.3.1	Tipos de problemática.....	32
2.3.2	Método Tradeoff Flexível e Interativo – FITtradeoff.....	33
2.4	ALGORITMO GENÉTICO	35
2.4.1	Operadores genéticos	39
2.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	42
3	MODELO DE SELEÇÃO DE SUBCONTRATADOS E SEQUENCIAMENTO DE ATIVIDADES EM PROJETOS.....	44
3.1	ESTUDOS DE SELEÇÃO DE SUBCONTRATADOS E/OU FORNECEDORES EM PROJETOS.....	44
3.2	ESTUDOS DE FORMULAÇÃO DE CRONOGRAMA DE PROJETOS.....	48
3.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	53
4	METODOLOGIA PROPOSTA PARA SELEÇÃO E SEQUENCIAMENTO DE SUBCONTRATADOS EM PROJETOS.....	54
4.1	FASE 1 – ESTRUTURAÇÃO DO PROBLEMA.....	56
4.2	FASE 2 – RANKING DOS SUBCONTRATADOS USANDO O MÉTODO FITTRADEOFF	62
4.3	FASE 3 – SELEÇÃO E SEQUENCIAMENTO USANDO GA	67
5	APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA.....	79
6	CONCLUSÕES E LIMITAÇÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	90

6.1	CONCLUSÕES.....	90
6.2	LIMITAÇÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	94
	REFERÊNCIAS	96
	APÊNDICE A – ACESSO AOS DADOS	109

1 INTRODUÇÃO

A Construção Civil tem grande importância estratégica no desenvolvimento econômico-social de um país. O aquecimento do setor da construção civil estimula um crescimento substancial da economia direta e indiretamente através de seus efeitos multiplicadores (KURESKI, 2011; XU, WANG, TAO 2019). Para Liu *et al.* (2004) não pode haver atividade econômica sem a construção, o que enfatiza a relevância desse setor.

No Brasil, a Indústria da Construção Civil - ICC é identificada como setor-chave na economia brasileira por Teixeira e Carvalho (2005) e Kureski *et al.* (2008). Em razão do valor adicionado gerado, da absorção da mão de obra e da natureza dos seus encadeamentos na economia, que afetam outros setores da economia, principalmente, aqueles dos quais se obtém insumos (KURESKI, 2011; TEIXEIRA; CARVALHO, 2005; RABECHINI JR.; CARVALHO, 2006).

Em 2010, a ICC cresceu 13,1% do valor adicionado, é o melhor resultado do setor em uma série histórica de 20 anos (CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO – CBIC, 2018), resultado do Programa de Aceleração do Crescimento – PAC que investiu no setor R\$ 603 bi entre 2015 – 2018 (MINISTÉRIO DO PLANEJAMENTO, 2018). Entretanto, de acordo com a CBIC, o valor adicionado do setor retraiu nos últimos anos (2014 – 2017), em paralelo, o PIB nacional também tem apresentado resultados longe do satisfatório. Para a CBIC, o setor da construção no Brasil foi impactado por crises políticas e econômicas, o que comprometeu a capacidade de execução de obras, causando a retração máxima de 9% em 2015 no PIB da construção.

Segundo Frej e Alencar (2010), a Construção Civil no Brasil é conhecida pelo atraso nos procedimentos gerenciais e técnicas construtivas, pela mão de obra pouco especializada, por baixos índices de produtividade, por atrasos nos prazos de entrega, pela não conformidade e baixa qualidade do produto final, entre outros limitantes. Ao comparar o indicador de tempo médio de projeto entre o Brasil, os Estados Unidos e a União Europeia, Mello e Amorim (2009) concluíram que o prazo médio para obras de edificação no Brasil é três vezes maior do que nas construções americanas e duas vezes o despendido nas construções europeias. Para além disso, a ICC no Brasil apresenta níveis de competitividade e produtividade abaixo do padrão existente nos países desenvolvidos e pouca atualização nos aspectos tecnológicos e de gestão, quando comparados aos padrões dos países desenvolvidos.

O setor demonstra dificuldades para atingir uma boa produtividade por razões que envolvem, o período de construção relativamente longo, a complexa rede de interferências dos

stakeholders, o parcelamento da responsabilidade entre várias empresas, em que o processo de subcontratação é comum (FREJ; ALENCAR, 2010).

Hahn (2008) destaca que é amplamente aceito que o cronograma do projeto de construção desempenha um papel fundamental no gerenciamento de projetos devido à sua influência no sucesso do projeto. Para Hussin, Rahman e Memon (2013) uma das principais manifestações de ineficiência na indústria da construção é a superação de custos resultante de atrasos no cumprimento dos cronogramas de entrega e desperdício de material.

Doloi (2013) destaca oito fatores relacionados com a superação dos custos no contexto do gerenciamento de projetos, estes são: a) planejamento e monitoramento precisos do projeto; b) eficiência do projeto; c) gerenciamento eficaz do local; d) comunicação; e) eficiência dos contratados; f) características do projeto; g) *due diligence*; e h) concorrência no mercado.

Segundo Alencar, de Almeida e Mota (2007), os fornecedores, sejam eles contratantes, subcontratados ou projetistas, exercem papéis cruciais na gestão de projetos, estando envolvidos em uma rede de atividades conectadas que, se não forem desenvolvidas de forma adequada, podem comprometer o sucesso do projeto.

Tendo em vista à relação cronograma – custo – subcontratados como elemento de sucesso do projeto, o presente trabalho se propõe a discutir as abordagens de cronograma de projetos, de modo a desenvolver um modelo de sequenciamento de subcontratados, à promover melhorias quanto aos objetivos de conclusão do cronograma no prazo e cumprimento do orçamento financeiro do projeto.

1.1 JUSTIFICATIVAS E RELEVÂNCIA

Métodos como o *Critical Path Method* – CPM e o *Program Evaluation and Review Technique* – PERT são frequentemente utilizados na elaboração do cronograma de projeto (GRAY; LARSON, 2009). Entretanto, apresentam limitações quanto à alocação de recursos e o consumo de recursos em atividades não críticas, onde qualquer alteração durante a execução pode ser difícil de planejar e controlar (NICHOLAS; STEYN 2012; THORNLEY, 2013).

À vista disso, outras abordagens para o agendamento de projetos com recursos limitados foram desenvolvidos seja pela busca por soluções ótimas usando programação inteira, técnicas *branch and bound*, programação dinâmica, ou pelo uso de algoritmos heurísticos e metaheurísticos como método de busca tabu e algoritmos evolutivos (JAŚKOWSKI; SOBOTKA, 2006).

Contudo, as aplicações não se limitam ao agendamento de projetos com recursos limitados. Elazouni e Gab-Allah (2004), apresentam um método de programação para produzir cronogramas financeiramente viáveis que equilibram os requisitos de financiamento das atividades em qualquer período. Ip, Yung e Wang (2004) desenvolveram um algoritmo de *branch and bound* para a seleção de subcontratados e aplicaram essa abordagem a um exemplo experimental extraído de um projeto de construção real da usina elétrica a carvão.

Biruk, Jaśkowski, Czarnigowska (2017), apresentaram um modelo de programação linear binário misto para decisões de subcontratação, integrando a seleção de subcontratados com a programação para permitir que o contratante geral selecione a combinação ideal de subcontratados e equipes próprias para todos os pacotes de trabalho do projeto. Entretanto, o modelo foi validado em uma rede pequena de projetos, com 13 pacotes de atividade, onde, para cada pacote de atividade, existiam 3 possíveis candidatos, sendo este um problema de otimização combinatória pequeno quando comparado à aplicação em um cenário real.

Neste sentido, a relevância deste trabalho é fundada na necessidade de cobertura da lacuna entre modelos de seleção e sequenciamento para subcontratados em projetos e validação em problemas de tamanho real.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral e os objetivos específicos desta pesquisa são apresentados, respectivamente, nos itens 1.2.1 e 1.2.2.

1.2.1 Objetivo geral

Desenvolver um modelo para seleção de subcontratados e sequenciamento de atividades em projetos com restrição de recurso na construção civil.

1.2.2 Objetivos específicos

- a) verificar na literatura metodologias utilizadas para o problema de seleção de subcontratados;
- b) verificar na literatura heurísticas e meta-heurísticas utilizadas no problema de sequenciamento de cronograma de projetos com/sem restrição de recurso;
- c) estruturar o problema de seleção de subcontratados e sequenciamento de cronograma com restrição de orçamento de projeto;

- d) modelar o problema;
- e) definir as abordagens a serem utilizadas para a resolução do problema;
- f) propor soluções para a problemática de seleção e sequenciamento de subcontratados.

2 BASE CONCEITUAL

Neste capítulo são abordados conceitos acerca do Desempenho em gerenciamento de projetos, explorando a importância do desenvolvimento cronograma, do orçamento do projeto e do relacionamento em projetos como elementos de sucesso do projeto, e da Subcontratação na construção civil, observando os principais elementos do processo de seleção de subcontratado em projetos. Outros tópicos são dedicados às abordagens de Apoio multicritério à decisão e Algoritmo Genético, uma vez que estes métodos serão utilizados para resolver a problemática de seleção e sequenciamento de subcontratados em projetos.

2.1 DESEMPENHO EM GERENCIAMENTO DE PROJETOS

A construção civil é mais desafiadora do que outras atividades em termos de sua natureza dinâmica, fragmentada e complexa, ao passo que exige o envolvimento de diferentes partes interessadas e o gerenciamento bem-sucedido dos processos (DEMIRKESEN E OZORHON, 2017). Por consequência, os níveis de desempenho do projeto na construção são baixos quando comparados com outras indústrias (SCHWEGLER *et al.* 2001; RAHMAN; KUMARASWAMY, 2004; OSPINA-ALVARADO; CASTRO-LACOUTURE, 2010; HARPER, 2014).

No setor de construção, o sucesso ainda é amplamente medido pelo alcance dos objetivos e expectativas do projeto de *stakeholders* e participantes em termos das normas tradicionais do “triângulo de ferro” de tempo, custo e qualidade (ARSLAN; KIVRAK, 2008).

Para Wit (1988), o gerenciamento de projetos tem três objetivos principais que são a execução do projeto no prazo, dentro do orçamento e com as especificações de qualidade. O escorregamento do cronograma e os desvios de orçamento podem criar consequências indesejáveis (DEMIRKESEN; OZORHON, 2017), que levam muitos clientes ao sentimento de insatisfação quanto ao resultado final do projeto (EGAN, 1998; NZEKWE-EXCEL, 2012). Neste sentido, o gerenciamento eficaz do escopo tem um impacto direto no resultado do projeto (FAGEHA; AIBINU, 2013).

Para Cheung, Suen e Cheung (2004), o sucesso do projeto de construção é influenciado por um conjunto de fatores, que são tamanho do projeto, meio ambiente, contrato e suas especificações, relacionamento e cooperação entre as partes interessadas, qualificação de engenheiros e trabalho em equipe.

De acordo com o *Project Management Institute* – PMI (p. 112, 2013), “o sucesso do projeto é diretamente influenciado pelo envolvimento ativo das partes interessadas na descoberta e decomposição das necessidades em requisitos, e pelo cuidado tomado na determinação, documentação e gerenciamento dos requisitos do produto, serviço ou resultado do projeto”. Neste sentido, o desempenho do projeto é um conceito amplo à medida que envolve os objetivos de todas as partes interessadas ao longo do ciclo de vida do projeto (BJORVATN; WALD, 2018). Visto isto, cabe introduzir à discussão o conceito de complexidade em projetos.

A complexidade do projeto é definida como características complicadas de um projeto como resultado da composição de muitas partes interconectadas dentro de um projeto (XIA; CHAN, 2012).

De acordo com Vidal e Marle (2008), a complexidade é uma propriedade do projeto que dificulta compreender, prever e manter sob controle seu comportamento geral. É resultado de uma função de vários fatores interconectados dentro de um projeto (MIHM; LOCH; HUCHZERMEIER, 2003), como a alta interdependência e alto grau de interação entre as partes, e a alta variedade de tarefas (JARKAS, 2017).

Ao investigar como a complexidade influencia os projetos e seu desempenho, Floricel, Michela e Piperca (2016) destacaram uma associação estatística negativa, com um coeficiente marginalmente significativo, entre complexidade técnica e desempenho de cronograma e orçamento em projetos. Segundo Qazi *et al.* (2016), os atributos de complexidade do projeto interferem significativamente no sucesso do projeto, tendo efeito significativo em dois aspectos de sucesso do projeto: custo e cronograma.

Mattila e Abraham (1998) destacam que o planejamento adequado do projeto através do agendamento eficiente de projetos e da alocação apropriada de recursos pode aumentar significativamente a possibilidade de que um projeto de construção seja concluído no prazo, dentro do orçamento, consistente com as especificações e com menos problemas.

Considerando os aspectos apresentados e a importância do cronograma, do orçamento e do relacionamento entre as partes no desempenho do projeto, três eixos serão aprofundados, a saber: desenvolvimento de cronograma em projetos, orçamento em projetos e relacionamento em projetos, com o propósito de caracterizar a relação destes elementos envolvidos no contexto da problemática deste estudo.

2.1.1 Desenvolvimento de cronograma em projetos

O desenvolvimento do cronograma de projetos usa informações específicas do projeto como, por exemplo, a Estrutura Analítica do Projeto – EAP, as atividades, os recursos, as dependências e restrições entre atividades, as durações, os marcos e outras, em conjunto com métodos e ferramentas para gerar o cronograma do projeto (PMI, 2013).

O *Critical Path Method* (CPM) ou Método do Caminho Crítico, foi o primeiro método projetado para o agendamento de projetos, que considera um número ilimitado de recursos e encontra as folgas das atividades, as atividades críticas e o caminho crítico do projeto (SU; SANTORO; MENDES, 2018). Entretanto, o método apresenta limitações quanto às incertezas inerentes às atividades e suas durações, sendo visto, assim, como inadequado para projetos multitarefa com centenas de dependências (WINCH; KELSEY, 2005; HEGAZY; MENESI, 2010). Além disso, o método não está preocupado com a alocação de recursos e com o consumo de recursos em atividades não críticas, como resultado, qualquer alteração durante a execução pode ser difícil de planejar e controlar (NICHOLAS; STEYN, 2012; THORNLEY, 2013).

No método de *Program Evaluation and Review Technique* (PERT), a duração de cada atividade é uma variável aleatória, determinada com base em estimativas de três pontos usando distribuições de probabilidade (MONGALO; LEE, 1990; PREMACHANDRA, 2001; HU, 2011). O sucesso da aplicação do PERT depende do processo de estimar os tempos de atividade e não das próprias estimativas (LITTLEFIELD; RANDOLPH, 1991), em virtude das incertezas quanto à base das estimativas, uma vez que estas dependem de fatores tais como, de quem as produziu, de que forma, por que, como e quando foram produzidas, de que recursos e experiência tais estimativas baseiam-se, e quanto à extensão de qualquer tendência nas estimativas (WARD; CHAPMAN, 2003).

Neste sentido, os aspectos matemáticos da teoria CPM foram combinados com os conceitos probabilísticos do PERT para fornecer uma estimativa mais clara sobre a incerteza, já que ambos os métodos adotam uma teoria de planejamento semelhante (WEI; LIU; TSAI, 2002; KUKLAN *et al.* 1993; FULKERSON, 1962).

Todavia, o principal problema é que o foco dessas ferramentas está na otimização local no nível de atividade e não na otimização global no nível do projeto (ASHURI; TAVAKOLAN, 2012). Em um ambiente de agendamento com recursos limitados, os métodos CPM e PERT não conseguem sincronizar o planejamento de atividades e de recursos perfeitamente (KANNIMUTHU *et al.*, 2018).

O principal motivo é devido à alta complexidade, que é afetada por muitos fatores, como o vasto espaço de solução, a escassez de recursos, objetivos conflitantes, as relações de dependência e de prioridade, e o alto nível de incerteza (ZHENG *et al.*, 2013; BODAGHI *et al.*, 2018).

O contexto real do projeto envolve a otimização de vários objetivos conflitantes, minimizar simultaneamente o custo total do projeto e a duração total do projeto é uma das tarefas mais desafiadoras de um planejador de projeto de construção (ASHURI; TAVAKOLAN, 2012; KANNIMUTHU *et al.*, 2018). Para Leu, Chen e Yang (1999), três tarefas inter-relacionadas devem ser executadas como parte do planejamento de projetos de construção: (1) análise de *tradeoff* tempo-custo, (2) alocação de recursos limitados e (3) nivelamento de recursos. Problemas de *Time-Cost-Resource Optimization* (TCRO) no planejamento de projetos de construção são tipos especiais de problemas gerais de otimização reconhecidos como NP-hard (tempo polinomial não determinístico - difícil) na teoria da complexidade computacional (MERKLE; MIDDENDORF; SCHMECK, 2002; COELLO COELLO; PULIDO; LECHUGA, 2004; KONAK; COIT; SMITH, 2006).

Em resposta, são desenvolvidas frequentemente técnicas analíticas ou heurísticas para alocação/ nivelamento de recursos em planos de rede CPM (LU; LI, 2003; GUERRIERO; TALARICO, 2010), a fim de apoiar os tomadores de decisão em sua busca por *tradeoffs* ideais entre tempo e custo (SENOUCI; AL-DERHAM, 2008).

Neste sentido, a eficiência do cronograma tem ganhado cada vez mais importância como um fator competitivo para as empresas de construção (SAPKAUSKIENE; LEIONIENE, 2012). De acordo com Kaliba, Muya e Mumba (2009), os principais efeitos dos atrasos no cronograma de projetos identificados foram a má qualidade do produto final, a extensão do projeto, o litígio e o excesso de custos.

2.1.2 Orçamento de projetos

É certo que as empresas precisam maximizar seus lucros ao passo que minimizam seus custos de produção e/ou operação para sobreviver à dinâmica dos mercados. Segundo Shane *et al.* (2009), as organizações enfrentam um grande desafio no controle de orçamentos ao longo do período entre o início e a conclusão do projeto. Entregar o projeto dentro do orçamento requer uma boa estimativa inicial, uma conscientização dos fatores que podem causar o aumento de custos e a disciplina do gerenciamento de projetos.

A escalada dos custos em projetos é influenciado por variáveis como a limitação de informações durante o estágio inicial, a aplicação de métodos tradicionais no processo de estimativas do projeto com grande número de variáveis (CHENG; TSAI, HSIEH, 2009), o planejamento inadequado, o gerenciamento inadequado dos contratos, a flutuação de preços (MANSFIELD; UGWU; DORAN, 1994), o nível de integração das partes interessadas no projeto (OSPINA-ALVARADO; CASTRO-LACOUTURE; ROBERTS, 2016), a eficiência dos contratados (DOLOI, 2013), as disputas e interrupção das relações entre partes contratantes (RAHMAN; KUMARASWAMY, 2004), o abandono do projeto, o litígio (KALIBA; MUYA; MUMBA, 2009) e os atrasos nas entregas do cronograma do projeto (HUSSIN; RAHMAN; MEMON, 2013).

Segundo Kaming *et al.* (1997), todos os atrasos geralmente custam dinheiro. Para Chan e Kumaraswamy (1996), a falta de comunicação entre o contratante e o contratado, a experiência inadequada do contratado e os atrasos dos subcontratados são alguns fatores que causam atrasos em projetos de construção.

Para Skitmore e Wilcock (1994), evidências empíricas sugerem que a eficiência dos contratados no processo de estimativa e a proposta apropriada de preços retratam o desempenho de custos em projetos de construção.

2.1.3 Relacionamento em projetos

As relações da cadeia de suprimentos na construção são bastante diversas, entre as quais três formas distintas são: a tradicionalmente contraditória, o colaborativo de curto prazo e as relações colaborativas de longo prazo (MENG, 2012). Para Larson (1995), a relação entre as equipes de gerenciamento, das empresas proprietárias e os contratados, enquanto trabalham em um projeto, é percebida em quatro níveis de cooperação que são: a) Adversários, os participantes se percebem como adversários, com cada parte perseguindo suas próprias preocupações, colaborando para a ocorrência de grandes conflitos sob o aspecto formal do litígio com base em ganhar/perder ; b) Adversário vigiado, os participantes cooperam dentro dos limites do contrato, onde as disputas são resolvidas com base nas relações contratuais; c) Parceiros informais, os participantes buscam sustentar uma relação de cooperação que ultrapassa os limites do contrato e as disputas são resolvidas por meio de ofertas mútuas, com soluções que satisfaçam ambas as partes, pelo menos parcialmente; e d) Parceiro do projeto, no qual os participantes tratam-se como parceiros iguais com metas e objetivos que se

convergem, e toda tentativa é para evitar litígios e resolver litígios em tempo útil, de maneira mutuamente satisfatória.

Os relacionamentos adversário e adversário vigiado, segundo Thomas e Thomas (2005), levam geralmente a objetivos egoístas, falta de confiança, confronto, má comunicação, escalada de problemas e falta de melhoria contínua. O sucesso dos relacionamentos baseados na cooperação é, por sua vez, associado a elementos-chaves como o compromisso com a atitude de ganha-ganha, a confiança, os objetivos mútuos, a resolução efetiva de problemas, a melhoria contínua, compartilhamento de cultura, definição de responsabilidades, alocação de risco e o monitoramento regular da parceria (HELLARD, 1995; CHAN; SCOTT; CHAN, 2004; MENG, 2012).

Os indicadores de relacionamento têm diferentes impactos no desempenho dos projetos. De acordo com Meng (2012), o estabelecimento de objetivos mútuos, a confiança mútua, a resolução efetiva de problemas contribuem marginalmente para a melhoria do desempenho de custo e de qualidade. Por outro lado, a deterioração dos relacionamentos na cadeia de suprimentos é uma razão para a ocorrência de mau desempenho, afetando-o em termos de ocorrência de atrasos e o excesso de custos.

De acordo com Hinze e Tracey (1994), em muitos projetos de construção os subcontratados são responsáveis, aproximadamente, pela execução de 80 % a 90% das tarefas do projeto. Para Lee *et al.* (2009), esta dependência destaca a necessidade de desenvolver relacionamento de longo prazo entre os empreiteiros gerais e os subcontratados, e que relações competitivas, que resultam em situações de ganhar/perder, pode impedir o estabelecimento de relações de colaboração.

Abbasianjahromi *et al.* (2013), Pollack-Johnson e Liberatore (2016), Mungle *et al.* (2013) destacam a influência dos subcontratados diretamente no desempenho do projeto, uma vez que a maioria das atividades dos subcontratados é referente a construção de diferentes pacotes de trabalho do projeto, e ressaltam a importância da interação entre os subcontratados que deve ser considerada durante o processo de seleção do subcontratado.

2.2 SUBCONTRATAÇÃO NA CONSTRUÇÃO CIVIL

O sistema de subcontratação é geralmente descrito como o processo contratual em que um empreiteiro principal subcontrata partes do trabalho para outro contratante, que também pode subcontratar outra firma ou fazer mais subcontratações (CHIANG, 2009). A

subcontratação no setor da construção civil é praticada em todo o mundo e em grandes projetos é possível verificar um arranjo de multicamadas de subcontratações.

Na indústria da construção, a característica mais específica das práticas de subcontratação é que a maioria dos empreiteiros gerais não estão envolvidos no trabalho físico de construção. Em geral, os empreiteiros gerais realizam as atividades de gerenciamento, planejamento e coordenação do projeto e transferem as tarefas reais do projeto aos subcontratados para a produção real (SHASH 1998; GRASSO *et al.* 2008; NG, TANG, 2010; ULUBEYLI, MANISALI; KAZAZ, 2010).

A subcontratação consiste em uma escolha estratégica das grandes construtoras de enfatizar a flexibilidade como fonte de vantagem competitiva (WINCH, 1998). Em função disso, esta é responsável pela realização de uma grande porcentagem das atividades do projeto, por razões que incluem a necessidade de equipamentos especializados, *expertise*, recursos escassos e limitações financeiras (ELAZOUNI; METWALLY, 2000).

Para Arditi e Chotibhongs (2005), a subcontratação é vantajosa para os principais empreiteiros, uma vez que podem recorrer à especialização dos subempreiteiros para manter as suas empresas em bom estado e ágeis. Outros motivos que impulsionam essa prática são a capacidade de ajustar a flexibilidade da mão-de-obra, o poder de barganha dos custos trabalhistas, o incentivo a conclusão mais rápida das tarefas, a externalização de atividades menos recompensadoras e perigosas, a transferência de riscos financeiros, além de evitar custos com a compensação dos trabalhadores, e atender rapidamente às demandas variáveis do mercado de produtos (MANU *et al.*, 2013).

Além disso, o contratante principal partilha os riscos do projeto com os subcontratados, o que possibilita contratos para sobreviver a condições voláteis e incertas da indústria da construção civil (MBACHU, 2008; CHOUDHRY *et al.*, 2012). Sem dúvida, a subcontratação tem benefícios econômicos razão pela qual é praticada na construção (DAINTY *et al.*, 2001).

No entanto, ao mesmo tempo em que a subcontratação apresenta vantagens ao setor da construção civil, existe o outro lado da moeda, onde se tem as desvantagens e os riscos desta atividade dentro do setor. Para Ng, Tang e Palaneeswaran (2009), o sucesso do contratante principal em um projeto de construção depende das performances dos subcontratantes envolvidos no projeto em questão. Desta forma, o desempenho dos subcontratados, ou melhor, o não desempenho, inevitavelmente afeta o desempenho da indústria como um todo, desencadeando problemas persistentes de qualidade, produtividade, falta de pagamento e segurança (CHIANG, 2009).

A grande quantidade de subcontratados envolvidos no projeto polariza os interesses envolvidos no projeto, saindo de uma esfera de foco apenas no objetivo do projeto como resultado satisfatório ao cliente para ajustamento de múltiplos objetivos, muitas vezes conflitantes entre si, para obter melhor desempenho e assim alcançar o objetivo do projeto.

Para Manu *et al.* (2013), a gestão das relações entre os principais empreiteiros e os subcontratados durante os projetos pode ser bastante complexa e problemática. Cabendo a equipe de projeto gerenciar os subcontratados de forma eficaz e eficientemente em direção a objetivos comuns, onde o sistema é devidamente monitorado e todos os subcontratados são adequadamente instruídos (CHIANG, 2009; ELAZOUNI; METWALLY, 2000). Para Kumaraswamy e Matthews (2000), os subcontratados devem ser envolvidos mais cedo dentro do processo de construção para desenvolver o entendimento mútuo do projeto. Segundo Polat (2015), a seleção do subcontratado mais apropriado é crucial para concluir o projeto com sucesso em termos de tempo, custo e qualidade.

Na literatura, estudos sobre subcontratados em projetos de construção têm sido amplamente desenvolvidos. Para Abbasianjahromi *et al.* (2013), existem três categorias principais nesse domínio. A primeira são: as pesquisas realizadas com o propósito de avaliar os fatores que influenciam na seleção dos subcontratados, ou seja, quais os principais critérios de decisão. O segundo grupo tem como objetivo o desenvolvimento de estrutura para a seleção dos subcontratados e, por fim, o terceiro grupo encarrega-se de pesquisas para desenvolver modelos para a subcontratação.

Polat, Kaplan e Bingol (2015) consideram que existem duas categorias, que são: os estudos que identificam os critérios de seleção dos subcontratados e seus níveis de importância, e os estudos que oferecem ferramentas, técnicas e/ou metodologias para a seleção de subcontratados.

Na prática, muitos contratantes não desenvolveram o seu processo de pré-qualificação dos subcontratados de forma estruturada, sistemática e formalizada. Muitas vezes, a última decisão é feita por gestores, no topo da hierarquia decisória, com base em técnicas heurísticas que combinam experiência, intuição e julgamento subjetivo, e assim, como consequência, o processo de seleção de subcontratados muitas vezes carece de padrões confiáveis (ULUBEYLI E KAZAZ, 2016; ULUBEYLI *et al.*, 2010).

Na racionalidade decisória “Apenas o preço” ou “a proposta mais baixa ganha”, os principais contratantes colocam muita importância no preço em detrimento da qualidade (KUMARASWAMY E MATTHEWS, 2000), de modo que, as decisões são baseadas no critério único – o custo. Todavia, a seleção de subcontratados requer muito mais do que um

foco restrito apenas nos aspectos econômicos, a proposta de menor preço não necessariamente produz os resultados finais mais econômicos ou valor racional; ao contrário, ela pode levar a maiores custos e envolvem a exposição de alto risco do contratante no longo prazo (ULUBEYLI *et al.*, 2010). Neste aspecto, Polat *et al.* (2015) destacam que, considerar vários fatores na seleção de subcontratados é importante para o sucesso das empresas de construção, e não apenas considerar os preços das propostas.

Entretanto, quando o número de critérios aumenta, a seleção do subcontratante torna-se mais complexa (POLAT, 2015). Segundo Ngowi e Pienaar (2005), avaliar antecipadamente a qualidade dos recursos e a capacidade dos subcontratantes não é uma tarefa fácil para os contratantes, especialmente os subcontratantes desconhecidos. A Tabela 1 apresenta um conjunto de critérios utilizados em trabalhos realizados, recentemente, para a seleção de subcontratados.

Tabela 1 – Critérios para seleção de subcontratados

Referências	Critérios				
	Custo (preço de oferta)	Duração (tempo)	Qualidade	Cooperação	Know-how
Alencar e de Almeida (2010)	✓	✓	✓		✓
Ulubeyli e Kazaz (2016)	✓			✓	
Polat (2015)	✓		✓		✓
Kumaraswamy e Matthews (2000)	✓			✓	
Polat, Kaplan e Bingol (2015)	✓	✓	✓		
Polat <i>et al.</i> (2016)	✓		✓		✓
Wang, Yung e Ip (2001)	✓	✓			
Abbasianjahromi <i>et al.</i> (2013)	✓	✓			
Abbasianjahromi, Rajaie e Shakeri (2011)	✓	✓	✓		
Biruk <i>et al.</i> (2017)	✓	✓			
Ip, Yung e Wang (2004)	✓	✓			

Fonte: A Autora (2020).

O *tradeoff* tempo-custo-qualidade tem sido objeto de extensa pesquisa na programação de projetos. Kannimuthu *et al.* (2019) destacam que muitos cronogramas são possíveis com diferentes valores de tempo, custo e qualidade, quando diferentes combinações do conjunto de subcontratados são feitas.

O critério de custo, ou o preço da proposta, destacado como a base de decisão dominante nas escolhas de subcontratação por décadas e mostrado como um critério significativo (GREENWOOD, 2001). De fato, o preço de compra é um dos fatores mais importantes que

afetam a margem de lucro de um empreiteiro geral, onde, quanto menor o preço de oferta do subcontratante, maior será a margem de lucro potencial para o contratante principal, assumindo que o projeto progride sem problemas sem grandes impedimentos (POLAT, 2014; HARTMANN; LING; TAN, 2009).

Assim, quando o critério de custo tem maior importância para o decisor, o cronograma do projeto pode vir a ter uma duração maior, evento conhecido como escorregamento do cronograma. Neste aspecto, existe o fator *money value* destacado por (KUMARASWAMY; MATTHEWS, 2000), que questiona o valor do dinheiro na perspectiva de economia de tempo, ou seja, um menor custo de projeto com um maior deslizamento do cronograma não é algo ideal.

Analisando o *tradeoff* custo-qualidade, observa-se o mesmo comportamento do *tradeoff* anterior, em que o maior desempenho em um ocorre em detrimento do pior desempenho do outro. Na subcontratação, a qualidade do trabalho fornecido é um antecedente crítico para o desempenho geral do projeto, e é medida através da entrega do produto ou serviço que atendam aos requisitos do projeto (ARDITI; CHOTIBHONGS, 2005; HARTMANN; LING; TAN, 2009).

Assim, a qualidade é geralmente avaliada com base na experiência passada com o subcontratado ou com base na reputação baseada em opiniões e experiências de outras empresas. É mais provável que os contratantes principais concedam contratos a subcontratados que demonstrem qualidade técnica e de mão-de-obra superior, e boa capacidade de gerenciamento e supervisão do local (DULAIMI; HONG, 2002), para garantir a boa qualidade do produto (HARTMANN; LING; TAN, 2009).

