

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
ESCOLA DE ENGENHARIA

Otimização robusta no gerenciamento de portfólio de projetos integrado ao planejamento financeiro

Valdir Dorotheio de Jesus Pinto

Belo Horizonte
2019

Valdir Dorothéio de Jesus Pinto

Otimização robusta no gerenciamento de portfólio de projetos integrado ao planejamento financeiro

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

Orientador: Prof. Dr. Maurício Cardoso de Souza

Belo Horizonte
2019

P659o

Pinto, Valdir Dorothéio de Jesus.

Otimização robusta no gerenciamento de portfólio de projetos integrado ao planejamento financeiro [recurso eletrônico] / Valdir Dorothéio de Jesus Pinto. - 2019.

1 recurso online (ix, 69 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Maurício Cardoso de Souza.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Apêndice: f. 69.

Bibliografia: f. 63-68.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia de produção - Teses. 2. Programação linear - Teses. 3. Otimização - Teses. 4. Fluxo de caixa - Teses. I. Souza, Maurício Cardoso de. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 658.5(043)



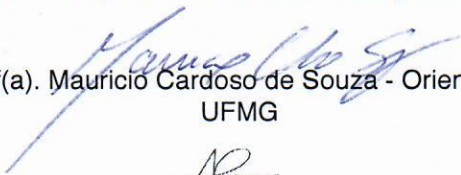
FOLHA DE APROVAÇÃO


Otimização robusta no gerenciamento de portfólio de projetos integrado ao planejamento financeiro


VALDIR DOROTHÉIO DE JESUS PINTO

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, como requisito para obtenção do grau de Mestre em ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, área de concentração PESQUISA OPERACIONAL E INTERVENÇÃO EM SISTEMAS SOCIOTÉCNICOS, linha de pesquisa Mod. e Algorit. de Otimiz. para Sistemas em Redes e de Prod..

Aprovada em 27 de março de 2019, pela banca constituída pelos membros:


Prof(a). Mauricio Cardoso de Souza - Orientador
UFMG


Prof(a). Douglas José Alem Junior
University of Edinburgh


Prof(a). Livia Martins da Costa Furtado Pimentel
PUC-Minas

Belo Horizonte, 27 de março de 2019.

Dedico ao Grande Mestre:
Senhor Jesus Maravilhoso.

"A única coisa que podemos ter certeza é a incerteza"
Zygmunt Bauman

"Estar incerto é estar desconfortável, mas estar certo é ser ridículo"
Provérbio Chinês

"Nunca duvido das minhas incertezas"
Autor anônimo

"É a incerteza que nos fascina. Tudo é maravilhoso entre brumas"
Oscar Wilde

Agradecimentos

Primeiro agradeço à pessoa mais linda que conheço, e que esteve comigo não somente no período de desenvolvimento dessa dissertação, mas que está sempre do meu lado. Minha esposa Flávia, amor da minha vida. Esse trabalho não seria possível sem você, logo, também é seu.

Agradeço aos melhores e mais lindos filhos que um ser humano poderia ter: Mariah, Marjorie e Gabriel. Agradeço pela paciência com um papai cansado por noites sem dormir e sem tempo adequado para dar a atenção que merecem. Espero compensá-los das mais variadas formas. Amo vocês ao infinito e além.

Agradeço ao meu pai, Santos (in memorian), exímio contador de estórias e que encheu meu coração de fé, esperança e empolgação pela vida.

Agradeço minha mãe, Deusmira, que daria seu coração para mim, se pudesse. Melhor mãe do universo.

Agradeço minha tia, Tereza (in memorian), uma mãe para mim, e que fez por mim coisas inimagináveis. Se há alguém que tenho certeza que me amou, foi você.

Agradeço à professora Dirce Mourão (in memorian), que viu algo além num menino de chinelo de dedo, short e camiseta numa escola de periferia. Assim como em Avatar, foi lá no fundo e cumpriu de forma magistral o "Eu vejo você".

Agradeço ao meu orientador, professor Dr. Maurício Cardoso de Souza, pela dedicação, sabedoria em conduzir a orientação, conselhos e disponibilidade. Meu eterno obrigado.

Agradeço ao professor Dr. Ricardo Saraiva de Camargo, da área de pesquisa em Otimização de Sistemas Logísticos e de Grande Porte, pela atenção, pelo exemplo como profissional, e principalmente como pessoa. Pra você, minha admiração.

Agradeço a CAPES pelo apoio financeiro, apoio sem o qual não seria possível a conclusão desse trabalho.

Agradeço aos participantes da banca, professor Dr. Douglas e professora Dra. Livia, pelos conselhos. Suas considerações, com certeza, auxiliaram muito no meu crescimento como pesquisador.

Agradeço a Raina Ribeiro Marques, pela atenção dedicada à um estranho envolto num manto de incertezas.

Agradeço ao querido Diego Fernandes Pantuza, amigo que me foi presenteado pelo Mestrado. Entrou comigo no mesmo processo seletivo e compartilhamos juntos de inúmeras inseguranças, questionamentos e apreensões. Um profundo obrigado, meu amigo.

Enfim, são tantas pessoas para agradecer. Aos porteiros, auxiliares de limpeza, auxiliares administrativos, do departamento de engenharia da UFMG e tantos outros, meu grande obrigado.

Resumo

O presente trabalho pretende criar modelos robustos para tratar estratégias de empréstimos de forma a suportar os custos dos projetos. Diferencia-se da maioria dos trabalhos relacionados ao planejamento de projetos e fluxos de caixa pois, no nosso caso, abordamos o tema em nível estratégico e não operacional ou tático. Sendo assim, aplica-se mais a gerenciamento de portfólios de projetos do que a gerenciamento de projetos auxiliando na tomada de decisão de quais atividades (projetos) devemos escolher (ou não) para integrar nosso portfólio. Há um aporte inicial de capital disponibilizado pelo proprietário do portfólio para apoiar os custos das atividades, junto com os fluxos de caixa provenientes dos empréstimos. Após a conclusão, as atividades passam a gerar lucros, alimentando assim o fluxo financeiro. Logo, o problema é analisar a incerteza inerente a certos parâmetros que ocorrem no modelo nominal, determinando quais atividades implementar e quando devem ser implementadas para que o fluxo de caixa no final do horizonte de planejamento (considerado fixo) seja maximizado.

Palavras chave: Programação Linear Inteira Mista, Otimização Robusta, Portfolio de Projetos, Fluxo de Caixa..

Abstract

The present work intends to create robust models to treat lending strategies to support project costs. It differs from most projects related to project planning and cash flow because in our case we approach the issue at a strategic rather than operational or tactical level. As such, it applies more to project portfolio management than to project management to help in deciding which activities (projects) to choose (or not) to integrate into our portfolio. There is an initial capital contribution made available by the portfolio owner to support activity costs, along with cash flows from loans. Upon completion, the activities begin to generate profits, thus feeding the financial flow. Thus, the problem is to analyze the uncertainty inherent in certain parameters that occur in the nominal model, determining which activities to implement and when they should be implemented so that the cash flow at the end of the planning horizon (considered fixed) is maximized.

Keywords: Mixed Integer Linear Programming, Robust Optimization, Project Portfolio, Cash Flow.

Lista de Figuras

1.1	Edificações com tipologia padrão	6
1.2	Aglomerado residencial em processo de desapropriação	7
1.3	Tipos comuns de fundação	7
1.4	Evolução do número de certificados <i>PMP</i> (Gerente de projetos) pelo <i>PMI</i> no mundo.	9
1.5	Evolução do número de certificados <i>PfMP</i> (Gestor de portfólio de projetos) pelo <i>PMI</i> no mundo.	10
4.1	Diminuição (em %) no valor ótimo do modelo robusto com incerteza nos lucros retornados em função de Γ_t^p com 10 atividades e $s=30$	41
4.2	Diminuição (em %) no valor ótimo do modelo robusto com incerteza nos lucros retornados em função de Γ_t^p com 10 atividades e $s=50$	41
4.3	Diminuição (em %) no valor ótimo do modelo robusto com incerteza nos lucros retornados em função de Γ_t^p com 20 atividades e $s=40$	42
4.4	Diminuição (em %) no valor ótimo do modelo robusto com incerteza nos lucros retornados em função de Γ_t^p com 20 atividades e $s=52$	42
4.5	Diminuição (em %) no valor ótimo do modelo robusto com incerteza nos lucros retornados em função de Γ_t^p com 20 atividades e $s=64$	43
4.6	Diminuição (em %) no valor ótimo do modelo robusto com incerteza nos lucros retornados em função de Γ_t^p com 20 atividades e $s=76$	43
4.7	Diminuição (em %) no valor ótimo do modelo robusto com incerteza nos lucros retornados em função de Γ_t^p com 50 atividades e $s=78$	44
4.8	Diminuição (em %) no valor ótimo do modelo robusto com incerteza nos lucros retornados em função de Γ_t^p com 50 atividades e $s=112$	44
4.9	Diminuição (em %) no valor ótimo do modelo robusto com incerteza nos lucros retornados em função de Γ_t^p com 50 atividades e $s=146$	45
4.10	Diminuição (em %) no valor ótimo do modelo robusto com incerteza nos lucros retornados em função de Γ_t^p com 50 atividades e $s=180$	45
4.11	Quantidade de atividades implementadas e seus respectivos modos predominantes considerando incerteza nos lucros retornados em função de Γ_t^p e γ com 10 atividades e $s=30$	46
4.12	Quantidade de atividades implementadas e seus respectivos modos predominantes considerando incerteza nos lucros retornados em função de Γ_t^p e γ com 20 atividades e $s=40$	46
4.13	Quantidade de atividades implementadas e seus respectivos modos predominantes considerando incerteza nos lucros retornados em função de Γ_t^p e γ com 50 atividades e $s=78$	47

4.14	Diminuição (em %) no valor ótimo do modelo robusto com incerteza na taxa de financiamento em função de Γ_f^r com 10 atividades e $s=30$	47
4.15	Diminuição (em %) no valor ótimo do modelo robusto com incerteza na taxa de financiamento em função de Γ_f^r com 10 atividades e $s=50$	48
4.16	Diminuição (em %) no valor ótimo do modelo robusto com incerteza na taxa de financiamento em função de Γ_f^r com 20 atividades e $s=40$	48
4.17	Diminuição (em %) no valor ótimo do modelo robusto com incerteza na taxa de financiamento em função de Γ_f^r com 20 atividades e $s=52$	49
4.18	Diminuição (em %) no valor ótimo do modelo robusto com incerteza na taxa de financiamento em função de Γ_f^r com 20 atividades e $s=64$	49
4.19	Diminuição (em %) no valor ótimo do modelo robusto com incerteza na taxa de financiamento em função de Γ_f^r com 20 atividades e $s=76$	50
4.20	Diminuição (em ‰) no valor ótimo do modelo robusto com incerteza na taxa de financiamento em função de Γ_f^r com 50 atividades e $s=78$	50
4.21	Diminuição (em ‰) no valor ótimo do modelo robusto com incerteza na taxa de financiamento em função de Γ_f^r com 50 atividades e $s=112$	51
4.22	Diminuição (em ‰) no valor ótimo do modelo robusto com incerteza na taxa de financiamento em função de Γ_f^r com 50 atividades e $s=146$	51
4.23	Diminuição (em ‰) no valor ótimo do modelo robusto com incerteza na taxa de financiamento em função de Γ_f^r com 50 atividades e $s=180$	52
4.24	Projetos modais implementados considerando incerteza nos lucros retornados para 10 atividades, $s=30$ e $\gamma = 5\%$	52
4.25	Projetos modais implementados considerando incerteza nos lucros retornados para 10 atividades, $s=30$ e $\gamma = 10\%$	53
4.26	Projetos modais implementados considerando incerteza nos lucros retornados para 10 atividades, $s=30$ e $\gamma = 15\%$	53
4.27	Projetos modais implementados considerando incerteza nos lucros retornados para 10 atividades, $s=30$ e $\gamma = 30\%$	53
4.28	Projetos modais implementados considerando incerteza nos lucros retornados para 20 atividades, $s=40$ e $\gamma = 5\%$	54
4.29	Projetos modais implementados considerando incerteza nos lucros retornados para 20 atividades, $s=40$ e $\gamma = 10\%$	55
4.30	Projetos modais implementados considerando incerteza nos lucros retornados para 20 atividades, $s=40$ e $\gamma = 15\%$	55
4.31	Projetos modais implementados considerando incerteza nos lucros retornados para 20 atividades, $s=40$ e $\gamma = 30\%$	56
4.32	Simulação de Monte Carlo: Comparação entre médias das simulações com I-P10-s30 e $\gamma = 10\%$ no Modelo Robusto DAp-R e o valor ótimo do Modelo Nominal	58
4.33	Simulação de Monte Carlo: Comparação entre médias das simulações com I-P20-s40 e $\gamma = 10\%$ no Modelo Robusto DAp-R e o valor ótimo do Modelo Nominal	59
4.34	Simulação de Monte Carlo: Comparação entre médias das simulações com I-P50-s78 e $\gamma = 10\%$ no Modelo Robusto DAp-R e o valor ótimo do Modelo Nominal	59

Lista de Tabelas

3.1	Conjuntos usados no modelo nominal	23
3.2	Parâmetros usados no modelo nominal	23
3.3	Variáveis usadas no modelo nominal	23
3.4	Conjuntos e Parâmetros adicionais usados no modelo robusto DAr-R . . .	27
3.5	Conjuntos e Parâmetros adicionais usados no modelo robusto DAp-R . . .	29
4.1	Instância I-P20-s40	36
4.2	Valores de Γ , n^o de atividades implementadas e respectivos decréscimos Δ (%) do valor da função objetivo para $\gamma = 5\%,10\%,15\%$ e 30% ao considerarmos incerteza nos lucros retornados. A coluna $ J $ apresenta o número total de coeficientes sujeitos à incerteza.	37
4.3	Valores de Γ , n^o de atividades implementadas e respectivos decréscimos Δ (%) do valor da função objetivo para $\gamma = 20\%,50\%$ e 100% ao considerarmos incerteza na taxa de financiamento. A coluna $ J $ apresenta o número total de coeficientes sujeitos à incerteza.	38
A.1	Comparação entre os resultados obtidos para a instância I-P10-s30 ao considerarmos incerteza apenas nos lucros retornados e na taxa de financiamento e nos lucros retornados simultaneamente	69

Lista de Abreviaturas

TI	Tecnologia e Informação
IPCA	Índice de Preços ao Consumidor Amplo
PMI	Project Management Institute
PMP	Project Management Professional
PfMP	Portfolio Management Professional
PMBOK	Project Management Body of Knowledge
RCPSP	Resource-Constrained Project Scheduling Problem
VPL	Valor Presente Líquido
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
CRO	Clinical Research Organization
DAr-R	Formulação Adequada r-Robusta
DAp-R	Formulação Adequada p-Robusta
DA-R	Formulação Adequada Robusta

Lista de Símbolos

U	Modelo de Dados Incertos
\mathbf{A}	Matriz de coeficientes
J_i^v	conjunto de parâmetros v_i da restrição i da matriz \mathbf{A} sujeitos à incerteza
a_{ij}	elemento de \mathbf{A} com $j \in J_i$
\hat{a}_{ij}	raio de um intervalo fechado
\tilde{a}_{ij}	variável aleatória, simétrica, independente e pertencente ao intervalo $[a_{ij}-\hat{a}_{ij}, a_{ij}+\hat{a}_{ij}]$
ϵ_{ij}	desvio unitário da variável aleatória
x_j	variável de decisão
l_j	limite inferior para a variável de decisão x_j
u_j	limite superior para a variável de decisão x_j
y_j	$ x_j $
b_i	termo independente da restrição i
Γ_i^v	Grau de conservadorismo (budget de incerteza) do parâmetro v_i que varia de 0 a $ J_i^v $
S_i^v	conjunto de parâmetros incertos v_i da linha i da matriz \mathbf{A} que assumem os piores casos
x^*	vetor solução
$\beta_i(x^*, \Gamma_i)$	função de proteção da restrição i
Ω_v	$\{S_i^v \cup \{t_i\} S_i^v \subseteq J_i^v, S_i^v = \lfloor \Gamma_i \rfloor, t_i \in J_i^v \setminus S_i^v\}$
z_{ij}	variável de decisão no problema de otimização equivalente à função de proteção
λ_i	variável dual
ρ_{ij}	variável dual
$B(n,p)$	Distribuição binomial com n ensaios e probabilidade p de sucesso em cada ensaio
$\Pr(E)$	Probabilidade de ocorrência do evento E
Φ	Função distribuição acumulada de uma distribuição normal
s	último período do horizonte de planejamento discretizado
C_0	Aporte Inicial do sponsor no fluxo de caixa
A	Conjunto de projetos do portfólio
P_i	Lista de precedência do projeto $i \in A$
m	modo de determinado projeto ser executado
c_{im}	custo de um projeto i caso executado no modo m
d_{im}	custo de um projeto i caso executado no modo m
M_i	conjunto de modos m que um projeto i pode ser implementado
p_i	lucro retornado ao fluxo de caixa devido à conclusão do projeto i
l	tipo de financiamento
L	Conjunto de financiamentos do tipo l
h_l	prazo do financiamento caso tenha sido tomado do tipo l
r_{tl}	taxa do financiamento caso tenha sido tomado do tipo l e começando no período t
u	limite superior, por período, para a tomada de financiamentos
T	Conjunto de períodos no horizonte de planejamento
esi	data de início mais cedo possível de um projeto i