Associado ao critério de qualidade, mas não parte integrante deste, temos o conhecimento técnico ou *know-how*. Hartmann, Ling e Tan. (2009) afirmam que é certo que o conhecimento técnico pode contribuir para a qualidade do produto final. Todavia, o conhecimento técnico é uma compreensão dos elementos complexos necessários para efetivamente completar tarefas associadas a um determinado processo, bem como o conhecimento dos critérios de julgamento necessários para uma ação eficiente ou correta no trabalho (GUSHGARI *et al.*, 1997; HUNTER, 1983). Desta forma, para Hartmann, Ling e Tan (2009), o critério *know-how* de um subcontratante pode ser avaliado com base em projetos anteriores, segundo alguns indicadores que são, os métodos de trabalho, os materiais utilizados, as máquinas e as ferramentas aplicadas.

Considerando os ambientes complexos dos projetos e o envolvimento de muitas partes interessadas, para Dulaimi e Hong (2002), os principais empreiteiros estarão mais dispostos a selecionar subcontratados que mostrem uma atitude positiva, compromisso e resposta rápida às

suas necessidades. Neste sentido, os serviços de subcontratação devem ser executados por meio de relacionamentos estabelecidos entre contratantes principais e subcontratados, a cooperação ou o grau em que os subcontratados cumprem acordos, e a proatividade, com a qual resolvem e previnem problemas, é altamente relevante para a eficiência operacional de projetos de construção (HUMPHREYS *et al.*, 2003).

Para Abbasianjahromi *et al.* (2013), a seleção de subcontratados altamente qualificados promove a qualidade global dos projetos e, conseqüentemente, o gerenciamento pode ser implementado no projeto. A seleção do subcontratado certo, para o trabalho certo é fundamental para o sucesso do projeto. Onde, a questão principal da seleção de subcontratados é estabelecer um conjunto de índices que reflitam a capacidade de subcontratantes de forma abrangente (FENG; BIN, 2012), com a melhor combinação possível de uma variedade de critérios quantitativos e qualitativos (ULUBEYLI; MANISALI; KAZAZ, 2010).

Por outro lado, a combinação dos vários fatores quantitativos e qualitativos tornam a formulação do problema de avaliação de subcontratados complicada, uma vez que não há consenso sobre os fatores que devem ser levados em consideração no processo de avaliação do subcontratante (ALBINO, GARAVELLI 1998; LUU, SHER 2006; POLAT, 2015). Vários métodos já foram propostos para a seleção de subcontratados, tais como tomada de decisão multicritério, análise multiatributo, teoria da utilidade multiatributo, regressão múltipla, análise de cluster, teoria de conjuntos *fuzzy*, análise discriminativa multivariada, programação inteira, programação linear, algoritmo de *branch and bound* e algoritmos genéticos (HATUSH; SKITMORE 1997; HOLT 1998; MAHDI *et al.* 2002; ELAZOUNI; GAB-ALLAH, 2004; IP; YUNG; WANG, 2004; HUANG; ZOU; ZHANG, 2016).

Na seção 2.3 será apresentada a abordagem de Apoio Multicritério à Decisão, sendo destacando o Método *FITradeoff*, e na seção 2.4 será apresentado o Algoritmo Genético.

2.3 APOIO MULTICRITÉRIO À DECISÃO

Os desafios e as muitas situações complexas convidam às organizações a procurar mecanismos de apoio à tomada de decisão, de tal modo, que não se limitem ao uso do “bom senso” ou de aplicações de técnicas de cálculo elementar (ROY; BOUYSSOU, 1993). Neste sentido, Roy (1987) destacou o uso de múltiplos critérios como um novo paradigma para analisar e ajudar as decisões.

Bouyssou (1989) afirma que o uso de múltiplos critérios em modelos de auxílio à decisão é frequentemente ressaltado em razão da “realidade” ter múltiplos objetivos e que qualquer

decisão implica equilibrar “pros” e “contras”, assim a decisão será inevitavelmente o resultado de um compromisso entre vários objetivos conflitantes.

Roy (1996) define apoio à decisão como sendo a atividade que ajuda a obter, através de modelos definidos, mas não necessariamente completamente formalizados, elementos de resposta às questões colocadas pelo decisor no processo de tomada de decisão. Estes elementos fornecem esclarecimentos quanto à decisão e, normalmente, recomendações de comportamento, ou simplesmente de favorecimento, que aumente a coerência entre a evolução do processo, de um lado, e os objetivos e os sistemas de valores do decisor, por outro. Para Vincke (1992), o apoio multicritério à decisão oferece ao decisor algumas ferramentas capazes de torná-lo apto a resolver problemas em que são considerados os mais diversos pontos de vista, muitas vezes contraditórios.

Segundo Vincke (1992), a Escola Americana – *Multiple Criteria Decision Making* – e a Escola Francesa – *Aide Multicritère à la Décision* – são as principais linhas de pensamento, no que se refere o desenvolvimento de metodologias de Apoio Multicritério à Decisão.

A Escola Americana desenvolveu um dos primeiros métodos de apoio multicritério à decisão na década de 70 (BOUYSSOU, 1989), o *Analytic Hierarchy Process* - AHP é baseado na representação hierárquica de objetivos ou critérios envolvidos na resolução de um problema, o método busca uma medida global para cada uma das alternativas através de uma comparação pareada de cada elemento em um nível hierárquico específico (SAATY, 1994).

O método *Multiattribute Utility Theory* – MAUT é uma extensão da teoria da utilidade clássica para contexto de multiatributo. Segundo Keeney e Raiffa (1999), o conceito é medir a utilidade da solução de cada uma das alternativas através da construção de uma função matemática que considera todos os atributos envolvidos no problema. Outros métodos desenvolvidos pela Escola Americana são o SMARTS (*Simple Multi-Attribute Rating Technique*) e o SMATER (*SMART Exploiting Raking*), que são métodos de medição de utilidade multiatributo, onde cada um é baseado em um procedimento de elicitação de pesos (EDWARDS; BARRON, 1994).

A Escola Francesa, com uma proposta que contrasta da Americana, desenvolveu um modelo mais flexível, baseado em uma modelagem das preferências (RANGEL *et al.* 2009). Bernard Roy publicou em 1968 o método ELECTRE I para problemáticas de escolha, o primeiro método da família ELECTRE (*Elimination et Choix Traduisant la Realite*) e o primeiro a incorporar o conceito teórico da relação de *surclassement*¹, em português sobreclassificação, no qual, avaliações intracritérios e intercritérios são realizadas e, em seguida, a diferença das relações de sobreclassificação são analisadas.

Outros métodos foram projetados seguindo o mesmo conceito, embora cada uma desses métodos procure resolver um problema diferente (ROY; BOUYSSOU, 1993), com exceção do ELECTRE IV, onde o decisor não precisa determinar pesos para os critérios (ROY; HUGONNARD, 1982).

O PROMETHEE (*Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations*), outra família de métodos, precede a classe de métodos de sobreclassificação da Escola Francesa. Segundo Brans e Mareschal (2002), os métodos PROMETHEE utilizam a relação de sobreclassificação, inserindo um novo conceito de “fluxo de superação líquida”.

Para Belton e Stewart (2002), as escolas diferem quanto à forma como os compromissos são gerados, mas todos tendem a concentrar a atenção às alternativas eficientes ou, pelo menos, suficientemente próximo da fronteira eficiente, e quanto às informações apresentadas aos tomadores de decisão. Neste sentido, uma característica substancial em métodos de decisão multicritério, relevante para a escolha de métodos, está relacionada à compensação que pode existir entre os critérios no procedimento de agregação. Em função disso, os métodos podem ser classificados em compensatórios e não compensatórios (de ALMEIDA, 2013).

– Métodos compensatório e não-compensatório

Para Bouyssou (1986), a compensação refere-se à existência de "*tradeoffs*", ou seja, a possibilidade de compensar uma "desvantagem" em algum atributo por uma "vantagem" suficientemente grande em outro atributo - enquanto "vantagens" menores não fariam o mesmo. Uma relação de preferência é não compensatória quando não ocorre *tradeoff* e compensatória quando ocorre.

De acordo de Almeida *et al.* (2014), para a racionalidade não-compensatória, o decisor deve ser capaz de dar pesos para critérios que representem sua importância relativa. Enquanto que, o conceito de “peso” do critério, na racionalidade compensatória, consiste na taxa de substituição de um critério em detrimento de outro (de ALMEIDA, 2013).

Os métodos de decisão multicritério podem ser classificados quanto ao Procedimento de Agregação Multicritério (PAMC). Neste trabalho, é considerado a visão apresentada por Roy e Bouyssou (1993).

– Procedimento de Agregação Multicritério (PAMC)

De acordo com Roy e Bouyssou (1993), o PAMC é uma regra que permite estabelecer, a partir da matriz de *performances* e de informações intercritérios, um ou vários sistemas relacionais de preferência – s.r.p (ver Roy e Bouyssou, 1993; e Vincke, 1992) sobre um conjunto *A* de ações. Desta forma, Roy e Bouyssou (1993) apresentam três abordagens operacionais para agregação de *performances*, estas são descritas na Tabela 2.

Tabela 2 - Abordagens operacionais para agregação de performance

Abordagem	Descrição	Características do s.r.p
Critério único de síntese	Consiste em formar um critério único de síntese agregando n critérios de uma família por meio de uma função de agregação V , fazendo: $g(a) = V ((g_1(a), g_2(a), \dots, g_n(a)))$	Propriedade notória de transitividade Sem Relação de Incomparabilidade (R) $R = \{\emptyset\}$
	Realiza <i>tradeoff</i>	
Sobreclassificação	Consiste em formar um conjunto de condições que conduzem à aceitar ou à rejeitar uma sobreclassificação no nível global. Esta abordagem visa caracterizar as Relações de Sobreclassificações (S) que podem ser estabelecidas de maneira suficientemente robusta.	Não necessariamente apresentará propriedade de transitividade Com Relação de Incomparabilidade (R) $R \neq \emptyset$
	Importância relativa entre critérios	
Julgamento interativo	Consiste de uma sequência de fases de diálogo e de cálculo, onde julgamentos locais interativos são realizados segundo a lógica de tentativas e erros. Os julgamentos são locais porque envolvem apenas uma ação e sua vizinhança no espaço de <i>performance</i> , ou seja, um número muito pequeno de ações que parecem sensatas.	-
	Requer que os tomadores de decisão especulem sobre as consequências das compensações na definição de níveis plausíveis de aspiração.	

Fonte: Adaptado de Roy; Bouyssou (1993); Belton; Stewart (2002).

Em síntese, os métodos como o MAUT, AHP, SMART e SMARTER seguem a abordagem de critério único de síntese e são de racionalidade compensatória. Por outro lado, o ELECTRE e o PROMETHEE seguem a abordagem de sobreclassificação e não realizam *tradeoff*, ou seja, são métodos de racionalidade não compensatória (de ALMEIDA, 2013).

Outro método que segue a abordagem de critério único de síntese e racionalidade compensatória é o *FITradeoff* (discutido na sessão 2.3.3). Segundo de Almeida *et al* (2016), baseado no modelo aditivo no escopo do *Multi-Attribute Value Theory* – MAVT, o método FITradeoff utiliza informações parciais do decisor em um procedimento de elicitación das preferências (*tradeoffs*) para com isso obter as constantes de escala dos critérios.

2.3.1 Tipos de problemática

Para Roy e Bouyssou (1993), um conjunto A de ações potenciais nem sempre podem ser considerado um conjunto de soluções segundo o conceito de “solução ótima”. Isso porquê, ao falar de ótimo, tem-se que a situação de decisão deve ser modelada, de tal forma que cada solução prevista seja exclusiva das demais, que o conjunto de soluções seja fixo e que as soluções possam ser ordenadas, de forma incontestável, da pior para a melhor. Por esta razão, é preferível, em muitos casos, procurar, pelo menos inicialmente, formular o problema em termos menos restritivos.

Com isso em mente, Roy e Bouyssou (1993) apresentam quatro problemáticas de decisão que podem ser consideradas:

- a) Problemática de Escolha ($P\alpha$) – **Objetivo:** identificar um conjunto limitado de ações, tendo em vista uma escolha final de apenas uma ação. Esse conjunto pode conter as melhores soluções ou as ações que satisfaçam o problema. **Resultado:** uma escolha ou um procedimento de seleção;
- b) Problemática de Classificação ($P\beta$) – **Objetivo:** classificar as ações, segundo o compromisso de cada, em categorias que são definidas inicialmente em função de normas. **Resultado:** uma classificação ou um procedimento de classificação;
- c) Problemática de Ordenamento ($P\gamma$) – **Objetivo:** construir um *ranking* a partir de um reagrupamento de todas ou de partes (de melhor compromisso) das ações em classes equivalentes, essas classes são ordenadas, de forma completa ou parcial, conforme as preferências. **Resultado:** uma ordenação ou um procedimento de ordenação;
- d) Problemática de Descrição ($P\delta$) – **Objetivo:** obter uma descrição, em linguagem apropriada, das ações e de suas consequências. **Resultado:** uma descrição ou um procedimento cognitivo.

Outra problemática apresentada por Belton e Stewart (2002) e Vetschera e de Almeida (2012) é a Problemática de Portfólio (PDP) – **Objetivo:** escolher, a partir de um conjunto de alternativas, um subconjunto que considere algumas restrições dadas pelo contexto e considerando a finalidade do problema. **Resultado:** um portfólio que tenha o máximo valor, sujeito a um conjunto de restrições.

Por fim, Roy (1996) destaca que a forma de formular o problema não está associada apenas com a natureza do que se pretende relativamente com o conjunto das ações potenciais,

mas também com o espírito da recomendação. Além disso, a compensação entre critérios é um conceito fundamental muito importante na análise de métodos e na escolha pela utilização de um método de agregação (VINCKE, 1992).

De Almeida *et al.* (2016) desenvolveram, inicialmente, o método Tradeoff Flexível e Interativo – *FITradeoff* para a problemática de seleção, Frej *et al.* (2019) propuseram uma variação do método para a problemática de ordenamento. Em ambos, a modelagem de preferência é conduzida através de uma abordagem compensatória.

2.3.2 Método Tradeoff Flexível e Interativo – *FITradeoff*

O procedimento de elucidação de *tradeoff* têm uma forte base axiomática, contudo, foram identificadas inconsistências nos procedimentos de *tradeoff* de modelos aditivos (WEBER E BORCHERDING, 1993). Segundo Belton e Stewart (2002), os tomadores de decisão podem enfrentar dificuldades para expressar *tradeoffs* de forma explícita. Isso porque o decisor compara as consequências, buscando encontrar o ponto exato que as tornam indiferentes segundo sua preferência (ROSELLI *et al.*, 2019). Holloway e White III (2003) consideram que existe um custo cognitivo para cada questão respondida pelo decisor e que, portanto, o esforço cognitivo deve ser reduzido.

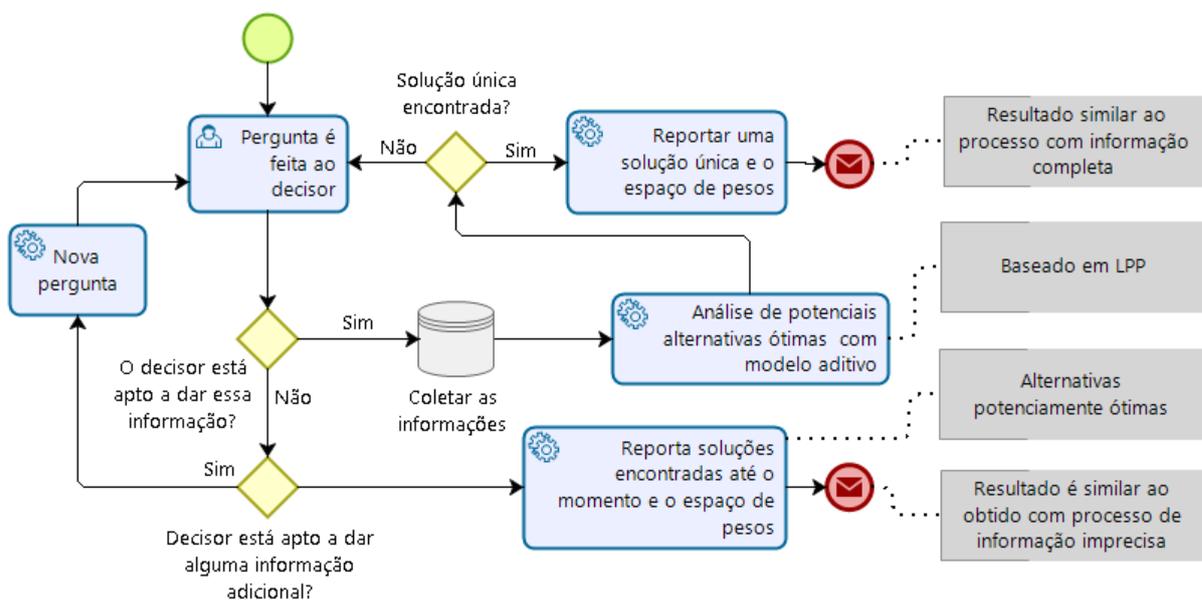
Neste sentido, o método *FITradeoff* destaca-se por ser um procedimento de elicitacão que requer informação parcial por parte do decisor, preservando a estrutura axiomática do *tradeoff*, e que exige um menor esforço cognitivo, o que leva, conseqüentemente, a uma menor taxa de inconsistências (de ALMEIDA *et al.*, 2016). De acordo com ROSELLI *et al.* (2019), o *FITradeoff* funciona com base em desigualdades obtidas de declarações de preferência estritas, logo não é necessário encontrar pontos de indiferença na fase de *tradeoff*.

O método é caracterizado como flexível, pois a elicitacão permite que o processo de decisão seja construído com menos informações do que o requerido pelo procedimento padrão de compensação, e é classificado como procedimento indireto, uma vez que os pesos são obtidos pelo sistema de equações, relacionado às preferências do decisor sobre essas conseqüências. Com isso, espera-se que com o *FItradeoff* ocorram menos erros nos processos de especificação de preferências (de ALMEIDA *et al.*, 2016).

O método *FITradeoff* tem duas etapas principais. A primeira consiste em classificar os pesos dos n critérios, onde k_i é o peso do critério i , retornando o conjunto de desigualdades: $k_1 > k_2 > \dots > k_n$. A segunda etapa consiste em extrair os valores dos pesos dos critérios, através da resolução de um problema de programação linear para cada alternativa, a fim de

testar a otimização potencial de cada uma delas (ROSELLI *et al.*, 2019). Este modelo foi inicialmente desenvolvido para modelos multicritério aditivos para situações de escolha (de ALMEIDA *et al.*, 2016) e funciona com base em um processo interativo de resposta a perguntas colocadas ao tomador de decisão, por meio de um sistema de apoio à decisão (*Decision Support System - DSS*), onde as questões colocadas pedem que o decisor compare duas consequências, considerando *tradeoffs* entre os critérios (FREJ *et al.*, 2019). O fluxograma da dinâmica do método *FITradeoff* é apresentado na Figura 1.

Figura 1 - Fluxograma da dinâmica do FITradeoff - seleção



Fonte: Adaptado de Almeida *et al.* (2016).

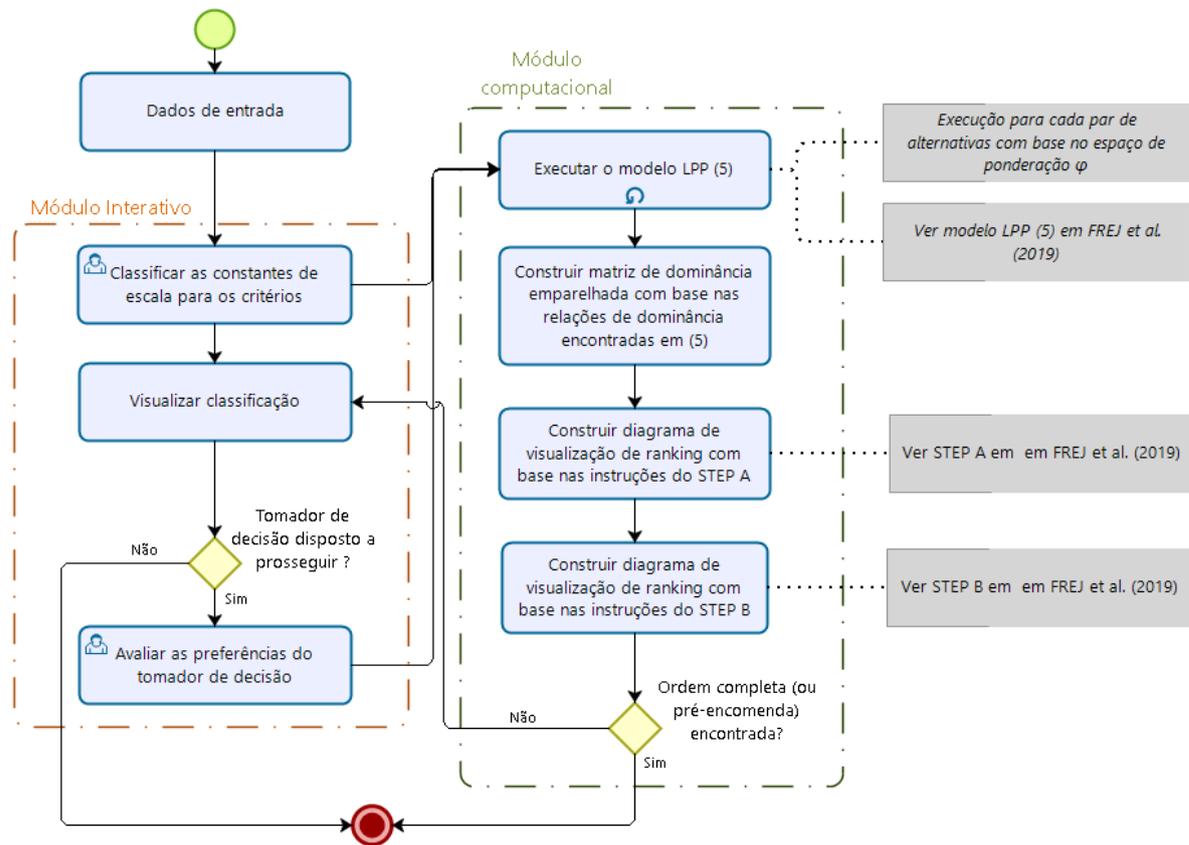
Deste modo, o processo de elicitação flexível é conduzido de maneira interativa junto ao decisor, apresentando uma ampla gama de aplicabilidade a problemas práticos (FREJ *et al.*, 2019).

Em um segundo momento, Frej *et al.* (2019) propuseram uma abordagem para a problemática de ordenamento. Diferentemente dos problemas de escolha, na problemática de ordenamento as alternativas devem ser comparadas entre si e as relações de preferência verificadas. À vista disso, o modelo LPP – *Linear Programming Problem* (ver em Almeida *et al.* (2016)) deve ser executado para cada par de alternativas, de modo a tentar encontrar relações de dominância, em vez de otimalidade potencial (FREJ *et al.*, 2019).

Para a problemática de ordenamento, o método *FITradeoff* tem três etapas, a primeira é ordenar os pesos dos critérios, assim como para a problemática de seleção. As duas etapas subsequentes são: construir o diagrama das alternativas (Etapa A) e ordenar as alternativas com

base no diagrama da etapa A (Etapa B). A Figura 2 mostra a dinâmica do DSS do *FITradeoff* para a classificação problemática.

Figura 2 - Fluxograma da dinâmica do DSS do *FITradeoff* - ordenamento



Fonte: Adaptado de Frej *et al.* (2019)

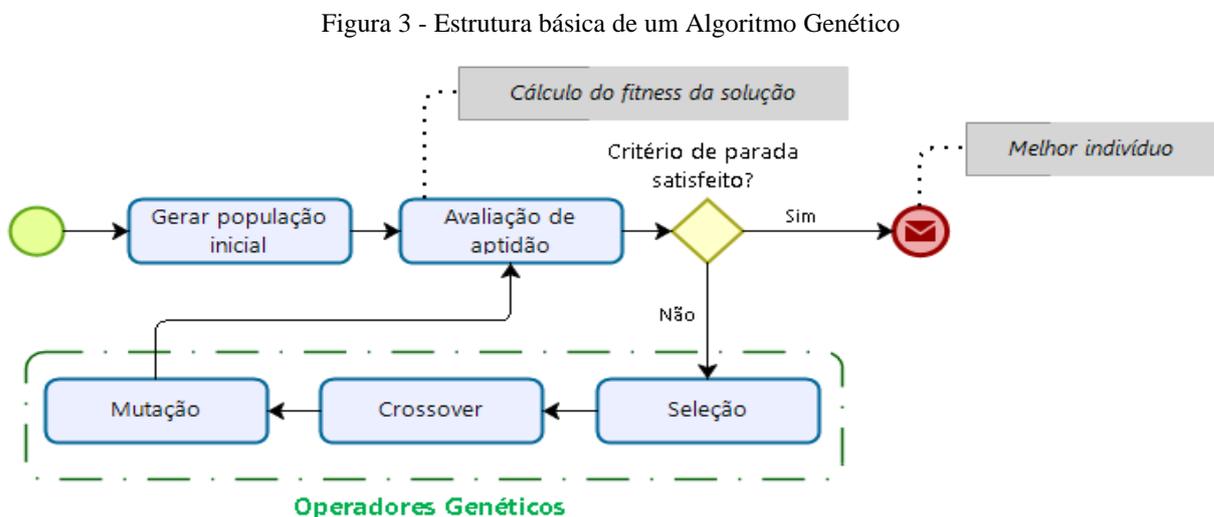
À medida que o decisor responde às perguntas no *FITradeoff*, mais restrições são obtidas, de modo que o espaço de peso fica mais apertado. Uma matriz de dominância é obtida em cada ciclo e uma vez emparelhada, é possível construir um ranking das alternativas (FREJ *et al.*, 2019).

2.4 ALGORITMO GENÉTICO

O Algoritmo Genético ou *Genetic Algorithm* (GA), em inglês, é uma metaheurística de busca inspirada na teoria da evolução natural de Charles Darwin, amplamente utilizada para encontrar soluções de boa qualidade, às vezes até ótimas. O conceito do algoritmo genético foi introduzido por Holland (1975) para encontrar respostas para problemas que têm espaços de

pesquisa realmente grandes gerando continuamente soluções candidatas, avaliando o quão bem as soluções se encaixam no resultado desejado e refinando as melhores soluções (SHEPPARD, 2017). Os GAs têm sido amplamente utilizados para resolver problemas de otimização combinatória, tais como: Problema do caixeiro viajante, Problema de roteamento de veículos, Problemas de *scheduling*, entre outros.

O GA manipula populações de cromossomos (ou indivíduos), que são *strings* que representam soluções para um problema específico (McCALL, 2005). Um GA é construído por vários componentes distintos, os principais são a codificação de cromossomos, a função de aptidão (*fitness*), e os operadores genéticos (seleção, *crossover*, e mutação). A Figura 3 apresenta a estrutura básica de um Algoritmo Genético.



Fonte: Adaptado de Linden (2006).

O algoritmo tem início na codificação de soluções em cromossomo para formar uma geração inicial $P(t)$, em $t \leftarrow 0$. Em seguida, os três operadores genéticos são empregados para gerar os descendentes, ou seja, uma nova geração $P(t)$, em $t \leftarrow t + 1$. O pseudocódigo para o GA é apresentado na Figura 4.

Figura 4 - Pseudocódigo do GA

Algoritmo 1: Algoritmo Genético**Início**

```

 $t \leftarrow 0$ ;
Gerar a população inicial  $P(t)$ ;
Avaliar  $P(t)$ ; #Função fitness
enquanto critérios de parada não satisfeitos faça
     $t \leftarrow t + 1$ ;
    Gerar  $P(t)$  a partir de  $P(t - 1)$ ; #Seleção
    Aplicar crossover em  $P(t)$ ;
    Aplicar mutação em  $P(t)$ ;
    Avaliar  $P(t)$ ; #Função fitness
    Definir população sobrevivente;
fim do enquanto

```

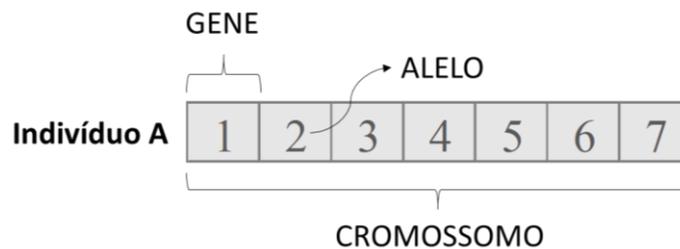
Fim

Fonte: Adaptado de Michalewicz (1996).

a) Codificação de cromossomos

Segundo Linden (2006), o GA adota uma terminologia original usada na teoria da evolução natural e da genética, na qual um indivíduo de uma população pode ser formado por um ou mais cromossomos. O cromossomo pode ser denominado de *string* e, em geral, implementados como vetores, onde cada elemento do vetor é conhecido como gene. Os valores que cada gene pode assumir é denominado de alelo, possuindo um local fixo no cromossomo denominado de *locus*. Genes e alelos em conjunto formam então o genótipo, com suas características tratadas de fenótipos. A Figura 5 traz uma representação de um indivíduo.

Figura 5 - Representação do Indivíduo A



Fonte: A Autora (2020).

A relação entre a terminologia dos algoritmos genéticos e a biologia é resumida na Tabela 3.

Tabela 3 - Terminologia dos GA com a biologia

Biologia	Algoritmos Genéticos
Cromossomo	Indivíduo ou string
Gene	Característica ou bit
Alelo	Valor do bit
Locus	Posição de um bit específico
Genótipo	Indivíduo candidato a solução – x
Fenótipo	Valor da função para um dado indivíduo – $f(x)$

Fonte: Adaptado de Linden (2005).

Deste modo, de acordo com Goldberg (1989), existem inúmeras maneiras de codificação do problema, ou de mapear soluções do problema original em strings de comprimento fixo. A codificação binária (ou clássica) e a codificação real são as duas abordagens distintas mais comumente utilizadas para realizar a codificação. Para Michalewicz (1996), a representação real apresenta vantagens sobre a binária no que diz respeito à velocidade de processamento, a consistência dos resultados entre as rodadas e a precisão.

b) Geração da população inicial

A população inicial de indivíduos é gerada de forma aleatória ou por meio de uma heurística, no qual os indivíduos gerados já apresentam características específicas do problema. O tamanho da população inicial e a variedade de indivíduos são características importantes para se obter bom desempenho do algoritmo genético. Para Sastry, Goldberg e Kendall (2005), tamanhos pequenos de população podem levar à convergência prematura e gerar soluções abaixo do padrão. Por outro lado, grandes tamanhos populacionais levam a gastos desnecessários de tempo computacional. Segundo de Lacerda e de Carvalho (1999), se uma população inicial pequena for gerada aleatoriamente, provavelmente, algumas regiões do espaço de busca não serão representadas.

Para Reeves (1995), ao direcionar a população inicial com o auxílio de alguma heurística, o GA pode chegar a soluções melhores e mais rapidamente quando comparado ao processo de geração aleatória. Por outro lado, pode ocorrer um processo de convergência prematura, para pontos de ótimo local, o que não é conveniente para a resolução do problema.

O problema de convergência prematura, segundo de Lacerda e de Carvalho (1999), é quando cromossomos chamado superindivíduos geram um número excessivo de filhos que dominam a população, espalhando seus genes enquanto outros genes desaparecem. A limitação

do número de filhos por cromossomo e a diversidade de cromossomos na população, garantida pela taxa de mutação, permitem combater o problema da convergência prematura.

c) Função de aptidão (*fitness*)

Para implementar a seleção natural e encontrar boas soluções, precisamos de uma medida para distinguir boas soluções de más (SASTRY; GOLDBERG; KENDALL, 2005). Assim, cada indivíduo é avaliado por uma função de aptidão, a qual mensura seu grau de adaptação ao meio. Quanto maior o valor da função de aptidão, mais o indivíduo está adaptado ao meio. Segundo Linden (2006), a função de aptidão, ou de avaliação, é a maneira utilizada pelo GA para determinar a qualidade de um indivíduo como solução do problema.