$lsim$	data de início mais tarde possível de um projeto i caso implementado no modo m
T_{im}	intervalo de tempo para iniciar a execução do projeto i caso implementado no modo m
f_t	fluxo de caixa no final do período t , com $t \in T$
x_{tl}	Capital emprestado no período t com prazo de vencimento do tipo l
y_{imt}	$(y_{imt} = 0)$: projeto i , no modo m , inicia no período t . $(y_{imt} = 1)$, caso contrário.
v_i	variável binária que indica se a atividade i será executada ($v_i = 0$) ou não ($v_i = 1$)
\mathbb{B}	$\{0, 1\}$
o	forma de investimento
a_o	prazo de retorno do investimento caso ocorra na forma o
b_{ot}	taxa de investimento caso ocorra na forma o no período t
λ_{ot}	Valor investido na forma o no período t
γ	nível de variabilidade do parâmetro incerto
$\Delta(\%)$	Decréscimo percentual entre o ótimo nominal e ótimo robusto robusto
n_I	Número de projetos implementados
$modo1$	Corresponde ao modo no qual o projeto terá menor duração e maior custo
$modo3$	Corresponde ao modo no qual o projeto terá maior duração e menor custo
$modo2$	Corresponde ao modo com duração e custo intermediários em relação aos modos 1 e 3
$I - Pn - s$	Instância com n projetos e último período s do horizonte de planejamento
F_r	Frequência dos projetos modais

Sumário

Lista de Figuras	iii
Lista de Tabelas	v
Lista de Abreviaturas	vi
Lista de Símbolos	vii
1 Introdução	1
1.1 Motivação	6
1.2 Objetivos	11
1.3 Organização do texto	11
2 Revisão da literatura	12
2.1 Gestão de projetos/portfólios de projetos	12
2.2 Otimização Robusta	15
2.3 Portfólio de projetos sob incerteza	19
3 Definição do Problema/Modelagem Matemática	21
3.1 Modelo Nominal	23
3.2 Modelos Robustos	26
3.2.1 Adequação da Formulação Original	26
3.2.2 Incerteza na taxa de financiamento	27
3.2.3 Incerteza nos lucros retornados	29
3.2.4 Incerteza na taxa de financiamento e nos lucros retornados	31
4 Resultados Computacionais	32
4.1 Instâncias	32
4.2 Resultados e discussões	37
4.2.1 Incerteza nos lucros retornados	41
4.2.2 Incerteza na taxa de financiamento	47
4.2.3 Incerteza no lucro retornado e na taxa de financiamento	56
4.2.4 Simulação de Monte Carlo	56
5 Conclusões	61
Referências Bibliográficas	63
A Resultados ao considerar incerteza na taxa de financiamento e lucros retornados para instância I-P10-s30	69

Capítulo 1

Introdução

Gerenciar um portfólio de projetos não é apenas executar vários projetos simultaneamente (ou sequencialmente) (Castro [18]). Cada carteira (ou portfólio) de projetos deve ser analisada buscando identificar sua capacidade de gerar valor para o negócio e por sua aderência aos objetivos definidos no planejamento estratégico (Levine [48]).

As relações de precedências entre projetos são inerentes à própria natureza do negócio (Castro [19]). Nesse trabalho, em alguns momentos, trataremos projetos apenas como atividades para simplificação da nomenclatura.

Quando tratamos o complexo problema da gestão de portfólio de projetos, o decisor têm inúmeras questões a tratar. O objetivo, na maioria das vezes, é maximizar o fluxo de caixa no último período do horizonte de planejamento (Lacerda [46], Hassanzadeh [39], Liu [50]). Uma das questões mais comuns é decidir se um projeto será implementado. Outra questão de grande importância gerencial é quando os projetos escolhidos serão executados (Pedrozo [65], Mika [54]).

Um projeto pode ser executado de vários modos quando tratamos o tradeoff entre custo e duração e por modos estamos nos referindo aos vários cenários possíveis (par (tempo, custo)) de execução do mesmo (Hussain [41]). Geralmente quando aplicamos mais recursos como melhorias tecnológicas, acréscimo de mão de obra ou investimento em mão de obra mais especializada, temos aumento no custo e decréscimos na duração (Lermen [47]).

Do ponto de vista financeiro, cabe ao gestor decidir qual o modo mais rentável para executar um determinado projeto (Lacerda [46]). O lucro retornado devido à execução de determinado projeto pode ocorrer ao longo de sua implementação, na sua conclusão ou até mesmo depois de seu término. No caso de portfólio de projetos, o problema é ainda mais difícil pois o gerente visa a máxima rentabilidade e geração de riqueza para a carteira de projetos e não apenas de um projeto (Pajares [62]).

Em situações onde há recursos limitados, muitas vezes, as empresas têm a necessidade de recorrer a empréstimos para possibilitar a execução dos projetos (Pinto [68], Pajares [62]). Para tal, devem inserir em seu processo gerencial estratégias de tomadas de financiamento. Como no mercado financeiro há vários tipos de financiamento variando quanto a tempo de carência para quitação e quanto às taxas, eles devem se alinhar com os períodos de execução e conclusão dos projetos (Silva [75]).

Visando desenvolver um trabalho sobre gerenciamento de portfólio de projetos num contexto onde o fator incerteza seria considerado e as considerações citadas anteriormente (possibilidade de não implementar um projeto e conseqüentemente os projetos sucessores do mesmo, vários modos possíveis de execução para cada projeto com tomadas de financiamento caso necessário) seriam modeladas como restrições do modelo, procuramos verificar se existia algum modelo na literatura que tratava essas questões de forma determinística, ou seja, sem levar em consideração o fator incerteza.

A partir de pesquisa na literatura encontramos os modelos propostos por Icmeli-Eregunc [42] e Martins [52] que trabalhavam modelos de redes de projetos com fluxos de caixas. Não obstante, Martins [52] tratava a situação que desejávamos modelar, mas num contexto determinístico. Nesse modelo, o lucro retornado ocorre na conclusão de cada projeto implementado. Para atender as demais situações, onde o lucro retornado ocorre de outras formas, o modelo deve ser adequado para representar devidamente as mesmas.

Tal modelo trata o problema exposto acima de gestão de portfólio de projetos com possibilidade de escolher qual(is) projeto(s) deve(m) ser implementado(s), quais modos de execução dos projetos escolhidos e definir a estratégia mais rentável de tomada de empréstimos. Com base no mesmo, deduz-se que, obedecidas tais relações, caso seja decidida a não implementação de uma atividade, todas as suas sucessoras também não serão implementadas.

Como exemplo, citamos o caso da decisão de construir vários conjuntos residenciais em locais diferentes e após a construção optar por alugá-los ou vendê-los (Alencar [8], Frej [30]). Caso o sponsor do portfólio aporte capital suficiente, todos os conjuntos residenciais poderiam ser executados simultaneamente mas, em muitas situações reais, o financiamento (tomada de empréstimos no mercado financeiro) é a única opção. Nesses casos, para tornar possível o empreendimento (Chan [20]) temos a seguinte situação: (i) decidir qual(is) conjunto(s) fazer primeiro, (ii) decidir se alguns valem a pena alugar ou vender, para gerarmos capital que será agregado ao nosso fluxo de caixa e assim podermos construir outros conjuntos, amortizarmos os empréstimos e seus respectivos encargos financeiros (juros) e continuarmos o processo de implementação das atividades.

Percebe-se que não estamos falando aqui das atividades associadas à construção dos conjuntos (“Limpar terreno”, “Perfurar estacas”, “Levantar Alvenaria”, “Concretar pilar”...). As atividades aqui tratadas são os próprios projetos (“Construir Condomínio A”, “Construir Condomínio B”, “Construir Condomínio C”, “Construir Condomínio D”, “Construir Condomínio E”, “Construir Condomínio F”...) e as relações de precedência podem ser por exemplo, a ideia de que o Condomínio A necessariamente vem antes de B pois o terreno onde A será construído já é propriedade do sponsor B deve vir antes de C e D pois estima-se que o valor das vendas dos imóveis de B consiga bancar quase todos dos custos das construções de C e D (Que são conjuntos menores e com menor lucratividade), e assim por diante. A possibilidade de não implementação de algum(ns) projeto(s) é importante (Julio [43]). Pode ocorrer, por exemplo, que o condomínio A não sendo implementado, torne inviável a implementação do B (Que nem sequer ainda tem terreno para ser construído e que depende da implementação do A para ser executado) que por sua vez torna inviável a execução do C e do D que dependem das vendas dos imóveis em B para se tornarem viáveis.

Ao considerarmos conhecidos os fluxos de caixa de retorno (lucros) advindos da im-

plementação de cada atividade, sabe-se a priori, que se construíssemos, por exemplo, os conjuntos C e D antes de B, não teríamos capital suficiente para construirmos B, ou que o empréstimo necessário seria muito grande, por isso a escolha de B antes de C e D e não o contrário. É claro que são apenas exemplos para trazer clareza ao modelo e que cada portfólio terá suas explicações para as precedências de suas atividades (restrições de espaço, restrições legais, restrições de recursos, restrições econômicas, restrições sociais, restrições ambientais, dentre tantas outras)(Frej [30]).

Natural pensar em incerteza associada a tais lucros, resultados da conclusão de determinada atividade executada, uma vez que, não há nenhuma garantia de que tudo ocorrerá conforme planejado e, por sua vez, desvios podem ser esperados (Ustinovicus [80]).

Por estarmos no nível estratégico e não no operacional, ou tático, a não execução de uma atividade é totalmente possível e na verdade é exatamente isso que um gerente de portfólio deseja decidir: qual(is) atividade(s) deve implementar (obedecidas as restrições de precedência associadas ao negócio) que gerem maior rentabilidade no final do horizonte de planejamento.

Há então, nítida importância em avaliar o impacto de considerar o fator incerteza em determinados parâmetros, como, por exemplo, o lucro retornado, sobre a escolha ou não de um determinado projeto e sobre quando o mesmo será executado (caso implementado). Será que a inclusão da incerteza nos levaria a não implementar determinado projeto? Ou será que, caso implementado, vale a pena executá-lo o mais breve possível para diminuir o risco que vem da incerteza? São questões importantes para um gestor de portfólio de projetos.

De acordo com os níveis de alocação de recursos, temos diferentes possibilidades de alternativas a serem escolhidas para cada atividade, cada alternativa possível é chamada de modo, e cada modo tem custo e duração definidos. Através da aplicação do conhecimento técnico da área específica de um projeto específico, são estudados os modos possíveis para cada atividade. Podemos, por exemplo, tratar cenários para cada atividade: pessimista (pior caso), muito provável e otimista (melhor caso), ou seja, o tradeoff custo x tempo.

Para o devido processo de modelagem do problema o gestor deve estabelecer a rede de precedência de projetos de acordo com as características específicas de seu ramo de atuação levando em consideração vários fatores como níveis de prioridade de execução e relações de implementação entre os projetos do portfólio.

Além dos vários modos (pares custo-duração) diferentes possíveis para cada atividade, desejamos tratar também vários tipos diferentes para os possíveis empréstimos cada um possuindo sua taxa de juros e vencimentos específicos. Também há imposição de limite de dívida total por período. Encontramos tal situação modelada em Martins [52] mas novamente de forma determinística.

Apesar de, em sua maioria, no caso da economia brasileira, taxas de financiamento serem fixadas na Selic mais algum acréscimo, vemos que tais dados são tipicamente estocásticos e possuem volatilidade a depender do mercado a qual pertencem. Pesquisas realizadas sobre o tema desenvolveram-se de tal forma que, atualmente, existem até mesmo modelos que podem ser aplicados para a previsão dos valores de taxas de juros tipo Selic. Encontramos, por exemplo, um modelo recursivo citado em Glasserman [35] aplicado para tal finalidade.

Consideramos que os recursos financeiros são utilizados para executar cada atividade. No entanto, após a conclusão, elas começam a gerar lucros, retroalimentando o fluxo de caixa e passando a aumentar os fluxos atuais para execução das atividades seguintes. Esses lucros também devem cobrir outras despesas financeiras, por exemplo as que envolvem os empréstimos correntes. Tal reinvestimento dos lucros é integral ao longo do horizonte de planejamento e apenas liberado no final.

O tamanho do horizonte fixo de planejamento é escolhido de forma a permitir a implementação completa do portfólio de projetos caso seja esse o caso mais rentável (caso gere o máximo fluxo de caixa no final do último período de tal horizonte).

Existem várias metodologias para tratar problemas de otimização sob incertezas. Dentre elas, temos:

- **Programação Dinâmica Estocástica:** Nessa técnica torna-se necessário o conhecimento prévio das distribuições de probabilidades associadas aos parâmetros incertos ou, pelo menos, sua estimativa. Temos várias formulações de programação estocástica como, por exemplo, modelos de dois períodos com recurso e problemas de multi-períodos. Para compensar a violação de restrições que surgem após as realizações das incertezas, os modelos de recurso usam ações corretivas. As variáveis de primeiro período são decididas antes da realização das incertezas. Já as variáveis de segundo período têm a função de serem utilizadas como medidas de correção contra toda situação de inviabilidade que tenha surgido após a realização das incertezas.
- **Otimização Robusta:** Nesse estudo, independente dos valores assumidos pelas variáveis aleatórias dentro de um conjunto convexo dado *a priori*, os modelos e métodos desenvolvidos garantem que as soluções sejam factíveis. Uma vantagem em relação à programação estocástica é o fato de não haver necessidade de conhecimento das distribuições de probabilidades associadas aos parâmetros incertos. Uma desvantagem é exatamente o fato de que, quando tais distribuições são conhecidas, não ser possível utilizá-las no modelo robusto.

Nesse trabalho, escolhemos a Otimização Robusta. Como pretendemos tratar a questão de gestão financeira de portfólio de projetos num contexto de incerteza cujos parâmetros estocásticos são os lucros retornados e/ou taxa de financiamento, a pergunta natural é por que não escolhermos Programação Estocástica.

Sabe-se que séries temporais de taxas de financiamento estão disponíveis e que é possível associar às mesmas distribuições de probabilidades, o que leva naturalmente à indagação: Por quê a escolha da Otimização Robusta?

Nossa escolha foi devido, especialmente, por três motivos:

- Sabe-se que em Programação Dinâmica Estocástica é comum assumir que o parâmetro aleatório possui uma distribuição de probabilidade discreta com um número finito de possíveis realizações. Essas são denominadas cenários e têm uma probabilidade de ocorrência que representa a chance do evento ocorrer. Desse modo, o problema sujeito a incerteza pode ser escrito na sua forma determinística equivalente, que resulta, muitas vezes, num problema de otimização de grande porte, principalmente se o número de cenários for muito grande, e que é exatamente o caso do problema que pretendemos tratar no presente trabalho. Logo, o maior motivo de

optarmos pela escolha da metodologia da Otimização Robusta em nosso trabalho, é a questão da dimensionalidade que torna o problema intratável caso fosse utilizada Programação Dinâmica Estocástica.

- Outro motivo é a simplicidade que tal metodologia permite ao decisor incorporar sua atitude em relação ao risco, desde neutro (não considera importante a incerteza = modelo determinístico) ou averso ao risco (considera o pior cenário possível onde os parâmetros incertos assumem os piores valores concomitantemente).
- O terceiro é o fato de que dificilmente conseguiremos a distribuição de probabilidade dos lucros retornados para qualquer tipo de projeto.

Pretendemos apresentar modelos robustos associados à gestão de portfólio de projetos que permitam ao gestor incorporar ao seu conjunto de metodologias o fator incerteza. Ao considerar incerteza nos lucros oriundos da conclusão de seus projetos e nas taxas dos possíveis financiamentos que ele precise tomar, visamos muni-lo de um instrumento que permita responder mais assertivamente as seguintes questões: Qual(is) e quando deve implementar determinado(s) projeto(s) e ainda levando em consideração o tradeoff tempo x custo de cada projeto? Como adequar o fator incerteza com as métricas de risco já utilizadas em sua empresa?

1.1 Motivação

A gestão de portfólios de projetos é uma atividade complexa onde a escolha pela implementação ou não de determinado(s) projeto(s) envolve vários aspectos (Frej [30]). Dentre eles, temos o retorno gerado por projeto, despesas financeiras devido a possíveis empréstimos, o tradeoff tempo-custo, relações de precedências entre os mesmos, e ainda respeitando todas as restrições que forem consideradas relevantes (Muller [57]).

Geralmente, para simplificar a modelagem do problema, assume-se o completo conhecimento sobre tais informações. Há caso onde um modelo assim tratado representa bem a realidade (Santos [72]).

Temos, por exemplo, a área da construção civil de edificações com tipologia padrão e em locais com sondagem do terreno bem definida e alto nível de controle gerencial (Mattos [53], Costa [21]).



Figura 1.1: Edificações com tipologia padrão
Fonte: Vitruvius [1]

Geralmente a incerteza associada aos lucros advindos da realização de tais tipos de empreendimentos são provenientes de situações não esperadas quanto à fundação das edificações (Ritz [70]).

Um processo de sondagem detalhado e bem executado diminui ou até mesmo elimina a ocorrência de tais situações (Nangan [58], Galvão [32]). Mas, o que normalmente ocorre na realidade, é que muitas informações e dados relevantes possuem caráter incerto (Zheng [82]).

Um parâmetro com forte caráter incerto são os lucros retornados através da conclusão dos projetos (Ribeiro [69]). Basta lembrar que o próprio projeto em si é constituído por uma rede de atividades interligadas e cada uma delas com seu potencial de gerar valor agregado e trazer seus respectivos retornos (Nazareth [59]). Há tanto projetos de pequeno porte (com dezenas de atividades) quanto de grande porte (com mais de centenas

de milhares de atividades) e seria pouco provável que todas essas atividades constituintes do projeto ocorreriam conforme planejado (Hallgren [37]).

Um exemplo claro são empreendimentos imobiliários que ocorrerão em locais onde haverá desapropriação (Ribeiro [69]).



Figura 1.2: Aglomeração residencial em processo de desapropriação
Fonte: Parque da Barragem [2]

O fato de ainda existirem moradores no local da futura construção, impede a realização de sondagens no solo, impossibilita definir o tipo adequado de fundação, e assim, apenas após o processo de desocupação integral, haverá possibilidade de orçar com maior precisão o valor do empreendimento.

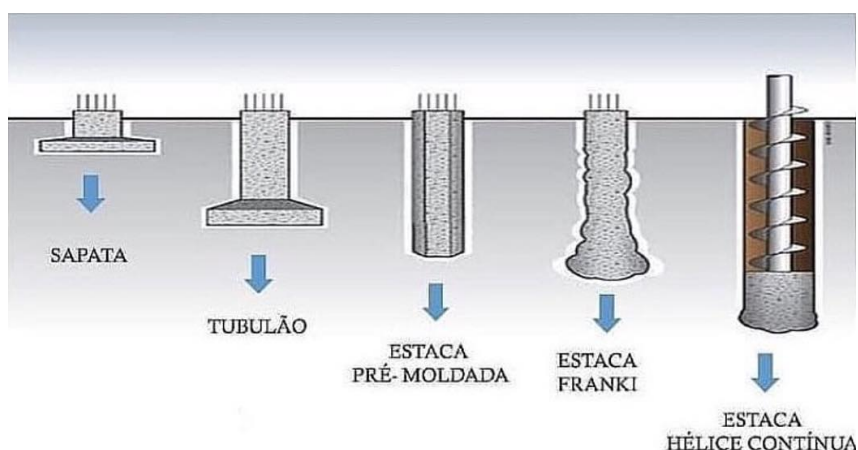


Figura 1.3: Tipos comuns de fundação
Fonte: N7 Construtora [4]

Mas, o que ocorre normalmente, é que a construção ocorre simultaneamente à desapropriação, o que torna incerta a estimativa dos lucros advindos da realização de tal projeto (Yang [81]).

Outro exemplo é o caso de projetos de TI (Tecnologia e Informação) na área de desenvolvimento de software onde o stakeholder cliente tem liberdade para interferir nas especificações do produto (Mirza [56]). Ocorrem, muitas vezes, várias alterações no escopo do produto ao longo do processo de criação e assim, não é possível desconsiderar o fator incerteza no momento de estimar os lucros desse tipo de projeto (Marinho [51]).

Vários projetos na área da indústria farmacêutica também são melhor representados num contexto não-determinístico (Hassanzadeh [39]) pois prever quantas pessoas sofrerão de qual tipo de enfermidade possui um caráter tipicamente incerto.

Outro parâmetro cujo estudo do mesmo não pode se abster de considerar incerteza é a taxa de financiamento (Barboza [10], Filho [26]). Sabe-se através da administração financeira que taxas de financiamento são afetadas por componentes de mercado como por exemplo custo de captação e risco de crédito (Paula [64]) e que seria praticamente impossível tratá-las de modo realista sem levar em consideração a incerteza inerente ao seu caráter (Dymski [23]).

No Brasil, por exemplo, temos o caso da taxa básica de juros, a Selic. A taxa básica de juros é um instrumento do Banco Central para influenciar a inflação da economia e isso não ocorre apenas no Brasil (Omar [17]). Tal influência tem duplo sentido e a inflação também afeta a determinação da Selic (Caetano [16]). No mundo todo, todos os bancos centrais fazem política monetária determinando qual a taxa básica de juros adequada para a situação atual do mercado (Omar [17]).

A taxa Selic atual é a mais baixa da história, que é de 6,5% ao ano. Já em 2015, ela cresceu até sofrer a primeira queda em outubro de 2016 (Banco Central do Brasil [3]). Nesse mesmo período, a inflação oscilava em torno de 10,0% a.a. Então, para fazer a contenção do consumo, a Selic aumentou (Oreiro [60]).

Estes índices refletem a situação econômica que o país viveu. O pico da crise econômica brasileira na época aconteceu entre os anos de 2015 e 2016. O ano de 2017 foi marcado pela evolução gradual da economia (Filho [28]). A taxa Selic fechou em 7,0% e o IPCA (inflação) em 2,95%. Esses resultados são consequência direta da retomada da atividade econômica e confirmam o fator incerteza atrelado à taxa de financiamento.

A partir da mudança de governo, houve uma série de reformas, em relação ao ajuste dos índices, para permitir a retomada das atividades. No final de 2016 e durante o ano de 2017, a taxa Selic sofreu vários cortes (reduções) (Banco Central do Brasil [3]) conforme o Brasil dava sinais de saída da crise econômica (Bacha [9]).

Financiamentos de médio a longo prazo assumem maior risco de crédito para as instituições financeiras que liberam os mesmos (Filho [27]), pois a capacidade do devedor de arcar com o pagamento de seus empréstimos está intimamente relacionada com a variação da taxa básica de juros, uma vez que seu poder de consumo também está associado à mesma (Grimaldi [36]).

Sendo assim, é natural pensar que uma modelagem mais adequada da gestão financeira de portfólios quando há dados incertos e tal incerteza impacta consideravelmente nos resultados, levaria em consideração a incerteza nos lucros retornados advindos das

conclusões dos projetos e nas taxas de financiamento e que é a proposta de nosso trabalho.

Diante dos obstáculos presentes no mundo corporativo, a utilização de uma abordagem de planejamento, execução e controle progressiva e reiterada dos projetos (ex.: Metodologias Ágeis), com mudanças ao longo do processo, e consequente incerteza associada ao mesmo, têm-se tornado cada vez mais comum (Shankarmani [73]). O próprio Project Management Institute (PMI) tem acrescentado informações sobre práticas ágeis em seu guia (PMBOK).

A última edição do guia do PMI contém um apêndice e informações sobre métodos ágeis para cada uma das áreas de conhecimento de gerenciamento de projetos (PMBOK-sexta edição). Percebe-se que o atual estado evolutivo da gestão de projetos e de portfólio de projetos demanda profissionais cada vez com maior capacitação para tratar incertezas (Zheng [82]).

No final de 2017, o *Project Management Institute (PMI)* divulgou a evolução do número de certificados *project management professional (pmp)* em gerenciamento de projetos.

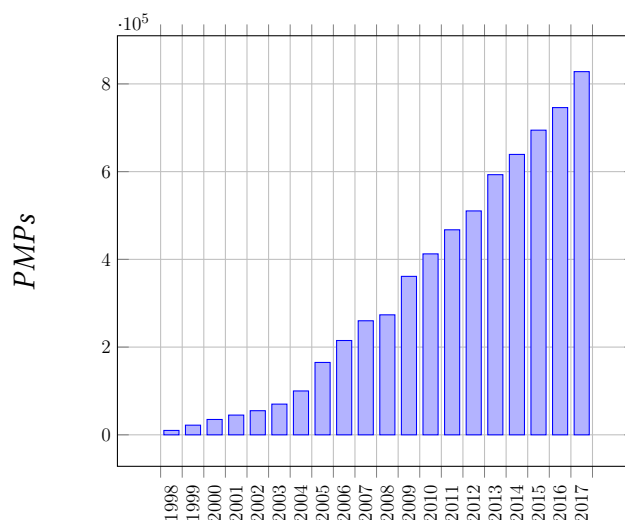


Figura 1.4: Evolução do número de certificados *PMP* (Gerente de projetos) pelo *PMI* no mundo.

Já especialistas em gerenciamento de portfólio de projetos (*Chief Portfolio Management Office*) com certificação pelo *PMI* segundo informações do próprio instituto tem a evolução conforme a figura (1.5).

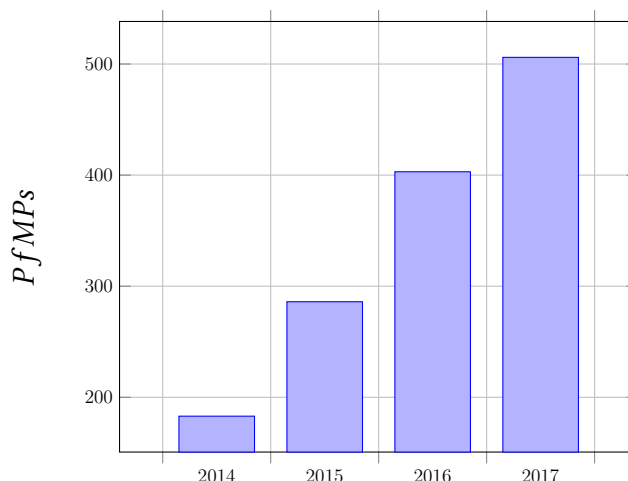


Figura 1.5: Evolução do número de certificados *PfMP* (Gestor de portfólio de projetos) pelo *PMI* no mundo.

A diferença entre o número de gerentes de projetos e o número de gestores de portfólio de projetos certificados pelo *PMI* é enorme por vários motivos. Um deles é a diferença do tempo de existência das duas certificações, demonstrando que o próprio *PMI* percebeu há poucos anos a urgência de gestores de portfólio certificados que comprovem experiência e conhecimento técnico.

Outro motivo é o alto grau de complexidade associado à gestão de portfólio de projetos. Segundo o *PMI*, "Projeto é um esforço temporário empreendido para criar um produto, serviço ou resultado único". Já Portfólio, conforme o mesmo instituto, é definido como "um conjunto de projetos, programas, portfólios subsidiários e operações gerenciados em grupo para alcançar objetivos estratégicos". Ou seja, portfólio trata-se de algo mais abrangente do que um projeto, respeitando-se o nível gerencial de cada um, aquele no nível estratégico e este nos níveis tático e operacional.

Temos um mercado global onde o número de projetos é enorme e a especialização no gerenciamento de portfólio dos mesmos é cada vez mais exigida. Logo, é de grande importância munir o decisor com ferramentas que possibilitem ao mesmo inserir em suas estratégias de análise financeira o fator incerteza (Junior [44]), e pretendemos, através desse trabalho, dar nossa contribuição a tal processo gerencial exatamente neste cenário: não-determinístico.

Um fato que não pode ser desconsiderado, é que a incerteza associada a determinados parâmetros da gestão de portfólio pode levar a resultados bem diferentes daqueles provenientes de um cenário determinístico, o que pode induzir o gestor a equívocos no seu processo decisório (Meyer [74]).

Tratar um modelo de gestão de portfólio de projetos como determinístico, num cenário claramente não-determinístico, pode inclusive, levar uma empresa a grandes perdas financeiras e, até mesmo, à falência pois os desvios associados aos parâmetros estocásticos não estariam sendo levados em consideração (Shenrar [67]).

1.2 Objetivos

Os objetivos dessa dissertação são:

(i) apresentar modelos robustos com base no modelo nominal (determinístico) proposto por Martins [52] considerando incertezas nos parâmetros taxa de financiamento, lucros retornados e ambos. Consideramos que outros parâmetros como custo e duração de cada projeto do portfólio têm valores determinados, pensando num cenário onde os mesmos podem ser controlados de forma a não serem considerados incertos, deixando assim, estudos dos casos onde tais parâmetros estão sujeitos à incerteza, para trabalhos futuros.

(ii) As questões básicas que pretendemos responder são:

(a) O quanto o fator incerteza associado aos parâmetros lucros retornados e taxa de financiamento afetam decisões como: quais projetos serão implementados, quando eles iniciarão, qual modo (tradeoff custo/tempo) para cada projeto torna o portfólio mais rentável e caso seja necessário algum financiamento, qual o tipo (tradeoff taxa/prazo de quitação). Para responder tal questão proporemos modelos robustos considerando incerteza nos lucros retornados, nas taxas de financiamento e em ambos e através da comparação dos resultados computacionais provenientes do modelo nominal e dos modelos robustos realizar nossas inferências.

(b) Qual o real impacto da incerteza no problema em estudo? Para responder essa questão utilizaremos simulação de Monte Carlo.

(iii) analisar e discutir os resultados computacionais de forma a obter *insights* úteis para a tomada de decisões práticas e na teoria para propor possibilidades de novas abordagens.

1.3 Organização do texto

Essa dissertação está organizada da seguinte maneira:

Capítulo 2 - Introduz revisão da literatura, apresentando artigos relacionados à otimização de projetos/portfólio de projetos seja quanto a custos ou fluxos de caixa. Ainda nesse capítulo há a introdução à revisão da literatura relativa à técnica de otimização robusta e são apresentados artigos relativos à técnica e exemplos de artigos onde a gestão de portfólios de projetos foi tratada em cenários de incerteza.

Capítulo 3 - Apresenta a definição do problema, descreve o modelo nominal e apresenta os modelos robustos onde trabalha-se com incerteza no parâmetro taxa de financiamento, no parâmetro lucros retornados e em ambos.

Capítulo 4 - Apresenta os resultados computacionais, as análises e discussões gerais.

Capítulo 5 - Finalmente, as conclusões são apresentadas.

Capítulo 2

Revisão da literatura

2.1 Gestão de projetos/portfólios de projetos

A importância do problema de compensação tempo-custo (tradeoff time-cost) de projetos foi trazida à atenção da comunidade de pesquisa há cinquenta e sete anos Fulkerson [31], e muitos outros trabalhos vieram tratar o problema de minimizar o custo de projetos. Akkan [5], por exemplo, desenvolveu uma heurística lagrangiana para minimizar o custo de projetos com tempo discretizado.

Outro trabalho utilizando heurística de busca-local com o mesmo objetivo é encontrado em Akkan [6]. Harvey [38] desenvolve um algoritmo de enumeração implícita para resolver o problema de minimização de custo considerando o tradeoff tempo-custo. As limitações dessa abordagem eram várias mas duas destacavam-se : A exclusão de receitas nos modelos e a falta de tratamento do valor do dinheiro no tempo.

O pioneiro em tratar problemas de maximização do Valor Presente Líquido de fluxos de caixa foi Russel [71] que descreve um modelo não linear com todos os parâmetros determinísticos. Apesar das restrições do modelo de Russel serem lineares, a função objetivo do mesmo é não-linear.

Também trabalhando sobre o problema da maximização do valor presente líquido (*VPL*), Szmerekovsky [78] desenvolve um modelo que trata o *VPL* de projetos considerando diferentes referenciais, a saber, o cliente e o contratado. Em seu modelo, o cliente seleciona as datas de pagamento e o contratado seleciona o cronograma de atividades, cada uma para maximizar seu próprio valor presente líquido. Além disso, o contratado tem a opção de rejeitar o projeto se ele não atingir um *VPL* mínimo pré-definido.

O problema de maximização do *VPL* levando também em consideração restrição de recursos (quantidade limitada de recursos a serem alocados em atividades que podem ocorrer simultaneamente) foi tratado por Patterson, Yang e Talbot [63].

Icmeli e Erenguc [42] desenvolvem sua pesquisa sobre fluxos de caixa objetivando maximizar o *VPL* mas inovam em sua abordagem introduzindo a possibilidade de reduzir as durações das atividades de suas durações normais pela alocação de mais recursos.

Apesar dos avanços consideráveis encontrados nenhum desses trabalhos citados tratava a possibilidade de tomada de empréstimos para suprir a demanda por recursos de aplicação. Buscando preencher essa lacuna, tal capital de empréstimo é tratado em Kimms [45]

através da aplicação de decomposição de Benders em um modelo de otimização linear, onde o capital de empréstimo de um determinado período será pago em algum subsequente considerando encargos financeiros à uma taxa de empréstimo conhecida *a priori*. De modo alternativo, sempre que os fluxos de caixa do projeto tratado forem negativos, o capital pode ser emprestado, desde que por taxas superiores à taxa de desconto e a taxa de juros (por causa do custo de oportunidade conforme Gitman [34]). O livro do Kimms [45] é dividido em seis partes sendo que a segunda trata da maximização do *VPL* de projetos e a terceira aborda a possibilidade de empréstimos num cenário de racionamento de capital.