Koza *et al.* (2003) destacam que a função de avaliação da população deve refletir os objetivos a serem alcançados na resolução de um problema e é derivada diretamente das condições impostas por este. Neste sentido, no problema de maximização, se o cromossomo x_A tem uma avaliação melhor que o cromossomo x_B , em termos de solução para o problema, então a função de aptidão do cromossomo x_A tem que ser maior que o cromossomo x_B . Deste modo, a função de aptidão deve embutir todo o conhecimento sobre o problema a ser solucionado, tanto suas restrições quanto seus objetivos de qualidade (LINDEN, 2008).

2.4.1 Operadores genéticos

Depois que o problema é codificado de maneira cromossômica e uma função de aptidão é escolhida, pode-se começar a desenvolver soluções para o problema usando os operadores de seleção, *crossover* (ou recombinação) e mutação comumente utilizados em algoritmos genéticos (SASTRY; GOLDBERG; KENDALL, 2005).

a) Seleção

Segundo Bäck *et al.* (2000), os métodos de seleção são usados para direcionar o processo de busca para melhores regiões no espaço de solução. Inspirado no processo de seleção natural, o GA seleciona os melhores cromossomos da população inicial (melhor *fitness*) para gerar cromossomos filhos, diferente dos pais, através dos operadores de *crossover* e mutação (de Lacerda e de Carvalho, 1999). De modo geral, a ideia principal da seleção é preferir soluções melhores às piores, e muitos procedimentos de seleção foram propostos para concretizá-la, incluindo seleção de roleta, seleção de torneios e seleção de *ranking*.

- i. Roleta simples ou seleção proporcional – no método da roleta cada indivíduo tem seu valor de aptidão representado proporcionalmente em relação ao valor total das aptidões na população, ou seja, a probabilidade de seleção p_{x_1} do cromossomo x_1 com aptidão $f(x_1)$ é dada por: $p_{x_1} = f(x_1) / \sum_{i=1}^n f(x_i)$. A roleta é girada, de modo que, os indivíduos que apresentam maior aptidão terão maiores chances de serem selecionados. Cada vez que a roleta é girada um novo indivíduo é selecionado (FALCONE, 2004; de LACERDA; de CARVALHO, 1999).
- ii. Seleção por torneio – consiste em selecionar indivíduos comparando o valor da função *fitness* entre os indivíduos que participam do torneio, garantindo a diversidade da população. O método tem um parâmetro denominado tamanho do torneio (k) que define quantos indivíduos são selecionados da população para competir. Entretanto, quando o parâmetro é muito grande, os $(n - k)$ indivíduos tenderão a predominar, uma vez que sempre um deles será o vencedor do torneio. Diferente do método da roleta, no torneio os indivíduos são selecionados aleatoriamente sem nenhuma forma de favorecimento aos indivíduos com maior aptidão (LINDEN, 2008).
- iii. Seleção por *ranking* – segundo Mitchell (1996), é um método que evita a convergência prematura e a dominância de um superindivíduo. Consiste em ordenar todos os elementos de acordo com a função *fitness*, posteriormente, a seleção é feita com base no *ranking*.
- iv. Outros métodos de seleção são a seleção local e o método de amostragem estocástica uniforme (ver em Linden (2008)).

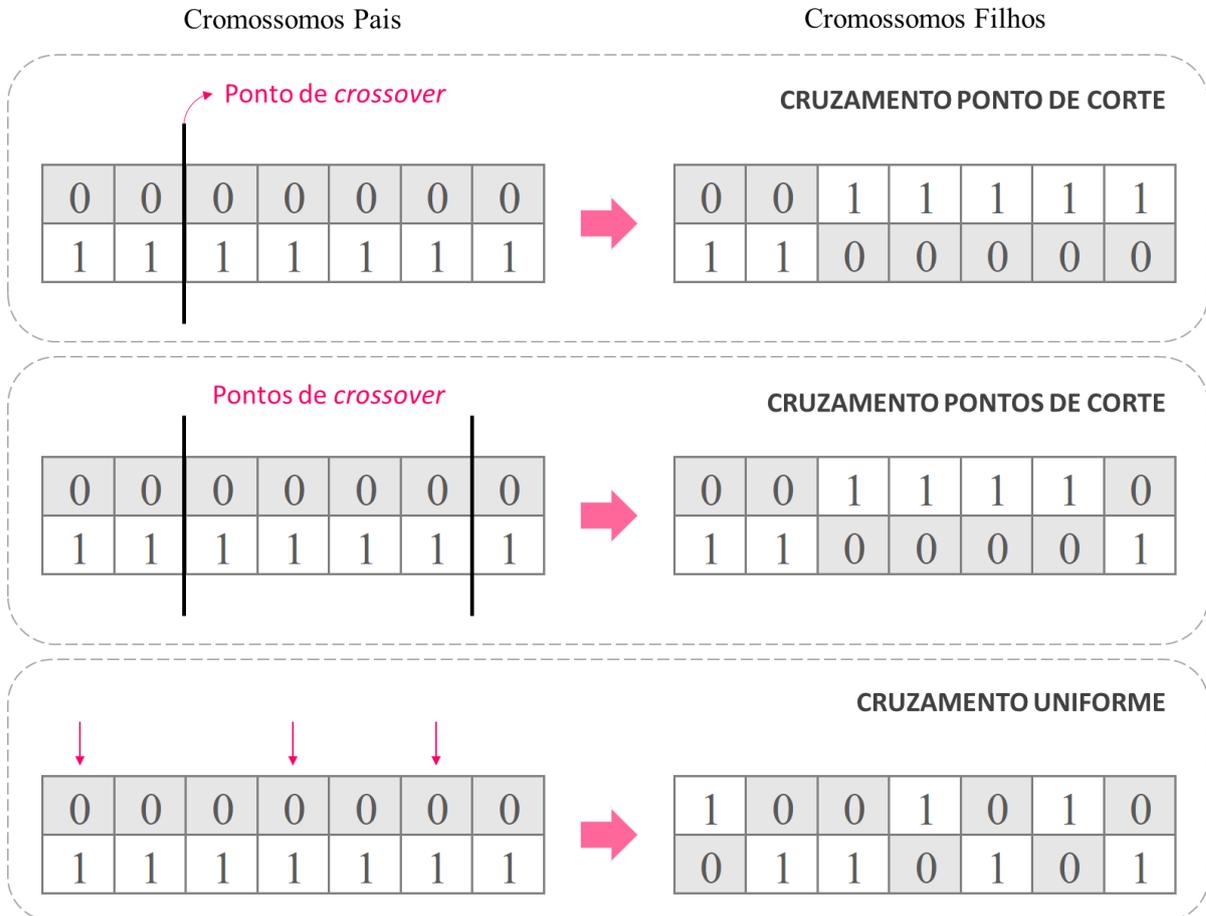
b) *Crossover*

Segundo Konak, Coit e Smith (2006), o *crossover*, ou operador de cruzamento, é o mais importante dos operadores genéticos. Consiste na combinação de partes de dois ou mais indivíduos para criar soluções novas e possivelmente melhores (SASTRY; GOLDBERG; KENDALL, 2005).

Na operação de cruzamento, uma posição de cada indivíduo é escolhida aleatoriamente e estes são quebrados nestas posições. Os fragmentos resultantes são recombinados e dois novos indivíduos são criados. Em outras formas de cruzamento, o indivíduo pode ser quebrado de forma aleatória em mais de uma posição e ser recombinado com outro indivíduo quebrado de forma semelhante (AZADIVAR; TOMPKINS, 1999).

A Figura 6 apresenta três tipos de cruzamento entre indivíduos pais, que são: a) cruzamento de ponto de corte; b) cruzamento de pontos de corte; e c) cruzamento uniforme.

Figura 6 - Representação dos tipos de crossover



Fonte: Adaptado de Sastry, Goldberg e Kendall (2005)

O parâmetro de taxa de cruzamento determina se será feito o cruzamento entre dois indivíduos de uma dada população. Onde números pseudo-aleatórios são gerados no intervalo $[0, 1]$, o cruzamento é realizado se este valor sorteado for menor que a taxa, se não o *crossover* não é realizado e os indivíduos filhos serão iguais aos pais (de LACERDA; de CARVALHO, 1999; de PINHO et al. 2013).

c) Mutação

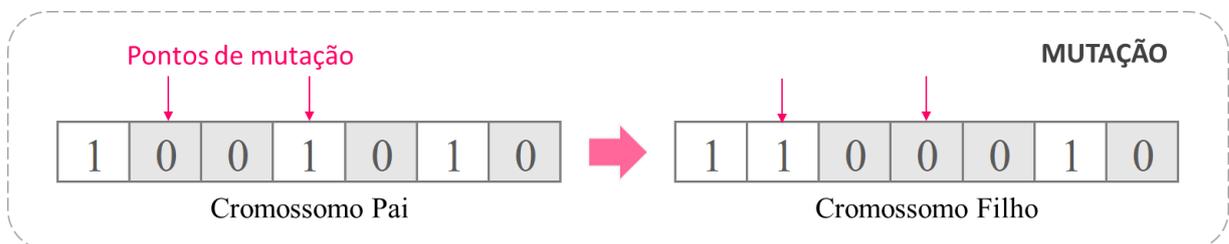
Segundo Sastry, Goldberg e Kendall (2005), o operador de cruzamento é utilizado para obter cromossomos cada vez melhores, entretanto se os dois pais ou pior, toda a população tiverem o mesmo alelo em um determinado gene, então um ponto crossover não vai mudar isso. Em outras palavras, esse gene terá o mesmo alelo para sempre. A mutação é projetada para

superar esse problema, a fim de adicionar diversidade à população e garantir que seja possível explorar todo o espaço de pesquisa.

A mutação melhora a diversidade da população, mas, por outro lado, destrói informação contida no cromossomo. Para evitar este efeito e assegurar a diversidade, uma taxa de mutação, normalmente entre 0,1% à 0,5% é utilizada (de LACERDA; de CARVALHO, 1999).

Na codificação binária simples, posições do indivíduo são sorteadas e os genes correspondentes são invertidos, ou seja, se o valor do gene for 1, então se muda este valor para 0, e vice-versa (MITCHELL, 1996). A Figura 7 destaca este tipo de mutação.

Figura 7 - Representação de uma mutação binária simples



Fonte: A Autora (2020).

d) Critério de parada

De acordo com Hicks (2006), os critérios de parada são abordagens que delimitam o número de buscas depois que certo número de gerações são concluídas em um GA. Para de Lacerda e de Carvalho (1999), alguns dos critérios de parada são: número limite de gerações, obtenção do valor ótimo da função objetivo, se este for conhecido, e quando não houver melhoria significativa entre uma geração e outra.

2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentados a base conceitual para contextualizar a problemática de seleção de subcontratados e de formulação de cronograma de projetos com restrições de recursos. Destacando a convergência dos temas para o desempenho em Gestão de Projetos em termos de duração, custo e relacionamento entre as partes do projeto.

Foi mostrado, essencialmente, que a seleção de subcontratados envolve a definição de critérios pelos quais as expertises e as aptidões dos subcontratados serão avaliados, de forma a escolher o subcontratado ideal para o pacote de atividade. Neste contexto, os métodos de apoio multicritério à decisão são frequentemente utilizados para resolver problemas de natureza que envolvem a avaliação de dado conjunto de alternativas em múltiplos critérios, por vezes

conflitantes. O *FITradeoff* é apresentado como o método a ser utilizado nesta pesquisa para elicitação das preferências do decisor frente a *tradeoffs* entre critérios, em decorrência do seu processo flexível e com menos inconsistências.

Contudo, a problemática de seleção do subcontratado é contextualizada juntamente com o problema de formulação de cronograma. De modo que, a seleção de subcontratados implica em um problema de otimização combinatória quando a limitação de recursos como custo e tempo, por exemplo, precisam ser respeitados. Por se tratar de um método bastante utilizado na resolução de problemas deste tipo, a abordagem de Algoritmos Genéticos foi apresentada, incluindo os componentes necessários para sua implementação.

No Capítulo seguinte serão apresentados, de forma breve, alguns trabalhos na literatura que utilizam as abordagens de Apoio Multicritério à Decisão, de Algoritmo Genético ou outra abordagem para resolver dois eixos da problemática: a seleção e o sequenciamento de subcontratados em projetos.

3 MODELO DE SELEÇÃO DE SUBCONTRATADOS E SEQUENCIAMENTO DE ATIVIDADES EM PROJETOS

O presente capítulo é dedicado à revisão da literatura dos dois eixos da problemática deste estudo: seleção de subcontratados e abordagens de formulação de cronogramas de projeto (*i. e.*, sequenciamento de atividades).

No primeiro eixo, são apresentados os estudos de seleção de subcontratados e/ou fornecedores em projetos, de modo a visualizar as particularidades de cada aplicação na construção da solução. No segundo eixo, são destacados os estudos para formulação de cronograma de projetos, sinalizando, também, as características do problema, sua modelagem, as abordagens adotadas para resolver e os resultados obtidos.

3.1 ESTUDOS DE SELEÇÃO DE SUBCONTRATADOS E/OU FORNECEDORES EM PROJETOS

A seleção dos subcontratados mais apropriados para as atividades do projeto influencia a duração, custo e eficiência econômica do projeto. Biruk *et al.* (2017) destacam a necessidade de desenvolver métodos de apoio à decisão no campo de seleção de subcontratados. Neste sentido, métodos têm sido propostos usando abordagens como modelos de decisão multicritério, programação linear, teoria de conjuntos *fuzzy*, algoritmos genéticos, dentre outros.

a) Modelos de decisão multicritério

Polat (2015) propôs uma abordagem de decisão integrada que emprega o AHP e o PROMETHEE em conjunto para a seleção do subcontratado mais adequado entre um conjunto de alternativas disponíveis, considerando vários critérios conflitantes. Nesta abordagem, o AHP foi utilizado para analisar a estrutura do problema de seleção de subcontratados e para determinar os pesos dos critérios, e o método PROMETHEE foi empregado para obter uma classificação completa e realizar análise de sensibilidade, alterando os pesos dos critérios. As alternativas (pontos) e os critérios (vetores) são plotados no plano GAIA, em que o comprimento de cada vetor é uma medida de sua força na diferenciação do subcontratados alternativos. O *stick* de decisão representa a direção de melhor compromisso, de modo que o decisor deve observar as alternativas que estão nesta direção e selecionar a de melhor desempenho.

Outra abordagem, segundo um problema de decisão multicritério, foi proposta por Polat *et al.* (2016), onde os métodos AHP e *Evidential Reasoning* (ER) foram combinados para resolver o problema de seleção. O método AHP foi utilizado para a mesma função do trabalho de Polat (2015). Já o método ER foi utilizado para ranquear as alternativas dos subcontratados. Para os autores, uma das vantagens mais importantes do método é que permite o uso de dados quantitativos e qualitativos.

Poucos modelos consideram a abordagem de decisão em grupo. Alencar e de Almeida (2010) apresentaram um modelo multicritério de decisão em grupo para a seleção de equipes de projetos. O modelo consiste na utilização dos métodos PROMETHEE II, para calcular os fluxos líquidos alternativos, com os fluxos líquidos, as projeções das alternativas, como os eixos de critérios, podem ser traçadas no plano GAIA, e PROMETHEE VI, usado para adicionar as margens de variação estipulados pelos decisores aos pesos dos critérios. Quando esta área é projetada no plano GAIA, o espaço de liberdade dos decisores é obtido. O *stick* de decisão pode ser orientado em qualquer direção dentro deste espaço, de modo que qualquer alternativa situada nessa direção é um bom compromisso nas preferências do grupo decisor. Contudo, o modelo proposto deve ser usado somente para os casos em que há pouca divergência entre os decisores.

b) Programação Linear

Ip, Yung e Wang (2004) propuseram um algoritmo de *branch and bound* para obter a solução do problema de seleção de subcontratados de um projeto de construção real de uma usina de carvão na China. O objetivo é selecionar a combinação ideal de subcontratados para todos os trabalhos de modo a minimizar o custo total do projeto, incluindo os custos do trabalho para todos os parceiros selecionados, o juro do empréstimo com o banco e a penalidade de atraso para o proprietário do projeto.

Biruk *et al.* (2017) usaram um modelo matemático para resolver o problema de seleção de subcontratados, com a função objetivo de minimizar o custo total do projeto atendendo restrição de prazo máximo do projeto. Na problemática dos autores, os pacotes de trabalho podem ser executados por um subcontratado ou por uma equipe do empreiteiro geral, de forma que a seleção consiste em determinar qual equipe (subcontratado/empreiteiro geral) irá executar o pacote, baseando-se no desempenho de custo e de duração das equipes, de modo que o cronograma do projeto seja otimizado segundo o critério de custo.

c) Teoria de conjuntos *fuzzy*

A lógica difusa é uma ferramenta poderosa que pode ser usada para quantificar dados imprecisos e tem a vantagem de representar matematicamente a incerteza e a imprecisão. Abordagens *Multiple Criteria Decision Making* (MCDM) com a teoria *fuzzy* é um novo ponto de vista que pode lidar adequadamente com a complexidade da decisão na indústria da construção, ainda na fase de criação (ULUBEYLI; KAZAZ, 2016).

Abbasianjahromi, Rajaie e Shakeri (2011) desenvolveram um modelo de seleção de subcontratados, o método PSI *fuzzy* (FPSI), uma combinação do método PSI (*Preference Selection Index*) e da teoria dos conjuntos *fuzzy*. O método proposto eliminou a fase de critérios de ponderação e a importância relativa de cada atributo é calculada com base nas opiniões dos tomadores de decisão sobre a avaliação de alternativas, tendo em vista que em algumas circunstâncias os atributos de ponderação são desafiadores e consomem tempo.

Ulubeyli e Kazaz (2016) também utilizaram a teoria dos conjuntos *fuzzy* como metodologia de solução do modelo de seleção de subcontratados auxiliado por computador chamado CoSMo. No modelo proposto, os tomadores de decisão expressam valores linguísticos para os critérios, para os autores, pontuar em termos linguísticos é a forma mais próxima de representar o julgamento humano. No processo de modelagem, os valores linguísticos dos critérios de seleção e a avaliação desses critérios para cada alternativa são convertidos para o formato quantitativo por meio de conjuntos *fuzzy*. Ao final do processo de seleção, em vez de selecionar o melhor subcontratado, o CoSMo apresenta todos os candidatos segundo um *ranking*, de modo que a decisão final (seleção) é feita pela comissão de avaliação.

d) Algoritmo Genético

Wang, Yung e Ip (2001) propuseram uma abordagem para seleção de subcontratados baseado em Algoritmo Genético e lógica *fuzzy*. O objetivo é o mesmo destacado no trabalho de Ip, Yung e Wang (2004). Neste, a ideia básica do algoritmo genético incorporado de decisão *fuzzy* (GA/FD) é selecionar a combinação de parceiros por GA no primeiro nível do algoritmo e programar todos os trabalhos com uma combinação de parceiros fixos por decisão *fuzzy* no segundo nível.

Polat, Kaplan, Bingol (2015) desenvolveram um modelo de otimização multiobjetivo para a seleção de subcontratados usando o algoritmo genético. O modelo proposto permite que os empreiteiros gerais selecionem a combinação de subcontratados considerando as interações entre eles e seus impactos no desempenho geral do projeto em termos de tempo, custo e qualidade. Neste estudo, o algoritmo NSGA-II (*Non-dominated Sorting Genetic Algorithm*) é

usado para fornecer as soluções ótimas não dominadas muito próxima da fronteira de Pareto. São apresentadas seis soluções diferentes, que representam a fronteira de Pareto, para que os empreiteiros gerais possam selecionar a melhor solução de compromisso.

Em outro momento, Abbasianjahromi *et al.* (2016) propuseram um modelo para seleção do melhor portfólio de subcontratados em projetos de construção, de modo a alcançar um equilíbrio entre risco e retorno. Assim, a seleção de portfólio de subcontratados foi baseada na maximização do retorno esperado e na minimização do risco. Esses objetivos foram inseridos na função *fitness* do GA. Como resultado, os melhores portfólios que constituem a fronteira de eficiência destacaram a relação de menor risco quando menos subcontratados são selecionados, e menor custo quando mais subcontratados são selecionados (admite-se que um único subcontratado pode executar mais de uma tarefa no projeto).

e) Outros métodos/abordagens

Arslan *et al.* (2008) propuseram um sistema WEB para avaliação de subcontratados chamado WEBSSES – *Web-based Subcontractor Evaluation System*, pelo qual os subcontratados são avaliados com base em um critério combinado dos principais critérios de custo, de qualidade, de tempo e de adequação. Cada subcontratado é avaliado segundo cada critério de modo a obter um *score* e o critério combinado consiste na soma aritmética dos *scores*, entendendo assim, que todos os critérios possuem o mesmo peso. Entretanto, na problemática de seleção de subcontratados, segundo Hartmann, Ling e Tan (2009), o custo é, de longe, o critério mais importante, respondendo por quase 50% da preferência dos contratantes principais. Este é um ponto de destaque muito importante.

Com base na revisão da literatura desse primeiro eixo da problemática, dentre os benefícios de utilizar métodos multicritério destacam-se a consideração de uma combinação de vários critérios conflitantes, a eliminação da dependência do critério único (lance de menor custo), a avaliação sistemática do problema, os *tradeoffs* entre os critérios segundo os julgamentos do decisor ou do grupo decisor, a participação direta na obtenção da solução, e a melhor representação visual do problema de seleção do subcontratado. No entanto, não foram encontrados estudos com aplicação de métodos multicritérios considerando aspectos de formulação de cronograma, como por exemplo restrição de recurso limitados, restrições de orçamento ou de tempo máximo de duração do projeto.

Modelos de seleção segundo a abordagem de Algoritmos Genéticos conseguem atender a essa desvantagem dos métodos multicritérios. Entretanto, a maioria dos estudos utilizam no máximo três critérios, sendo estes o custo, a duração e a qualidade, desconsiderando outros

fatores qualitativos na avaliação dos subcontratados, como as relações de parceria e o *know-how* dos subcontratados, para a execução do pacote de trabalho. Outra característica dos Problemas de Otimização Combinatória é o crescimento exponencial do número de possíveis soluções com o aumento da instância, por exemplo o aumento no número de atividade ou de subcontratados. Os Algoritmos Genéticos, por sua vez, são algoritmos que permitem lidar com esses problemas sem requerer muito esforço computacional, ao contrário dos métodos exatos.

3.2 ESTUDOS DE FORMULAÇÃO DE CRONOGRAMA DE PROJETOS

A relação de compromisso tempo-custo conquistou atenção considerável na indústria da construção para fins de gerenciamento (HUANG; ZOU; ZHANG, 2016). Para Kannimuthu *et al.* (2018) a situação realista envolve a otimização de vários objetivos conflitantes em um ambiente de agendamento de projeto com recursos limitados. Isso significa que o tempo, o custo e os recursos de construção devem ser considerados simultaneamente nas fases de planejamento e programação do projeto (ZHENG; NG, 2005).

Esses problemas são tipos especiais de problemas gerais de otimização reconhecidos como problemas NP-*hard* que requerem análise de troca de tempo e custo-recurso (ASHURI; TAVAKOLAN, 2011). O principal motivo é devido à alta complexidade, que é afetada por muitos fatores, como o vasto espaço de solução, a escassez de recursos, objetivos conflitantes, as relações de dependência e de prioridade, e o alto nível de incerteza (ZHENG *et al.*, 2013; BODAGHI *et al.*, 2018).

De acordo com Ashuri e Tavakolan (2011), existem três métodos para resolver esses problemas complexos de otimização, que são: Modelos de programação matemática, abordagens heurísticas e algoritmos evolutivos.

a) Modelos de programação matemática

Os modelos de programação matemática são aplicáveis a problemas de otimização de recursos limitados (ELBELTAGI; HEGAZY; GRIERSON, 2005). Abordagens convencionais foram utilizadas para resolver o problema de forma otimizada, como: programação inteira e dinâmica e as abordagens de enumeração implícitas (LEE; GATTON 1994; NUDTASOMBOON; RANDHAWA 1996; SUNG; LIM 1996; DEMEULEMEESTER; HERROELEN 1997).

Reda (1990) apresentou uma formulação de programação linear para concluir o projeto dentro de uma meta de duração pré-especificada e com um custo direto mínimo. Elazouni e

Gab-Allah (2004) apresentaram um método para desenvolver cronogramas financeiramente viáveis usando programação inteira. O método modifica os cronogramas de CPM, de modo que os projetos possam ser adequadamente financiados por meio de descobertos bancários com limites de crédito predeterminados.

No entanto, esses métodos não são capazes de gerar uma ampla gama de soluções viáveis (ELBELTAGI; HEGAZY; GRIERSON, 2005).

b) Abordagens heurísticas

Considerando uma rede de projetos composta por múltiplos projetos simultâneos, com o objetivo de minimizar o atraso total de todos os projetos, Chen *et al.* (2018), propuseram uma heurística para sincronizar a seleção de fornecedores com o planejamento de cronograma de projetos. A heurística explora a estrutura natural do problema.

Entretanto, devido à complexidade computacional do problema, a heurística foi decomposta em subproblemas mais fáceis, a saber: seleção de fornecedores, programação de atividades em projetos e sequenciamento de revisões de projetos. Esses subproblemas foram resolvidos sequencialmente e, posteriormente, os preços-sombra de determinadas restrições destes subproblemas foram usados para melhorar de forma iterativa a qualidade da solução. Por fim, testes de desempenho da heurística em projetos de tamanhos pequeno e grande foram realizados. Concluiu-se que cada subproblema é muito menor em tamanho do que o problema original e, portanto, pode ser resolvido rapidamente, e que o agendamento simultâneo do projeto pode ser tratado via computação paralela.

c) Algoritmos Evolutivos

Em comparação com métodos matemáticos e heurísticos, os algoritmos evolutivos têm uma maior capacidade de otimizar problemas complexos, resultando em soluções generalizadas (SHI *et al.* 2005; ZHENG; NG; KUMARASWAMY, 2004; ZITZLER; DEB; THIELE, 2000; KONAK; COIT; SMITH, 2006). Para Lu e Li (2003), os desenvolvimentos mais recentes recorreram a técnicas de *Artificial Intelligence* (AI) emergentes, à exemplo os Algoritmos Genéticos (GA).

Chan, Chua e Kannan (1996) e Hegazy (1999) utilizam GA para alcançar a otimização da alocação e nivelamento de recursos simultaneamente e produzir uma duração mais curta do projeto e um perfil de recursos melhor nivelado. Feng, Liu e Burns (1997) usando a abordagem de GA e a fronteira de Pareto, desenvolveram um algoritmo para otimizar as decisões de custo

de tempo de construção, segundo o *time-cost trade-off problems* (TCTP) em processos de construção.

Para o problema do *Time-Cost Optimization* (TCO), Zheng, Ng e Kumaraswamy (2004) propuseram uma abordagem multiobjetivo usando GA. O modelo apresenta também uma abordagem de peso adaptativo, do inglês *Adaptive Weight Approach* (AWA), em seguida propõe-se uma versão modificada – *Modified Adaptive Weight Approach* (MAWA) – que apresenta maior pressão de busca para resistir ao poder de convergência inerente dos GAs, em comparação com o AWA. Os pesos adaptativos no MAWA representam a importância relativa de cada critério e ajustam o escopo da próxima pesquisa de acordo com o desempenho da população atual na obtenção de uma otimização global. Os resultados mostram que a abordagem proposta é capaz de resolver problemas de TCO multiobjetivo e que o MAWA proporciona uma maior capacidade em explorar. Entretanto, algumas fragilidades são destacadas, como por exemplo, o modelo proposto requer que tomadores de decisão determinem a melhor solução final.

Long e Ohsato (2009) apresentam um método baseado no GA para agendar projetos de construção repetitivos, de forma a minimizar vários objetivos, como a duração do projeto, o custo do projeto ou ambos. O método considera as atividades com atributos diferentes, permitem ou não interrupções, e as diferentes relações entre custos diretos e durações de atividades para fornecer um cronograma satisfatório. Senouci e Al-Derham (2008) também utilizaram a abordagem do GA para propor um modelo de otimização multiobjetivo para o escalonamento de projetos de construção linear. O modelo considera a capacidade adicional de permitir várias opções de utilização de recursos (com limite) e um procedimento geral de análise de compromisso de tempo-custo. Por fim, o estudo apresenta uma curva de compromisso de tempo-custo com 12 soluções ideais/quase ideais.

Outra problemática de otimização multi-objetivo no contexto de planejamento de projetos de construção é o *Time-Cost-Resource Optimization* (TCRO) que analisa o *tradeoff* de tempo e custo-recurso. Segundo Hegazy (1999), as funções objetivo do modelo TCRO são formuladas para minimizar simultaneamente o tempo e o custo totais do projeto, juntamente com o nivelamento e a alocação de recursos para diferentes atividades.

Kandil e El-Rayes (2006) apresentam uma estrutura de GA multiobjetivo paralelo desenvolvida em quatro módulos principais:

- (1) um módulo de otimização multiobjetivo para minimizar simultaneamente o custo e a duração da construção;
- (2) um módulo de algoritmo genético paralelo global para permitir uma distribuição eficiente dos cálculos do algoritmo genético sobre um número variável de processadores paralelos;
- (3) um módulo de computação paralela de granulação grossa para fornecer melhorias adicionais na eficiência de computação

paralela para projetos de construção em larga escala; e (4) um módulo de avaliação de desempenho para testar e comparar o desempenho de dois paradigmas de algoritmos genéticos paralelos (KANDIL; EL-RAYES, 2006).

O objetivo dos autores é otimizar a utilização de recursos em projetos de construção de grande escala. O desempenho da estrutura foi avaliado usando 183 experimentos que representaram várias combinações de tamanhos de projetos, números de processadores paralelos e configurações de algoritmos genéticos. Os resultados experimentais destacam que o algoritmo genético paralelo global é capaz de fornecer soluções de qualidade superior ao módulo paralelo de granulação grossa em detrimento de sua eficiência computacional.

Zahraire e Tavakolan (2009) se propuseram a resolver um modelo de otimização TCRO usando o algoritmo NSGA-II, com o objetivo de alcançar a fronteira de Pareto com o menor tempo e custo total e o nível mais adequado de variações na utilização de recursos, considerando as relações de prioridade existentes entre diferentes atividades de um projeto. O modelo também incorpora conjuntos *fuzzy* associados a variáveis de tempo e custo. As soluções ótimas obtidas com o modelo TCRO mostram o tempo e o custo ideais de todo o projeto, além disso, também visualiza-se os cenários selecionados para todas as atividades. Entretanto, os autores destacam que o algoritmo NSGA-II tende a ser menos eficiente para os problemas com alto número de variáveis de decisão, e que outros métodos GA multiobjetivo podem ser considerados para tais casos.

Por fim, podemos incluir à lista de métodos de Ashuri e Tavakolan (2011), os métodos híbridos, onde mais de um método ou mais de uma metaheurística são utilizados, para resolver determinada problemática.

d) Métodos híbridos

Kerkhove e Vanhoucke (2017) propuseram um modelo de simulação climática, baseada em processos estocásticos, de modo a considerar as incertezas decorrentes das variáveis climáticas que tornam o planejamento de projetos de construção *offshore* altamente complexo. Em seguida, utilizaram abordagens heurísticas de escalonamento para otimizar o planejamento do projeto *offshore*, tendo como objetivo a maximização do valor presente líquido. A comparação entre as abordagens apontou as técnicas de solução que usam o *SAT - chromosome* (busca dedicada e *SAT - annealing*) superam as outras abordagens de solução para problemas de escalonamento de projetos *offshore*.

O *Discrete Time-Cost Trade-off Problem* (DTCTP) é um problema multiobjetivo normalmente encontrado em projetos práticos. Huang, Zou e Zhang (2016) desenvolveram um

modelo matemático considerando *soft logic* para endereçar o DTCTP em projetos de construção repetitivos, onde o objetivo era selecionar um conjunto de modos de atividade, horários de início e sequências de trabalho entre unidades, de modo a minimizar o custo total enquanto a restrição de prazo é atendida. Devido à complexidade do problema ser NP-hard, foi desenvolvido um GA melhorado para o resolvê-lo, no qual apenas os modos de atividade e sequências de trabalho entre unidades são codificados, também foi utilizada uma abordagem de programação linear para determinar os tempos de início de todas as subatividades.