No artigo de Herroelen et al. [40], os autores apresentam importantes desenvolvimentos no então campo em expansão de pesquisas sobre modelos de redes de projetos com fluxos de caixa descontados.

Já o trabalho de Ulusoy e Cebelli [79] trata o problema onde o montante e o prazo dos pagamentos feitos pelo cliente e recebidos pelo contratado são determinados de forma a alcançar uma solução equitativa. Definem solução equitativa como aquela em que tanto o contratado quanto o cliente se desviam de suas respectivas soluções ideais numa porcentagem igual e tal igualdade percentual de desvio entra como uma restrição em seu modelo. As soluções ideais para o contratado e para o cliente resultam de um pagamento total no início e no final do projeto, respectivamente. Um algoritmo genético double-loop é proposto para chegar à uma solução equitativa. O loop externo representa o cliente e o loop interno o contratado. O loop interno corresponde a um problema de agendamento de projetos com recursos restritos (RCPS) com o objetivo de maximizar o valor presente líquido (*VPL*) do contratado para uma dada distribuição de pagamento. A disponibilidade de capital pode ser vista como uma restrição de recursos especiais.

Sabemos que é frequente o caso em que um determinado projeto é planejado sob restrição de capital, limitando assim o número e o valor das atividades que podem ser programadas para ocorrer simultaneamente. No entanto, a quantidade de capital disponível para agendar atividades pode aumentar à medida que dinheiro adicional é recebido como pagamentos de progresso para atividades concluídas.

Considerando como objetivo do gerente de projeto a maximização do *VPL* do projeto, torna-se importante que o gerente desenvolva um cronograma que equilibre o recebimento antecipado e o adiantamento de pagamentos (que melhoram o *VPL* e aumentam o saldo de capital disponível) e atraso de despesas particularmente grandes.

Apesar de todos esses trabalhos aprofundarem na temática fluxos de caixas e empréstimos, ainda faltava trabalhos no nível estratégico de gestão de portfólios com o intuito de auxiliarem gestores na situação de decidirem qual(is) (e quando) projetos deveriam ser escolhidos para serem executados.

O trabalho de Hassanzadeh et al. [39], veio tratar adequadamente esse problema, ou seja, gerar modelos que trabalham com a possibilidade de decidir se se deve ou não realizar algumas atividades. Neste trabalho [39] os autores discutem um problema de otimização de portfólio de projetos de P&D da Indústria Farmacêutica e trabalham com incerteza em alguns parâmetros utilizando técnicas de otimização robusta para que o modelo seja mais realista.

Vários outros trabalhos surgiram com a intenção de tratar esse mesmo problema de decidir qual(is) projeto(s) deveriam ser escolhidos num portfólio de projetos como por exemplo Sun et al [77], Liu and Liu [50] e Pérez et al [66].

A integração de restrições de recursos concomitantemente a fluxos de caixa e a programação de projetos também foram tratados na literatura, nomeadamente em Patterson et al. [63], Icmeli e Erenguc [42], Padman et al. [61], De Reyck e Herroelen [22], Ulusoy e Cebelli [79], Mika et al. 2005, Pieter e Vanhoucke [49]. A maior parte desses trabalhos considera que as magnitudes do fluxo de caixa líquido são independentes do tempo de realização.

No trabalho de Mika et al. [54], considera-se o problema de agendamento de projetos com restrição de recursos e multimodo com fluxos de caixa descontados. Um projeto é representado por uma rede de atividade no nó (AoN). Cada atividade fica associada a um fluxo de caixa positivo. Quando usam o termo multimodo referem-se ao fato de que são considerados quatro modelos de pagamento diferentes: pagamento integral na conclusão do projeto, pagamentos nos tempos de conclusão das atividades, pagamentos em intervalos de tempo iguais e pagamentos adiantados. O objetivo é maximizar o *VPL* de todos os fluxos de caixa do projeto. Propõe metaheurísticas de pesquisa local: *simulated annealing* e *tabu search* são propostas para resolver este problema *NP*-difícil.

O trabalho de Pieter e Vanhoucke [49] tem uma proposta parecida mas sem considerar multimodos e utilizam um método de agendamento implementado através de uma metaheurística de algoritmo genético e empregam uma função de penalidade para melhorar a viabilidade do algoritmo com relação a um prazo apertado.

No artigo de Etgar et al [24] os autores modelam uma versão desse problema que leva em consideração, por exemplo, que por causa dos pagamentos de incentivos (ex.: prêmios) e penalidades (ex.: multas por atraso) para ocorrências de eventos precoce e tardio, respectivamente, e devido à mudança de custos de recursos ao longo do tempo (ex.: efeitos inflacionários e riscos), as magnitudes líquidas do fluxo de caixa dependem do tempo de realização e assim a maximização do *VPL* torna-se mais realístico.

O trabalho de Mika et al. [54], descreve um procedimento próximo do trabalho de Martins [52] envolvendo um pagamento fixo no final do horizonte de planejamento mas procura também maximizar o *VPL* de todos os fluxos de caixa conforme já citado.

As principais limitações das referências aqui citadas envolvem o uso do *VPL* para maximizar retorno dos fluxos de caixa, a execução obrigatória de todas as atividades (na maioria delas) e também a ausência de capital emprestado (também na maioria das referências).

Vemos então, após essa exposição, que todos esses trabalhos utilizam o *VPL*, envolvendo assim o conceito do valor do dinheiro no tempo (retirando assim a limitação dos problemas de time-cost tradeoff) sendo utilizado amplamente para analisar a viabilidade de um projeto e testar seu potencial para investimento.

Não obstante, não representa o capital real retornado pelo portfólio de projetos no final do horizonte de planejamento, que por sua vez, refere-se exatamente ao real retorno do investimento e que é o verdadeiro objetivo dos investidores. O dinheiro retornará em sua totalidade com os respectivos ganhos para o investidor apenas no final do horizonte de planejamento e não na data zero (*VPL*).

Nosso trabalho trata exatamente do caso onde o objetivo é maximizar o fluxo de caixa no final do horizonte de planejamento considerando a possibilidade de solicitação de empréstimos e a não execução de atividades que não contribuam para tal objetivo, dentro de um contexto estocástico.

2.2 Otimização Robusta

A otimização robusta é uma abordagem relativamente nova, que trata o problema da incerteza dos dados, incorporando o caráter aleatório de parâmetros do problema sem fazer quaisquer suposições sobre suas distribuições.

O desenvolvimento de modelos imunizados às incertezas nos parâmetros é a ideia principal da otimização robusta. Com esse ideia como base, o trabalho de Soyster [76] foi pioneiro no sentido de gerar soluções factíveis para todo dado pertencente a certo conjunto convexo através da proposta de seu modelo de otimização linear.

Em sua abordagem, cada parâmetro incerto foi considerado o pior valor possível dentro de um intervalo, resultando em soluções que são "excessivamente conservadoras", ou seja, soluções encontradas no contexto de pior cenário e que, muitas vezes, são até mesmo inviáveis de serem implementadas do ponto de vista gerencial.

El-Ghaoui et al. [33] e Ben-Tal e Nemirovski [12], [11] introduziram conjuntos elípticos incertos para resolver problemas excessivamente conservadores. Esse trabalho resultou num problema da programação linear incerta tornando-se uma contraparte robusta quadrática cônica.

Bertsimas e Sim [13], [15] desenvolveram a abordagem da incerteza para controlar a conservatividade cumulativa de todos os parâmetros de problemas incertos.

Tal abordagem permitiu encontrar uma contraparte robusta linear. Tratavam assim o conservadorismo excessivo proposto por Soyster permitindo a possibilidade do decisor interferir no número de parâmetros incertos, visto que provaram que seria muito improvável sempre todos assumirem o pior caso, e também tratavam a não-linearidade advinda da abordagem de Ben-Tal e Nemirovski [11]. Para eles uma solução de um problema que não leve em consideração as incertezas inerentes aos problemas pode encontrar ótimos insignificantes do ponto de vista prático. O Modelo de Dados incertos U proposto por Ben-Tal e Nemirovski [12] pode ser assim descrito:

Seja o problema de otimização linear:

$$\begin{aligned} & \max \mathbf{c}^T \mathbf{x} \\ & \text{s.a:} \\ & \mathbf{Ax} \leq \mathbf{b} \\ & \mathbf{x} \geq \mathbf{0} \end{aligned}$$

O conjunto J_i é definido a partir daí como sendo o conjunto de coeficientes da linha i da matriz \mathbf{A} sujeitos à incerteza. Modela-se cada elemento a_{ij} de \mathbf{A} com $j \in J_i$ como uma variável aleatória \tilde{a}_{ij} , simétrica, independente e pertencente ao intervalo fechado $[a_{ij}-\hat{a}_{ij}, a_{ij}+\hat{a}_{ij}]$ em \mathbb{R} , ou seja, tal variável pertence à um intervalo fechado centrado em a_{ij} de raio \hat{a}_{ij} . A tal dado considerado incerto \tilde{a}_{ij} associa-se um *desvio* em relação ao centro do intervalo (valor nominal = valor sem considerar as incertezas) definido por $\epsilon_{ij} = (\tilde{a}_{ij} - a_{ij})/\hat{a}_{ij}$ desvio esse nomeado como desvio unitário da variável aleatória. O termo unitário é evidente pois pela definição de intervalo fechado dada acima percebe-se facilmente que $\epsilon_{ij} \in [-1, 1]$.

O caso de Soyster é considerar exatamente todos os coeficientes sobre os quais incide incerteza com desvio unitário nos extremos do intervalo, ou seja, para Soyster $\epsilon_{ij} \in \{-1, 1\}$.

Sendo assim, o modelo de Soyster se resume a:

$$\begin{aligned} & \max \mathbf{c}^T \mathbf{x} \\ & \text{s.a:} \\ & \sum_j \tilde{a}_{ij} x_j \leq b_i \quad \forall i \\ & l_j \leq x_j \leq u_j \quad \forall j \end{aligned}$$

Onde l_j e u_j são limites inferior e superior, respectivamente, para a variável de decisão x_j . Como em Soyster temos $\epsilon_{ij} \in \{-1, 1\}$ então: $\tilde{a}_{ij} = a_{ij} \pm \hat{a}_{ij}$. Daí chegamos no modelo de Soyster escrito da forma conhecida:

$$\begin{aligned} & \max \mathbf{c}^T \mathbf{x} \\ & \text{s.a:} \\ & \sum_j a_{ij} x_j + \sum_{j \in J_i} \hat{a}_{ij} |x_j| \leq b_i \quad \forall i \\ & l_j \leq x_j \leq u_j \quad \forall j \end{aligned}$$

Que é facilmente linearizado ao considerar $|x_j| = y_j$.

Como vimos, a metodologia de Soyster fixa todos os parâmetros incertos no pior caso (desvio unitário nos extremos do intervalo da variável aleatória) o que faz com que os resultados obtidos por meio da mesma seja muito pior que os obtidos através do modelo nominal. Esse foi o maior motivo que incentivou o desenvolvimento de pesquisas que tratassem esse conservadorismo. Daí as pesquisas que surgiram para tratar esse problema como as de Ben-Tal e Nemirovski ([12], [11]), El-Ghaoui e Lebret [33], Bertsimas e Sim ([13], [15]), Bertsimas e Thiele [14].

Dentro de tal ideia, Ben-Tal e Nemirovski [11] propõe o seguinte modelo robusto visando trabalhar o tradeoff entre o desempenho e a robustez:

$$\begin{aligned} & \max \mathbf{c}^T \mathbf{x} \\ & \text{s.a:} \\ & \sum_j a_{ij} x_j + \mu \left(\sum_{j \in J_i} \hat{a}_{ij} x_j + \lambda_i \sqrt{\sum_{j \in J_i} \hat{a}_{ij}^2 x_j^2} \right) \leq b_i \quad \forall i \\ & x_j \geq 0 \quad \forall j \end{aligned}$$

onde μ é algum nível de variabilidade e λ_i um parâmetro positivo associado ao nível de confiabilidade onde a probabilidade de violação da restrição i é dado por $e^{-\lambda_i^2/2}$ e tal parâmetro λ_i é definido pelo decisor.

Como o modelo de Soyster é deveras conservador e o de Ben-Tal tem um problema de tratabilidade devido ao fato de ser não-linear, Bertsimas e Sim trouxeram uma nova abordagem, resolvendo essas duas questões.

A ideia de Bertsimas e Sim [13] foi introduzir um parâmetro no modelo para controlar a quantidade de parâmetros incertos que assumiriam o pior caso. Tal parâmetro inserido no modelo com esse propósito foi chamado de grau de conservadorismo (também chamado

de *budget* de incerteza e representado por Γ_i para a restrição i com Γ_i variando de 0 a $|J_i|$. O caso em que $\Gamma_i = 0$ é exatamente o caso nominal (Neutralidade em relação ao risco). Já o caso onde $\Gamma_i = |J_i|$ é o caso de Soyster, onde todos os parâmetros incertos assumem o pior caso. Pretende-se proteger a violação da restrição que contém os parâmetros incertos por meio do grau de conservadorismo. O modelo proposto por Bertsimas e Sim ([13],[15]) parte do modelo de Soyster mas apresentam uma função de proteção. O modelo inicial tem a seguinte forma:

$$\max \mathbf{c}^T \mathbf{x} \quad (2.1)$$

s.a:

$$\sum_j a_{ij}x_j + \max_{\Omega} \left[\sum_{j \in S_i} \hat{a}_{ij}|x_j| + (\Gamma_i - \lfloor \Gamma_i \rfloor) \hat{a}_{it_i}|x_{t_i}| \right] \leq b_i \quad \forall i \quad (2.2)$$

$$l_j \leq x_j \leq u_j \quad \forall j \quad (2.3)$$

$$\Omega = \{S_i \cup \{t_i\} | S_i \subseteq J_i, |S_i| = \lfloor \Gamma_i \rfloor, t_i \in J_i \setminus S_i\}$$

A notação $\lfloor u \rfloor$ representa o maior número inteiro menor ou igual a u . E, conforme demonstrado por Bertsimas e Sim [15], dado o vetor solução \mathbf{x}^* , a restrição i é protegida pela função de proteção:

$$\beta_i(\mathbf{x}^*, \Gamma_i) = \max_{\Omega} \left[\sum_{j \in S_i} \hat{a}_{ij}|x_j^*| + (\Gamma_i - \lfloor \Gamma_i \rfloor) \hat{a}_{it_i}|x_{t_i}^*| \right]$$

O termo "proteção" se refere ao fato de que tal expressão tem a função de impor um espaço de segurança entre $\sum_j a_{ij}x_j$ e b_i de modo a garantir a factibilidade de cada restrição i .

Bertsimas e Sim [15], demonstram que tal função de proteção é equivalente ao seguinte problema de otimização:

$$\beta_i(\mathbf{x}^*, \Gamma_i) = \max \sum_{j \in J_i} \hat{a}_{ij}|x_j^*|z_{ij}$$

s.a:

$$\sum_{j \in J_i} z_{ij} \leq \Gamma_i$$

$$0 \leq z_{ij} \leq 1 \quad \forall j \in J_i$$

Como esse último problema é limitado e factível $\forall \Gamma_i \in [0, |J_i|]$, por dualidade forte temos que o modelo dual do mesmo também é factível e limitado e seus valores ótimos coincidem. Representado as variáveis duais por λ_i e ρ_{ij} temos, o seguinte modelo dual:

$$\min \sum_{j \in J_i} \rho_{ij} + \lambda_i \Gamma_i$$

s.a:

$$\lambda_i + \rho_{ij} \geq \hat{a}_{ij}|x_j^*| \quad \forall i, j \in J_i$$

$$\rho_{ij} \geq 0 \quad \forall j \in J_i$$

$$\lambda_i \geq 0 \quad \forall i$$

Que pode ser linearizada igualando $|x_j|$ a y_j , ou, impondo não negatividade a x_j . Considerando esse último caso, o problema dual se torna:

$$\min \sum_{j \in J_i} \rho_{ij} + \lambda_i \Gamma_i \quad (2.4)$$

s.a:

$$\lambda_i + \rho_{ij} \geq \hat{a}_{ij}|x_j| \quad \forall i, j \in J_i \quad (2.5)$$

$$\rho_{ij} \geq 0 \quad \forall j \in J_i \quad (2.6)$$

$$\lambda_i \geq 0 \quad \forall i \quad (2.7)$$

$$x_j \geq 0 \quad \forall j \quad (2.8)$$

Podemos agora substituir tal formulação do modelo dual (2.4 a 2.8) obtido para a i -ésima função de proteção $\beta_i(x_j, \Gamma_i)$ na restrição 2.2 do modelo original e podemos desconsiderar a minimização por se tratar de um problema de maximização, ou seja, é suficiente que a restrição vale para pelo menos um λ_i e um ρ_{ij} , que por sua vez equivale a ter, no mínimo, $\Gamma_i = 1$. Ora, $\Gamma_i = 0$ implica $\beta_i(x_j, \Gamma_i) = 0$, ou seja, o modelo se torna equivalente ao modelo nominal. Se $\Gamma_i = 1$ então $|S_i| = \lfloor \Gamma_i \rfloor = 1$. Mas como $S_i \subseteq J_i$ então $|J_i| \geq 1$. Suponhamos então que haja apenas um parâmetro incerto. Ao considerar que a restrição 2.5 deve ser satisfeita, e que o primeiro membro da mesma é equivalente à expressão da função objetivo 2.4 para $\Gamma_i = 1$, e seu segundo membro é equivalente à expressão $[\sum_{j \in S_i} \hat{a}_{ij}|x_j| + (\Gamma_i - \lfloor \Gamma_i \rfloor)\hat{a}_{it_i}|x_{t_i}|]$ da restrição 2.2 também para $\Gamma_i = 1$, concluímos a explicação. Tal problema dual, ao ser substituído no modelo original, gera enfim o modelo linear robusto de Bertsimas e Sim que tem a seguinte formulação:

$$\max \mathbf{c}^T \mathbf{x}$$

s.a:

$$\sum_j a_{ij}x_j + \lambda_i \Gamma_i + \sum_{j \in J_i} \rho_{ij} \leq b_i \quad \forall i$$

$$\lambda_i + \rho_{ij} \geq \hat{a}_{ij}x_j \quad \forall i, j \in J_i$$

$$\rho_{ij} \geq 0 \quad \forall i, j \in J_i$$

$$x_j \geq 0 \quad \forall j$$

$$\lambda_i \geq 0 \quad \forall i$$

Apenas temos garantia da factibilidade desse modelo dual proposto por Bertsimas e Sim se, no máximo, $\lfloor \Gamma_i \rfloor$ coeficientes \tilde{a}_{ij} variarem. Logo, se o decisor escolhe determinado valor para Γ_i e mais coeficientes \tilde{a}_{ij} variarem, a metodologia de otimização robusta fornece ao gestor limitantes à probabilidade de violação do primeiro conjunto de restrições do modelo dual. Supondo que x_j^* seja a solução do modelo robusto então a probabilidade de violação da i -ésima restrição pode ser limitada da seguinte forma:

$$Pr \left(\sum_j \tilde{a}_{ij} x_j^* > b_i \right) \leq B(n, \Gamma_i) \quad \text{onde} \quad B(n, \Gamma_i) = \frac{1}{2^n} \left\{ (1 - \mu) \binom{n}{\lfloor v \rfloor} + \sum_{l=\lfloor v \rfloor+1}^n \binom{n}{l} \right\}$$

$$n = \lfloor \Gamma_i \rfloor, \quad v = \frac{\Gamma_i + n}{2} \quad e \quad \mu = v - \lfloor v \rfloor$$

Utilizando a aproximação de De Moivre-Laplace da distribuição binomial, obtemos:

$$B(n, \Gamma_i) \approx 1 - \Phi \left(\frac{\Gamma_i - 1}{\sqrt{|J_i|}} \right)$$

em que

$$\Phi(\theta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\theta} \exp \left(-\frac{y^2}{2} \right) dy$$

é a função distribuição acumulada de uma normal padrão.

Bertsimas e Thiele [14] trabalham incerteza tanto na matriz dos coeficientes como nos coeficientes da função objetivo. Vemos uma aplicação dessa abordagem de Bertsimas e Thiele [14] na tese de doutoramento de Alem [7] ao trabalhar com incertezas em parâmetros associados à um modelo de produção moveleira.

2.3 Portfólio de projetos sob incerteza

Otimização robusta têm sido amplamente utilizada no portfólio de projetos de P&D . Por exemplo, Fernandes et al. [25] apresentou uma otimização robusta de portfólio para alocação adaptativa de ativos. A partir da consideração de custos de transação, obtidos pela aplicação do modelo para cada dia dos dados históricos (2000-2015) e atualização com retornos realizados, indicaram que o portfólio robusto exibiu um desempenho aprimorado e com êxito para restringir possíveis perdas.

Hassanzadeh et al. [39] explicam que pesquisas sobre desenvolvimento e pesquisa de medicamentos farmacêuticos (P&D) para contratar organizações de pesquisa (CROs) experimentaram um crescimento significativo nas últimas décadas e que espera-se que a tendência continue. Tal artigo apresentou uma contribuição distinta para a literatura pois

desenvolveu e avaliou uma ferramenta de suporte ao negócio (num contexto estocástico) para ajudar uma CRO a decidir sobre oportunidades de projetos clínicos de P&D e revisar seu portfólio de projetos de P&D, considerando as restrições existentes e as capacidades financeiras e de recursos.

Sun et al [77] propõe um modelo robusto de portfólio de projetos de P&D que leva em conta o alto grau de incerteza no custo e no recurso que pertencem aos conjuntos de incerteza poliédricos. Este modelo pode ajudar os tomadores de decisão conservadores escolherem um portfólio de projeto de P&D adequado e razoável em diferentes ambientes de P&D incertos, e simular o nível de incerteza, ajustando os limiares de controle para avaliar a adequação dos projetos selecionados.

Não se limitando a portfólio de projetos de P&D e estendendo sua pesquisa para outra metodologia, Liu e Liu [50] trataram o problema de seleção de portfólio de projetos por meio de otimização fuzzy e obtiveram alguns insights sobre tal portfólio em relação à interação dos projetos. Discutem como a incerteza e a interação entre os projetos afetam o retorno de projetos e alocação de pessoal.

Assim como Liu e Liu, Mild et al. [55] também trabalham interdependências de projetos, e quanto a seleção de projetos foram responsáveis por múltiplos critérios de avaliação, e incertezas sobre o desempenho do projeto, bem como financeira e outras restrições relevantes e relataram como a modelagem de portfólio robusta tem sido usada repetidamente na Agência de Transporte Finlandesa (FTA) para programação de manutenção.

Em nenhum trabalho anteriormente citado fora estudada a correlação entre os parâmetros incertos. Fliedner e Liesio [29] desenvolveram uma metodologia para seleção de portfólio de projetos reduzindo o conjunto de parâmetros incertos que assumem o pior caso, ao limitar o número de parâmetros do projeto que podem se desviar simultaneamente do seu valor mais provável. Ajustando esse limite, os tomadores de decisão podem escolher os níveis desejados de conservadorismo. Tal metodologia permitiu inferir se havia (ou não) dependências entre os parâmetros incertos do modelo de otimização linear multi-objetivo considerado.

Apesar de toda a pesquisa desenvolvida, nenhum trabalho foi realizado com o intuito de considerar incerteza num contexto de seleção de portfólio de projetos com possibilidade de financiamento para execução dos mesmos. Sabe-se que em muitas situações, apenas por meio de financiamentos, a execução de projetos seria factível. Nosso trabalho se encaixa na proposta de tratar a gestão de portfólio de projetos num contexto estocástico, utilizando otimização robusta a um modelo de programação linear com o intuito de auxiliar o gestor nas seguintes decisões:

- Escolha do portfólio (decisão de implementar ou não determinado projeto).
- Uma vez escolhido o conjunto que constituirá o portfólio, definir a programação (quando e em qual modo (par tempo-custo) de cada projeto).
- Munir o decisor de ferramentas que o ajudem na tomada de empréstimos com o objetivo de maximizar o fluxo de caixa do último período no horizonte de planejamento.

e tudo isso fornecendo a flexibilidade de comparar os possíveis resultados desde um cenário determinístico até um cenário onde todos os parâmetros incertos assumem o pior caso simultaneamente.

Capítulo 3

Definição do Problema/Modelagem Matemática

Consideremos um portfólio constituído por vários projetos e representado pelo conjunto A . Desejamos planejar a execução de tal portfólio e dos fluxos de caixa ao longo de um horizonte fixo de planejamento num contexto estocástico. Tal horizonte de planejamento é discretizado e varia de 1 a s .

Paralelo ao processo de agendamento dos projetos existe um fluxo de caixa. As entradas de tal fluxo são: um aporte inicial do sponsor e denotado por C_0 , os lucros retornados mediante a conclusão dos projetos, e os possíveis empréstimos necessários para execução dos mesmos. As saídas de tal fluxo são: os custos de execução dos projetos, as amortizações dos empréstimos e dos juros compensatórios.

Cada projeto $i \in A$ tem sua lista de precedência P_i . Também trata-se a possibilidade de cada projeto ser executado em modos distintos. Entende-se por modo m de um projeto i um par (d_{im}, c_{im}) onde d_{im} e c_{im} representam a duração e o custo da projeto, respectivamente. O conjunto de modos de um projeto i será denotado por M_i . Consideramos que aumentos no custo de um determinado projeto (alocação de mais recursos de mão de obra direta, por exemplo) diminuem a duração do mesmo.

O custo de cada projeto é rateado linearmente por período sendo que, o custo por período de um projeto i executado no modo m é c_{im}/d_{im} . Uma vez concluído um projeto i , o lucro p_i advindo de sua conclusão passa a alimentar os fluxos de caixa.

O "gatilho" para a tomada de financiamentos em determinado período é exatamente quando as entradas de caixa (aporte inicial e lucros retornados) não são suficientes para bancar as saídas de caixa, a saber, os custos de execução dos projetos naquele período e as amortizações dos empréstimos anteriores e juros remuneratórios.

Da mesma forma que para os projetos temos modos de execução, para os financiamentos temos tipos de amortização. Cada tipo de financiamento é denotado por l e corresponde ao par (h_l, r_{hl}) onde h_l e r_{hl} são o prazo de vencimento do empréstimo e a taxa de juros do empréstimo começando no período t , respectivamente.

Consideramos que, quanto maior for h_l , maior será r_{hl} pois os riscos de crédito (riscos de inadimplência, por exemplo) são maiores quando se prolonga o prazo de amortização e assim, tais riscos são incorporados na taxa de financiamento.

Todos os empréstimos (e seus respectivos encargos financeiros) devem ser amortizados ao longo do horizonte de planejamento. Logo, o último período de empréstimo é o período $(s - h_l)$.

Um empréstimo do tipo l que é tomado no início do período t é denotado por x_{tl} e é pago em h_l parcelas iguais a x_{tl}/h_l . Sobre cada parcela incide juros durante a quantidade de períodos restantes até o vencimento do empréstimo em regime de capitalização linear.

Temos desde a possibilidade de implementar toda a carteira de projetos a não implementar nem sequer um projeto (se esse for o caso mais rentável), ou seja, a não implementação de algum projeto é considerada.

Também consideramos uma política de contenção de tomada de financiamentos por período através da consideração de um limite superior expresso por u .

Como estamos tratando de um nível gerencial estratégico e não tático nem operacional, preferimos considerar os parâmetros associados ao modo de execução dos projetos, custo e duração, como determinísticos (pois estão atrelados diretamente à forma como os projetos serão conduzidos) e apenas tratamos tais parâmetros dentro de determinados cenários (otimista, mais provável e otimista, por exemplo).

A gestão de portfólio de projetos num contexto estocástico onde a incerteza está associada aos lucros retornados e à taxa de financiamento é então o foco de nosso trabalho.

O objetivo é maximizar o fluxo de caixa no final do horizonte de planejamento e para isso deve-se escolher o portfólio de projetos, a programação dos mesmos, os modos que serão executados, quando serão implementados, e os tipos de empréstimos (caso sejam necessários) de forma a maximizar a rentabilidade da carteira de projetos proposta, e tudo isso num contexto onde os lucros retornados devido à conclusão dos projetos e a taxa de financiamento são incertos. Na seção seguinte apresentamos ainda uma forma de tratar investimento de possíveis saldos positivos que surjam em cada período.

3.1 Modelo Nominal

Apresentamos os conjuntos, parâmetros e variáveis utilizados no modelo nominal e suas respectivas notações e descrições:

Tabela 3.1: Conjuntos usados no modelo nominal

Conjunto	Descrição
A	Conjunto de atividades no portfólio de projetos
P_i	Conjunto de atividades precedentes para a atividade $i, \forall i \in A$
M_i	Conjunto de modos de execução da atividade $i, \forall i \in A$
$T = \{1, \dots, s\}$	Conjunto de períodos no horizonte de planejamento (s corresponde ao último período)
$T_{im} = \{es_i, \dots, ls_{im}\}$	intervalo de tempo para iniciar a execução da atividade i onde es_i = Data de início mais cedo possível de uma atividade i e ls_{im} = Data de início mais tarde possível de uma atividade i quando executada no modo $m, i \in A, m \in M_i$
L	Conjunto de tipos de empréstimo

Tabela 3.2: Parâmetros usados no modelo nominal

Parâmetro	Descrição
C_0	Capital inicial fornecido pelo sponsor do portfólio antes do período 1
u	Limite superior para a totalidade da dívida em cada período
h_l	Prazo de vencimento dos empréstimos do tipo $l, l \in L$
r_{tl}	Taxa de juros por período para o empréstimo de tipo l começando no período $t, t = 1, \dots, (s - h_l), l \in L$
p_i	Fluxo de caixa gerado pela atividade i após a conclusão, $i \in A$
d_{im}	Duração (em períodos) da atividade i no modo $m, i \in A, m \in M_i$
c_{im}	Custo total para a execução da atividade i no modo $m, i \in A, m \in M_i$

Tabela 3.3: Variáveis usadas no modelo nominal

Variável	Descrição
f_t	Fluxo de caixa no final do período $t, t = 1, \dots, s$
x_{tl}	Capital emprestado no período t para um empréstimo com prazo de vencimento do tipo $l, t = 1, \dots, (s - h_l), l \in L$
y_{imt}	Variável binária que indica se o início da execução ($y_{imt} = 1$) ou não ($y_{imt} = 0$) da atividade i ocorre no período t , no modo $m, \forall i \in A, \forall m \in M_i, \forall t \in T_{im}$
v_i	Variável binária que indica se será executada ($v_i = 0$) ou não ($v_i = 1$) a atividade $i, \forall i \in A$

O modelo determinístico original proposto por Martins [52] (com algumas alterações na notação) é o seguinte:

Formulação original (D):

$$\max Z_D = f_s \quad (3.1)$$

s.a:

$$\sum_{m \in M_j} \sum_{t \in T_{jm}} (t + d_{jm}) y_{jmt} + (s + 1) v_j \leq \sum_{m \in M_i} \sum_{t \in T_{im}} t y_{imt} + (s + 1) v_i \quad i \in A, j \in P_i \neq \emptyset \quad (3.2)$$

$$\sum_{m \in M_i} \sum_{t \in T_{im}} y_{imt} + v_i = 1 \quad i \in A \quad (3.3)$$

$$\sum_{l \in L} \sum_{q=\max\{1, t-h_l+1\}}^{\min\{t, s-h_l\}} ((q - t + h_l)/h_l) x_{ql} \leq u \quad t = 1, \dots, \max_{l \in L} \{s - h_l\} \quad (3.4)$$

$$C_0 + \sum_{l \in L} x_{1l} = \sum_{i \in A} \sum_{m \in M_i} ((c_{im}/d_{im}) y_{im1}) + f_1 \quad (3.5)$$

$$\begin{aligned} & f_{t-1} + \sum_{i \in A} \sum_{m \in M_i} \sum_{q \in T_{im} \cap \{1, \dots, t-d_{im}\} \neq \emptyset} (p_i y_{imq}) + \sum_{l \in L \wedge t \leq s-h_l} x_{tl} = \\ & = \sum_{i \in A} \sum_{m \in M_i} \sum_{q \in T_{im} \cap \{t-d_{im}+1, \dots, t\} \neq \emptyset} ((c_{im}/d_{im}) y_{imq}) + \\ & + \sum_{l \in L} \sum_{q=\max\{1, t-h_l\}}^{\min\{t-1, s-h_l\}} ((1 + r_{ql}(q - t + h_l + 1))/h_l) x_{ql} + f_t \quad t = 2, \dots, s \end{aligned} \quad (3.6)$$

$$f_t \geq 0 \quad \forall t \in T \quad (3.7)$$

$$x_{tl} \geq 0 \quad \forall l \in L, t = 1, \dots, (s - h_l) \quad (3.8)$$

$$y_{imt} \in \mathbb{B} \quad \forall i \in A, m \in M_i, t \in T_{im} \quad (3.9)$$

$$v_i \in \mathbb{B} \quad \forall i \in A \quad (3.10)$$

O objetivo (3.1) é maximizar o fluxo de caixa no final do último período no horizonte de planejamento. A restrição (3.2) garante que um projeto apenas inicie após seus predecessores serem concluídos. A restrição (3.3) em conjunto com a (3.2) garantem que se um projeto não for implementado, todos seus sucessores também não serão. A restrição (3.4) trata-se de uma restrição de capacidade impondo um limite de débito para cada período $t \in T$ levando em consideração que vários empréstimos podem ocorrer naquele período tratado. As restrições (3.5) e (3.6) são restrições de fluxo sendo que a restrição (3.5) refere-se ao primeiro período garantindo que os capitais aportados (próprios ou de terceiros) são suficientes para arcar com os custos de execução dos projetos sobrando assim um fluxo de caixa (que pode ser zero) no fim do período. Já a restrição (3.6) garante que o fluxo de caixa do período atual ($t \neq 1$) é o que sobra depois que utilizamos os capitais provenientes do fluxo de caixa do período anterior, os lucros retornados e os empréstimos solicitados mas ainda não pagos integralmente. Tais entradas de caixa bancam os custos de execução das atividades do período atual, as parcelas dos empréstimos que estão vencendo no período atual e seus respectivos encargos financeiros (saídas de caixa).