Ashuri e Tavakolan (2012) apresentam uma abordagem híbrida GA-PSO (PSO – *Particle Swarm Optimization*) para resolver problemas complexos de TCRO no planejamento de projetos de construção que também utiliza a teoria dos conjuntos *fuzzy* para caracterizar a incerteza sobre os dados de entrada. O desempenho da abordagem híbrida GA-PSO, em termos do tempo de processamento necessário para resolver problemas de planejamento de projeto, foi comparado com o algoritmo NSGA-II de Zahraire e Tavakolan (2009) e com o algoritmo PSO (de Yang (2007)). Os resultados mostraram que a abordagem híbrida GA-PSO é mais rápida do que os métodos existentes e que a abordagem proposta é capaz de resolver problemas TCRO simultâneos com funções contínuas de tradeoff de tempo e custo, o que para os autores, esta é uma grande melhoria em relação aos métodos existentes.

Como visto na literatura, a criação de cronogramas otimizados é complicada em virtude do tamanho do espaço de soluções. Neste aspecto, o poder de busca dos Algoritmos Genéticos é a principal motivação para auxiliar os tomadores de decisão na identificação de soluções ótimas ou quase ótimas para resolver problemas com grandes espaços de busca, a exemplo do problema de *tradeoff* de custo, duração e recursos na construção de cronogramas de projetos ótimos.

Ashuri e Tavakolan (2012) destacam que a abordagem de GA tem sido aplicada como método avançado de otimização computacional para superar as limitações dos métodos convencionais e resolver problemas simultâneos de TCRO no planejamento de projetos de construção. Por outro lado, os métodos de programação não-linear são muito difíceis para resolver o problema acima devido à exploração de restrições não-lineares e variáveis de decisão (LONG; OHSATO, 2009).

Observa-se ainda a utilização frequente dos conjuntos *fuzzy*, como Cheng; Tsai e Hsieh (2009), Zahraire e Tavakolan (2009), Ashuri e Tavakolan (2012), Mungle *et al.* (2013), e Ulubeyli e Kazaz (2016), para lidar com as incertezas decorrentes das estimativas de duração das atividades em projetos, bem como de outros dados de entrada. Neste sentido, destaca-se a

importância do processo de estimativas dos dados de execução das atividades do projetos ser bem estruturado, de forma a apresentar boas estimativas para o modelo.

3.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentados algumas pesquisas que propuseram modelos para a seleção de subcontratados e abordagens para resolver problemas de formulação de cronograma de projetos com restrições.

O objetivo desta revisão da literatura foi analisar os modelos propostos para a problemática de seleção de subcontratados, de forma a identificar vantagens e desvantagens das abordagens utilizadas nos modelos que, como visto, podem ser de apoio multicritério à decisão, métodos exatos e heurísticos e, considerar ou não, abordagens de métodos *fuzzy*, e de encontrar lacunas entre os modelos propostos.

Considerando os remarkes, na base conceitual, sobre a importância de avaliar o desempenho dos subcontratados mediante um conjunto de critérios qualitativos e quantitativos, a abordagem de apoio multicritério à decisão, neste aspecto, distinguiu-se das demais aplicações.

Quanto as abordagens apresentadas para a formulação do cronograma, destaca-se a crescente utilização de Algoritmos Evolutivos, como o GA e o NSGA-II para resolver problemas multiobjetivo. O GA é baseado em criação de uma população e na evolução desta através dos operadores genéticos, de modo a obter o melhor indivíduo das gerações como resultado para o problema. Diferente do GA, o NSGA-II consiste na obtenção de uma curva de Pareto constituída por soluções não dominadas.

Neste momento, a lacuna observada é a ausência da utilização conjunta das abordagens de Apoio Multicritério à Decisão, muito fortemente baseada nas preferências do decisor segundo um conjunto de critérios e de otimização combinatória para encontrar a solução para a problemática de seleção e sequenciamento dos subcontratados.

4 METODOLOGIA PROPOSTA PARA SELEÇÃO E SEQUENCIAMENTO DE SUBCONTRATADOS EM PROJETOS

A problemática de seleção de subcontratados para pacotes de atividades em projetos envolve a combinação de vários critérios, com o propósito de escolher o melhor subcontratado para determinado pacote de trabalho. Estes critérios podem ser por vezes conflitantes, a exemplo dos critérios custo e tempo, exigindo processos de *tradeoffs* entre os critérios, de modo que a constante de escala dos critérios reflitam as preferências do decisor ou do grupo decisor, como visto nos trabalhos de Polat (2015), Alencar e de Almeida (2010), Polat *et al.* (2016), Abbasianjahromi, Rajaie e Shakeri (2011) e Ulubeyli e Kazaz (2016).

A subjetividade do decisor é importante para obtenção da solução. A princípio, o decisor é um especialista no assunto e detém conhecimentos e experiências que, por vezes, não podem ser modelados de forma matemática. Essa subjetividade é capturada por meio dos *tradeoffs* entre diferentes espaços de consequência que são apresentados ao decisor.

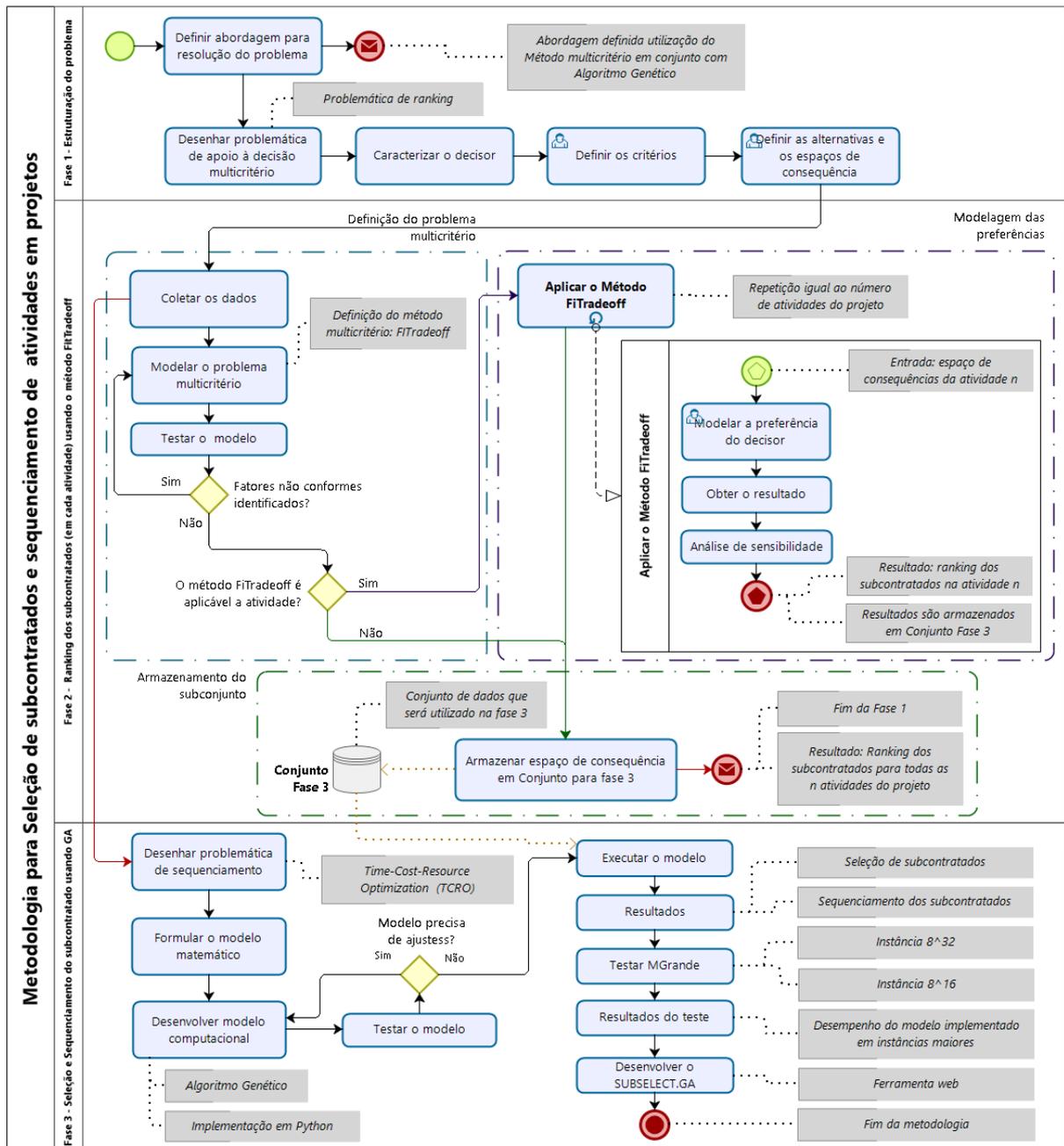
De Medeiros e Alencar (2019a) e de Medeiros e Alencar (2019b) propuseram a aplicação do Método *FITradeoff* para selecionar, o subcontratado para cada atividade na rede de projeto considerando cinco critérios, onde constatou-se que para cada atividade as constantes de escalas dos critérios apresentavam configurações diferentes e que o *tradeoff* curto-duração foi o de maior embate nas relações de preferência do decisor. Neste sentido, a utilização de métodos multicritério destacam-se como alternativa para realizar tais processos de julgamento das preferências do decisor e obter a solução.

Contudo, os métodos multicritério não sincronizam o problema de seleção de subcontratado com o problema de sequenciamento do cronograma de projeto. Nesta problemática, a metaheurística de GA tem sido amplamente utilizada, e com sucesso, para resolver o TCRO em cronogramas de projetos e para obter um cronograma eficiente de forma multiobjetiva, ou seja, a função objetivo do problema é formulada de modo a minimizar o custo e a duração e a maximizar a qualidade, a exemplo os estudos de Polat, Kaplan e Bingol (2015), Zheng, Ng e Kumaraswamy (2004), Long e Ohsato (2009), Senouci e Al-Derham (2008), Kandil e El-Rayes (2006) e Zahraire e Tavakolan (2009). Entretanto, considerar muitos fatores de otimização levam a uma escala de problema maior, onde o tempo para se obter uma solução pode ser muito grande, ou a solução ser inviável.

Considerando tais argumentos, optou-se por uma abordagem conjunta do método multicritério com o GA para resolver a problemática de seleção e sequenciamento de subcontratados em projetos apresentada neste estudo. A metodologia para a seleção e

sequenciamento de subcontratados é baseado na abordagem de Hillier e Lieberman (2013), que descrevem as principais fases para a formulação dos problemas para os estudos da Pesquisa Operacional – PO, e no *framework* proposto por de Almeida (2013), para problemas de decisão multicritério. A Figura 8 apresenta o fluxograma da metodologia proposta para o problema.

Figura 8 - Metodologia para seleção e sequenciamento de subcontratados em projetos



Fonte: A Autora (2020).

A metodologia é dividida em três fases, a Fase 1 compreende a estruturação da problemática e segue os passos do *framework* para resolução de problemas de apoio à decisão

multicritério, onde tem-se a definição das abordagens que serão utilizadas na resolução, o desenho da problemática multicritério, a caracterização do decisor, a definição dos critérios, as alternativas e os espaços de consequência.

A Fase 2 consiste na utilização do método *FITradeoff* com o propósito de ordenar os subcontratados. Nesta fase, tem-se a subfase definição do problema multicritério, onde tem-se a coleta de dados, a modelagem do problema, e o teste do modelo para verificar inconsistências. A subfase seguinte é a modelagem das preferências, que consiste na aplicação do *FITradeoff*, resultado no armazenamento da informação dos *ranking* dos subcontratados e na formação do conjunto Fase 3. Em decorrência das características do problema, o método não é aplicado em todos os tipos de atividade que compõem o projeto, sendo essas atividades armazenadas automaticamente no conjunto Fase 3.

A Fase 3 corresponde à implementação de um GA para resolver o problema de seleção e sequenciamento dos subcontratados no projeto e obter, conseqüentemente, o cronograma, a duração e o custo do projeto. A seguir, as três fases da metodologia são explicadas em detalhes.

4.1 FASE 1 – ESTRUTURAÇÃO DO PROBLEMA

A Fase 1 consiste na estruturação do problema de seleção e sequenciamento de subcontratados, considerando os aspectos de desempenho de projetos como o cronograma, o orçamento e o relacionamento em projetos e na escolha das abordagens apoio à decisão multicritério e de algoritmo genético para resolver a problemática e na estruturação do problema geral.

O problema proposto consiste na avaliação e seleção dos subcontratados no Projeto A, que corresponde a construção de um edifício vertical com três níveis: porão, pavimento 1 e pavimento 2. A Tabela 4 apresenta cada nível, bem como as atividades e as relações de precedência.

Tabela 4 - Atividades do projeto

NÍVEL	Nº DA ATIVIDADE	ATIVIDADE	ATIVIDADE PREDECESSORA
<i>Porão</i>	1	Cofragem para parede ou pilar de cisalhamento	–
	2	Reforço para parede ou coluna	1
	3	Concretagem de parede ou coluna de cisalhamento	1, 2
	4	Cofragem para laje	3
	5	Armação para laje	3
	6	Placa de concreto	5
<i>Pavimento 1_A</i>	7	Cofragem (parede e pilar)	5, 6

Pavimento 1_A	8	Reforço (parede e pilar)	4, 7
	9	Concretagem (parede e pilar)	8
	10	Cofragem (viga e laje)	9
	11	Armação (viga e laje)	9
	12	Concretagem (viga e laje)	7
Pavimento 2_A	13	Cofragem (parede e pilar)	12
	14	Reforço (parede e pilar)	12, 13
	15	Concretagem (parede e pilar)	14
	16	Cofragem (viga e laje)	15
	17	Armação (viga e laje)	16
	18	Concretagem (viga e laje)	16,17
Pavimento 1_B	19	Trabalho com bloco	12
	20	Reboco	19
	21	Revestimento cerâmico	20
	22	Massa - 2 camadas	21
	23	Primer	22
	24	Primeira demão	23
	25	Camada final	24
Pavimento 2_B	26	Trabalho com bloco	18, 19
	27	Reboco	20, 26
	28	Revestimento cerâmico	21, 27
	29	Massa - 2 camadas	22, 28
	30	Primer	23, 29
	31	Primeira demão	24, 30
	32	Camada final	25, 31

Fonte: Adaptado de Kannimuthu *et al.* (2019).

A rede do Projeto A pode ser construída a partir das restrições de precedência, porém o tempo de execução de cada atividade está diretamente relacionado com os subcontratados que serão escolhidos, assim, inicialmente, o caminho crítico receberá *status* de não identificado.

O conjunto de atividades do projeto é definido como $A = \{1, 2, 3, \dots, 32\}$.

Em projetos de construção, determinadas atividades são repetidas a cada novo pavimento, esta característica é observada no conjunto de atividades do Projeto A. Assim, o conjunto de atividades é reagrupado em subconjuntos derivados do conjunto A , a partir da tipologia das atividades, onde:

$K = \{1, 2, 3, \dots, 13\}$ é o conjunto de tipos de atividades do projeto; e

$N_k \subseteq A$ é o conjunto de atividades do tipo $k \in K$.

Para cada atividade $i \in A$ existe um conjunto de subcontratados S_i , tal que todos esses conjuntos pertencem ao conjunto de todos os possíveis subcontratados S , ou seja:

S é o conjunto de todos os possíveis subcontratados; e

$S_i \subseteq S$ é o conjunto de subcontratados candidatos a realizar a atividade i .

ocuparem as três primeiras posições no *ranking* formarão um subconjunto, do conjunto original, e serão utilizados na Fase 3. É válido ressaltar que o ordenamento proposto permite a ocorrência em empates, logo, mais de um subcontratado pode ocupar a mesma posição no *ranking*.

É importante que o decisor seja um especialista em gerenciamento de projetos ou que tenha experiência em desenvolvimento e gerenciamento de cronograma, e que tenha boa compreensão dos fatores do projeto que influenciam seu desempenho. Deste modo, os julgamentos serão mais ricos em termos de informação fornecida pelo decisor.

Considerando os aspectos os principais objetivos do projeto apontados por Wit (1988), bem como os fatores relacionados aos subcontratados que influenciam o desempenho do projeto, foram escolhidos cinco critérios para avaliar os subcontratados: custo, duração, qualidade, *know-how* e cooperação. O Tabela 5 apresenta a definição para cada critério. Destaca-se que, é necessário que o decisor valide os critérios, já que mudanças eventuais podem ocorrer no que se refere o indicador do critério.

Tabela 5 - Critérios escolhidos para a problemática de ordenamento dos subcontratados

CRITÉRIO	DEFINIÇÃO	TIPO	UNIDADE DE MEDIDA
CUSTO	Valor estimado pelo subcontratado para executar a atividade.	Quantitativo	Unidade monetária
DURAÇÃO	Tempo estimado pelo subcontratado para executar a atividade.	Quantitativo	Dias
QUALIDADE	Relação entre escopo da atividade e trabalho realizado, ou seja, ao atendimento dos requisitos do projeto.	Quantitativo	Porcentagem
KNOW-HOW	Percentual da equipe com mais de 5 anos de experiência.	Quantitativo	Porcentagem
COOPERAÇÃO	Percentual de projetos desenvolvidos em parceria.	Quantitativo	Porcentagem

Fonte: A Autora (2020).

O desempenho dos subcontratados nos critérios pode ser visto no link disponibilizado no Apêndice. Os critérios de *Know-how* e Cooperação podem ser avaliados com base em outros aspectos na relação entre subcontratados e contratantes, alguns exemplos são destacados na Figura 10. Neste trabalho foram utilizados os aspectos grifados em azul, como já destacado na definição do critério na Tabela 5.

Figura 10 – Exemplos de aspectos para avaliação os critérios Know how e Cooperação

KNOW HOW

- Investimento em inovação (novas tecnologias);
- Investimento em treinamento da mão de obra;
- Experiência em outros projetos;
- Conhecimento técnico para realizar a atividade;
- Métodos de trabalho, materiais, máquinas e ferramentas aplicados;
- Tempo de atuação no mercado.

COOPERAÇÃO

- Gerenciamento de crises;
- Compromisso com os acordos do projeto;
- Parceria em projetos passados (entre o contratante e o subcontratado);
- Reputação do mercado;
- Flexibilidade na resolução de problemas;
- Agilidade na resolução de problemas
- Litígios.

Fonte: A Autora (2020).

Desta forma, os subcontratados podem ser avaliados de forma quantitativa, como utilizado nesta dissertação, ou de forma qualitativa, conforme a escala construída para avaliação. Essa escolha vai depender de como o decisor da empresa deseje avaliar os subcontratados nesses critérios. A Figura 11 apresenta alguns exemplos de escalas que podem ser construídas para avaliar o desempenho do subcontratado no critério de *Know how* (o exemplo segue a sugestão de aspectos da Figura 10), considerando que quanto melhor o nível da escala, melhor a avaliação.

Figura 11 – Exemplo de escala de avaliação para o critério Know how

KNOW HOW	ESCALA				
	BAIXO	1	2	3	4
Investimento em inovação (novas tecnologias) nos últimos 5 anos	R\$ 0 - R\$ 10 mil	R\$ 11 mil - R\$ 25 mil	R\$ 25 mil - R\$ 50 mil	R\$ 50 mil - R\$ 100 mil	Mais de R\$ 100 mil
Investimento em treinamento da mão de obra nos últimos 5 anos	R\$ 0 - R\$ 10 mil	R\$ 11 mil - R\$ 25 mil	R\$ 25 mil - R\$ 50 mil	R\$ 50 mil - R\$ 100 mil	Mais de R\$ 100 mil
Experiência em outros projetos	0 - 2 projetos	3 - 5 projetos	6 - 8 projetos	9 - 10 projetos	mais de 10 projetos
Conhecimento técnico para realizar a atividade (% da equipe com mais de 5 anos de experiência)	0% - 20%	21% - 40%	41% - 60%	61% - 80%	81% - 100%
Métodos de trabalho, materiais, máquinas e ferramentas aplicados	muito baixo	baixo	moderado	alto	muito alto
Tempo de atuação no mercado	0 - 1 ano	1 - 5 anos	6 - 10 anos	11 - 20 anos	mais de 20 anos

Fonte: A Autora (2020).

Como dito anteriormente, este é um exemplo de escala de avaliação que pode ser utilizado, porém é necessário considerar outros fatores para construir a escala, como por exemplo o tamanho e a complexidade do projeto, e o tempo de atuação da empresa contratante.

A etapa seguinte é o levantamento das alternativas do processo de decisão e a compreensão dos espaços de consequência. Cada atividade do projeto possui um conjunto de alternativas, que são os subcontratados que participam do processo de seleção, e um espaço de consequência. O espaço de consequência é o conjunto de alternativas e seus respectivos desempenhos em cada critério.

O Tabela 6 apresenta um espaço de consequência genérico para uma dada atividade i , em que:

$$A_{jc}^i \rightarrow \text{Desempenho do subcontratado } j \text{ no critério } c \text{ na atividade } i$$

Tabela 6 - Espaço de consequência genérico para dada atividade i

<i>Atividade i</i>	Critério 1	Critério 2	Critério 3	Critério 4	Critério 5
Subcontratado 1	A_{11}^i	A_{12}^i	A_{13}^i	A_{14}^i	A_{15}^i
Subcontratado 2	A_{21}^i	A_{22}^i	A_{23}^i	A_{24}^i	A_{25}^i
...
Subcontratado j	A_{j1}^i	A_{j2}^i	A_{j3}^i	A_{j4}^i	A_{j5}^i

Fonte: A Autora (2020).

Deste modo, a problemática foi estruturada para ser resolvida em duas etapas. A primeira etapa, denominada como FASE 2, consiste na aplicação do método multicritério para avaliar os subcontratados segundo critérios que influenciam o desempenho do projeto e na presença do decisor, tendo como saída um *ranking* dos subcontratados para cada atividade do projeto. As informações referentes ao desempenho das três primeiras posições do *ranking* são armazenadas e utilizadas na etapa seguinte, uma vez que o método considera a incomparabilidade entre alternativas, podendo assim ocorrer empates entre alternativas na mesma posição do *ranking*. O objetivo desta etapa é levar o melhor subconjunto de subcontratados, segundo os julgamentos de preferência do decisor, para a fase seguinte.

A FASE 3, segunda etapa, compreende a utilização de um GA para realizar a seleção e o sequenciamento dos subcontratados, respeitando as restrições de orçamento do projeto, a penalidade por atraso e o bônus por antecipação do cronograma, em que, os inputs serão os dados armazenados na etapa anterior. O resultado obtido nesta etapa é a resposta para a problemática definida.

4.2 FASE 2 – RANKING DOS SUBCONTRATADOS USANDO O MÉTODO FITTRADEOFF

Na Fase 2, como já destacado, deseja-se obter um ordenamento dos subcontratados. Para isto, inicialmente, a fase é subdividida nas etapas de definição do problema, de modelagem das preferências e no armazenamento do subconjunto.

a) Definição do problema

A modelagem do problema consiste na escolha do método multicritério utilizado para resolver a problemática construída. Para isto, o método *FITtradeoff* para problemática de ordenamento será utilizado. Considerando a racionalidade decisória da problemática, o *FITtradeoff* é um método multicritério de elicitação de constantes de escala no modelo aditivo, em que *tradeoffs* são realizados de forma a obter a taxa de substituição de um critério por outro. Demais justificativas para escolha deste método já foram dadas ao longo deste trabalho.

O teste do modelo tem o propósito de verificar a ocorrência de inconsistência que impede a aplicação do método *FITtradeoff* em alguma atividade do projeto ou outra inconsistência adversa. Caso seja identificada, mudanças devem ser realizadas na modelagem do problema, de modo a inserir o procedimento que deve ser seguido para os casos de inconsistência. Assim, no teste realizado foi identificado que para atividades em que o conjunto de subcontratados é menor do que 3 alternativas, não é necessário aplicar o método, uma vez que o método busca avaliar os subcontratados e reduzir o conjunto original em um subconjunto com pelo menos 3 alternativas. Assim, determinou-se um *gate* de decisão:

***FITtradeoff* é aplicável na atividade?** $\begin{cases} \text{Sim; quantidade de alternativas} > 3 \\ \text{Não; c. c} \end{cases}$

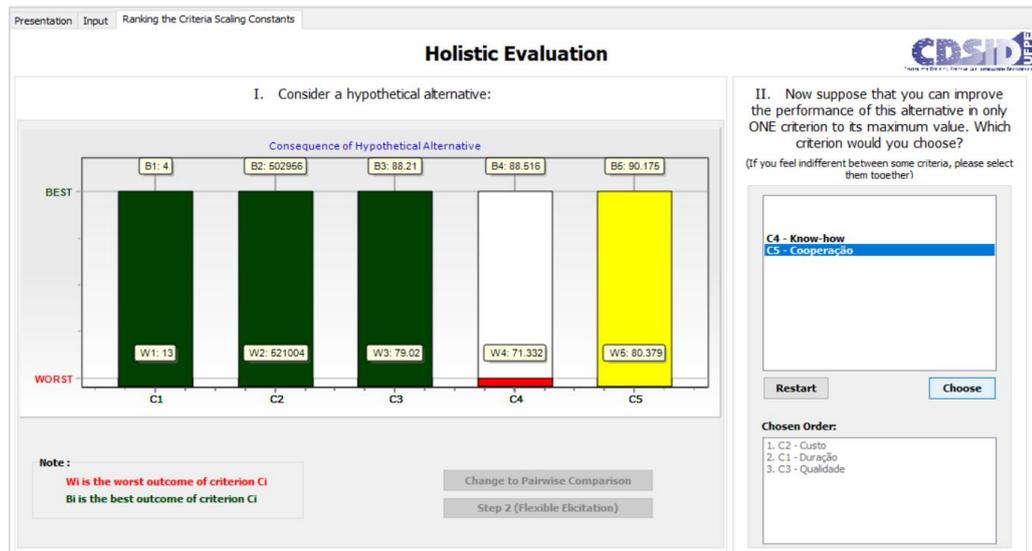
Para as atividades em que a saída do *gate* de decisão é “sim” o processo segue para a etapa de aplicação do método *FITtradeoff*. Cada atividade compreende uma execução, ou seja, se $n - 2$ atividades do projeto passaram pelo *gate* na saída sim, então o método será aplicado $n - 2$ vezes, por isso, no fluxograma (Figura 8), os marcadores de início e fim possuem um pentágono, para indicar que ocorrem múltiplos inícios e términos. Caso contrário, segue para etapa de Armazenamento do subconjunto.

b) Modelagem das preferências

A Modelagem das preferências compreende na aplicação do método *FITtradeoff* para problemática de ordenamento, que apresenta duas fases principais baseadas na interação *software* – decisor. O procedimento é realizado por um único decisor, Engenheiro Civil de

formação, com MBA em Gestão de Projetos e 15 anos de experiência como gestor de obra na construção civil vertical no Brasil. A primeira fase ou *Step 1* consiste no *ranking* das constantes de escala dos critérios segundo o julgamento do decisor. A Figura 12 apresenta uma captura de tela do *software* nesta fase durante a aplicação de um módulo piloto de teste.

Figura 12 - Step 1: Ranking dos critérios



Fonte: Software FITradeoff (2019).

A segunda fase ou *Step 2* no *FITradeoff* consiste na modelagem de preferências do decisor, onde serão realizados julgamentos quanto a preferência entre a Consequência A ou Consequência B, tais *tradeoffs* exploram o espaço de consequência da atividade e avaliam a taxa de substituição de um critério por outro (Figura 13).

Figura 13 - Step 2: Questionamento quanto a preferência do decisor

Which consequence do you prefer?
Answer the questions by choosing one option

Criterion	Consequence A Value	Consequence B Value
C1	X1: 60450	B1: 54000
C2	W2: 20	B2: 7
C3	W3: 74.63	B3: 87.03
C4	W4: 75.98	B4: 88.788
C5	W5: 64.647	B5: 87.163

Options:
 Consequence A
 Consequence B
 Indifferent
 No Answer
 Inconsistency

Number of Questions Answered: 9
Number of Potentially Optimal Alternatives: 2

Chosen Order:
C1 - Custo
C2 - Duração
C3 - Qualidade
C4 - Cooperação
C5 - Know-how

Equivalence Test:
(Maximum difference between P. O. A.s)

Between	Max. Difference
SUPPLIER 2 - SUPPLIER 4	0.05320000
SUPPLIER 4 - SUPPLIER 2	0.10600000

Note:
W_i is the worst outcome of criterion C_i
X_i is an outcome in between best and worst of criterion C_i
B_i is the best outcome of criterion C_i

Fonte: Software FITTradeoff (2019).

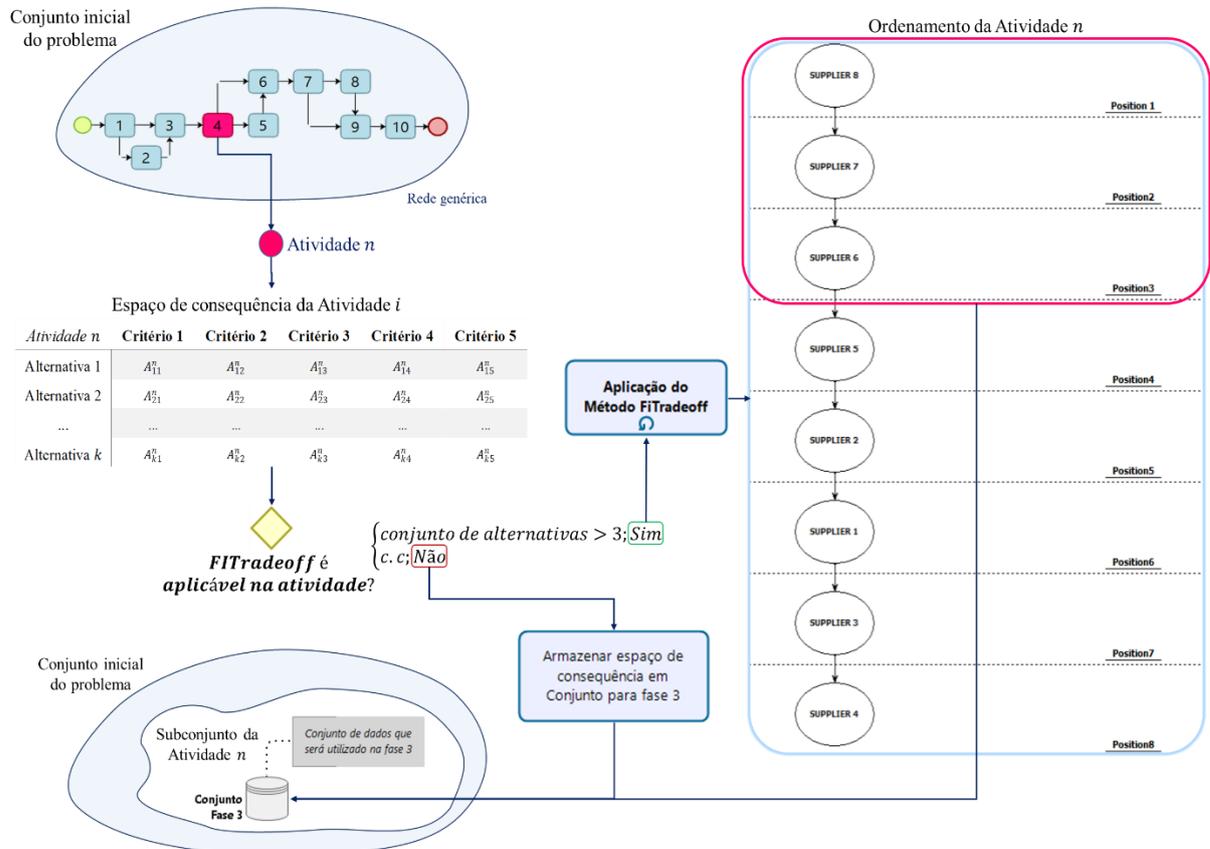
Ao realizar esses questionamentos, o método *FITTradeoff* utiliza as respostas do decisor, que podem ser: a) consequência A; b) consequência B; c) indiferença; d) sem resposta e; e) inconsistência, para calcular a taxa de substituição de um critério em relação à outro. A quantidade de questionamentos não é o mesmo para todas as atividades, o método questiona o decisor até que a solução do *ranking* seja encontrada.

A Figura 12, destaca outra captura de tela, em que o decisor é questionado quanto a Consequência A, onde o critério custo tem valor quase que intermediário, ou a Consequência B, em que o critério duração tem o melhor desempenho. Para este questionamento, o decisor estabeleceu sua preferência pela Consequência B, e outro questionamento foi realizado comparando os critérios duração e qualidade. Também podem ser observados na captura, o número de questionamentos já realizado (:9) e o número potencial de alternativas ótimas (:2). O *output* dos questionamentos é o ordenamento das alternativas e a obtenção dos valores das constantes de escala dos critérios.

c) Armazenamento do subconjunto

O conjunto inicial do problema é formado por todos os subcontratados que concorrem pela execução do pacote de trabalho, a etapa de Armazenamento do subconjunto consiste na formação do Conjunto Fase 3 que será *input* para a Fase 3. A Figura 14 apresenta, com mais detalhes, como dar-se-á a formação do subconjunto.

Figura 14 - Metodologia para seleção e sequenciamento de subcontratados em projetos



Fonte: A Autora (2020).

Como já destacado, cada atividade do projeto possui um espaço de consequência, a partir desta, a metodologia questiona quanto a aplicação do método *FITradeoff*. A saída sim do *gate* de decisão consiste na aplicação do método que tem como resultado um ordenamento dos subcontratados para aquela atividade, as três primeiras posições do ordenamento, por serem os melhores subcontratados candidatos segundo a preferência do decisor, serão armazenados no Conjunto Fase 3. Para a saída não do *gate*, os dados dos subcontratados são armazenados diretamente no Conjunto Fase 3 e assim, obtém-se o subconjunto de subcontratados para a atividade.

O processo apresentado na Figura 13 ocorrerá para uma única atividade $i \in N_k$, $k \in K$ e $N_k \subseteq A$, isso porque entende-se que o *ranking* das constantes de escala dos critérios podem variar com o tipo k da atividade. Além disso, como as atividades pertencentes ao mesmo conjunto N_k são de mesma natureza, não se justifica a aplicação do método em duas atividades iguais. A Figura 15 apresenta o pseudocódigo da Aplicação do Método *FITradeoff*.

Figura 15 - Pseudocódigo da Aplicação do Método FITradeoff

Algoritmo 2: Aplicação do Método FITradeoff**Início**

```

A ← atividades do projeto;
S ← subcontratados do projeto;
K ← tipo de atividade do projeto;
para k em K
    para i em A
        se atividade i for do tipo k então
            |  $N_k \leftarrow$  atividade i;
        fim se
    fim para
fim para
para k em K
    Selecionar uma única atividade i em  $N_k$ ;
    Aplicar o Método FITradeoff na atividade i;
    Obter o ordenamento;
    Definir subconjunto:  $S_i \leftarrow$  {Posição 1, Posição 2, Posição 3};
    Conjunto Fase 3 ←  $S_i$ ;
    para j em  $N_k$  e  $j \neq i$ 
        |  $S_j = S_i$ ;
        | Conjunto Fase 3 ←  $S_j$ ;
    fim para
fim para

```

Fim

Fonte: A Autora (2020).

Exemplificando o pseudocódigo de forma numérica temos:

Seja $N_1 = \{1, 7, 13\}$, atividades do tipo cofragem, $N_1 \subseteq A$. O Método *FITradeoff* aplicado na **atividade 1** e o resultado obtido no *ranking* é: $S_1 = \{3, 5, 7, 8\}$, em que 3 e 8 ficaram empatados. Assim, $S_1 = S_7 = S_{13} = \{3, 5, 7, 8\}$.

A relação de igualdade entre $S_1 = S_7 = S_{13}$ está condicionada a outra característica do problema, em que o mesmo subcontratado deve executar as atividades pertencentes ao mesmo conjunto N_k , mais detalhes desta relação será apresentada na Fase 3.

Após obter todos os subconjuntos S_i para $i \in A$, os dados serão consolidados de modo a obter um subconjunto derivado do conjunto inicial do problema, chamado Conjunto Fase 3. Desta forma, a Fase 2 é concluída após a obtenção do subconjunto de subcontratados e a consolidação dos dados para a próxima fase.

4.3 FASE 3 – SELEÇÃO E SEQUENCIAMENTO USANDO GA

Considerando o problema ainda na Fase 1, sem a aplicação do Método *FITradeoff*, seja S_k o conjunto dos subcontratados que podem realizar a atividade do tipo $k \in K$ na rede do projeto, o número de combinações de subcontratados para o projeto é apresentado na Equação 1, em que a base é o tamanho do subconjunto S_k e o expoente é a quantidade de tipos de atividades que possuem o tamanho do subconjunto S_k igual a base.

$$\prod_{k \in K} |S_k| = 8^7 \times 5^2 \times 2^4 = 8,388 \times 10^8 \quad (1)$$

Assim, de acordo com a rede do projeto da Figura 9, sete tipos de atividades possuem tamanho de subconjunto S_k igual a 8 subcontratados candidatos, dois tipos de atividades possuem 5 subcontratados candidatos e quatro tipos de atividades possuem 2 subcontratados candidatos. Cujo número de combinações possíveis é igual a $8,388 \times 10^8$.

Com a aplicação do *FITradeoff* na Fase 2, o conjunto de subcontratados que podem realizar a atividade k é reduzido a uma instância menor, S'_k , tal que $S'_k \subseteq S_k$. A Equação 2 destaca o número de combinações para o problema na Fase 3.

$$\prod_{k \in K} |S'_k| = 4^1 \times 3^8 \times 2^4 = 4,19 \times 10^5 \quad (2)$$

Visto isso, algumas observações deste estudo se fazem necessárias. A primeira observação destaca que não é objetivo deste estudo comparar o desempenho computacional entre a problemática **sem** e **com** a aplicação do *FITradeoff*. A segunda observação corresponde ao tamanho da instância, onde o número de combinações é considerado pequeno para ambos os cenários. Tendo em vista a segunda observação, a fase Teste MGrande foi criada para testar o algoritmo genético implementado, de modo a testar o desempenho do mesmo em um cronograma com um número de combinações grande, esta fase é detalhada ao final deste item.

Por conseguinte, uma vez que a Fase 2 é concluída e o Conjunto Fase 3 é consolidado, dar-se início a Fase 3, que consiste no desenvolvimento do modelo para a seleção e sequenciamento do cronograma do projeto. A metaheurística de Algoritmos Genéticos foi escolhida para resolver a problemática de seleção e sequenciamento, em decorrência do bom desempenho do GA para esse problema, como evidenciado na revisão da literatura.

d) Descrição do problema de sequenciamento

O Conjunto Fase 3 compreende um grupo de potenciais subcontratados que apresentaram melhores desempenhos frente as preferências do decisor nos critérios. O sequenciamento do cronograma consiste na formulação do cronograma do projeto, em que o tempo do projeto é determinado em função do subcontratado selecionado em cada atividade, ou seja, para cada atividade do projeto, um único subcontratado deve ser selecionado para executá-la.

O *status* do cronograma de antecipado ou atrasado é dado em função da duração do projeto em comparação com a duração máxima permitida sem penalidade, que é de 120 semanas. Caso o projeto tenha duração superior a 120 semanas, uma penalidade de custo é aplicada a cada semana de atraso, por outro lado, a antecipação do cronograma, ou seja tempo do projeto menor que 120 semanas, é seguido de um bônus por semana de antecipação. A penalidade e o bônus são de R\$ 50.000,00 e R\$ 30.000,00, respectivamente. O projeto tem orçamento máximo de R\$ 7.000.000,00 e o valor máximo do bônus pago é de R\$ 150.000,00. Deste modo, o objetivo do problema é minimizar o custo total do cronograma. A modelagem matemática proposta para o problema é apresentada a seguir.

e) Modelo Matemático

Conjuntos

A → conjunto de atividades do projeto

$$A = \{1, 2, 3, \dots, 32\}$$

K → conjunto de tipos de atividades do projeto

$$K = \{1, 2, 3, \dots, 13\}$$

N_k → conjunto de atividades do tipo k , tal que $N_k \subseteq A$

S → conjunto de todos os possíveis subcontratados

$$S = \{1, 2, 3, \dots, 8\}$$

S_i → conjunto de subcontratados candidatos para realizar a atividade i , tal que $S_i \subseteq S$

$Pred_i$ → conjunto de atividades predecessoras de $i \in A$

Dados

$Cost_{ij}$ → custo no subcontratado j para executar a atividade i

Dur_{ij} → duração no subcontratado j para executar a atividade i

$D_{m\acute{a}x}$ → duração máxima do projeto sem penalidade: 120 semanas

$C_{m\acute{a}x}$ → custo máximo do projeto: R\$ 7.000.00,00

$Cost_{penalty}$ → custo da penalidade por semana de atraso: R\$ 50.000,00

$Bonus_{value}$ → valor do bônus por semana de antecipação: R\$ 30.000,00

$Bonus_{m\acute{a}x}$ → valor máximo no bônus: R\$ 150.000,00

Variáveis

$X_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se o subcontratado } j \text{ realiza a atividade } i \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$

T_i → tempo de término da atividade i

T_{proj} → tempo de término do projeto

α → quantidade de semana(s) de atraso do projeto

β → quantidade de semana(s) de antecipação do projeto

Função Objetivo:

$$MIN \sum_{i \in A} \sum_{j \in S_i} Cost_{ij} X_{ij} + (\alpha \times Cost_{penalty}) - (\beta \times Bonus_{value}) \quad (3)$$

s. a

$$\sum_{j \in S_i} X_{ij} = 1 \quad \forall i \in A \quad (4)$$

$$X_{rj} - X_{sj} = 0 \quad k \in K, \quad r, s \in N_k, \quad s > r, \quad \forall j \in S_r \cap S_s \quad (5)$$

$$T_n + \sum_{j \in S_i} dur_{ij} X_{ij} \leq T_i \quad i \in A, \quad \forall n \in pred_i \quad (6)$$

$$T_{proj} \geq T_i \quad \forall i \in A \quad (7)$$

$$T_{proj} + \beta - \alpha \leq D_{m\acute{a}x} \quad (8)$$

$$\beta \times Bonus_{value} \leq Bonus_{m\acute{a}x} \quad (9)$$

$$\sum_{i \in A} \sum_{j \in S_i} Cost_{ij} X_{ij} + (\alpha \times Cost_{penalty}) - (\beta \times Bonus_{value}) \leq C_{m\acute{a}x} \quad \forall i \in A, \quad \forall j \in S \quad (10)$$

$$X_{ij} = \{0, 1\} \quad \forall i \in A, \quad \forall j \in S_i \quad (11)$$

$$T_i \geq 0 \quad \forall i \in A \quad (12)$$

$$\alpha, \beta \geq 0 \quad (13)$$

A Expressão 3 corresponde a Função Objetivo do problema, que busca minimizar o custo total do projeto considerando o bônus por antecipação e a penalidade por atraso do projeto. As Restrições 4 – 13 compreendem as restrições do modelo.

As Restrições 4 determinam que exatamente um subcontratado $j \in S_i$ deve ser selecionado para executar a atividade i , ou seja: $x_{i1} + x_{i2} + \dots + x_{i|S_i|} = 1$, para cada atividade $i \in A$.

As Restrições 5 determinam que as atividades r e s devem ser executadas pelo mesmo subcontratado j , dado que r e s são de tipos iguais. Sejam as atividades $\{1, 7\} \in N_1$, se o Subcontratado 1 for selecionado para executar a Atividade 1, então o Subcontratado 1 deve ser selecionado para executar a Atividade 7. Isso significa dizer que, pela Equação 4:

$$\text{Se } x_{11} = 1, \quad \text{Então: } x_{12} = x_{13} = \dots = x_{1|S_i|} = 0$$

Pela Restrição 5:

$$x_{11} = 1, \quad \text{Então: } x_{11} - x_{71} = 0 \Rightarrow 1 - x_{71} = 0 \Rightarrow x_{71} = 1$$

$$x_{12} = 0, \quad \text{Então: } x_{12} - x_{72} = 0 \Rightarrow 0 - x_{72} = 0 \Rightarrow x_{72} = 0$$

⋮

$$x_{1|S_i|} = 0, \quad \text{Então: } x_{1j} - x_{7j} = 0 \Rightarrow 0 - x_{71} = 0 \Rightarrow x_{7|S_i|} = 0$$

As Restrições 6 e 7 determinam, respectivamente, o tempo de término de cada atividade, considerando as atividades predecessoras, e o tempo de término do projeto. Considerando as atividades $\{1, 2, 3\} \in A$, a Atividade 1, pela rede do projeto, não possui nenhuma atividade predecessora, logo $pred_1 = \{\emptyset\}$, para as atividades 2 e 3 tem-se respectivamente, $pred_2 = \{1\}$ e $pred_3 = \{1, 2\}$. Assim, pela Inequação 6 tem-se

Atividade 1:

$$\text{Dado que: } x_{15} = 1, \quad Dur_{15} = 6 \text{ e } T_0 = 0,$$

$$T_0 + (Dur_{11}x_{11} + Dur_{12}x_{12} + \dots + Dur_{1|S_i|}x_{1|S_i|}) \leq T_1$$

$$0 + Dur_{15}x_{15} \leq T_1$$

$$T_1 \geq 6$$

Atividade 2:

$$\text{Dado que: } x_{28} = 1, \quad Dur_{28} = 3$$

$$pred_2 = \text{Atividade 1}$$

$$T_1 + (Dur_{21}x_{21} + Dur_{22}x_{22} + \dots + Dur_{2|S_i|}x_{2|S_i|}) \leq T_2$$

$$T_2 \geq T_1 + Dur_{28}x_{28}$$

$$T_2 \geq 6 + 3 \Rightarrow T_2 \geq 9$$

Atividade 3:

$$\text{Dado que: } x_{34} = 1, \quad Dur_{34} = 3$$

$$pred_3 = \text{Atividade 1}$$

$$T_1 + (Dur_{31}x_{31} + Dur_{32}x_{32} + \dots + Dur_{3|S_i|}x_{3|S_i|}) \leq T_3$$

$$T_3 \geq T_1 + Dur_{34}x_{34}$$

$$T_3 \geq 6 + 3$$

$$pred_3 = \text{Atividade 2}$$

$$T_2 + (Dur_{31}x_{31} + Dur_{32}x_{32} + \dots + Dur_{3|S_i|}x_{3|S_i|}) \leq T_3$$

$$T_3 \geq T_2 + Dur_{34}x_{34}$$

$$T_3 \geq 9 + 3$$

Para que as desigualdades $T_3 \geq 6 + 3$ e $T_3 \geq 9 + 3$ sejam atendidas, a variável T_3 deve assumir valor maior ou igual a 12, que corresponde a soma dos tempos de execução da sequencia $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3$.

Pela Inequação 7, o maior valor das variáveis $T_i, \forall i \in A$, determinará o tempo do projeto. Visualmente, pela rede do projeto, é possível verificar que a variável T_{32} corresponde ao valor que a variável T_{proj} assumirá. No entanto, caso houvesse mais de uma atividade final, não seria possível visualizar de forma tão simples qual atividade determinaria o tempo do projeto. Assim, a Inequação 7 permite atualizar a variável T_{proj} , pelo atendimento das restrições, e determinar o tempo de projeto.

A Equação 8 avalia se o projeto está com *status* de Atrasado (α) ou Antecipado (β), considerando a duração máxima que determina se haverá bônus pela antecipação ou penalidade pelo atraso. Deste modo:

Se $T_{Proj} > D_{m\acute{a}x} \Rightarrow$ Ent\~{a}o: $\alpha > 0$ e $\beta = 0$

Se $T_{Proj} < D_{m\acute{a}x} \Rightarrow$ Ent\~{a}o: $\alpha = 0$ e $\beta < 0$

Se $T_{Proj} = D_{m\acute{a}x} \Rightarrow$ Ent\~{a}o: $\alpha = 0$ e $\beta = 0$

As Restri\c{c}o\~{e}s 9 e 10 delimitam, respectivamente, o valor m\~{a}ximo de b\~{o}nus que pode ser pago pelo adiantamento do projeto, e o valor total do projeto (C_{max}). As Restri\c{c}o\~{e}s 11 – 13 correspondem as vari\~{a}veis do problema, sendo x_{ij} bin\~{a}ria e T_i , α e β do tipo inteiros.

f) Modelo computacional

O Modelo Matem\~{a}tico 3 – 13 foi implementado em Python 3.7 utilizando-se o pacote PuLP – modelador de LP (*Linear Programming*). O pacote PuLP gera arquivos .mps e .lp e chama o *solver* (e.g., GLPK, COIN CLP / CBC, CPLEX ou GUROBI) para resolver o modelo matem\~{a}tico.

A Figura 16 apresenta o arquivo .lp onde \~{e} poss\~{i}vel visualizar parte da fun\c{c}\~{a}o objetivo e algumas restri\c{c}o\~{e}s. Observa-se que, para os subcontratados $j \notin S_i$ foi atribuído um valor M grande na fun\c{c}\~{a}o objetivo, de modo a inviabilizar a escolha do subcontratado j para a atividade i . O arquivo .lp completo pode ser visto no Ap\~{e}ndice.

Figura 16 - Arquivo.lp da problem\~{a}tica de subcontratados

```

Minimize total cost of subcontractors with FITradeoff - Bloco de Notas
Arquivo Editar Formatar Exibir Ajuda
\* Minimize total cost of subcontractors with FITradeoff *\
Minimize
OBJ: - 30000 ProjAnt + 50000 ProjAts + 100000000 X_10_1 + 52200 X_10_2
+ 100000000 X_10_3 + 58320 X_10_4 + 64080 X_10_5 + 100000000 X_10_6
+ 100000000 X_10_7 + 100000000 X_10_8 + 100000000 X_11_1 + 100000000 X_11_2
+ 100000000 X_11_3 + 100000000 X_11_4 + 100000000 X_11_5 + 516852 X_11_6
+ 519744 X_11_7 + 521004 X_11_8 + 100000000 X_12_1 + 100000000 X_12_2
+ 100000000 X_12_3 + 100000000 X_12_4 + 100000000 X_12_5 + 199120 X_12_6
+ 252360 X_12_7 + 253200 X_12_8 + 100000000 X_13_1 + 100000000 X_13_2
+ 44750 X_13_3 + 100000000 X_13_4 + 51250 X_13_5 + 100000000 X_13_6
+ 44750 X_13_7 + 48500 X_13_8 + 100000000 X_14_1 + 100000000 X_14_2
+ 100000000 X_14_3 + 100000000 X_14_4 + 100000000 X_14_5 + 602994 X_14_6
+ 606368 X_14_7 + 607838 X_14_8 + 264840 X_15_1 + 100000000 X_15_2
+ 100000000 X_15_3 + 100000000 X_15_4 + 320340 X_15_5 + 321840 X_15_6
+ 100000000 X_15_7 + 100000000 X_15_8 + 100000000 X_16_1 + 53650 X_16_2
+ 100000000 X_16_3 + 59940 X_16_4 + 65860 X_16_5 + 100000000 X_16_6
+ 100000000 X_16_7 + 100000000 X_16_8 + 100000000 X_17_1 + 100000000 X_17_2
+ 100000000 X_17_3 + 100000000 X_17_4 + 100000000 X_17_5 + 646065 X_17_6
+ 649680 X_17_7 + 651255 X_17_8 + 100000000 X_18_1 + 100000000 X_18_2
+ 100000000 X_18_3 + 100000000 X_18_4 + 100000000 X_18_5 + 224010 X_18_6
+ 283905 X_18_7 + 284850 X_18_8 + 100000000 X_19_1 + 100000000 X_19_2
+ 211860 X_19_3 + 213210 X_19_4 + 236910 X_19_5 + 100000000 X_19_6
+ 100000000 X_19_7 + 100000000 X_19_8 + 100000000 X_1_1 + 100000000 X_1_2
+ 57280 X_1_3 + 100000000 X_1_4 + 65600 X_1_5 + 100000000 X_1_6 + 57280 X_1_7
+ 62080 X_1_8 + 100000000 X_20_1 + 57900 X_20_2 + 61200 X_20_3
+ 100000000 X_20_4 + 100000000 X_20_5 + 100000000 X_20_6 + 100000000 X_20_7
+ 53100 X_20_8 + 79170 X_21_1 + 100000000 X_21_2 + 100000000 X_21_3
+ 94900 X_21_4 + 97890 X_21_5 + 100000000 X_21_6 + 100000000 X_21_7
+ 100000000 X_21_8 + 16000 X_22_1 + 17920 X_22_2 + 100000000 X_22_3
+ 100000000 X_22_4 + 100000000 X_22_5 + 100000000 X_22_6 + 100000000 X_22_7
+ 100000000 X_22_8 + 11840 X_23_1 + 12800 X_23_2 + 100000000 X_23_3
+ 100000000 X_23_4 + 100000000 X_23_5 + 100000000 X_23_6 + 100000000 X_23_7
+ 100000000 X_23_8 + 14400 X_24_1 + 12160 X_24_2 + 100000000 X_24_3
+ 100000000 X_24_4 + 100000000 X_24_5 + 100000000 X_24_6 + 100000000 X_24_7
+ 100000000 X_24_8 + 14400 X_25_1 + 12160 X_25_2 + 100000000 X_25_3
+ 100000000 X_25_4 + 100000000 X_25_5 + 100000000 X_25_6 + 100000000 X_25_7
+ 100000000 X_25_8 + 100000000 X_26_1 + 100000000 X_26_2 + 233046 X_26_3
+ 234531 X_26_4 + 260601 X_26_5 + 100000000 X_26_6 + 100000000 X_26_7
+ 100000000 X_26_8 + 100000000 X_27_1 + 58865 X_27_2 + 62220 X_27_3
+ 100000000 X_27_4 + 100000000 X_27_5 + 100000000 X_27_6 + 100000000 X_27_7

Subject To
_C1: X_1_1 + X_1_2 + X_1_3 + X_1_4 + X_1_5 + X_1_6 + X_1_7 + X_1_8 = 1
_C10: X_10_1 + X_10_2 + X_10_3 + X_10_4 + X_10_5 + X_10_6 + X_10_7 + X_10_8
= 1
_C100: - X_12_3 + X_18_3 = 0
_C101: - X_19_3 + X_26_3 = 0
_C102: - X_20_3 + X_27_3 = 0
_C103: - X_21_3 + X_28_3 = 0
_C104: - X_22_3 + X_29_3 = 0
_C105: - X_23_3 + X_30_3 = 0
_C106: - X_24_3 + X_31_3 = 0
_C107: - X_25_3 + X_32_3 = 0
_C108: - X_1_4 + X_7_4 = 0
_C109: - X_2_4 + X_8_4 = 0
_C11: X_11_1 + X_11_2 + X_11_3 + X_11_4 + X_11_5 + X_11_6 + X_11_7 + X_11_8
= 1
_C110: - X_3_4 + X_9_4 = 0
_C111: X_10_4 - X_4_4 = 0
_C112: X_11_4 - X_5_4 = 0
_C113: X_12_4 - X_6_4 = 0
_C114: X_13_4 - X_1_4 = 0
_C115: X_13_4 - X_7_4 = 0
_C116: X_14_4 - X_2_4 = 0
_C117: X_14_4 - X_8_4 = 0
_C118: X_15_4 - X_3_4 = 0
_C119: X_15_4 - X_9_4 = 0
_C12: X_12_1 + X_12_2 + X_12_3 + X_12_4 + X_12_5 + X_12_6 + X_12_7 + X_12_8
= 1
_C120: X_16_4 - X_4_4 = 0
_C121: - X_10_4 + X_16_4 = 0
_C122: X_17_4 - X_5_4 = 0
_C123: - X_11_4 + X_17_4 = 0
_C124: X_18_4 - X_6_4 = 0
_C125: - X_12_4 + X_18_4 = 0
_C126: - X_19_4 + X_26_4 = 0
_C127: - X_20_4 + X_27_4 = 0
_C128: - X_21_4 + X_28_4 = 0
_C129: - X_22_4 + X_29_4 = 0
_C13: X_13_1 + X_13_2 + X_13_3 + X_13_4 + X_13_5 + X_13_6 + X_13_7 + X_13_8
= 1

```

Fonte: A Autora (2020).

g) Algoritmo Genético

As heurísticas funcionam de forma diferente dos métodos exatos, em que a definição da representação da solução é fundamental para a implementação do algoritmo e para a obtenção de uma solução viável. Tendo isso, o GA implementado considera a variabilidade de tipos de atividades como elemento de representação da solução. Deste modo, o cromossomo possui tamanho igual ao número de elementos do conjunto K , em que cada gene corresponde a um tipo de atividade e os alelos correspondem aos subcontratados do conjunto S'_k . A Figura 17 traz essa representação do cromossomo para um indivíduo (solução) do problema.

Figura 17 - Representação do cromossomo para o indivíduo do problema

$k \in K$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
<i>Indivíduo</i>	5	7	6	2	7	8	3	2	1	1	2	1	2

Fonte: A Autora (2020).

A avaliação do indivíduo é feita em função do desempenho em custo, em que quanto menor o custo, melhor o indivíduo. A composição do custo, como apresentado em (5), consiste no desempenho dos subcontratados selecionados mais o bônus ou penalização do projeto, em decorrência da antecipação ou atraso do cronograma.

A definição do tempo de projeto, ou do cronograma do projeto, é dado pelo CPM, seguindo a heurística. A Figura 18 apresenta como o tempo do projeto é calculado para cada indivíduo da população.

Figura 18 - Cálculo do tempo de projeto: cronograma de projeto

Algoritmo 3: Calcular o tempo do projeto

Início

```

para indivíduo em população
  para  $i$  em  $A$ 
    para  $k$  em  $K$  # cromossomo = [1, 2, ..., 13]
      se atividade  $i$  for do tipo  $k$  então
         $Sub_k \leftarrow$  subcontratado selecionado para o gene  $k$ 
        se  $Pred_i = \emptyset$  então
           $T_i = Dur_{i, Sub_k}$ 
        se não
           $T_i = 0$ 
          para  $j$  em  $Pred_i$ 
             $T_i = \max\{T_i, Dur_{i, Sub_k} + T_j\}$ 
          fim para
        fim se
      fim se
    fim para
    para
       $durP_{indivíduo} = \max_{i \in A}\{T_i\}$  #tempo do projeto
    fim para
  fim para
fim

```

Fonte: A Autora (2020).

Uma vez calculado o tempo do projeto é possível calcular o custo total do projeto. De modo geral, o indivíduo pode selecionar os subcontratados com menor custo, exceder o tempo de projeto e pagar pela penalização, e mesmo assim ser o menor custo. Como pode, pagar um pouco mais nos subcontratados e ganhar um bônus pela antecipação do cronograma. A Figura 19 destaca como o custo do projeto foi calculado.

Figura 19 - Cálculo do custo do projeto

Algoritmo 4: Calcular o custo do projeto**Início**

```

costProject = 0
para indivíduo em população
  para i em A
    para k em K # cromossomo = [1, 2, ..., 13]
      se atividade i for do tipo k então
        Subk ← subcontratado selecionado para o gene k
        costProject = costProject + Costi, Subk
      fim se
    fim para
  fim para
  se durPindivíduo > Durmax então
    PenaltyProject = (durPindivíduo - Durmax) × Costpenalty
    costProject = costProject + PenaltyProject
  se não
    BonusProject = (Durmax - durPindivíduo) × Bonusvalue
    se BonusProject < Bonusmáx então
      costProjectindivíduo = costProject - BonusProject
    se não
      costProjectindivíduo = costProject - Bônusmax
    fim se
  fim se
fim
fim

```

Fonte: A Autora (2020).

Normalmente, o ordenamento da população é decrescente, ou seja, quanto maior o *fitness* melhor. Neste cenário, a probabilidade de seleção dos pais é dado pela Equação 14, em que *P* corresponde à população, como visto na sessão 2.4.2 deste trabalho (operador de seleção, item i).

$$Probabilidade\ de\ seleção_p = \frac{fitness_{indivíduo\ p}}{\sum_{p=1}^{|P|} fitness_{indivíduo\ p}}, \quad p \in P \quad (14)$$

Este ordenamento é parâmetro para a escolha dos indivíduos mais aptos para a etapa de *crossover*, onde as gerações futuras são influenciadas pela escolha dos pais na geração atual. Para a problemática deste estudo, a Equação 14 não se aplica, visto que os indivíduos menos aptos (piores *fitness*, *i.e.*, maiores custos do projeto) apresentariam maior influência na geração

futura, podendo resultar em indivíduos não aptos ou de menor aptidão que os pais, ou seja, não haveria melhoria no desempenho geral da população.

Para o problema desta pesquisa, os melhores indivíduos da população são aqueles com menor custo total do projeto, ou seja, quanto menor o *fitness*, melhor o indivíduo, assim a população é ordenada de forma crescente, sendo necessário alterar a forma de cálculo das probabilidades de seleção de cada indivíduo (ver a seguir).

Baseando-se na Equação 14, dois métodos de execução da roleta para selecionar os pais foram testados, de modo a avaliar qual o método apresenta a melhor geração de indivíduo em termos de tempo de processamento e do melhor indivíduo como resultado final.

h) Roleta 1

A probabilidade de escolha dos pais para o *crossover* na Roleta 1 é calculada conforme a Equação 15:

$$Probabilidade\ de\ seleção_p = \frac{\frac{1}{fitness_{indivíduo\ p}}}{\sum_{p=1}^{|P|} \frac{1}{fitness_{indivíduo\ p}}}, \quad p \in P \quad (15)$$

Onde, quando menor o valor do $fitness_{indivíduo\ p}$, maior índice do numerador e maior a probabilidade de seleção do indivíduo. Testando a Equação 15, sejam os indivíduos $p \in P$, tal que $P = \{1, 2, 3\}$ e o *fitness* dos indivíduos: $fitness_p = \{5, 10, 2\}$. Ordenando os indivíduos pelo *fitness*, do melhor para o pior, tem-se: $fitness_3 > fitness_1 > fitness_2$. Assim, temos:

$$\sum_{p=1}^{|P|} \frac{1}{fitness_{indivíduo\ p}} = \frac{1}{5} + \frac{1}{10} + \frac{1}{2} = 0,2 + 0,1 + 0,5 = 0,8$$

$$Probabilidade\ de\ seleção_1 = \frac{\frac{1}{5}}{0,8} = \frac{0,2}{0,8} = 0,25$$

$$Probabilidade\ de\ seleção_2 = \frac{\frac{1}{10}}{0,8} = \frac{0,1}{0,8} = 0,125$$

$$Probabilidade\ de\ seleção_3 = \frac{\frac{1}{2}}{0,8} = \frac{0,5}{0,8} = 0,625$$

Logo,

$$Probabilidade\ de\ seleção_3 > Probabilidade\ de\ seleção_1 > Probabilidade\ de\ seleção_2$$

Desta forma, os indivíduos com menor valor *fitness* possuem maior probabilidade de serem selecionados para o *crossover* e, conseqüentemente, gerar indivíduos com melhor desempenho nas gerações futuras.

i) Roleta 2

Na Roleta 2, a probabilidade de seleção dos pais é dado pela Equação 16.

$$Probabilidade\ de\ seleção_p = \frac{(C_{m\acute{a}x} - fitness_{indiv\acute{u}do\ p})}{\sum_{p=1}^{|P|} (C_{m\acute{a}x} - fitness_{indiv\acute{u}do\ p})}, \quad p \in P \quad (16)$$

Quanto menor o *fitness* do indivíduo, maior a diferença e maior a probabilidade de seleção dos pais. Testando a Equação 16, seja $C_{m\acute{a}x} = 12$ e os indivíduos $p \in P$ tal que $P = \{1, 2, 3\}$ e o *fitness* dos indivíduos: $fitness_p = \{5, 10, 2\}$. O ordenamento dos indivíduos pelo *fitness* é o mesmo apresentado na Roleta 1. Desta forma, temos:

$$\sum_{p=1}^{|P|} (C_{m\acute{a}x} - fitness_{indiv\acute{u}do\ p}) = (12 - 5) + (12 - 10) + (12 - 2) = 19$$

$$Probabilidade\ de\ seleção_1 = \frac{12 - 5}{19} = \frac{7}{19} = 0,368$$

$$Probabilidade\ de\ seleção_2 = \frac{12 - 10}{19} = \frac{2}{19} = 0,105$$

$$Probabilidade\ de\ seleção_3 = \frac{12 - 2}{19} = \frac{10}{19} = 0,527$$

Logo,

$$Probabilidade\ de\ seleção_3 > Probabilidade\ de\ seleção_1 > Probabilidade\ de\ seleção_2$$

Os operadores genéticos de *crossover* e de mutação seguiram a seguinte configuração. O *crossover* entre os indivíduos pais é do tipo cruzamento de ponto de corte, em que um único ponto de corte é selecionado de forma aleatória e, em seguida, os indivíduos pais são recombinados. A mutação ocorre conforme a taxa de mutação, em que se o alelo i (tipo de atividade) for selecionado, o subcontratado j do alelo será substituído pelo subcontratado j' pertencente conjunto S_i , tal que $j \neq j'$.