Apresentamos a seguir a forma de resolver as limitações do modelo nominal apresentado, a saber, o fato do mesmo não utilizar regime de capitalização composta na tomada de empréstimos e também não levar em consideração a possibilidade de investimento de saldos positivos. Apesar de apresentarmos a possibilidade de tratamento das limitações citadas, não rodamos nenhuma instância considerando tais melhorias no modelo e deixamos essa proposta para trabalhos futuros.

Da mesma forma que consideramos a possibilidade de ocorrerem tipos diferentes de financiamento, também consideramos formas distintas de investimento. Cada forma de investimento (representada por o) corresponde ao par (a_o, b_{ot}) onde a_o = prazo de retorno do investimento e b_{ot} = taxa de investimento que pode variar também de acordo com o período de aplicação. O conjunto de possibilidades de forma de investimento será representado por O . Consideramos que todo investimento retornará para o fluxo de caixa dentro do horizonte fixo de planejamento logo, o último período de investimento corresponde a $s - a_o$.

Ao decisor cabe resolver quanto e quando investir, de forma a não comprometer a execução dos projetos escolhidos e continuar seguindo o objetivo de maximizar o fluxo de caixa no último horizonte de planejamento. A liquidez do capital disponibilizado para arcar com a execução dos projetos torna-se comprometida e a escolha de quanto e quando podemos comprometer a mesma será representada pela variável de decisão λ_{ot} = Valor investido no período t para um investimento com prazo de retorno da forma o . Para resolvermos as limitações citadas basta substituir as restrições 3.5 e 3.6 pelas restrições seguintes:

$$C_0 + \sum_{l \in L} x_{1l} = \sum_{i \in A} \sum_{m \in M_i} \left(\left(\frac{c_{im}}{d_{im}} \right) y_{im1} \right) + \sum_{o \in O} \lambda_{o1} + f_1 \quad (3.11)$$

$$\begin{aligned} & f_{t-1} + \sum_{i \in A} \sum_{m \in M_i} \sum_{q \in T_{im} \cap \{1, \dots, t-d_{im}\} \neq \emptyset} (p_i y_{imq}) + \sum_{l \in L \wedge t \leq s-h_l} x_{tl} + \\ & + \sum_{o \in O \wedge t \geq a_o+1} (1 + b_{o,t-a_o})^{a_o} \lambda_{o,t-a_o} = \sum_{i \in A} \sum_{m \in M_i} \sum_{q \in T_{im} \cap \{t-d_{im}+1, \dots, t\} \neq \emptyset} \left(\left(\frac{c_{im}}{d_{im}} \right) y_{imq} \right) + \\ & + \sum_{l \in L} \sum_{q=\max\{1, t-h_l\}}^{\min\{t-1, s-h_l\}} \left((1 + r_{ql})^{(q-t+h_l+1)} \right) \frac{x_{ql}}{h_l} + \sum_{o \in O \wedge t \leq s-a_o} \lambda_{ot} + f_t \quad t = 2, \dots, s \quad (3.12) \end{aligned}$$

Ao substituírmos as restrições 3.5 e 3.6 pelas restrições 3.11 e 3.12, respectivamente, ainda teremos um modelo de otimização linear misto pois nos expoentes temos apenas parâmetros. Através de tais substituições, os financiamentos passam a ser tomados em regime de capitalização composta e o valor do fluxo de caixa no último período tende a aumentar pois consideramos a possibilidade de investimento de saldos positivos. Assim como o gatilho para a tomada de empréstimos é o surgimento de saldos negativos num determinado período, o gatilho para a realização de investimentos é o surgimento de saldos positivos. Para estudos futuros podemos tratar tal modelo linear considerando incerteza também nas taxas de investimento.

3.2 Modelos Robustos

3.2.1 Adequação da Formulação Original

Para a devida aplicação da técnica de otimização robusta, as restrições de igualdade, onde encontram-se os parâmetros incertos, devem ser convertidas em restrições de desigualdade. Para tal, como o objetivo é maximizar o fluxo de caixa no final do último período no horizonte de planejamento, é natural pensar numa formulação onde as entradas são maiores ou iguais às saídas (diferente da formulação original que as considera iguais). Logo, todas as restrições do modelo nominal devem ser mantidas com exceção da restrição (3.6) (restrição onde encontram-se os parâmetros incertos e cujas entradas e saídas dos fluxos de caixa referem-se a seus primeiro e segundo membros, respectivamente), que deve ser reescrita da seguinte forma:

$$\begin{aligned}
 & f_{t-1} + \sum_{i \in A} \sum_{m \in M_i} \sum_{q \in T_{im} \cap \{1, \dots, t-d_{im}\} \neq \emptyset} (p_i y_{imq}) + \sum_{l \in L \wedge t \leq s-h_l} x_{tl} \geq \\
 & \geq \sum_{i \in A} \sum_{m \in M_i} \sum_{q \in T_{im} \cap \{t-d_{im}+1, \dots, t\} \neq \emptyset} ((c_{im}/d_{im}) y_{imq}) + \\
 & + \sum_{l \in L} \sum_{q=\max\{1, t-h_l\}}^{\min\{t-1, s-h_l\}} ((1 + r_{ql}(q - t + h_l + 1))/h_l) x_{ql} + f_t \quad t = 2, \dots, s \quad (3.13)
 \end{aligned}$$

E a formulação onde substituímos a restrição (3.6) pela restrição (3.13) será chamada Formulação Adequada e denotada por (DA). A mesma servirá de base para criarmos os modelos robustos que terão as seguintes formulações e notações:

- Formulação Adequada r-Robusta (Notação: DAR-R) considerando incerteza na taxa de financiamento.
- Formulação Adequada p-Robusta (Notação: DAp-R) considerando incerteza nos lucros retornados.
- Formulação Adequada Robusta (Notação: DA-R) considerando incerteza na taxa de financiamento e nos lucros retornados.

A intenção é tratar o impacto da incerteza nas variáveis de decisão considerando, inicialmente, os casos onde cada parâmetro (taxa de financiamento ou lucros retornados) é considerado incerto isoladamente e, após, analisar o impacto ao considerar ambos incertos simultaneamente.

3.2.2 Incerteza na taxa de financiamento

Como o parâmetro r_{ql} aparece apenas na desigualdade (3.13), apenas esse conjunto de restrições será modificado. Neste caso, considera-se que:

Tabela 3.4: Conjuntos e Parâmetros adicionais usados no modelo robusto DAR-R

Conjunto/Parâmetro	Descrição
$J_t^r = \{(q,l): \widehat{r}_{ql} > 0\}$	Conjunto de parâmetros r_{ql} do período t relativo à desigualdade (3.13) sujeitos a incertezas.
S_t^r	Conjunto de parâmetros r_{ql} do período t relativo à desigualdade (3.13) sujeitos a incertezas e que assumirão os piores casos.
\widehat{r}_{ql}	Variação máxima do parâmetro r_{ql} .
Γ_t^r	Budgets de incerteza (Grau de conservadorismo) do parâmetro r_{ql} (para $t \in T \setminus \{1\}$). $\Gamma_t^r \in [0, J_t^r]$
Ω_t^r	$\{S_t^r S_t^r \subseteq J_t^r, S_t^r \leq \Gamma_t^r\}$

Dada a solução do problema de otimização robusta x_{ql}^* , define-se a função de proteção da taxa de financiamento como

$$\beta_t^r(x_{ql}^*, \Gamma_t^r) = \max_{\Omega_t^r} \sum_{(q,l) \in S_t^r} [\widehat{r}_{ql}(q-t+h_l+1) \frac{x_{ql}^*}{h_l}] \quad (3.14)$$

E tal função de proteção pode ser substituída pelo seguinte problema de otimização:

$$\beta_t^r(x_{ql}^*, \Gamma_t^r) = \max \sum_{(q,l) \in J_t^r} [\widehat{r}_{ql}(q-t+h_l+1) \frac{x_{ql}^*}{h_l}] w_{tql}^r \quad (3.15)$$

s.a.:

$$\sum_{(q,l) \in J_t^r} w_{tql}^r \leq \Gamma_t^r \quad (3.16)$$

$$0 \leq w_{tql}^r \leq 1 \quad \forall (q,l) \in J_t^r \quad (3.17)$$

Com base em Bertsimas e Sim [13] sabemos que a solução ótima desse problema de otimização (3.15 a 3.17) consiste de Γ_t^r variáveis w_{tql}^r iguais a 1, que equivale a escolher o subconjunto Ω_t^r com o correspondente valor da função objetivo $\sum_{(q,l) \in S_t^r} [\widehat{r}_{ql}(q-t+h_l+1) \frac{x_{ql}^*}{h_l}]$. Como a função de proteção (3.14) e o problema de otimização (3.15 a 3.17) são equivalentes podemos substituir este na restrição (3.13) com a finalidade de obter uma função linear para x_{ql}^* dado. Não obstante, como no nosso caso x_{ql} trata-se de uma variável de decisão, é necessário obter o modelo dual do modelo anterior (3.15) a (3.17) para após, incorporá-lo ao modelo nominal e assim obter uma função linear para todo x_{ql} . Inserindo as variáveis

duais λ_t^r e ρ_{tql}^r , tem-se o dual de $\beta_t^r(x_{ql}^*, \Gamma_t^r)$, para cada restrição t , ou seja:

$$\min \sum_{(q,l) \in J_t^{ir}} \rho_{tql}^r + \lambda_t^r \Gamma_t^r \quad (3.18)$$

s.a.:

$$\lambda_t^r + \rho_{tql}^r \geq \widehat{r}_{ql}(q - t + h_l + 1) \frac{x_{ql}^*}{h_l} \quad \forall (q, l) \in J_t^r, \forall t \in T \setminus \{1\} \quad (3.19)$$

$$\rho_{tql}^r \geq 0 \quad \forall (q, l) \in J_t^r, \forall t \in T \setminus \{1\} \quad (3.20)$$

$$\lambda_t^r \geq 0 \quad \forall t \in T \setminus \{1\} \quad (3.21)$$

Cumpra ressaltar que, como o problema (3.15 a 3.17) é limitado e factível para todo $\Gamma_t^r \in [0, |J_t^r|]$, por dualidade forte temos que o problema (3.18 a 3.21) também é limitado e factível, e os valores das funções objetivos de tais problemas são iguais. Inserindo então o problema (3.18 a 3.21) na restrição (3.13) e conseqüentemente no modelo nominal, obtemos agora o equivalente modelo robusto do modelo adequado considerando apenas incerteza na taxa de financiamento. Tal modelo robusto será denominado DAr-R e apresenta a seguinte formulação:

Formulação Adequada r-Robusta (DAr-R)

$$\max Z_{DAr-R} = f_s \quad (3.22)$$

s.a.:

$$\text{Sequenciamento}((3.2) - (3.3)) \quad (3.23)$$

$$\text{Capacidade}(3.4) \quad (3.24)$$

$$\text{Fluxo}(3.5) \quad (3.25)$$

$$\begin{aligned} & f_{t-1} + \sum_{i \in A} \sum_{m \in M_i} \sum_{q \in T_{im} \cap \{1, \dots, t-d_{im}\} \neq \emptyset} (p_i y_{imq}) + \sum_{l \in L \wedge t \leq s-h_l} x_{tl} \geq \\ & \geq \sum_{i \in A} \sum_{m \in M_i} \sum_{q \in T_{im} \cap \{t-d_{im}+1, \dots, t\} \neq \emptyset} ((c_{im}/d_{im}) y_{imq}) + \\ & + \sum_{l \in L} \sum_{q=\max\{1, t-h_l\}}^{\min\{t-1, s-h_l\}} ((1 + r_{ql}(q - t + h_l + 1))/h_l) x_{ql} + \sum_{(q,l) \in J_t^r} \rho_{tql}^r + \lambda_t^r \Gamma_t^r + f_t \end{aligned} \quad (3.26)$$

$t = 2, \dots, s$

$$\lambda_t^r + \rho_{tql}^r \geq \widehat{r}_{ql}(q - t + h_l + 1) \frac{x_{ql}^*}{h_l} \quad \forall (q, l) \in J_t^r, \forall t \in T \setminus \{1\} \quad (3.27)$$

$$\rho_{tql}^r \geq 0 \quad \forall (q, l) \in J_t^r, \forall t \in T \setminus \{1\} \quad (3.28)$$

$$\lambda_t^r \geq 0 \quad \forall t \in T \setminus \{1\} \quad (3.29)$$

$$\text{Dominio}((3.7) - (3.10)) \quad (3.30)$$

3.2.3 Incerteza nos lucros retornados

Como o parâmetro p_i aparece apenas na desigualdade (3.13), apenas esse conjunto de restrições será modificado. Neste caso, considera-se que:

Tabela 3.5: Conjuntos e Parâmetros adicionais usados no modelo robusto DAp-R

Conjunto/Parâmetro	Descrição
$J_t^p = \{i \in A: \widehat{p}_i > 0\}$	Conjunto de parâmetros p_i do período t relativo à desigualdade (3.13) sujeitos a incertezas.
S_t^p	Conjunto de parâmetros p_i do período t relativo à desigualdade (3.13) sujeitos a incertezas e que assumirão os piores casos.
\widehat{p}_i	Variação máxima do parâmetro p_i .
Γ_t^p	Budgets de incerteza (Grau de conservadorismo) do parâmetro p_i (para $t \in T \setminus \{1\}$). $\Gamma_t^p \in [0, J_t^p]$
Ω_t^p	$\{S_t^p S_t^p \subseteq J_t^p, S_t^p \leq \Gamma_t^p\}$

Dada a solução do problema de otimização robusta y_{imq}^* , define-se a função de proteção dos lucros retornados como

$$\beta_t^p(y_{imq}^*, \Gamma_t^p) = \max_{\Omega_t^p} \sum_{i \in S_t^p} \sum_{m \in M_i} \sum_{q \in T_{im} \cap \{1, \dots, t-d_{im}\} \neq \emptyset} \widehat{p}_i y_{imq}^* \quad (3.31)$$

E tal função de proteção pode ser substituída pelo seguinte problema de otimização:

$$\beta_t^p(y_{imq}^*, \Gamma_t^p) = \max_{\Omega_t^p} \sum_{i \in J_t^p} \sum_{m \in M_i} \sum_{q \in T_{im} \cap \{1, \dots, t-d_{im}\} \neq \emptyset} (\widehat{p}_i y_{imq}^*) w_{ti}^p \quad (3.32)$$

s.a.:

$$\sum_{i \in J_t^p} w_{ti}^p \leq \Gamma_t^p \quad (3.33)$$

$$0 \leq w_{ti}^p \leq 1 \quad \forall i \in J_t^p \quad (3.34)$$

O próximo passo é obter o modelo dual do modelo anterior (3.32) a (3.34). Inserindo as variáveis duais λ_t^p e ρ_{ti}^p , tem-se o dual de $\beta_t^p(y_{imq}^*, \Gamma_t^p)$, para cada restrição t , ou seja:

$$\max \sum_{i \in J_t^p} \rho_{ti}^p + \lambda_t^p \Gamma_t^p \quad (3.35)$$

s.a.:

$$\lambda_t^p + \rho_{ti}^p \geq \sum_{m \in M_i} \sum_{q \in T_{im} \cap \{1, \dots, t-d_{im}\} \neq \emptyset} (\widehat{p}_i y_{imq}^*) \quad \forall i \in J_t^p, \forall t \in T \setminus \{1\} \quad (3.36)$$

$$\rho_{ti}^p \geq 0 \quad \forall i \in J_t^p, \forall t \in T \setminus \{1\} \quad (3.37)$$

$$\lambda_t^p \geq 0 \quad \forall t \in T \setminus \{1\} \quad (3.38)$$

Obtemos agora o equivalente modelo robusto do modelo adequado considerando apenas incerteza na taxa de financiamento. Tal modelo robusto será denominado DAp-R e apresenta a seguinte formulação:

Formulação Adequada p-Robusta (DAp-R)

$$\max Z_{DAp-R} = f_s \quad (3.39)$$

s.a.:

$$\text{Sequenciamento}((3.2) - (3.3)) \quad (3.40)$$

$$\text{Capacidade}(3.4) \quad (3.41)$$

$$\text{Fluxo}(3.5) \quad (3.42)$$

$$\begin{aligned} & f_{t-1} + \sum_{i \in A} \sum_{m \in M_i} \sum_{q \in T_{im} \cap \{1, \dots, t-d_{im}\} \neq \emptyset} (p_i y_{imq}) + \sum_{l \in L \wedge t \leq s-h_l} x_{tl} + \sum_{i \in J_t^p} \rho_{ti}^p + \lambda_t^p \Gamma_t^p \geq \\ & \geq \sum_{i \in A} \sum_{m \in M_i} \sum_{q \in T_{im} \cap \{t-d_{im}+1, \dots, t\} \neq \emptyset} ((c_{im}/d_{im}) y_{imq}) + \\ & + \sum_{l \in L} \sum_{q=\max\{1, t-h_l\}}^{\min\{t-1, s-h_l\}} ((1+r_{ql}(q-t+h_l+1))/h_l) x_{ql} + f_t \quad t = 2, \dots, s \end{aligned} \quad (3.43)$$

$$\lambda_t^p + \rho_{ti}^p \geq \sum_{m \in M_i} \sum_{q \in T_{im} \cap \{t-d_{im}+1, \dots, t\} \neq \emptyset} (\widehat{p}_i y_{imq}) \quad \forall i \in J_t^p, \forall t \in T \setminus \{1\} \quad (3.44)$$

$$\rho_{ti}^p \geq 0 \quad \forall i \in J_t^p, \forall t \in T \setminus \{1\} \quad (3.45)$$

$$\lambda_t^p \geq 0 \quad \forall t \in T \setminus \{1\} \quad (3.46)$$

$$\text{Dominio}((3.7) - (3.10)) \quad (3.47)$$

3.2.4 Incerteza na taxa de financiamento e nos lucros retornados

Obtemos agora o equivalente modelo robusto do modelo adequado considerando incerteza tanto na taxa de financiamento como nos lucros retornados. Tal modelo robusto será denominado DA-R e apresenta a seguinte formulação:

Formulação Adequada Robusta (DA-R)

$$\max Z_{DA-R} = f_s \quad (3.48)$$

s.a.:

$$\text{Sequenciamento}((3.2) - (3.3)) \quad (3.49)$$

$$\text{Capacidade}(3.4) \quad (3.50)$$

$$\text{Fluxo}(3.5) \quad (3.51)$$

$$\begin{aligned} & f_{t-1} + \sum_{i \in A} \sum_{m \in M_i} \sum_{q \in T_{im} \cap \{1, \dots, t-d_{im}\} \neq \emptyset} (\widehat{p}_i y_{imq}) + \sum_{l \in L \wedge t \leq s-h_l} x_{tl} + \sum_{i \in J_t^p} \rho_{ti}^p + \lambda_t^p \Gamma_t^p \geq \\ & \geq \sum_{i \in A} \sum_{m \in M_i} \sum_{q \in T_{im} \cap \{t-d_{im}+1, \dots, t\} \neq \emptyset} ((c_{im}/d_{im}) y_{imq}) + \\ & + \sum_{l \in L} \sum_{q=\max\{1, t-h_l\}}^{\min\{t-1, s-h_l\}} ((1 + r_{ql}(q-t+h_l+1))/h_l) x_{ql} + \sum_{(q,l) \in J_t^r} \rho_{tql}^r + \lambda_t^r \Gamma_t^r + f_t \end{aligned}$$

$$t = 2, \dots, s \quad (3.52)$$

$$\lambda_t^r + \rho_{tql}^r \geq \widehat{r}_{ql}(q-t+ml_l+1) \frac{x_{ql}}{ml_l} \quad \forall (q,l) \in J_t^r, \forall t \in T \setminus \{1\} \quad (3.53)$$

$$\lambda_t^p + \rho_{ti}^p \geq \sum_{m \in M_i} \sum_{q \in T_{im} \cap \{t-d_{im}+1, \dots, t\} \neq \emptyset} (\widehat{p}_i y_{imq}) \quad \forall i \in J_t^p, \forall t \in T \setminus \{1\} \quad (3.54)$$

$$\rho_{tql}^r \geq 0 \quad \forall (q,l) \in J_t^r, \forall t \in T \setminus \{1\} \quad (3.55)$$

$$\rho_{ti}^p \geq 0 \quad \forall i \in J_t^p, \forall t \in T \setminus \{1\} \quad (3.56)$$

$$\lambda_t^r \geq 0 \quad \forall t \in T \setminus \{1\} \quad (3.57)$$

$$\lambda_t^p \geq 0 \quad \forall t \in T \setminus \{1\} \quad (3.58)$$

$$\text{Dominio}((3.7) - (3.10)) \quad (3.59)$$

Capítulo 4

Resultados Computacionais

Neste capítulo, os resultados obtidos com o modelo nominal e os modelos robustos são apresentados, comparados e analisados. Todos os modelos matemáticos são resolvidos usando o solver CPLEX, versão 12.7. Os modelos matemáticos e as estratégias propostas são implementados com a linguagem de programação AMPL, as simulações de Monte Carlo foram realizadas no Microsoft Excel 2016 com auxílio do suplemento @RISK7.6 (software comercial específico para Análise de risco por meio de simulação de Monte Carlo), e executados em um computador com processador Intel Core i3 com sistema operacional Windows10 com 4 GB de RAM.

4.1 Instâncias

No trabalho de Martins [52] o mesmo trabalha com duas classes bem definidas de instâncias, a saber: (i) uma classe cuja taxa de financiamento é constante e, (ii) outra onde tal taxa varia linearmente. A intenção do autor ao variar a taxa é testar a robustez do modelo mesmo considerando-o determinístico. Como estamos tratando a incerteza inerente à taxa de financiamento e aos lucros retornados através de modelagem robusta, escolhemos as instâncias da classe onde as taxas eram constantes e deixamos o estudo do impacto da variação da taxa nas variáveis de decisão para a simulação de Monte Carlo. Por isso, foram selecionadas todas as instâncias com taxa de financiamento constante, e às mesmas foram agregadas informações associadas aos modelos robustos (percentual de desvios dos parâmetros e número total de coeficientes sujeitos à incerteza) para gerarmos as instâncias utilizadas nos mesmos. A notação adotada para as instâncias será a seguinte: $I - Pn - s$, onde n representa o número de atividades (projetos) e s (último período do horizonte de planejamento) assumindo quatro valores, a saber, o makespan (intervalo de tempo contado do início ao término de uma sequência de tarefas) mínimo (que corresponderá a todas as atividades executadas naquilo que chamaremos de modo1), o makespan máximo (que corresponderá a todas as atividades executadas naquilo que chamaremos de modo3) e dois makespans intermediários correspondentes aos tercios do intervalo com extremos nos makespans mínimo e máximo. A exceção é para $n=10$ e $s=30$ e 50 onde os valores de s foram escolhidos por corresponderem à instâncias utilizadas por Martins [52]. Utilizaremos $n = 10, 20$ e 50 . Para os modelos robustos definimos γ como sendo o nível de variabilidade dos parâmetros sujeitos à incerteza em relação aos seus respectivos valores nominais. Assim, $\hat{p}_i = \gamma p_i$ e $\hat{r}_{ql} = \gamma r_{ql}$. Os valores para γ foram escolhidos de forma

a ter coerência com o setor de portfólio de projetos. A coerência aqui citada refere-se ao fato de que não é comum projetos bem planejados e acompanhados terem variações nos lucros retornados acima de 30% e no mercado financeiro é comum encontrarmos taxas de financiamento variando até 100%. Por isso, para determinarmos \widehat{p}_i e \widehat{r}_{ql} foram escolhidos valores de γ nos conjuntos $\{5\%, 10\%, 15\%, 30\%\}$ e $\{20\%, 50\%, 100\%\}$ respectivamente. Os testes foram realizados variando Γ com passo unitário. Os graus de conservadorismo tratados foram inteiros mas o caso não-inteiro é direto (Bertsimas e Sim [15]). Mostraremos a seguir como foi definido o passo unitário para o grau de conservadorismo Γ_t^r . Como o índice q do parâmetro r_{ql} depende de cada período $t \in T \setminus \{1\}$ e do tipo l de empréstimo então tal parâmetro é uma matriz de ordem $|L| \times |T \setminus \{1\}|$ e cujas entradas são os graus de conservadorismo de cada período relativos ao respectivo tipo de empréstimo escolhido. Assim, pelo mesmo motivo explicado anteriormente, o conjunto J_t^r também é uma matriz e é construído por meio do somatório que engloba o parâmetro r_{ql} . Em todas as instâncias, adotamos $h_1 = 3$ e $h_2 = 6$. Adotemos, em nosso exemplo, $s = 17$. Logo, por meio do somatório que engloba o parâmetro r_{ql} temos:

$$J^r = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 2 & 1 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 6 & 6 & 6 & 6 & 6 & 5 & 4 & 3 & 2 & 1 \end{pmatrix}$$

Segundo Bertsimas e Sim [15] o grau de conservadorismo Γ varia de 0 a $|J|$. Definamos o grau de conservadorismo $\Gamma_t^r = [\Gamma_t^r]_{|L| \times |T \setminus \{1\}|}$, onde para cada $l \in L$ e para cada $t \in T \setminus \{1\}$ a entrada correspondente de J_t^r será um limitante superior do elemento correspondente de Γ_t^r . Sendo assim, definimos o passo unitário como sendo acréscimos sucessivos unitários nas entradas de uma matriz nula de ordem $|L| \times |T \setminus \{1\}|$ de forma a não ultrapassar as entradas correspondentes de J_t^r . Para o nosso exemplo temos:

$$\Gamma_0^r = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\Gamma_1^r = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\Gamma_2^r = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 1 \\ 1 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 1 \end{pmatrix}$$

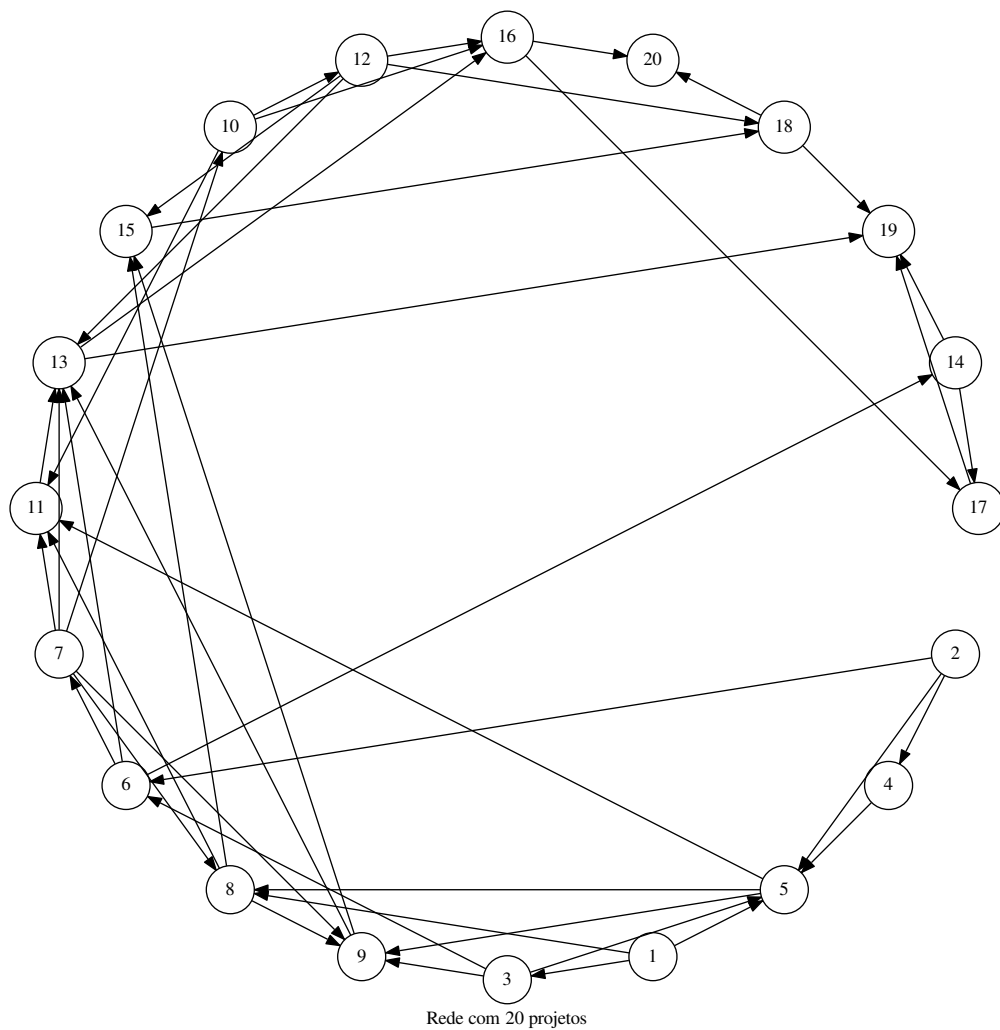
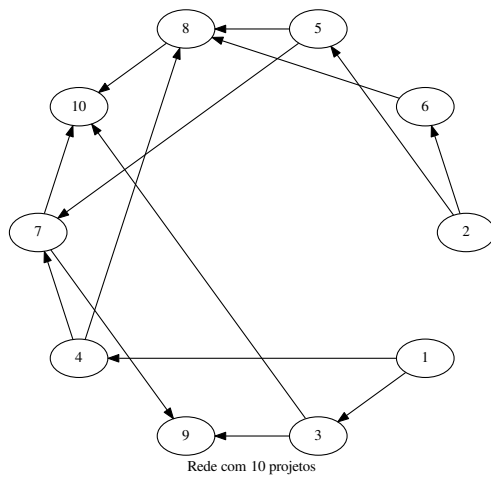
$$\Gamma_3^r = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 2 & 1 \\ 1 & 2 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 2 & 1 \end{pmatrix}$$

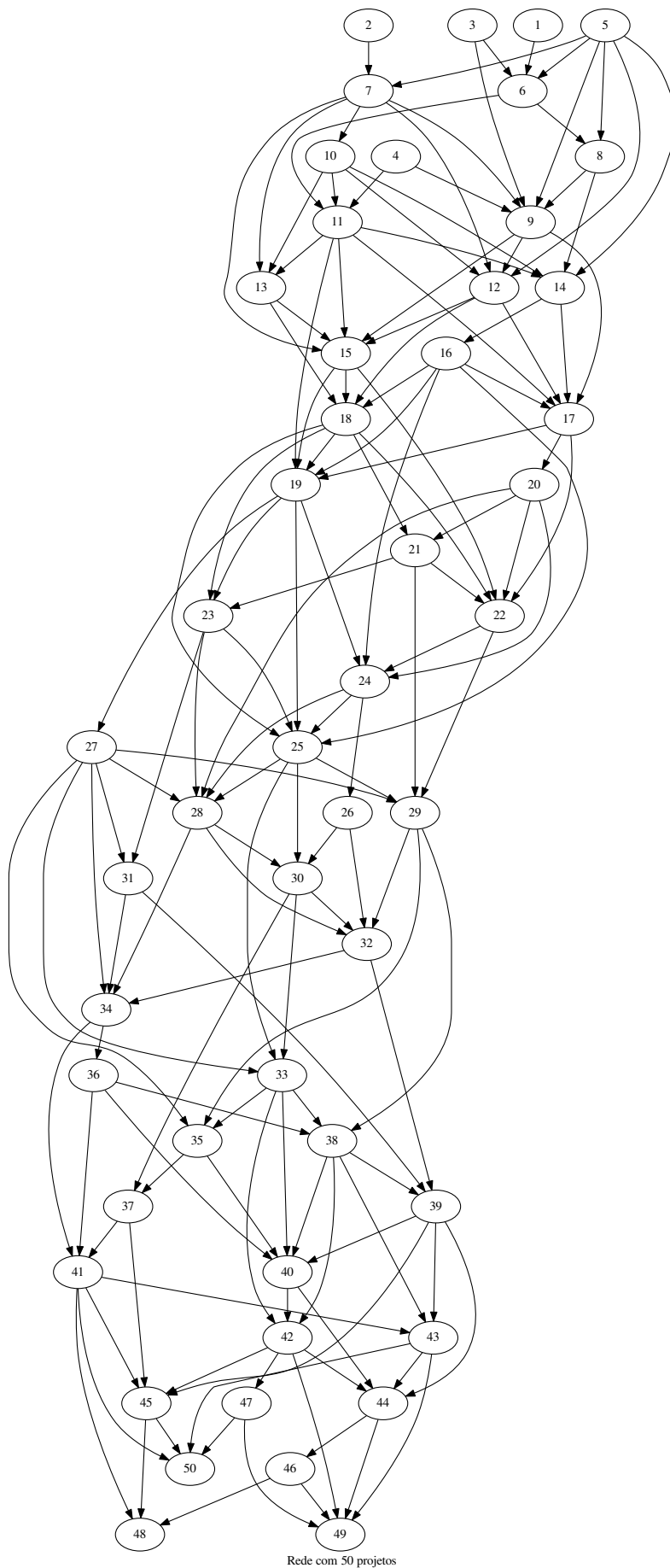
$$\Gamma_4^r = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 2 & 1 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 & 3 & 2 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\Gamma_5^r = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 2 & 1 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 5 & 5 & 5 & 5 & 5 & 5 & 5 & 5 & 4 & 3 & 2 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\Gamma_6^r = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 2 & 1 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 6 & 6 & 6 & 6 & 6 & 5 & 4 & 3 & 2 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

As seguintes redes de projetos foram utilizadas em nosso trabalho (gentilmente cedidas por Martins [52]). As setas apontam dos predecessores para os sucessores.