Por conseguinte, os demais parâmetros do algoritmo genético Taxa de Mutação, Tamanho da População e Número de Gerações foram definidos ao longo dos testes, de modo a encontrar

uma melhor configuração para cada tipo de roleta. O Algoritmo Genético foi executado no notebook com processador *intel® core i7*, CPU de 1.80 GHz e memória RAM de 16GB.

j) Teste MGrande

A fase denominada Teste MGrande, como já destacado, consiste em testar o algoritmo genético implementado em um problema de maior dimensão. Neste sentido, foram criados duas instâncias considerando a mesma rede de projeto deste trabalho, a primeira com 16 tipos de atividades e 8 subcontratados possíveis, e a segunda com 32 tipos de atividades e 8 subcontratados possíveis, o número de combinações é apresentado, respectivamente, nas Equações 17 e 18.

$$\prod_{k \in K} |S_k| = 8^{16} = 2,814 \times 10^{14} \quad (17)$$

$$\prod_{k \in K} |S_k| = 8^{32} = 7,922 \times 10^{28} \quad (18)$$

k) Desenvolvimento do SubSelect.GA

Consiste no desenvolvimento uma ferramenta *web* para acesso local que execute o modelo proposto na Fase 3.

5 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA

Os resultados obtidos com a aplicação da metodologia proposta serão discutidos ao longo deste capítulo. Inicialmente, serão apresentados os resultados referentes a definição do problema (Fase 1), a aplicação do Método *FITradeoff* para a ordenação dos subcontratados (Fase 2), em seguida os resultados obtidos com a aplicação do GA para a seleção final dos subcontratados para o projeto e o teste MGrande (Fase 3).

a) Fase 1 – Definição do problema

A definição do problema é muitas vezes encarada como uma fase de pouca importância, ou ignorada em muitas aplicações. Normalmente, os modelos são utilizados para resolver problemas sem que antes se tenha uma completa definição do problema, do objetivo, ou do valor comercial que o modelo resultará.

Neste sentido, a definição do problema é essencial para identificar a natureza, as principais características, as restrições, os dados, bem como detalhar o objetivo a ser alcançado, para assim selecionar o(s) método(s) para resolvê-lo de forma a suportar as decisões que sucedem a problemática. Desta forma, o método *FITradeoff* e o GA foram selecionados para resolverem a problemática desta pesquisa, e conseqüentemente, são as abordagens que se baseiam a metodologia.

b) Fase 2 – *Ranking* dos subcontratados usando o método *FITradeoff*

Um projeto é constituído por um conjunto de atividade diferentes, que podem/ou não se repetir ao longo do cronograma. Neste aspecto, partimos do princípio de que as atividades podem apresentar um conjunto de preferências diferentes, ou seja, o *ranking* das constantes de escala podem variar de acordo com a atividade. Onde a subjetividade do decisor ao avaliar os subcontratados para cada atividade é determinante na obtenção do resultado, bem como na construção do subconjunto de subcontratados candidatos que serão dados de entrada para o Algoritmo Genético.

Neste sentido, foram identificados quatro configurações diferentes do *ranking* das constantes de escala dos critérios:

- a) Duração > Qualidade > Custo > Cooperação > *Know-How*
- b) Custo > Qualidade > Duração > Cooperação > *Know-How*
- c) Qualidade > Duração > Custo > Cooperação > *Know-How*
- d) Qualidade > Custo > Duração > Cooperação > *Know-How*

A Tabela 7 apresenta os tipos de atividades do projeto, bem como a configuração utilizada no processo de elicitação das preferências do Método *FITradeoff*. Destacam-se também as atividades que não se aplicaram ao método, dado que a quantidade de subcontratados candidatos é menor que três.

Tabela 7 - Ranking das constantes de escala dos critérios (Step 1 – Método *FITradeoff*)

Tipo de atividade (k)		N_k	Configuração no Step 1
1	Cofragem	{1, 7, 13}	<i>Duração</i> > <i>Qualidade</i> > <i>Custo</i> > <i>Cooperação</i> > <i>Know – How</i>
2	Reforço	{2, 8, 14}	<i>Duração</i> > <i>Qualidade</i> > <i>Custo</i> > <i>Cooperação</i> > <i>Know – How</i>
3	Concretagem	{3, 9, 15}	<i>Custo</i> > <i>Qualidade</i> > <i>Duração</i> > <i>Cooperação</i> > <i>Know – How</i>
4	Cofragem para laje	{4, 10, 16}	<i>Duração</i> > <i>Qualidade</i> > <i>Custo</i> > <i>Cooperação</i> > <i>Know – How</i>
5	Armação	{5, 11, 17}	<i>Qualidade</i> > <i>Duração</i> > <i>Custo</i> > <i>Cooperação</i> > <i>Know – How</i>
6	Placa de concreto	{6, 12, 18}	<i>Custo</i> > <i>Qualidade</i> > <i>Duração</i> > <i>Cooperação</i> > <i>Know – How</i>
7	Trabalho com bloco	{19, 26}	<i>Qualidade</i> > <i>Custo</i> > <i>Duração</i> > <i>Cooperação</i> > <i>Know – How</i>
8	Reboco	{20, 27}	<i>Custo</i> > <i>Qualidade</i> > <i>Duração</i> > <i>Cooperação</i> > <i>Know – How</i>
9	Revestimento cerâmico	{21, 28}	<i>Qualidade</i> > <i>Custo</i> > <i>Duração</i> > <i>Cooperação</i> > <i>Know – How</i>
10	Massa	{22, 29}	<i>Método FITradeoff não foi aplicado</i>
11	Primer	{23, 30}	<i>Método FITradeoff não foi aplicado</i>
12	Primeira demão	{24, 31}	<i>Método FITradeoff não foi aplicado</i>
13	Camada final	{25, 32}	<i>Método FITradeoff não foi aplicado</i>

Fonte: A Autora (2020).

O *Step 2* do Método *FITradeoff* consiste na elicitação das preferências do decisor e tem como resultado o ordenamento dos subcontratados, em que empates podem ocorrer, como visto na atividade do tipo $k = 1$, em que os subcontratados 3 e 8 empataram na Posição 1. O resultado do *Step 2* pode ser visto na Tabela 8.

Tabela 8 - Resultados do ranking dos subcontratados (Step 2 – Método *FITradeoff*)

k	Conjunto S inicial	Posição							
		1	2	3	4	5	6	7	8
1	{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8}	{3, 8}	{7}	{5}	{4}	{2}	{1, 6}	-	-
2	{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8}	{8}	{7}	{6}	{5}	{2}	{1}	{3}	{4}
3	{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8}	{1}	{6}	{5}	{8}	{7}	{4}	{3}	{2}
4	{1, 2, 3, 4, 5}	{5}	{4}	{2}	{3}	{1}	-	-	-
5	{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8}	{8}	{7}	{6}	{5}	{3}	{2}	{1}	{4}
6	{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8}	{6}	{7}	{8}	{2, 5}	{4}	{1}	{3}	-
7	{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8}	{5}	{4}	{3}	{1}	{2}	{6}	{7}	{8}
8	{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8}	{8}	{2}	{3}	{4}	{6}	{1, 5}	{7}	
9	{1, 2, 3, 4, 5}	{4}	{5}	{1}	{3}	{2}	-	-	-

Fonte: A Autora (2020).

Como já destacado na seção 4.2, os subcontratados que ocuparem as três primeiras posições do ranking irão compor o subconjunto S_i e, por conseguinte, o *Conjunto Fase 3*, conforme destacado na Tabela 9.

Tabela 9 - Formação do Conjunto Fase 3

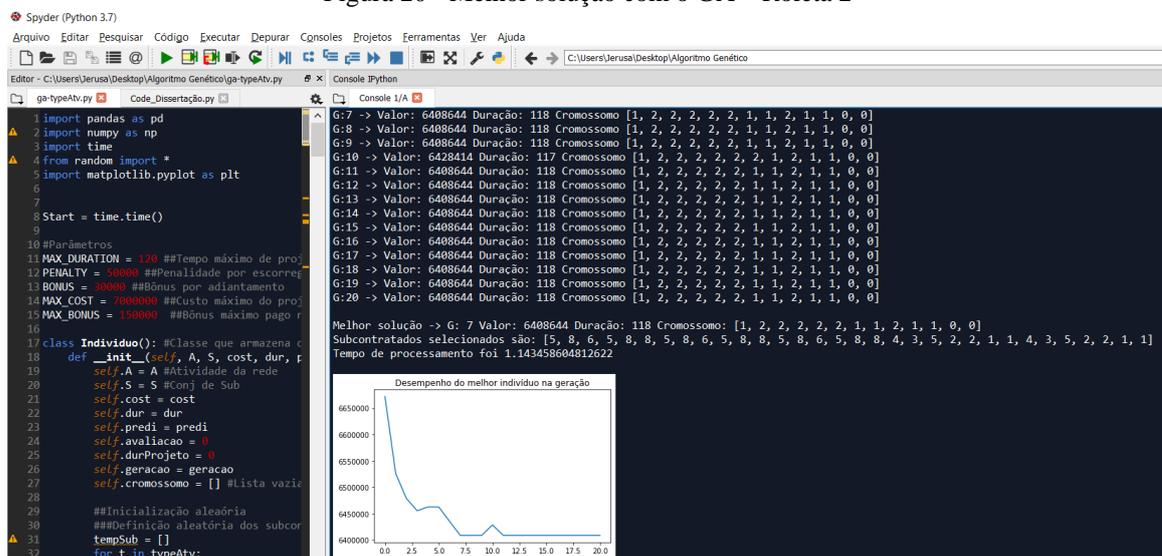
k	N_k	Posição 1	Posição 2	Posição 3	S_i
1	{1, 7, 13}	{3, 8}	{7}	{5}	{3, 5, 7, 8}
2	{2, 8, 14}	{8}	{7}	{6}	{6, 7, 8}
3	{3, 9, 15}	{1}	{6}	{5}	{1, 5, 6}
4	{4, 10, 16}	{5}	{4}	{2}	{2, 4, 5}
5	{5, 11, 17}	{8}	{7}	{6}	{6, 7, 8}
6	{6, 12, 18}	{6}	{7}	{8}	{6, 7, 8}
7	{19, 26}	{5}	{4}	{3}	{3, 4, 5}
8	{20, 27}	{8}	{2}	{3}	{2, 3, 8}
9	{21, 28}	{4}	{5}	{1}	{1, 4, 5}
10	{22, 29}	Método FITradeoff não foi aplicado			{1, 2}
11	{23, 30}	Método FITradeoff não foi aplicado			{1, 2}
12	{24, 31}	Método FITradeoff não foi aplicado			{1, 2}
13	{25, 32}	Método FITradeoff não foi aplicado			{1, 2}

Fonte: A Autora (2020).

c) Fase 3 – Seleção e sequenciamento usando o GA

Com isso, o *Conjunto Fase 3* foi consolidado e o *script* do GA foi executado. O resultado obtido com o GA-Roleta 2 é apresentado na Figura 20.

Figura 20 - Melhor solução com o GA – Roleta 2



Fonte: A Autora (2020).

A melhor solução foi encontrada na geração 7, com *fitness* igual a R\$ 6.408.644,00, a duração do projeto de 118 semanas, o tempo de processamento de 1.14 segundos e o gráfico com o desempenho do melhor indivíduo em cada geração.

O indivíduo consiste na representação do subcontratado selecionado para cada tipo de atividade no projeto. Neste sentido, o indivíduo é decodificado para atividades, assim outro *insight* do algoritmo é gerado, onde o cronograma do projeto é detalhado (Figura 21).

Figura 21 - Cronograma do projeto detalhado (GA – Roleta 2)

```

225 #Configuração da rede de projeto
226 'Data mais cedo de início (DCI)'
227 tempDCI = []
228 tempDCT = []
229 for i in A:
230     cont = 0
231     for t in typeAtv:
232         if i in t:
233             sub = self.melhor_sc
234             if pred[i] == []:
235                 tempDCI.append(cc)
236                 tempDCT.append(cc)
237                 pprint(tempDCI)
238             else:
239                 tempI = []
240                 tempI.append(i)
241                 for j in pred[i]:
242                     tempI.append(j)
243                 tempDCI.append(cc)
244                 tempDCT.append(cc)
245             else:
246                 cont += 1
247
248 'Data mais tarde de início (DTI)'
249 tempDTI = [0]*len(A)
250 tempDTI = [0]*len(A)
251 cont = 32
252 A_inv = sorted(A, reverse = True)
253 pprint(A_inv)
254 for i in A_inv:
255     cont = 0
256     for t in typeAtv:
257         if i in t:
258
Subcontratados selecionados são: [5, 8, 6, 5, 8, 8, 5, 8, 6, 5, 8, 8, 5, 8, 6, 5, 8, 8, 4, 3, 5, 2, 2, 1, 1, 4, 3, 5, 2, 2, 1, 1]
Cronograma do Projeto
[Atividade 1, 'Sub.Select 5', 'Duração 6', 'DCI 0', 'DCT 6', 'Folga 0', 'Custo 65600']
[Atividade 2, 'Sub.Select 8', 'Duração 3', 'DCI 6', 'DCT 9', 'Folga 0', 'Custo 416803']
[Atividade 3, 'Sub.Select 6', 'Duração 5', 'DCI 9', 'DCT 14', 'Folga 0', 'Custo 348600']
[Atividade 4, 'Sub.Select 5', 'Duração 7', 'DCI 14', 'DCT 21', 'Folga 0', 'Custo 71200']
[Atividade 5, 'Sub.Select 8', 'Duração 4', 'DCI 21', 'DCT 25', 'Folga 0', 'Custo 555738']
[Atividade 6, 'Sub.Select 8', 'Duração 2', 'DCI 25', 'DCT 27', 'Folga 0', 'Custo 443100']
[Atividade 7, 'Sub.Select 5', 'Duração 5', 'DCI 27', 'DCT 32', 'Folga 0', 'Custo 55350']
[Atividade 8, 'Sub.Select 8', 'Duração 4', 'DCI 32', 'DCT 36', 'Folga 0', 'Custo 521904']
[Atividade 9, 'Sub.Select 6', 'Duração 4', 'DCI 36', 'DCT 40', 'Folga 0', 'Custo 289656']
[Atividade 10, 'Sub.Select 5', 'Duração 6', 'DCI 40', 'DCT 46', 'Folga 0', 'Custo 64080']
[Atividade 11, 'Sub.Select 8', 'Duração 4', 'DCI 46', 'DCT 50', 'Folga 0', 'Custo 521004']
[Atividade 12, 'Sub.Select 8', 'Duração 1', 'DCI 50', 'DCT 51', 'Folga 0', 'Custo 253200']
[Atividade 13, 'Sub.Select 5', 'Duração 4', 'DCI 51', 'DCT 55', 'Folga 0', 'Custo 51258']
[Atividade 14, 'Sub.Select 8', 'Duração 4', 'DCI 55', 'DCT 59', 'Folga 0', 'Custo 607838']
[Atividade 15, 'Sub.Select 6', 'Duração 5', 'DCI 59', 'DCT 64', 'Folga 0', 'Custo 321840']
[Atividade 16, 'Sub.Select 5', 'Duração 7', 'DCI 64', 'DCT 71', 'Folga 0', 'Custo 97890']
[Atividade 17, 'Sub.Select 8', 'Duração 5', 'DCI 71', 'DCT 76', 'Folga 0', 'Custo 651255']
[Atividade 18, 'Sub.Select 8', 'Duração 1', 'DCI 76', 'DCT 77', 'Folga 0', 'Custo 284850']
[Atividade 19, 'Sub.Select 4', 'Duração 4', 'DCI 51', 'DCT 55', 'Folga 17', 'Custo 213210']
[Atividade 20, 'Sub.Select 3', 'Duração 9', 'DCI 55', 'DCT 64', 'Folga 17', 'Custo 61200']
[Atividade 21, 'Sub.Select 5', 'Duração 4', 'DCI 64', 'DCT 68', 'Folga 17', 'Custo 97890']
[Atividade 22, 'Sub.Select 2', 'Duração 9', 'DCI 68', 'DCT 77', 'Folga 17', 'Custo 19920']
[Atividade 23, 'Sub.Select 2', 'Duração 5', 'DCI 77', 'DCT 82', 'Folga 19', 'Custo 12800']
[Atividade 24, 'Sub.Select 1', 'Duração 5', 'DCI 82', 'DCT 88', 'Folga 19', 'Custo 14400']
[Atividade 25, 'Sub.Select 1', 'Duração 6', 'DCI 88', 'DCT 94', 'Folga 19', 'Custo 14400']
[Atividade 26, 'Sub.Select 4', 'Duração 5', 'DCI 77', 'DCT 82', 'Folga 0', 'Custo 234531']
[Atividade 27, 'Sub.Select 3', 'Duração 9', 'DCI 82', 'DCT 91', 'Folga 0', 'Custo 62220']
[Atividade 28, 'Sub.Select 5', 'Duração 3', 'DCI 91', 'DCT 94', 'Folga 0', 'Custo 94125']
[Atividade 29, 'Sub.Select 2', 'Duração 9', 'DCI 94', 'DCT 103', 'Folga 0', 'Custo 17360']
[Atividade 30, 'Sub.Select 2', 'Duração 5', 'DCI 103', 'DCT 108', 'Folga 0', 'Custo 12400']
[Atividade 31, 'Sub.Select 1', 'Duração 5', 'DCI 108', 'DCT 113', 'Folga 0', 'Custo 13950']
[Atividade 32, 'Sub.Select 1', 'Duração 5', 'DCI 113', 'DCT 118', 'Folga 0', 'Custo 13950']

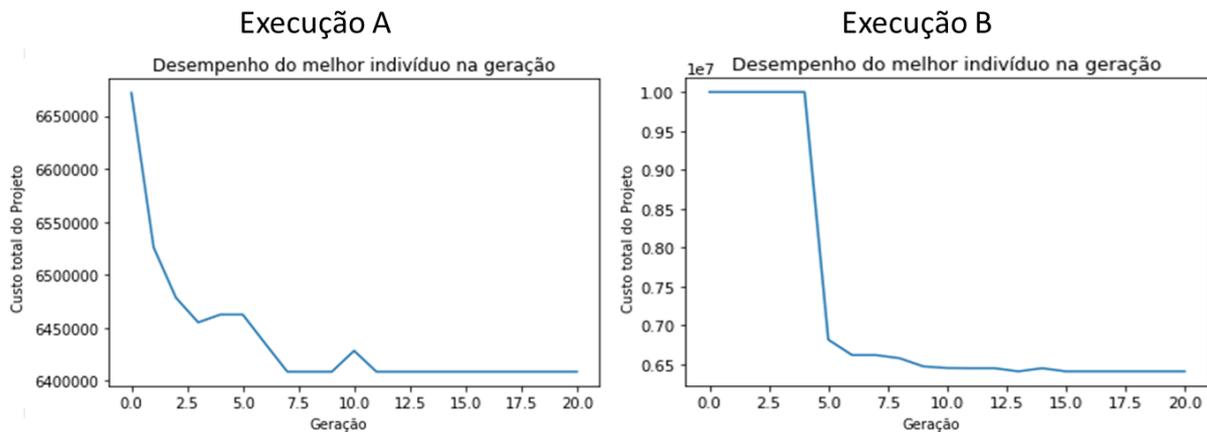
```

Fonte: A Autora (2020).

Na Figura 20, temos cada atividade do projeto, bem como o subcontratado selecionado, o desempenho em duração e custo, a data mais cedo de início e de término das atividades, bem como a folga, que permite visualizar as atividades que pertencem ao caminho crítico do projeto, de modo que o atraso em qualquer uma dessas atividades resultará no atraso do projeto.

A geração inicial *aleatória* do algoritmo permite a inicialização do GA com indivíduos viáveis ou não. A Figura 22, apresenta o gráfico de desempenho de duas execuções do algoritmo.

Figura 22 - Desempenho dos indivíduos: Execução A e Execução B (GA – Roleta 2)



Fonte: A Autora (2020).

Na Execução A, observamos que o algoritmo inicia em uma região viável de indivíduos e, nas gerações seguintes, o desempenho do melhor indivíduo é melhorado com o modelo de busca do algoritmo. Na Execução B, a geração inicial começa em uma região não viável, em que o custo do projeto é superior ao custo máximo. Ao longo das gerações, o indivíduo melhora o desempenho de forma considerável, é quando o algoritmo entra na região dos indivíduos que atendem a restrição de custo máximo. Observa-se que, uma vez nesta região, o algoritmo não volta para região de soluções inviáveis. Em ambas as execuções, a melhor solução encontrada foi a já apresentada na Figura 19.

O modelo matemático 5 – 15 para o problema também foi executado, de modo a verificar se o GA chegou na solução ótima ou próximo (Figura 23). O *solver* utilizado na resolução foi o COIN CLP.

Figura 23 - Solução ótima do modelo matemático

```

Console 1/A
In [52]: runfile('C:/Users/Jerusa/Desktop/Algoritmo Genético/Code_Dissertação_Exato.py', wdir='C:/Users/Jerusa/Desktop/Algoritmo Genético')
Status: Optimal
Vetor de Subcontratados = [5, 8, 6, 5, 8, 8, 5, 8, 6, 5, 8, 8, 5, 8, 6, 5, 8, 8, 4, 3, 5, 2, 2, 1, 1, 4, 3, 5, 2, 2, 1, 1]
Vetor de Custo = [65600, 416803, 348660, 71200, 555738, 443100, 55350, 521004, 289656, 64080, 521004, 253200, 51250, 607838, 321840, 65860, 651255, 284850, 213210, 61200, 97890, 17920, 12800, 14400, 14400, 234531, 62220, 94125, 17360, 12400, 13950, 13950]
Tempos de início = [0.0, 6.0, 9.0, 14.0, 21.0, 25.0, 27.0, 32.0, 36.0, 40.0, 46.0, 50.0, 51.0, 55.0, 59.0, 64.0, 71.0, 76.0, 51.0, 55.0, 64.0, 68.0, 77.0, 82.0, 88.0, 77.0, 82.0, 91.0, 94.0, 103.0, 108.0, 113.0]
Tempos de término = [6.0, 9.0, 14.0, 21.0, 25.0, 27.0, 32.0, 36.0, 40.0, 46.0, 50.0, 51.0, 55.0, 59.0, 64.0, 71.0, 76.0, 77.0, 55.0, 64.0, 68.0, 77.0, 82.0, 88.0, 94.0, 82.0, 91.0, 94.0, 103.0, 108.0, 113.0, 118.0]
Total cost of project = 6408644.0
Total duration of project 118.0
Atraso 0.0
Antecipação 2.0

```

Fonte: A Autora (2020).

Da Figura 23, observa-se que a solução ótima obtida com o modelo matemático foi igual a encontrada pelo GA, com o custo igual a R\$ 6.408.644,00, duração de 118 semanas e o mesmo vetor de subcontratados selecionados. Neste sentido, destaca-se que o GA implementado é capaz de alcançar a solução ótima a partir de uma geração aleatória inicial, mesmo que este gere inicialmente indivíduos não viáveis.

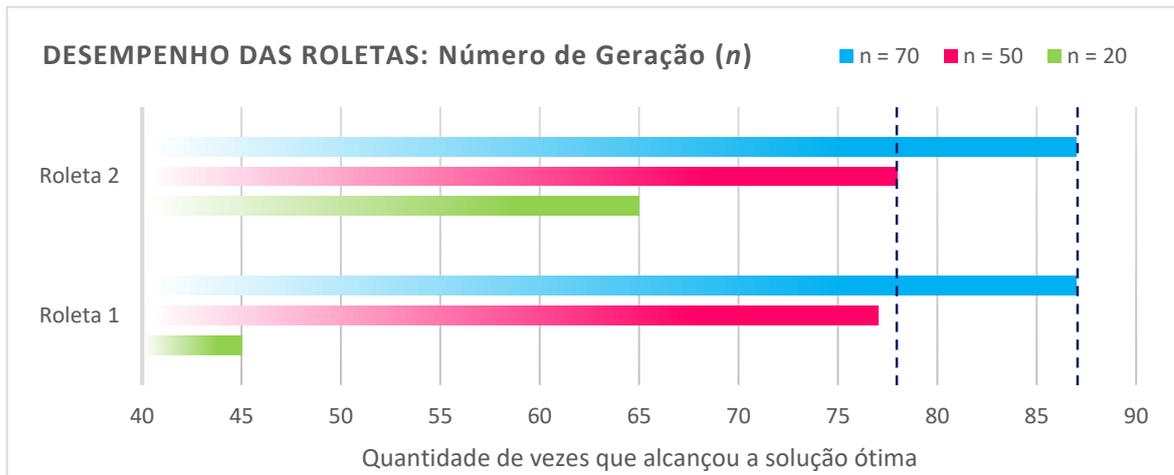
Fechando a análise do GA proposto para a resolução da problemática de seleção e sequenciamento de subcontratados em projeto de construção civil, a Tabela 10 apresenta os resultados obtidos pelo GA proposto utilizando as Roletas 1 e 2, assim como o resultado do modelo matemático.

Tabela 10 - Desempenho do GA: Roleta 1 versus Roleta 2

<i>Tipo da Roleta</i>	<i>GA – Roleta 1</i>	<i>GA – Roleta 2</i>	<i>Modelo Matemático</i>
<i>Parâmetros do GA</i>			
<i>Taxa de Mutação</i>	5%	5%	–
<i>Tamanho da População</i>	100	100	–
<i>Número de Geração</i>	50	20	–
<i>Melhor solução encontrada</i>			
<i>Geração do melhor indivíduo</i>	11	13	–
<i>Custo do Projeto</i>	R\$ 6.408.644,00	R\$ 6.408.644,00	R\$ 6.408.644,00
<i>Duração do projeto</i>	118 semanas	118 semanas	118 semanas
<i>Tempo médio de processamento (100 replicações)</i>	1.1114 s	0.4569 s	0.4029 s

Fonte: A Autora (2020).

Observa-se que ambas as roletas alcançaram o resultado ótimo do modelo matemático, entretanto na configuração dos parâmetros, o número de gerações para as roletas foram diferentes, para definir esse parâmetro foi realizada uma sequência de 100 execuções para cada tipo de roleta. A Figura 24 apresenta o desempenho das roletas (*i.e.*, o número de vezes que encontraram a solução ótima). Os demais parâmetros, taxa de mutação e tamanho da população foram definidos, respectivamente, em 5% e 100 indivíduos para as três variações no número de geração.

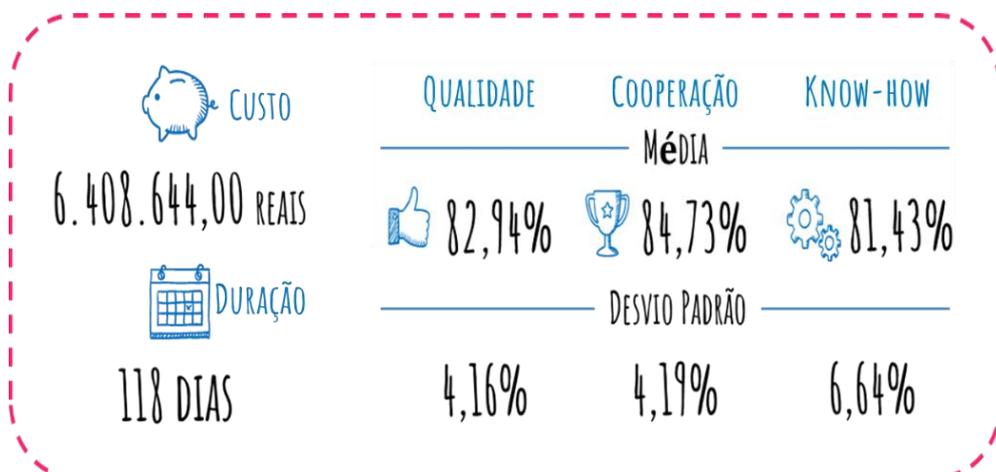
Figura 24 - Desempenho das roletas: parâmetro número de gerações (n)

Fonte: A Autora (2020).

Para o número de gerações igual a 20, a Roleta 2 apresentou desempenho bem superior, em uma sequência de 100 execuções, que a Roleta 1. Quando o número de gerações é aumentado para 50 ou 70, o desempenho das roletas se tornam similares, onde temos a Roleta 1 com 77 acertos do ótimo e a Roleta 2 com 78 acertos, para $n = 50$, e ambas com 87 acertos, para $n = 70$.

O desempenho da solução obtida com a aplicação do Método *FITradeoff* e do Algoritmo Genético proposto é apresentado na Figura 25, onde são quantificados os valores esperados para cada um dos critérios considerados na problemática.

Figura 25 - Desempenho da melhor solução nos cinco critérios



Fonte: A Autora (2020).

Para auxiliar os critérios de Qualidade, Cooperação e *Know-How* da Rede de Projeto, respectivamente na mesma ordem da Figura 25, foi feita uma média do desempenho dos subcontratados selecionados nas atividades, bem como o desvio padrão. Com média acima de 80% nos três critérios, o resultado foi considerado muito satisfatório para objetivos de sucesso do projeto, do qual pode-se esperar um projeto com partes engajadas, com entregas dentro da qualidade desejada e de valor agregado.

Uma vez alcançado o resultado para a problemática deste estudo, a análise seguinte dar-se-á no sentido de analisar o GA implementado, bem como as duas roletas propostas, na resolução de duas instâncias maiores denominada na Fase 3 como Teste MGrande. As instâncias possuem número de combinações igual a 8^{16} e 8^{32} , respectivamente, Equação 17 e Equação 18.

Diferente da rodada anterior, em que buscou-se determinar o parâmetro tido como satisfatório para cada tipo de roleta, nesta rodada ambas foram configuradas iguais. A Tabela 11 apresenta os parâmetros utilizados, bem como o desempenho de cada roleta para a primeira instância de tamanho 8^{16} . Foram realizadas 20 replicações do algoritmo para cada roleta.

Tabela 11 - Instância 8^{16} : Desempenho das roletas do GA proposto

Tipo da Roleta	GA – Roleta 1	GA – Roleta 2
MENOR Custo do projeto	R\$ 6.403.553,00	R\$ 6.386.787,00
MAIOR Custo do Projeto	R\$ 6.443.479, 00	R\$ 6.394.290,00
Desvio Padrão	R\$ 8.738,20	R\$1.936,48
$((Menor\ Custo - \acute{o}timo) / \acute{o}timo) \times 100$	0,26251 %	0,00000 %
$((Maior\ Custo - \acute{o}timo) / \acute{o}timo) \times 100$	0,82502 %	0,11748 %
Tempo médio de processamento (20 replicações)	323.52 s	832.32 s

Fonte: A Autora (2020).

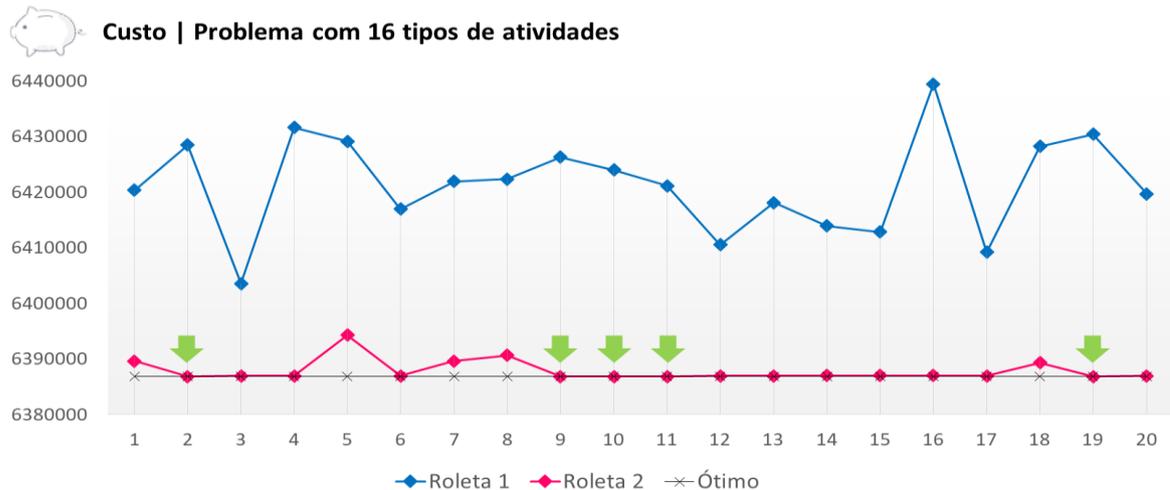
Analisando os intervalos das roletas, verifica-se que a Roleta 2 apresentou soluções em um intervalo mais próximo do ótimo. A distância entre o menor valor obtido na roleta e o valor ótimo foi de 0,00%, ou seja, o valor obtido é igual ao ótimo. Por outro lado, os resultados da Roleta 1 estão em um intervalo mais distante do valor ótimo, o maior valor deste intervalo está a 0,825% do ótimo. Em termos de maior aproximação do ótimo, a Roleta 2 apresentou melhor desempenho.

Foi observado, que a Roleta 1 apresenta baixa variabilidade para os indivíduos, permanecendo em uma vizinhança de soluções não viáveis por muitas gerações. Já a Roleta 2, apresenta uma busca melhor pelos indivíduos mais aptos, permanecendo pouco tempo na

vizinhança não viável. Essa característica reflete no tempo de processamento, em que verifica-se que a Roleta 1 é 2,57 vezes mais rápida que a Roleta 2.

A Figura 26 apresenta graficamente o desempenho das roletas nas 20 execuções, também foi inserido o valor ótimo da instância, este foi obtido pelo modelo matemático apresentado neste estudo.

Figura 26 - Instância 8¹⁶: Representação gráfica dos desempenhos das roletas



Fonte: A Autora (2020).

A Roleta 2 alcançou o ótimo em 5 vezes (setas verdes na Figura 23) e em 10 pontos a diferença entre o valor alcançado e o ótimo foi de 126 ou 228 reais. Por outro lado, a Roleta 1 não alcançou em nenhuma replicação, o melhor resultado das 20 replicações está 0,26251% do ótimo, como destacado na Tabela 11.

Para a instância 8³² foram realizadas apenas 10 execuções, em decorrência ao tempo de processamento ser alto. A Tabela 12 apresenta os parâmetros utilizados nas execuções, assim como os resultados obtidos. O valor ótimo da instancia também foi obtido pelo modelo matemático apresentado neste estudo.

Tabela 12 - Instância 8³²: Desempenho das roletas do GA proposto

Tipo da Roleta	GA – Roleta 1	GA – Roleta 2
MENOR Custo do projeto	R\$ 6.229.495,00	R\$ 6.146.205,00
MAIOR Custo do Projeto	R\$ 6.289.017,00	R\$ 6.173.651,00
Desvio Padrão	R\$ 19.383,49	R\$ 8.382,20
$((Menor\ Custo - \acute{o}timo) / \acute{o}timo) \times 100$	2,67211%	1,29936%
$((Maior\ Custo - \acute{o}timo) / \acute{o}timo) \times 100$	3,65313%	1,75172%
Tempo médio de processamento (10 replicações)	775,54 s	1045,11 s

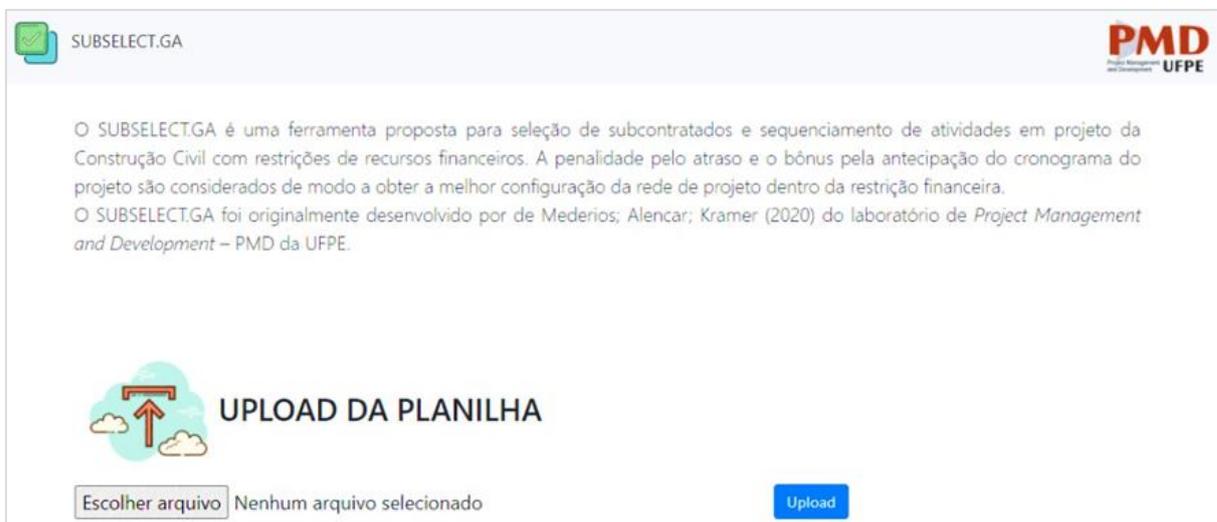
Fonte: A Autora (2020).

Analisando a distância entre o menor e o maior custo das roletas para o valor ótimo da instância, verifica-se que nenhuma das roletas alcançaram o ótimo. A Roleta 2, mais uma vez, apresentou melhor desempenho, resultado já esperado em decorrência das instâncias anteriores, com uma distância mínima de 1,299% e máxima de 1,75% do ótimo. Outro destaque para essa instância foi o tempo de resolução, a Roleta 1 teve tempo médio de 12,93 minutos, enquanto que a Roleta 2 demorou 17,41 minutos.

Os dados referentes as execuções do problema proposto, da Instância 8¹⁶ e Instância 8³² podem ser acessadas no *link* disponibilizado no Apêndice.

Com o propósito de ultrapassar as barreiras entre o ambiente acadêmico das universidades do ambiente profissional das empresas, optou-se pelo desenvolvimento do produto SubSelect.GA com o *framework web Flask* no *back-end* que incorpora o algoritmo genético proposto nesta pesquisa e o *framework web Bootstrap* para o *front-end*. A ferramenta consiste em uma aplicação *web* desenvolvida para acesso local. A Figura 27 apresenta a página inicial do SubSelect.GA

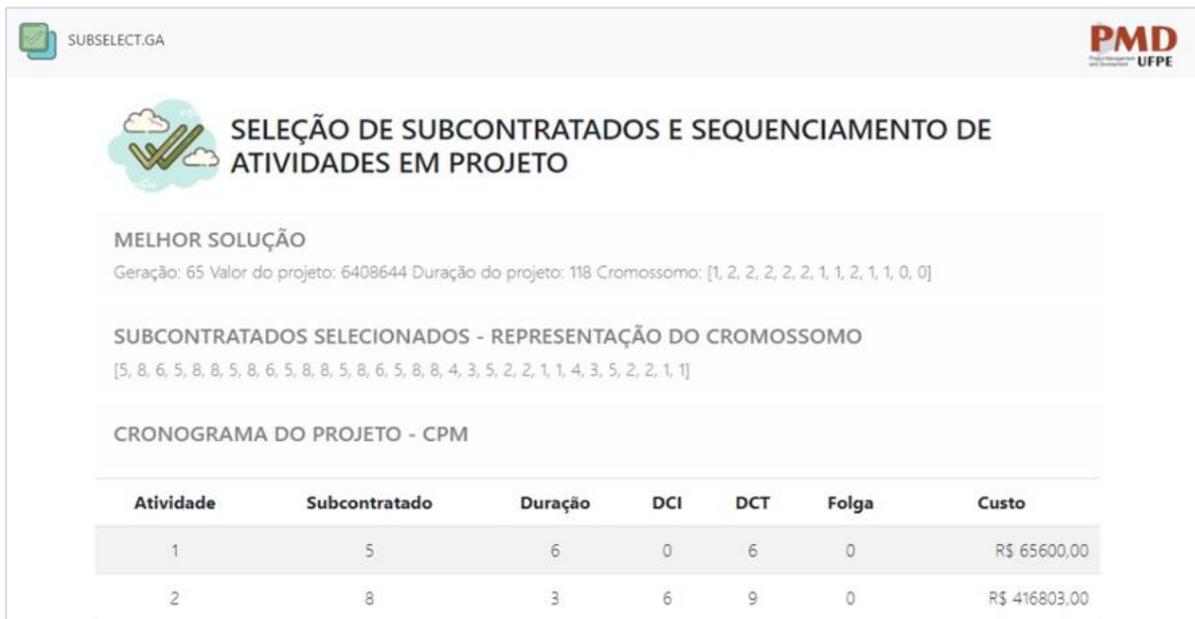
Figura 27 - SubSelect.GA index



Fonte: A Autora (2020).

No *index* o usuário visualiza o texto informativo sobre a ferramenta, seguido da sessão para realizar o *upload* do arquivo que deve estar de acordo os padrões da planilha base. Uma vez que o *upload* é feito, o *back-end* é executado e a tela seguinte traz a melhor solução encontrada, junto com as informações do CPM e o gráfico de desempenho do modelo (Figura 28).

Figura 28 - SubSelect.GA resultado



Fonte: A Autora (2020).

O objetivo é fornecer uma ferramenta gratuita de suporte à tomada de decisão em projetos, no que tange a problemática de seleção de subcontratados, de modo que as empresas de construção civil consigam incorporar mais tecnologia a seus processos e obter melhores índices de *performences*.

Algumas funcionalidades ainda precisam ser desenvolvidas, como por exemplo o cadastro para baixar a ferramenta, visto que deseja-se obter informações quanto ao tamanho e a localização das empresas que estão fazendo *download* e com isso mensurar o impacto da ferramenta. Além de recursos gráficos, como o desenho da rede do projeto e a exportação do CPM em arquivo no formato *.xml*, tendo em vista que o arquivo pode ser importado para alguma ferramenta de gerenciamento de projetos.

6 CONCLUSÕES E LIMITAÇÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste último capítulo são apresentadas as conclusões e pontuadas as principais limitações encontradas no âmbito da pesquisa, bem como as sugestões para trabalhos futuros.

6.1 CONCLUSÕES

A construção civil apresenta dificuldades para atingir determinados níveis de desempenho quando comparado com outras atividades produtivas. Em resposta, o gerenciamento de projetos na construção civil tem ganhado maior atenção nos últimos anos, ao passo que os projetos tornaram-se mais fragmentados, dinâmicos e, sobretudo, mais complexos, com maior número de variáveis que influenciam o desempenho do projeto no que tange o atendimento dos objetivos de cronograma, de orçamento e de qualidade do projeto.

O cronograma de projeto é a principal ferramenta para o gerenciamento de projetos. É a partir deste que se verifica o andamento do projeto em termos de adiantamento ou atrasos, e o resultado do *tradeoff* entre custo e duração, uma vez que cronogramas são desenvolvidos através das estimativas de custo e duração para as atividades. O processo de adiantamento de atividade é ótimo para exemplificar este *tradeoff*. Para antecipar uma atividade é necessário aumentar os recursos direcionados para a atividade, este aumento é diretamente relacionado ao acréscimo de custo.

De forma análoga, antecipar o cronograma de projeto consiste em um orçamento alto e, em problemas reais, os projetos possuem limites de orçamento. Por outro lado, o escorregamento do cronograma reflete em menores orçamentos, todavia, existe o *money value* associado ao projeto, de modo que projetos muito longo podem se tornar inviáveis em virtude da dinâmica do mercado.

Os métodos PERT/CPM foram desenvolvidos com o objetivo de construir cronogramas considerando aspectos de variabilidade na duração das atividades e para verificar quais atividades pertencem ao caminho crítico, ou seja, aquele que determina a duração máxima do projeto. Entretanto, a característica estática desses métodos negligenciam aspectos do projeto, como por exemplo a limitação e a alocação de recursos, além do *tradeoff* entre custo e duração. Com isso, a problemática *Time-Cost-Resource Optimization* é inserida no contexto de desenvolvimento de cronogramas de projetos e, conseqüentemente, novas abordagens de formulação de cronograma foram desenvolvidas.

Em paralelo a ascensão do gerenciamento de projetos, o processo de subcontratação foi amplamente difundido nos projetos como estratégia dos empreiteiros principais para melhorar seu desempenho e manter-se ágeis e competitivos. Com a subcontratação, o parcelamento das atividades é seguido do compartilhamento da responsabilidade e dos riscos do projeto, exigindo assim relações de cooperação e parceria entre os empreiteiros e os subcontratados para a obtenção mútua dos objetivos. Ao mesmo tempo que a subcontratação é vantajosa, existe o outro lado da moeda em que, o baixo desempenho do subcontratado pode desencadear problemas como o aumento de custos, escorregamento do cronograma, retrabalhos entre outros.

Em outras palavras, a seleção do subcontratado inadequado para determinada atividade tem efeito direto no gerenciamento do projeto em termos de cronograma. Ao abordar os critérios frequentemente utilizados na seleção de subcontratados, as pesquisas evidenciam a relação entre o desempenho do subcontratado com o desempenho no gerenciamento do projeto em termos de indicadores como custo, duração, qualidade, *know-how* e cooperação. Deste modo, a problemática de seleção de subcontratados é múltiplos objetivos, na qual deseja-se selecionar o subcontratado com melhor relação de desempenho nos critérios. Entretanto, esses critérios são por vezes conflitantes, é o caso do custo e da duração em que o melhor desempenho em dado critério ocorre em detrimento do outro, e de natureza qualitativa – quantitativa diferentes, como a qualidade e o custo, respectivamente, exigindo assim procedimentos de *tradeoffs*.

Neste aspecto, a resolução do problema de seleção de subcontratados em projetos e de sequenciamento de subcontratados para a construção de cronograma de projetos converge para a utilização das abordagens de apoio multicritério à decisão, ao passo que deseja-se obter uma decisão, para o problema que se coloca, a partir da avaliação das alternativas segundo múltiplos critérios, e de otimização combinatória, seja por métodos exatos ou metaheurísticos, para a formulação do cronograma com restrições de recursos.

Considerando essas abordagens, este estudo propôs uma metodologia para resolver o problema de sequenciamento dos subcontratados para uma rede de projeto e, ao mesmo tempo, selecionar o subcontratado para determinada atividade na rede combinando um modelo multicritério e uma metaheurística. A resolução da problemática deu-se em três fases, a primeira consistiu na definição do problema, onde foram apresentadas as características da rede de projeto, os conjuntos de subcontratados para as atividades, bem como as restrições quanto ao orçamento do projeto. Na segunda fase, o Método *FITradeoff* foi aplicado com o objetivo de ordenar os subcontratados segundo as preferências do decisor em cinco critérios: custo, duração, qualidade, *know-how* e cooperação, considerados importantes para o atingimento do

status de sucesso do projeto. Este ordenamento resultou em um subconjunto de subcontratados composto pelos classificados nas três primeiras posições do ordenamento. O objetivo para realizar esses *tradeoffs* envolvendo o decisor, e não usar diretamente um modelo de otimização multiobjetivo, foi verificar como cada tipo de atividade era avaliada pelo decisor, bem como, se a natureza diferente resultaria em diferentes configurações de preferências. Isso porque, normalmente, o peso ou a importância do critério nos modelos de otimização são fixos, conseqüentemente, em uma avaliação global do problema, o critério de custo possuem maior peso e, como destacado na revisão da literatura, nem sempre o menor custo é o melhor em termos de sucesso em projetos.

Desta forma, foi constatado que cada atividade do projeto possui sua particularidade, onde verificou-se diferentes configurações na ordem de preferência para os critérios, no *step 1* do *FITradeoff*, e valores da taxa de substituição de um critério em detrimento do outro. Chegando à seguinte conclusão que “sim”, a natureza das atividades configuram diferentes constantes de escala para os critérios.

Os critérios de custo, duração e qualidade revezaram entre as primeiras três posições do ordenamento, os critérios de cooperação e know-how foram, respectivamente, o 4º e o 5º na posição de ordenamento. Com isso, observou-se a não predominância do critério custo como o principal ou o de maior grau de importância, quando as atividades são avaliadas pela sua característica e pelo desempenho dos subcontratados no conjunto. Ou seja, quando os desempenhos dos subcontratados, em um determinado critério, apresentam uma variabilidade muito baixa, o decisor tende a priorizar outro critério com variabilidade maior.

Na terceira fase, a metaheurística Algoritmo Genético foi escolhida para resolver a problemática de otimização combinatória, tendo como objetivo encontrar a melhor configuração da rede de projeto com menor custo. A escolha dessa metaheurística ocorreu a partir da revisão da literatura realizada sobre o contexto de otimização em redes de projetos com restrição de custo, onde verificou-se a crescente utilização do GA nos trabalhos mais recentes, grande parte desta utilização é justificada pelo bom desempenho da Inteligência Artificial na resolução dos problemas desta natureza.

A partir do subconjunto dos subcontratados obtido com a aplicação do método *FITradeoff*, a problemática foi resolvida pelo GA. Foram considerados elementos de bônus por antecipação e penalidade pelo atraso do cronograma, e restrição de custo total do projeto. Nessa configuração, o problema apresenta um *tradeoff* entre custo e duração de cronograma, mas a função objetivo foi escrita buscando minimizar um único critério, o custo. O resultado obtido com o GA consistiu em uma rede de cronograma com custo ótimo de R\$ 6.408.644,00 e duração

de 118 semanas. O conjunto de subcontratados selecionados na solução ótima, apresentaram desempenho superior a 81% nos critérios de qualidade, cooperação e *know-how*. Destaca-se ainda que ambas as roletas alcançaram o valor ótimo.

Avaliando o resultado final, da problemática de seleção e sequenciamento de atividades em projetos, alcançado pela metodologia proposta, conclui-se que a combinação da abordagem multicritério com modelos de otimização combinatória resultaram em uma solução com valor agregado significativo, no sentido de que critérios importantes no sucesso do projeto não foram desprezados em detrimento de um único critério e de inserir no modelo de otimização um subconjunto de subcontratados trabalhado e “refinado” pelas preferências do decisor. Sendo assim, conseguiu-se balancear os aspectos de subjetividade do decisor ao realizar *tradeoffs* entre critérios conflitantes entre si, e de exatidão do modelos de otimização combinatória.

As metaheurísticas são frequentemente utilizadas para resolver problemas complexos de grande porte, uma vez que, o tempo necessário para resolvê-los por métodos exatos costuma ser bastante elevado e o valor da licença dos *softwares* comerciais podem ser considerados altos para as empresas. Neste sentido, buscou-se implementar a metaheurística de Algoritmos Genéticos para resolver a problemática deste estudo, como uma alternativa de menor custo. Tendo isso em vista, para avaliar o desempenho do GA implementado, duas instâncias maiores foram criadas. Em apenas uma instância, com a Roleta 2, o ótimo do problema foi alcançado. Todavia, a distância das soluções encontradas teve variação mínima e máxima, respectivamente, de [2,67%; 3,65%] para a Roleta 1 e de [1,30%; 1,75%] para a Roleta 2 na instância 8^{32} , do valor ótimo.

O desempenho do Algoritmo Genético implementado foi considerado muito satisfatório, podendo alcançar o ótimo para instâncias de pequeno e médio portes, e resultados próximos do ótimo para uma instância grande. Podendo este ser aplicado em problemas reais do cenário da construção civil, auxiliando na tomada de decisão e na busca por melhor *performance* deste setor da economia.

Por fim, a metodologia desenvolvida apresenta significativas contribuições no que tange o eixos econômico, tecnológico e social, ao passo que o objetivo é suportar melhor a tomada de decisão e contribuir para a melhor *performance* do setor da construção civil. Dessa forma, as contribuições se dão no âmbito da importância e do efeito multiplicador do setor na economia do país, onde o melhor desempenho do gerenciamento dos projeto e a melhor utilização dos recursos proveniente do processo de seleção e do sequenciamento fazendo com que a empresa tenha ganhos financeiros, aquecendo o setor tornando-o mais competitivo a nível nacional e internacional e, conseqüentemente, aquecendo outros setores. Além disso, empresas de outros

segmentos que possuam problemática similar a seleção de subcontratados em projetos, também podem utilizar o modelo, ou seja, não se restringe a projetos de construção civil.

Quando comparado com outros setores, como a indústria de manufatura e os serviços, a construção civil possui pouca tecnologia incorporar aos processos de planejamento e de construção. Neste sentido, o modelo proposto traz para o cenário da construção civil a aplicação de métodos otimização combinatória, muito utilizada em problemáticas de outros setores produtivos, que promovem a maior eficiência dos processos e de métodos multicritério de apoio à decisão.

O impacto social está relacionado com a força do setor em absorver mão de obra, desta forma espera-se que os ganhos do modelo estejam alinhados com a premissa de que quando selecionamos empresas com maior *know-how*, temos processos de maior valor agregado, ou seja, as pessoas possuem mais conhecimentos e competências para executar as atividade.

6.2 LIMITAÇÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Ao longo deste estudo, a principal limitação foi a ausência de dados de um empreendimento da construção civil brasileira para aplicar a metodologia. Visto que, pequenas e médias empresas desse setor não realizam procedimentos de avaliação dos subcontratados antes da contratação, existindo um processo de indicação de subcontratado, feita por parte de algum conhecido do empreiteiro, para aquele pacote de trabalho. De forma geral, esse estudo contribui para que as empresas busquem reavaliar seus procedimentos e melhorar o processo de seleção dos subcontratados, ao passo que foram exploradas as perspectivas de sucesso em projetos e uma metodologia de seleção de subcontratados foi desenvolvida, de modo a proporcionar maior apoio a tomada de decisão.

Outra limitação foi o pouco tempo de desenvolvimento da pesquisa, visto que no mestrado tem-se, efetivamente, um ano para realizar toda a pesquisa, com isso não foi possível implementação de um Algoritmo Genético para um problema multiobjetivo, visto que este iria requerer mais tempo de pesquisa e aprendizado. De toda forma, essa limitação pode ser vista como uma sugestão para trabalhos futuros, onde as constantes de escalas obtidas no ordenamento podem ser *inputs* para o modelo, de forma que possamos considerar a subjetividade do decisor na execução e não apenas um peso fixo para cada critério independente da atividade.

Seguindo com as sugestões para trabalhos futuros, destacam-se duas melhorias que podem ser feitas no GA implementado. A primeira consiste em inserir uma heurística para a

geração da população inicial, com isso o modelo já parte de indivíduos viáveis, evitando que o algoritmo retorne indivíduo inviáveis ao longo das gerações. A segunda melhoria a ser feita é na população, em que esta seria composta pelos melhores indivíduos da geração de pais e da geração de filhos, ou considerar um percentual da geração filhos, com melhor fitness, para realizar crossover.

Por fim, a última sugestão é uma aplicação no contexto nacional com algum empreendimento do governo, por exemplo. Considerando o contexto econômico atual e futuro, pós pandemia, as empresas e o governo precisarão se reinventar, “pensar fora da caixa”, e buscar melhor desempenho no setor em termos de custo, de qualidade e de rapidez. O trabalho desenvolvido converge para o alcance desses objetivos.

REFERÊNCIAS

- ABBASIANJAHROMI, H.; RAJAIE, H.; SHAKERI, E.; KAZEMI, O. A new approach for subcontractor selection in the construction industry based on portfolio theory. **Journal of Civil Engineering and Management**, v. 22, n.3, p. 346-356, 2016.
- ABBASIANJAHROMI, H.; RAJAIE, H.; SHAKERI, E. A FRAMEWORK FOR SUBCONTRACTOR SELECTION IN THE CONSTRUCTION INDUSTRY. **Journal of Civil Engineering and Management**, v. 19, n. 2, p.158-168, 2013. <http://dx.doi.org/10.3846/13923730.2012.743922>.
- ALBINO, V.; GARAVELLI, A. C. A neural network application to subcontractor rating in construction firms. **International Journal of Project Management**, v. 16, n. 1, p. 9-14, 1998. [http://dx.doi.org/10.1016/S0263-7863\(97\)00007-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0263-7863(97)00007-0)
- ALENCAR, L. H., DE ALMEIDA, A. T. **A model for selecting project team members using multicriteria group decision making**. Pesquisa Operacional, v. 30, n. 1, p. 221–236, 2010. doi:10.1590/s0101-74382010000100011
- ALENCAR, L. H.; DE ALMEIDA, A. T.; MOTA, C. M. M. Sistemática proposta para seleção de fornecedores em gestão de projetos. **Gestão Produção**, São Carlos, v. 14, n. 3, p. 477-487, 2007.
- ARDITI, D.; CHOTIBHONG, R. Issues in subcontracting practice. **Journal Construction Engineering Management**, v. 131, n. 8, p. 866–876, 2005.
- ARSLAN G.; KIVRAK; S. Critical factors to company success in the construction industry. **World Academy of Science, Engineering and Technology**, v. 45, p. 43–46, 2008.
- ARSLAN, G.; KIVRAK, S.; BIRGONUL, M. T.; DIKMEN, I. Improving sub-contractor selection process in construction projects: Web-based sub-contractor evaluation system (WEBSES). **Automation in Construction**, v.17, n. 4, p. 480-488, 2008.
- ASHURI, B.; TAVAKOLAN, M.. Fuzzy Enabled Hybrid Genetic Algorithm–Particle Swarm Optimization Approach to Solve TCRO Problems in Construction Project Planning. **Journal Of Construction Engineering And Management**, v. 138, n. 9, p.1065-1074, 2012. [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)co.1943-7862.0000513](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)co.1943-7862.0000513).
- AZADIVAR, F.; TOMPKINS, G. Simulation optimization with qualitative variables and structural model changes: A genetic algorithm approach. **European Journal of Operational Research**, v. 113, p. 169–182, 1999.
- BIRUK, S.; JAŚKOWSKI, P.; CZARNIGOWSKA, A. Minimizing Project Cost by Integrating Subcontractor Selection Decisions with Scheduling. In: **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. IOP Publishing, v. 245, p. 072007, 2017.
- BJORVATN, T.; WALD, A. Project complexity and team-level absorptive capacity as drivers of project management performance. **International Journal Of Project Management**, v. 36, n. 6, p.876-888, 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijproman.2018.05.003>.

BODAGHI, B.; PALANEESWARAN, E.; BABAK, A. Bi-objective multi-resource scheduling problem for emergency relief operations. **Production Planning and Control**, 2018. https://doi-org.ez16.periodicos.capes.gov.br/10.1007/978-1-4615-1495-4_11

BOUYSSOU, D. Modelling Inaccurate Determination, Uncertainty, Imprecision Using Multiple Criteria. In: Lockett A.G., Islei G. (eds) **Improving Decision Making in Organisations**. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, Springer, Berlin, Heidelberg, v. 335, 1989. https://doi.org/10.1007/978-3-642-49298-3_8

BRANS, J. P.; MARESCHAL, B. PROMÉTHÉE-Gaia une méthodologie d'aide à la décision en presence de critères multiples. **Éditions d l'Université de Bruxelles**, / Éditions Ellipses, Bruxelles, 2002.

CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO. **Banco de Dados: PIB Brasil e Construção Civil**. 2018. Acesso em fev. 2019. Disponível em: <http://www.cbicdados.com.br/menu/pib-e-investimento/pib-brasil-e-construcao-civil>.

CHAN, A. P. C.; SCOTT, D.; CHAN, A. P.L. Factors affecting the success of a construction project. **Journal of construction engineering and management**, v. 130, n. 1, p. 153-155, 2004. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2004\)130:1\(153\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2004)130:1(153))

CHAN, D. W. M.; KUMARASWAMY, M. M. An evaluation of construction time performance in the building industry. **Building and Environment**, v. 31, n. 6, p. 569-578, 1996.

CHAN, W. T.; CHUA, D. KH; KANNAN, G. Construction resource scheduling with genetic algorithms. **Journal of construction engineering and management**, v. 122, n. 2, p. 125-132, 1996. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(1996\)122:2\(125\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(1996)122:2(125))

CHEN, W. ; LEI, L.; WANG, Z.; TENG, M.; LIU, J. Coordinating supplier selection and project scheduling in resource-constrained construction supply chains. **International Journal Of Production Research**, v. 56, n. 19, p.6512-6526, 2018. <http://dx.doi.org/10.1080/00207543.2018.1436782>.

CHENG, M. Y.; TSAI, H. C.; HSIEH, W. S. Web-based conceptual cost estimates for construction projects using Evolutionary Fuzzy Neural Inference Model. **Automation in Construction**, v. 18, n. 2, p. 164-172, 2009.

CHEUNG, S. O.; SUEN, H. CH; CHEUNG, K. KW. PPMS: a web-based construction project performance monitoring system. **Automation in construction**, v. 13, n. 3, p. 361-376, 2004.

CHIANG, Y. Subcontracting and its ramifications: a survey of the building industry in Hong Kong. **International Journal of Project Management**, v. 27, p. 80–88, 2009.

CHOUDHRY, R. M.; HINZE, J. W.; ARSHAD, M.; GABRIEL, H. F. Subcontracting practices in the construction industry of Pakistan. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 138, n. 12, p. 1353-1359, 2012. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000562](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000562)

COELLO, C. A. C.; PULIDO, G. T.; LECHUGA, M. S. Handling multiple objectives with particle swarm optimization. **IEEE Transactions on evolutionary computation**, v. 8, n. 3, p. 256-279, 2004.

DAINTY, A.R.J.; BRISCOE, G.H.; MILLETT, S.J. Subcontractor perspectives on supply chain alliances. **Construction Management and Economics**, v. 19, p. 841–848, 2001.

DE ALMEIDA, A. T. **Processo de Decisão nas Organizações: construindo modelos de decisão multicritério**. Editora Atlas S.A, São Paulo, 2013.

DE ALMEIDA, A. T.; MORAIS, D. C.; ALENCAR, L. H.; CLEMENTE, T. R. N.; KRYM, E. M.; BARBOZA, C. Z. A multicriteria decision model for technology readiness assessment for energy based on PROMETHEE method with surrogate weights. **2014 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management**, p. 64-68, 2014. <http://dx.doi.org/10.1109/ieem.2014.7058601>

DE ALMEIDA, A. T.; DE ALMEIDA, J. A.; COSTA, A. P. C. S.; DE ALMEIDA-FILHO, A. T. A New Method for Elicitation of Criteria Weights in Additive Models: Flexible and Interactive Tradeoff. **European Journal of Operational Research**, v. 250, p. 179-191, 2016.

DE LACERDA, E. G. M.; DE CARVALHO, A. C. P. L. F. Introdução aos algoritmos genéticos. **Sistemas inteligentes: aplicações a recursos hídricos e ciências ambientais**, v. 1, p. 99-148, 1999.

DE MEDEIROS, J. C. G.; ALENCAR, L. H. Seleção de subcontratados na construção civil utilizando o FITtradeoff. In: **SBPO - Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**, 2019, Limeira – SP. PO e Inteligência Computacional, 2019a.

DE MEDEIROS, J. C. G.; ALENCAR, L. H. Utilização do método FITtradeoff para seleção de subcontratados na construção civil. In: **INSID - INNOVATION FOR SYSTEMS INFORMATION AND DECISION**, 1, 2019, Natal – RN. Meeting. Natal: Insid, 2019b.

DEMEULEMEESTER, E. L.; HERROELEN, W. S. New benchmark results for the resource-constrained project scheduling problem. **Management Science**, v. 43, n. 11, p. 1485-1492, 1997.

DEMIRKESEN, S.; OZORHON, B. Impact of integration management on construction project management performance. **International Journal of Project Management**, v. 35, n.8, p. 1639 – 1654, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2017.09.008>.

DOLOI, H. Cost Overruns and Failure in Project Management: Understanding the Roles of Key Stakeholders in Construction Projects. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 139, n. 3, p. 267 – 279, 2013.

DONG, N.; GE, D.; FISCHER, M.; HADDAD, Z. A genetic algorithm-based method for look-ahead scheduling in the finishing phase of construction projects. **Advanced Engineering Informatics**, v. 26, n. 4, p.737-748, 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aei.2012.03.004>.

EDWARDS, W.; BARRON, F. H. SMARTS and SMARTER: Improved Simple Methods for Multiattribute Utility Measurement. **Organizational Behavior And Human Decision Processes**, v. 60, n. 3, p.306-325, 1994. <http://dx.doi.org/10.1006/obhd.1994.1087>.

- EGAN, J. **Rethinking construction**. Department of Environment, Transport and the Region, 1998.
- ELAZOUNI, A.; METWALLY, F. D-Sub: decision support system for subcontracting construction works. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 126 n. 3, p. 191–200, 2000.
- ELAZOUNI, A.M.; GAB-ALLAH, A. A. Finance-Based Scheduling of Construction Projects Using Integer Programming. **Journal Of Construction Engineering And Management**, v. 130, n. 1, p.15-24, 2004. [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9364\(2004\)130:1\(15\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)0733-9364(2004)130:1(15)).
- ELBELTAGI, E.; HEGAZY, T.; GRIERSON, D.. Comparison among five evolutionary-based optimization algorithms. **Advanced Engineering Informatics**, v. 19, n. 1, p.43-53, 2005. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aei.2005.01.004>.
- FAGEHA, M. K.; AIBINU, A. A. Managing project scope definition to improve stakeholders participation and enhance project outcome. **Procedia Social and Behavioral Sciences**, v. 74, p. 154-164, 2013.
- FALCONE, M.A.G. **Estudo Comparativo Entre Algoritmos Genéticos e Evolução Diferencial para Otimização de um Modelo de Cadeia de Suprimento Simplificada**. Dissertação de mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUC-PR), Curitiba, PR, 2004.
- FENG, C. W.; LIU, L.; BURNS, S. A. Using Genetic Algorithms to Solve Construction Time-Cost Trade-Off Problems. **Journal Of Computing In Civil Engineering**, v. 11, n. 3, p.184-189, 1997. [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)0887-3801\(1997\)11:3\(184\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)0887-3801(1997)11:3(184)).
- FLORICEL, S.; MICHELA, J.L.; PIPERCA, S. Complexity, uncertainty-reduction strategies, and project performance. **International Journal of Project Management**, v. 34, p. 1360-1383, 2016.
- FRANCK, B.; NEUMANN, K.; SCHWINDT, C. Truncated branch-and-bound, schedule-construction, and schedule-improvement procedures for resource-constrained project scheduling. **Or-spektrum**, v. 23, n. 3, p. 297-324, 2001. <http://dx.doi.org/10.1007/pl00013356>.
- FREJ, E. A.; DE ALMEIDA, A. T.; COSTA, A. P. C. S. Using data visualization for ranking alternatives with partial information and interactive tradeoff elicitation. **Operational Research**, v. 19, n. 4, p. 909-931, 2019.
- FREJ, T. A.; ALENCAR, L. H. Fatores de sucesso no gerenciamento de múltiplos projetos na construção civil de Recife. **Produção**, v. 20, n. 3, p. 322-334, 2010.
- FRIMPONG, Y.; OLUWOYE, J.; AND CRAWFORD, L. Causes of delay and cost overruns in construction of groundwater projects in a developing countries: Ghana as a case study. **International Journal of Project Management**, v. 21, n. 5, p. 321–326, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0263-7863\(02\)00055-8](https://doi.org/10.1016/S0263-7863(02)00055-8).
- FULKERSON, D. R. Expected critical path lengths in PERT networks. **Operations Research**, v. 10, n. 6, p. 808-817, 1962.

GOLDBERG D. E. Genetic Algorithms in Search, **Optimization and Machine Learning**. In Addison-Wesley Longman Publishing Company, Inc. Boston, MA. 1989.

GRASSO, B.; RASDORF, W.; BRIDGERS, M. Nature and extent of domestic construction program outsourcing. **Journal of construction engineering and management**, v. 134, n. 12, p. 1002-1010, 2008. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2008\)134:12\(1002\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2008)134:12(1002))

GRAY, C. F.; LARSON, E. W.. **Gerenciamento de projetos**. AMGH Editora, 2009.

GUERRIERO, F.; TALARICO, L. A solution approach to find the critical path in a time-constrained activity network. **Computers & operations research**, v. 37, n. 9, p. 1557-1569, 2010.

HAHN, E. D. Mixture densities for project management activity times: A robust approach to PERT. **European Journal of Operational Research**, v. 188, p. 450-459, 2008.

HARPER, C. M. **Measuring Project Integration Using Relational Contract Theory**. Ph. D. Thesis. University of Colorado Boulder, Boulder, 2014. https://scholar.colorado.edu/cven_gradetds/10

HARTMANN, A., LING, F. Y. Y., TAN, J. S. H. Relative Importance of Subcontractor Selection Criteria: Evidence from Singapore. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 135, n. 9, p. 826–832, 2009.

HATUSH, Z.; SKITMORE, M. Criteria for contractor selection. **Construction Management & Economics**, v. 15, p. 19-38, 1997.

HEGAZY, T. Optimization of resource allocation and leveling using genetic algorithms. **Journal of construction engineering and management**, v. 125, n. 3, p. 167-175, 1999.

HEGAZY, T.; MENESI, W. Critical path segments scheduling technique. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 136, n. 10, p. 1078-1085, 2010.

HELLARD, R. B. **Project partnering: principle and practice**. Thomas Telford, 1995.

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. **Introdução à pesquisa operacional**. 9ª Ed, Porto Alegre: AMGH, 2013.

HINZE, J.; TRACEY, A. The contractor-subcontractor relationship: the subcontractor's view. **Journal of construction engineering and management**, v. 120, n. 2, p. 274-287, 1994.

HOLLAND, J. H. Adaptation in natural and artificial systems. Ann Arbor: **The University of Michigan press**, 1975.

HOLLOWAY, H. A.; WHITE III, C. C. Question selection for multi-attribute decision-aiding. **European Journal of Operational Research**, v. 148, n. 3, p.525-533, ago. 2003. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0377-2217\(02\)00436-8](http://dx.doi.org/10.1016/s0377-2217(02)00436-8).

HOLT, G. D. Which contractor selection methodology? **International Journal of Project Management**, v. 16, n. 3, p. 153–64, 1998.

HU, Z.G.. A new progress in the theory of PERT. **IEEE 18th International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IE&EM)**, Changchun, p. 15-20, 2011.

HUANG, Y.; ZOU, x.; ZHANG, L.. Genetic Algorithm–Based Method for the Deadline Problem in Repetitive Construction Projects Considering Soft Logic. **Journal Of Management In Engineering**, v. 32, n. 4, a. 04016002, 2016.
[http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)me.1943-5479.0000426](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)me.1943-5479.0000426).

HUSSIN, J. M.; RAHMAN, I. A.; MEMON, A. H. The way forward in sustainable construction: issues and challenges. **International Journal of Advances in Applied Sciences**, v. 2, n. 1, p. 15-24, 2013.

IP, W. H.; YUNG, K. L.; WANG, D. A branch and bound algorithm for sub-contractor selection in agile manufacturing environment. **International Journal of Production Economics**, v. 87, n. 2, p. 195-205, 2004. [http://dx.doi.org/10.1016/s0925-5273\(03\)00125-7](http://dx.doi.org/10.1016/s0925-5273(03)00125-7).

JARKAS, A. M. Contractors Perspective of Construction Project Complexity: Definitions, Principles, and Relevant Contributors. **Journal Of Professional Issues In Engineering Education And Practice**, v. 143, n. 4, p.04017007, 2017.
[http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)ei.1943-5541.0000337](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)ei.1943-5541.0000337).

JAŚKOWSKI, P.; SOBOTKA, A. Scheduling Construction Projects Using Evolutionary Algorithm. **Journal Of Construction Engineering And Management**, v. 132, n. 8, p.861-870, 2006. [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9364\(2006\)132:8\(861\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)0733-9364(2006)132:8(861)).

KALIBA, C.; MUYA, M.; MUMBA, K. Cost escalation and schedule delays in road construction projects in Zambia. **International Journal Of Project Management**, v. 27, n. 5, p.522-531, 2009. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijproman.2008.07.003>.

KAMING, P. F.; OLOMOLAIYE, P. O.; HOLT, G. D.; HARRIS, F. C. Factors influencing construction time and cost overruns on high-rise projects in Indonesia. **Construction Management & Economics**, v. 15, n. 1, p. 83-94, 1997.

KANDIL, A.; EL-RAYES, K. Parallel Genetic Algorithms for Optimizing Resource Utilization in Large-Scale Construction Projects. **Journal Of Construction Engineering And Management**, v. 132, n. 5, p. 491-498, 2006. [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9364\(2006\)132:5\(491\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)0733-9364(2006)132:5(491)).

KANNIMUTHU, M.; EKAMBARAM, P.; RAPHAEL, B.; KUPPUSWAMY, A. Resource Unconstrained and Constrained Project Scheduling Problems and Practices in a Multiproject Environment. **Advances In Civil Engineering**, v. 2018, p.1-13, 2018.
<http://dx.doi.org/10.1155/2018/9579273>.

KEENEY, R.L. ; RAIFFA, H. **Decisions with multiple objectives: preferences and value tradeoffs**. Cambridge University Press, Cambridge, 1999.

KERKHOVE, L.-P.; VANHOUCHE, M. Optimised scheduling for weather sensitive offshore construction projects. **Omega**, v. 66, p.58-78, 2017.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.omega.2016.01.011>.

- KONAK, A.; COIT, D. W.; SMITH, A. E. Multi-objective optimization using genetic algorithms: A tutorial. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 91, n. 9, p.992-1007, 2006. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ress.2005.11.018>.
- KUKLAN, H.; ERDEM, E.; NASRI, F.; PAKNEJAD, M. J. Project planning and control: An enhanced PERT network. **International Journal of Project Management**, v. 11, n. 2, p. 87-92, 1993.
- KUMARASWAMY, M. M.; MATTHEWS, J. D. Improved subcontractor selection employing partnering principles. **Journal of Management in Engineering**, v. 16, n. 3, p. 47-57, 2000.
- KURESKI, R. **Produto interno bruto, emprego e renda do macrossetor da construção civil paranaense em 2006**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 11, n. 3, p. 131-142, 2011.
- KURESKI, R.; RODRIGUES, R. L.; MORETTO, A. C.; SESSO FILHO, U. A.; HARDT, L. P. A. **O macrossetor da construção civil na economia brasileira em 2004**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 8, n. 1, p. 7-19, 2008.
- LARSON, E. Project partnering: results of study of 280 construction projects. **Journal of management in engineering**, v. 11, n. 2, p. 30-35, 1995.
- LEE, H. S.; SEO, J. O.; PARK, M.; RYU, H. G.; KWON, S. S. Transaction-Cost-Based Selection of Appropriate General Contractor-Subcontractor Relationship Type. **Journal Of Construction Engineering And Management**, v. 135, n. 11, p.1232-1240, 2009. [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)co.1943-7862.0000086](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)co.1943-7862.0000086).
- LEE, J.; HYUN, H.. Multiple Modular Building Construction Project Scheduling Using Genetic Algorithms. **Journal Of Construction Engineering And Management**, v. 145, n. 1, a. 04018116, 2019. [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)co.1943-7862.0001585](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)co.1943-7862.0001585).
- LEE, Y.; GATTON, T. M.. Construction scheduling based on resource constraints. **AACE International Transactions**, v. 1994, p. CSC3. 1, 1994.
- LEU, S.; CHEN, A. T.; YANG, C. H.. Fuzzy optimal model for resource-constrained construction scheduling. **Journal of Computing in Civil Engineering**, v. 13, n. 3, p. 207-216, 1999.
- LINDEN, R.. **Algoritmos Genéticos: uma importante ferramenta da Inteligência Computacional**. Brasport, Rio de Janeiro, 2 Edição, 2008.
- LITTLEFIELD, T. K.; RANDOLPH, P. H. PERT Duration Times: Mathematics or MBO. **Interfaces**, v. 21, n. 6, p.92-95, 1991. <http://dx.doi.org/10.1287/inte.21.6.92>.
- LIU, G. ; SHEN, Q. ; LI, H. ; SHEN, L.. Factors constraining the development of professional project management in China's construction industry. **International Journal of Project Management**, v. 22, n. 3, p. 203-211, 2004. [https://doi.org/10.1016/S0263-7863\(03\)00068-1](https://doi.org/10.1016/S0263-7863(03)00068-1).
- LIU, S.; WANG, C.. Resource-constrained construction project scheduling model for profit maximization considering cash flow. **Automation In Construction**, v. 17, n. 8, p.966-974, 2008. <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2008.04.006>.

- LONG, L. D.; OHSATO, A.. A genetic algorithm-based method for scheduling repetitive construction projects. **Automation in Construction**, v. 18, n. 4, p.499-511, 2009. <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2008.11.005>.
- LU, M.; LI, H.. Resource-Activity Critical-Path Method for Construction Planning. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 129, n. 4, p.412-420, 2003. [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9364\(2003\)129:4\(412\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)0733-9364(2003)129:4(412)).
- LUU, D.; SHER, W. Construction tender subcontract selection using case-based reasoning. **Construction Economics and Building**, v. 6, n. 2, p. 32-43, 2006.
- MAHDI, I. M.; RILEY, M. J.; FERREIG, S. M.; ALEX, A. P. A multi-criteria approach to contractor selection. **Engineering, Construction and Architectural Management**, v. 9, n. 1, p. 29-37, 2002.
- MANSFIELD, N.; UGWU, O.; DORAN, T. Causes of delay and cost overruns in Nigerian construction projects. **International Journal Of Project Management**, v. 12, n. 4, p.254-260, 1994. [http://dx.doi.org/10.1016/0263-7863\(94\)90050-7](http://dx.doi.org/10.1016/0263-7863(94)90050-7).
- MANU, P.; ANKRAH, N.; PROVERBS, D.; SURESH, S. Mitigating the health and safety influence of subcontracting in construction: The approach of main contractors. **International Journal of Project Management**, v. 31, n. 7, p. 1017-1026, 2013.
- MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M.. **Fundamentos de metodologia científica**. 5ª Ed, São Paulo: Atlas, 2003.
- MATTILA, K. G.; ABRAHAM, D. M. Resource leveling of linear schedules using integer linear programming. **Journal of construction engineering and management**, v. 124, n. 3, p. 232-244, 1998.
- MBACHU, J. Conceptual framework for the assessment of subcontractors' eligibility and performance in the construction industry. **Construction Management and Economics**, v. 26, n. 5, p. 471-484, 2008. <http://dx.doi.org/10.1080/01446190801918730>
- MCCALL, J. Genetic algorithms for modelling and optimisation. **Journal of Computational and Applied Mathematics**, v. 184, n. 1, p. 205-222, 2005. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cam.2004.07.034>
- MELLO, L. C. B. B.; DE AMORIM, S. R. L. **O subsetor de edificações da construção civil no Brasil**: uma análise comparativa em relação à União Europeia e os Estados Unidos. **Produção**, v. 19, n. 2, p. 388-399, 2009.
- MENG, X. The effect of relationship management on project performance in construction. **International Journal of Project Management**, v. 30, n. 2, p.188-198, 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijproman.2011.04.002>
- MERKLE, D.; MIDDENDORF, M.; SCHMECK, H. Ant colony optimization for resource-constrained project scheduling. **IEEE transactions on evolutionary computation**, v. 6, n. 4, p. 333-346, 2002.
- MICHALEVICZ, Z.. **Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs**. Springer Science & Business Media, 1996.

MIHM, J.; LOCH, C.; HUCHZERMEIER, A. Problem-solving oscillations in complex engineering projects. **Management Science**, v. 46, n. 6, p. 733-750; 2003.

MINISTÉRIO DO PLANEJAMENTO. **7º Balanço do PAC**. 2018. Acesso em: fev. 2019. Disponível em: <http://www.pac.gov.br/noticia/ecbc5e1e>

MITCHELL, M.. **An Introduction to Genetic Algorithms**. Cambridge, USA: MIT Press, 1996.

MONGALO, M.A.; LEE, J. A comparative study of methods for probabilistic project scheduling. **Computers & Industrial Engineering**, v. 19, p. 505-509, 1990.

MUNGLE, S.; BENYOUCEF, L.; SON, Y. J.; TIWARI, M. K. A fuzzy clustering-based genetic algorithm approach for time–cost–quality trade-off problems: A case study of highway construction project. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v. 26, n. 8, p. 1953-1966, 2013.

NG, S. T.; TANG, Z. Labour-intensive construction sub-contractors: Their critical success factors. **International Journal of Project Management**, v. 28, n. 7, p. 732-740, 2010. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijproman.2009.11.005>

NG, S. T.; TANG, Z.; PALANEESWARAN, E. Factors contributing to the success of equipment-intensive subcontractors in construction. **International Journal of Project Management**, v. 27, n. 7, p. 736-744, 2009. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijproman.2008.09.006>

NICHOLAS, J.M.; STEYN, H. Project time planning and networks. **Project Management for Engineering, Business, and Technology**, 4th ed., Butterworth-Heinemann, Boston, p. 197-236, 2012.

NUDTASOMBOON, N.; RANDHAWA, S. U. Resource-constrained project scheduling with renewable and non-renewable resources and time-resource tradeoffs. **Computers & Industrial Engineering**, v. 32, n. 1, p. 227-242, 1997.

NZEKWE-ExCEL, C. Satisfaction assessment in construction projects: a conceptual framework. **Built Environment Project And Asset Management**, v. 2, n. 1, p.86-102, 2012. <http://dx.doi.org/10.1108/20441241211235071>.

OSPINA-ALVARADO, A. M.; CASTRO-LACOUTURE, D. Interaction of Processes and Phases in Project Scheduling Using BIM for A/E/C/FM Integration. **Construction Research Congress 2010**, p.939-948, 2010. [http://dx.doi.org/10.1061/41109\(373\)94](http://dx.doi.org/10.1061/41109(373)94).

OSPINA-ALVARADO, A.; CASTRO-LACOUTURE, D.; ROBERTS, J. S. Unified Framework for Construction Project Integration. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 142, n. 7, a. 04016019, 2016. [https://doi-org.ez16.periodicos.capes.gov.br/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001131](https://doi-org.ez16.periodicos.capes.gov.br/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001131).

PEROBELLI, F. S.; CAMPOS, R. B. A.; CARDOSO, V. L.; VALE, V. A. **Avaliação do setor da construção civil para as principais economias mundiais**: uma análise sistêmica a partir de uma abordagem de insumo-produto para o período de 1995 a 2009. **Ensaio FEE (Online)**, v. 37, p. 331-366, 2016.

PMI - Project Management Institute. **Um Guia do Conhecimento em Gerenciamento de Projetos: Guia PMBOK. 5ª Ed**, Pennsylvania, 2013.

POLAT, G. Subcontractor selection using the integration of the AHP and PROMETHEE methods. **Journal Of Civil Engineering And Management**, v. 22, n. 8, p.1042-1054, 29 abr. 2015. <http://dx.doi.org/10.3846/13923730.2014.948910>.

POLAT, G.; CETINDERE, F.; DAMCI, A.; BINGOL, B. N. Smart home subcontractor selection using the integration of ahp and evidential reasoning approaches. **Procedia engineering**, v. 164, p. 347-353, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.629>

POLAT, G.; KAPLAN, B.; BINGOL, B. N. Subcontractor Selection using Genetic Algorithm. **Procedia Engineering**, v. 123, p.432-440, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2015.10.081>.

POLLACK-JOHNSON, B.; LIBERATORE, M. J. Incorporating quality considerations in to project time/cost trade-off analysis and decision making. **IEEE Transactions on Engineering Management**, v. 53, n. 4, p. 534–542, 2006.

PREMACHANDRA, I. M. An approximation of the activity duration distribution in PERT. **Computers & Operations Research**, v 28, n. 5, p. 443 – 452, 2001.

QAZI, A.; QUIGLEY, J.; DICKSON, A.; KIRYTOPOULOS, K. Project Complexity and Risk Management (ProCRiM): Towards modelling project complexity driven risk paths in construction projects. **International Journal Of Project Management**, v. 34, n. 7, p.1183-1198, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijproman.2016.05.008>.

RABECHINI Jr., R.; CARVALHO, M. M. **Gerenciamento de Projetos na Prática: Casos Brasileiros**. São Paulo: Atlas, 2006.

RAHMAN, M. M.; KUMARASWAMY, M. M.. Contracting Relationship Trends and Transitions. **Journal of Management in Engineering**, v. 20, n. 4, p. 147 – 161, 2004. [https://doi-org.ez16.periodicos.capes.gov.br/10.1061/\(ASCE\)0742-597x\(2004\)20:4\(147\)](https://doi-org.ez16.periodicos.capes.gov.br/10.1061/(ASCE)0742-597x(2004)20:4(147)).

RANGEL, L. A. D.; GOMES, L. F. A. M.; MOREIRA, R. A. Decision theory with multiple criteria: an application of ELECTRE IV and TODIM to SEBRAE/RJ. **Pesquisa Operacional**, v. 29, n. 3, p. 577-590, 2009.

REDA, R. M. RPM: Repetitive Project Modeling. **Journal Of Construction Engineering And Management**, v. 116, n. 2, p.316-330, 1990. [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9364\(1990\)116:2\(316\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)0733-9364(1990)116:2(316)).

REEVES, C. R. A genetic algorithm for flowshop sequencing. **Computers & Operations Research**, v. 22, n. 1, p. 5–13, 1995.

REEVES, C.R. **Modern Heuristic Techniques for Combinatorial Problems**. New York, USA: McGraw-Hill, 1995.

ROSELLI, L. R. P.; DE ALMEIDA, A. T.; FREJ, E. A. Decision neuroscience for improving data visualization of decision support in the FITradeoff method. **Operational Research**, v. 19, n. 56, p.1-22, 2019. <http://dx.doi.org/10.1007/s12351-018-00445-1>.

ROY, B. *Multicriteria Methodology for Decision Aiding*. Netherlands: **Kluwer Academic Publishers**, 1996.

ROY, B. **Des critères multiples en recherche opérationnelle: pourquoi?**. Université Paris-Dauphine, 1987.

ROY, B., BOUYSSOU, D. Aide Multicritère à la décision: méthodes et cas. **Editora Economica**, Paris, 1993.

ROY, B.; HUGONNARD, J. C. Ranking of suburban line extension projects on the Paris metro system by a multicriteria method. **Transportation Research Part A: General**, v. 16, n. 4, p. 301-312, 1982.

SAATY, T.L. **Fundamentals of Decision Making and Priority Theory with the Analytic Hierarchy Process**. RWS, Pittsburgh, v. 6, 1994.

SAPKAUSKIENE, A.; LEITONIENE, S. The concept of time-based competition in the context of management theory. **Engineering Economics**, v. 21, n. 2, 2010.

SASTRY, K.; GOLDBERG, D.; KENDALL, G.. **Genetic algorithms**. In: Search methodologies. Springer, Boston, MA, 2005. p. 97-125.

SCHWEGLER, B. R.; FISCHER, M. A.; O'CONNELL, M. J.; HÄNNINEN, R.; LAITINEN, J. Near-medium-and long-term benefits of information technology in construction. **Center for Integrated Facility Engineering (CIFE) Working Paper**, n. 65, 2001.

SENOUCI, A. B.; ELDIN, N. N. Use of Genetic Algorithms in Resource Scheduling of Construction Projects. **Journal Of Construction Engineering And Management**, v. 130, n. 6, p.869-877, 2004. [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9364\(2004\)130:6\(869\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)0733-9364(2004)130:6(869)).

SENOUCI, A.; AL-DERHAM, H. R.. Genetic algorithm-based multi-objective model for scheduling of linear construction projects. **Advances In Engineering Software**, v. 39, n. 12, p.1023-1028, 2008. <http://dx.doi.org/10.1016/j.advengsoft.2007.08.002>.

SHANE, J. S; MOLENAAR, K. R.; ANDERSON, S.; SCHEXNAYDER, C.. Construction Project Cost Escalation Factors. **Journal Of Management In Engineering**, v. 25, n. 4, p.221-229, out. 2009. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)0742-597x\(2009\)25:4\(221\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)0742-597x(2009)25:4(221)).

SHASH, A. A. Bidding practices of subcontractors in Colorado. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 124, n. 3, p. 219-225, 1998. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(1998\)124:3\(219\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(1998)124:3(219))

SHEPPARD, C. **Genetic algorithms with python**. Smashwords Edition, 2017.

SHI, X. H.; LIANG, Y. C.; LEE, H. P.; LU, C.; WANG, L. M. An improved GA and a novel PSO-GA-based hybrid algorithm. **Information Processing Letters**, v. 93, n. 5, p. 255-261, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.ipl.2004.11.003>

SKITMORE, M.; WILCOCK, J.. Estimating processes of smaller builders. *Construction Management and Economics*, v. 12, n. 2, p. 139-154, 1994. <https://doi.org/10.1080/01446199400000020>

- SU, C. T.; SANTORO, M. C.; MENDES, A. Constructive Heuristics for Project Scheduling Resource Availability Cost Problem with Tardiness. **Journal Of Construction Engineering And Management**, v. 144, n. 8, p.1-15, 2018. [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)co.1943-7862.0001524](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)co.1943-7862.0001524).
- SUNG, C. S.; LIM, S. K. A scheduling procedure for a general class of resource-constrained projects. **Computers & Industrial Engineering**, v. 12, n. 1, p. 227–242, 1996.
- TEIXEIRA, L. P.; CARVALHO, F. M. A. **A construção civil como instrumento do desenvolvimento da economia brasileira**. Revista Paranaense de Desenvolvimento, Curitiba, n.109, p.9-26, 2005.
- THOMAS, G.; THOMAS, M. **Construction partnering & integrated teamworking**. Blackwell Publishing: London, 2005.
- THORNLEY, G. **Critical Path Analysis in Practice. Collected Papers on Project Control**, Routledge, 2013.
- ULUBEYLI, S.; KAZAZ, A. Fuzzy multi-criteria decision making model for subcontractor selection in international construction projects. **Technological and Economic Development of Economy**, v. 22, n. 2, p. 210-234, 2016. <http://dx.doi.org/10.3846/20294913.2014.984363>.
- ULUBEYLI, S.; MANISALI, E.; KAZAZ, A. Subcontractor selection practices in international construction projects. **Journal Of Civil Engineering And Management**, v. 16, n. 1, p.47-56, 2010. Vilnius Gediminas Technical University. <http://dx.doi.org/10.3846/jcem.2010.04>.
- VETSCHERA, R.; DE ALMEIDA, A. T. A PROMETHEE-based approach to portfolio selection problems. **Computers & Operations Research**, v. 39, n. 5, p.1010-1020, 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cor.2011.06.019>.
- VIDAL, L. A.; MARLE, F.. Understanding project complexity: Implications on project management. **Kybernetes**, v. 37, n. 8, p. 1094-1110, 2008. <https://doi.org/10.1108/03684920810884928>.
- VINCKE, P. **Multicriteria decision-aid**. Wiley, Bruxelles, 1992.
- WANG, D.; YUNG, K. L.; IP, W. H. A heuristic genetic algorithm for subcontractor selection in a global manufacturing environment. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)**, v. 31, n. 2, p. 189-198, 2001.
- WARD, S.; CHAPMAN, C. Transforming project risk management into project uncertainty management. **International Journal Of Project Management**, v. 21, n. 2, p.97-105, fev. 2003. [http://dx.doi.org/10.1016/s0263-7863\(01\)00080-1](http://dx.doi.org/10.1016/s0263-7863(01)00080-1).
- WAUGH, L. M.; FROESE, T. M. Constraint knowledge for construction scheduling. In: **1991 First International Conference on Expert Planning Systems**. IET, p. 114-118, 1990.
- WEBER, M.; BORCHERDING, K. Behavioral influences on weight judgments in multiattribute decision making. **European Journal of Operational Research**, v. 67, n. 1, p.1-12, 1993. [http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217\(93\)90318-h](http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217(93)90318-h).

WEI, C. C.; LIU, P. H.; TSAI, Y. C. Resource-constrained project management using enhanced theory of constraint. **International Journal of Project Management**, v. 20, n. 7, p.561-567, 2002. [http://dx.doi.org/10.1016/s0263-7863\(01\)00063-1](http://dx.doi.org/10.1016/s0263-7863(01)00063-1).

WINCH, G. The growth of self-employment in British construction. **Construction Management and Economics**, v. 16, p. 531-542, 1998.

WINCH, G.M.; KELSEY, J. What do construction project planners do?. **International Journal of Project Management**, v. 23, n. 2, p. 141-149, 2005.

WIT, A. Measurement of project success. **International Journal of Project Management**, v. 6, n. 3, p. 164 – 170, 1988. [https://doi.org/10.1016/0263-7863\(88\)90043-9](https://doi.org/10.1016/0263-7863(88)90043-9).

XIA, B.; CHAN, Albert P. C. Measuring complexity for building projects: a Delphi study. **Engineering, Construction And Architectural Management**, v. 19, n. 1, p.7-24, 2012. <http://dx.doi.org/10.1108/09699981211192544>.

XU, X.; WANG, Y.; TAO, L.. Comprehensive evaluation of sustainable development of regional construction industry in China. **Journal of Cleaner Production**, v. 211, p. 1078-1087, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.248>.

ZAHRAIE, B.; TAVAKOLAN, M. Stochastic Time-Cost-Resource Utilization Optimization Using Nondominated Sorting Genetic Algorithm and Discrete Fuzzy Sets. **Journal Of Construction Engineering And Management**, v. 135, n. 11, p.1162-1171, 2009. [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)co.1943-7862.0000092](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)co.1943-7862.0000092).

ZHENG, D. x. M.; NG, S. T. Stochastic Time–Cost Optimization Model Incorporating Fuzzy Sets Theory and Nonreplaceable Front. **Journal Of Construction Engineering And Management**, v. 131, n. 2, p.176-186, 2005. [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9364\(2005\)131:2\(176\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)0733-9364(2005)131:2(176)).

ZHENG, D. x. M.; NG, S. T.; KUMARASWAMY, M. M. Applying a Genetic Algorithm-Based Multiobjective Approach for Time-Cost Optimization. **Journal Of Construction Engineering And Management**, v. 130, n. 2, p.168-176, 2004. [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9364\(2004\)130:2\(168\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)0733-9364(2004)130:2(168)).

ZHENG, Z.; SHUMIN, L.; ZE, G.; YUENI, Z..Resource-constraint multi-project scheduling with priorities and uncertain activity durations. **International Journal of Computational Intelligence Systems**, v. 6, n. 3, p. 530-547, 2013.

ZITZLER, E.; DEB, K.; THIELE, L.. Comparison of Multiobjective Evolutionary Algorithms: Empirical Results. **Evolutionary Computation**, v. 8, n. 2, p.173-195, 2000. MIT Press - Journals. <http://dx.doi.org/10.1162/106365600568202>.

APÊNDICE A – ACESSO AOS DADOS

Os arquivos do apêndice serão compartilhados via web. Acreditando que este tipo de compartilhamento seja mais eficiente no sentido de disseminação de conhecimento e informação.

- A. O Arquivo LP do problema de seleção de subcontratados resolvido pelo PuLP e o *MS Excel*[®] com os testes das roletas encontram-se no link abaixo.

<https://www.dropbox.com/sh/4b9rstw26cdsu5t/AAAn4EPIIK0B6ZhUoBdvVmq7a?dl=0>

- B. Os resultados dos *tradeoffs* resultante da aplicação do método *FITradeoff* encontram-se no link abaixo.

<https://www.dropbox.com/sh/xbggytj41uyfpka/AABluAI7xcIWx9SP0zYReQ41a?dl=0>