Apresentamos uma instância com o propósito de mostrarmos a ordem de grandeza dos dados de entrada:

Tabela 4.1: Instância I-P20-s40

Projeto	Lucro	Modos		
		Modo1	Modo2	Modo3
Proj1	8	(5,95)	(7,70)	(8,56)
Proj2	7	(3,69)	(7,56)	(9,45)
Proj3	3	(5,65)	(6,42)	(8,32)
Proj4	2	(4,124)	(8,104)	(10,90)
Proj5	7	(5,50)	(7,28)	(8,16)
Proj6	6	(4,48)	(5,30)	(6,24)
Proj7	1	(1,41)	(4,36)	(5,30)
Proj8	6	(5,55)	(6,30)	(7,21)
Proj9	5	(3,99)	(7,84)	(9,72)
Proj10	5	(1,50)	(5,45)	(6,36)
Proj11	5	(5,115)	(9,90)	(11,77)
Proj12	7	(3,60)	(5,45)	(6,36)
Proj13	6	(1,30)	(5,25)	(6,18)
Proj14	9	(5,75)	(9,54)	(11,44)
Proj15	5	(4,100)	(5,80)	(7,70)
Proj16	2	(5,105)	(7,84)	(8,72)
Proj17	1	(5,70)	(7,49)	(8,40)
Proj18	10	(2,40)	(5,30)	(7,21)
Proj19	5	(4,108)	(7,91)	(9,81)
Proj20	8	(4,40)	(5,20)	(7,14)

I-P20-s40 \Rightarrow $|A| = 20$ projetos e $s = 40$ (último período do horizonte de planejamento) = quadragésimo período (que, nos casos tratados nesse trabalho, corresponde ao quadragésimo mês). Para todas as instâncias adotamos, para os financiamentos, os tipos (3, 0,3%) e (6, 0,32%) onde o par representa (prazo,taxa), com o prazo medido em meses e taxa também mensal (em nosso trabalho), mas basta, num caso geral, que as unidades do prazo e da taxa sejam compatíveis (ex.: ano, anual). As relações de precedência estão representadas na rede com 20 projetos. Para 20 projetos sempre adotamos $u = 500$ (= $500 \cdot 10000 = 5.000.000$ unidades monetárias) (Limite de empréstimo por período) e $C_0 = 50$ (= $50 \cdot 10000 = 500.000$ unidades monetárias) (Aporte inicial). Em nosso trabalho a unidade monetária foi o Real (unidade monetária brasileira).

4.2 Resultados e discussões

Nas tabelas 4.2 e 4.3 temos, para diferentes valores de γ :

- $|J|$ = número de coeficientes sujeitos à incerteza,
- n_I = quantidade de atividades implementadas. Para determinadas instâncias, ao fixarmos γ e variarmos Γ com passo unitário, obtivemos quantidades distintas de projetos implementados. Como exemplo, citamos a instância I-P10-s30. Para a mesma, ao fixarmos $\gamma = 15\%$ e variarmos Γ com passo unitário, inicialmente 4 projetos foram implementados e, ao aumentarmos o valor de Γ , o número de projetos implementados reduziu para 3 projetos. Por esse motivo, na tabela 4.2, para tal instância, com os parâmetros supracitados, $n_I \in \{3, 4\}$.
- Γ a partir do qual o valor ótimo estabiliza (atinge o mesmo valor da solução de Soyster (pior caso)). No caso de quantidades distintas para n_I , sempre o valor ótimo estabiliza para o menor de n_I .
- $\Delta(\%)$ = decréscimo (já que estamos tratando um problema de maximização) correspondente do valor da função objetivo e calculado pela expressão $\Delta(\%) = (z^N - z^R)/z^N$ onde z^N e z^R são os valores ótimos do modelo nominal e do modelo robusto, respectivamente.

Ao considerarmos incerteza nos lucros retornados, em alguns casos o cenário de pior caso coincidiu com o pior caso teórico, ou seja, chegamos a ter $\Gamma = |J|$. Já no caso de tratarmos incerteza na taxa de financiamento, em todas as situações estudadas o cenário de pior caso coincidiu com a solução de Soyster.

Tabela 4.2: Valores de Γ , n° de atividades implementadas e respectivos decréscimos Δ (%) do valor da função objetivo para $\gamma = 5\%, 10\%, 15\%$ e 30% ao considerarmos incerteza nos lucros retornados. A coluna $|J|$ apresenta o número total de coeficientes sujeitos à incerteza.

Instância	$ J $	$\gamma = 5\%$			$\gamma = 10\%$			$\gamma = 15\%$			$\gamma = 30\%$		
		n_I	Γ	$\Delta(\%)$	n_I	Γ	$\Delta(\%)$	n_I	Γ	$\Delta(\%)$	n_I	Γ	$\Delta(\%)$
I-P10-s30	10	4	4	9,88	4	4	22,21	{3,4}	4	33,53	{2,4}	4	57,58
I-P10-s50	10	10	10	10,3	10	10	20,57	10	10	30,41	{7,9,10}	8	57,81
I-P20-s40	20	{11,16}	12	9,55	{11,16}	11	17,73	{11,16}	11	25,72	{11,16}	11	49,42
I-P20-s52	20	18	15	7,54	18	18	15,48	18	18	23,23	18	18	46,54
I-P20-s64	20	18	18	6,74	18	18	13,48	18	18	20,22	18	18	40,49
I-P20-s76	20	20	20	6,43	20	20	12,86	20	20	19,29	{18,20}	19	38,39
I-P50-s78	50	41	41	6,44	41	41	12,88	41	41	19,31	41	41	38,6
I-P50-s112	50	47	47	5,84	47	47	11,68	47	47	17,51	47	47	35
I-P50-s146	50	50	50	5,59	50	50	11,18	50	50	16,77	50	50	33,53
I-P50-s180	50	50	50	5,44	50	50	10,88	50	50	16,32	50	50	32,63

Tabela 4.3: Valores de Γ , n° de atividades implementadas e respectivos decréscimos Δ (%) do valor da função objetivo para $\gamma = 20\%, 50\%$ e 100% ao considerarmos incerteza na taxa de financiamento. A coluna $|J|$ apresenta o número total de coeficientes sujeitos à incerteza.

Instância	$ J $	$\gamma = 20\%$			$\gamma = 50\%$			$\gamma = 100\%$		
		n_I	Γ	$\Delta(\%)$	n_I	Γ	$\Delta(\%)$	n_I	Γ	$\Delta(\%)$
I-P10-s30	6	4	6	0,44	4	6	0,98	4	6	1,9
I-P10-s50	6	10	6	0,16	10	6	0,93	10	6	1,78
I-P20-s40	6	16	6	0,43	16	6	0,97	16	6	1,88
I-P20-s52	6	18	6	0,2	18	6	0,44	18	6	0,87
I-P20-s64	6	18	6	0,13	18	6	0,28	18	6	0,55
I-P20-s76	6	20	6	0,09	20	6	0,21	20	6	0,4
I-P50-s78	6	41	6	0,03	41	6	0,06	41	6	0,12
I-P50-s112	6	47	6	0,015	47	6	0,03	47	6	0,06
I-P50-s146	6	50	6	0,01	50	6	0,021	50	6	0,04
I-P50-s180	6	50	6	0,007	50	6	0,016	50	6	0,03

As figuras (4.1)-(4.10) e (4.14)-(4.23) ilustram a evolução do valor ótimo em função do *budget* de incerteza (Grau de conservadorismo) variando com passo unitário e em função do nível de variabilidade γ . Os resultados ocorreram de acordo com o esperado que era o valor ótimo decrescer monotonicamente em função do aumento desses dois parâmetros.

Também observamos através de tais figuras que o impacto da incerteza dos lucros retornados sobre o valor ótimo da função objetiva é muito maior que o gerado por considerar incerteza na taxa de financiamento. Perceba que, para uma mesma instância, (tomemos por exemplo a instância I-P20-s52) chegamos a decréscimos superiores a 40% ao considerar incertos os lucros retornados, enquanto para incerteza na taxa de financiamento, não chegamos a 1% de diminuição quando comparamos com o ótimo do modelo nominal.

Tal fato nos incentivou a procurar analisar o que gerava tamanha diferença nos impactos causados, e deu origem às tabelas 4.2 e 4.3. Por meio dessas tabelas e dos gráficos (4.1)-(4.10) e (4.14)-(4.23) percebemos que no caso de incerteza nos lucros retornados houveram vários casos que o valor ótimo estabiliza-se antes do caso limite de Soyster.

Há dois motivos para os desvios percentuais ($\Delta(\%)$) na tabela 4.3 serem tão baixos quando comparados com os desvios da tabela 4.2: (i) limitação dos modelos ao tratarem financiamentos em regime de capitalização simples e, o principal motivo, (ii) a restrição de capacidade limitando o empréstimo tomado por período. Para verificarmos o impacto de tal restrição, calculamos novamente o desvio percentual para a instância I-P10-s30 com $\gamma = 5\%$ (para determinar z^R) e obtivemos $z^N = 6840,32$ e $z^R = 5659,77$, ou seja, $\Delta(\%) = 17,26\%$. Interessante observar que nos dois casos, ao retirarmos a restrição de capacidade, o número de projetos implementados aumentou de 4 para 9. Isso ocorreu porque, como o gestor possui maior liberdade para decidir se tomará mais empréstimos, surge a necessidade de maior número de projetos serem executados para os lucros advindos de suas conclusões auxiliarem no pagamento de tais financiamentos. Os valores ótimos da função objetivo também aumentaram consideravelmente (de 4145,68 para 6840,32 no caso nominal (aumento de 65%)) ao desconsiderar limites de empréstimos, o que permite deduzir que, uma gestão adequada de tomadas de financiamentos é muito melhor que restringir os mesmos a limites por período.

Ao analisar as tabelas 4.2 e 4.3 percebe-se a forte relação entre o valor a partir da qual

ocorre a estabilização (confirmando a afirmação de Bertsimas e Sim [15] que em vários casos não há necessidade de chegarmos à solução de Soyster [76], ou seja, nem sempre precisamos ser tão conservadores), e o número de projetos implementados. É razoável tal verificação pois o parâmetro lucros retornados é indexado em relação ao número de projetos e é relativamente grande quando comparado aos demais dados.

Analisamos o efeito da incerteza nos parâmetros sobre a escolha dos modos de execução dos projetos. Verificamos que, para cada instância analisada, determinado modo de execução sempre era mais escolhido para quase todos (ou todos) os projetos executados conforme figuras (4.11)-(4.13). Para a instância I-P10-s30, por exemplo, todos os projetos implementados, para todos os valores de γ e de Γ^p , sempre foram realizados no modo3 (maior duração, menor custo). Já para as instâncias I-P20-s40 e I-P50-s78, todos os projetos implementados, também para todos os valores de γ e de Γ^p , sempre foram realizados no modo1 (menor duração, maior custo). Isso acontece porque, dependendo da rede de precedência (que determina o número de projetos que podem ser executados concomitantemente por período), quando aumentamos o número de projetos que podem ser implementados, aumentamos também o custo por período ($\sum c_{im}/d_{im}$) do portfólio. Isso torna necessário a execução dos projetos no modo1 porque o retorno dos lucros está atrelado à conclusão dos projetos e, quanto antes eles terminarem, mais cedo tais lucros alimentarão o fluxo de caixa, permitindo assim, o mais cedo possível, projetos sucessores se tornarem candidatos a serem incorporados ao portfólio. O decisor encontra-se exatamente no seguinte dilema: "Adio a conclusão do projeto para que o custo por período diminua mas, fazendo assim, também adio o recebimento dos lucros ou, adianto a conclusão para o mais breve possível, recebendo os lucros mais cedo, mas, arco mais cedo com custos por período mais altos?". Um fator primordial para responder tal indagação é qual "fôlego" seu portfólio possui para conseguir bancar os custos de execução dos projetos sem necessidade de utilizar os lucros provenientes da conclusão dos mesmos. E isso depende do aporte inicial que, de acordo com seu valor, munirá o gestor com flexibilidade em relação à escolha do modo de execução, permitindo ao mesmo escolher a melhor opção (menores custos de execução) e esperar o retorno dos lucros (que foi exatamente o ocorrido com a instância I-P10-s30).

Também através das figuras (4.11)-(4.13) conclui-se que o número de projetos executados diminuía ao aumentarmos o *budget* de incerteza e do nível de variabilidade. Como a figura (4.13) parecia contradizer tal tendência, fizemos várias simulações com nível de variabilidade superiores a 30% e confirmamos que a tendência se mantinha. Realizamos então, alguns testes aumentando o nível de variabilidade e, para todas as instâncias, chega um momento que nenhum projeto é implementado, pois o cenário que permite tamanha variabilidade nos parâmetros é tão incerto que, ao gestor, é melhor não aplicar em nenhum projeto. Aqui, se percebe outra limitação do modelo, que é não considerar a possibilidade de aplicação (investimento) dos resultados positivos por período. No caso de nenhum projeto ser executado, por exemplo, obtivemos em nossas simulações, ao aumentar a variabilidade dos parâmetros e o grau de incerteza, o fluxo de caixa no último período igual ao aporte inicial.

Apesar do caso de incerteza na taxa de financiamento sempre chegar na solução de Soyster [76], percebe-se com base nas figuras (4.14)-(4.23) que em vários casos a solução de Soyster era quase atingida antes de todos os parâmetros se tornarem incertos. Ao desconsiderar o limite de empréstimo por período, ocorria o mesmo.

As demais figuras (4.24 a 4.31) apresentadas nessa seção foram geradas para analisar-

mos o efeito da incerteza nos parâmetros sobre o número de projetos implementados, a data de início das implementações e sobre os modos de execução dos mesmos. Escolhemos para análise as instâncias com makespan mínimo para o caso de 20 e 50 atividades e $s=30$ para o caso de 10 atividades. Foram analisados extensivamente através da variação de Γ com passo unitário e todas as possibilidades de γ escolhidas. Como em todos os cenários o impacto da incerteza na taxa de financiamento mostrou pequeno impacto no ótimo do modelo nominal (quando comparado ao considerar incerteza nos lucros retornados), tais figuras foram criadas considerando apenas incertos esses últimos.

Percebemos que em alguns casos, ao aumentar o nível de variabilidade e o grau de conservadorismo, havia tendência de algumas atividades assumirem o modo de maior duração e menor custo. As figuras (4.29 a 4.31) (maiores valores de γ), por exemplo, mostram que, para a instância I-P20-s40, ao variar Γ^p de 0 a 20, a maioria das vezes, o valor ótimo foi atingido ao executar os projetos do portfólio nos modos 1, 2, 1 e 3, nessa sequência. Isso é devido ao fato de que, em cenários onde se aumenta o nível de incerteza, os primeiros projetos terem duração menor, permite os lucros dos mesmos alimentarem mais cedo o fluxo de caixa. Tais lucros geram flexibilidade temporária para o gestor que pode então, optar por executar algum(ns) projeto(s) no modo2 (duração um pouco maior e assim diminuir os custos por período). Em seguida, retoma-se uma investida mais agressiva executando projetos com a menor duração possível, novamente para gerar novos fluxos de caixa e permitindo implementar os projetos remanescentes do portfólio de forma mais longa. A execução agressiva citada anteriormente, além de permitir retorno mais cedo dos lucros, permite ao decisor tomar decisões mais flexíveis quanto aos projetos finais. Como o conjunto anterior de projetos foi executado com a menor duração, há tempo suficiente no horizonte fixo de planejamento para escolher ainda alguns projetos. Mas, a escolha dos mesmos pode agora ser estratégico pois, caso o gestor decida executá-los, pode fazê-lo com a duração mais longa, diminuindo assim os custos por período e diminuindo a possibilidade de tomada de empréstimos logo na conclusão da implementação do portfólio e ainda incorporando os lucros advindos da conclusão desses projetos no fluxo de caixa do último período.

Para desenvolver a análise das figuras (4.24)-(4.31), definimos projetos modais como aqueles que são escolhidos mais vezes com uma mesma configuração (mesmo modo para os mesmos projetos) e frequência relativa como $Fr = (Frequencia\ dos\ projetos\ modais) / (|J| + 1)$. Percebe-se que ao aumentar o nível de variabilidade, a Fr diminui quando n_I diminui (figuras (4.24)-(4.27)) , e aumenta quando n_I é constante (figuras (4.28)-(4.31)). O caso de 50 atividades teve a mesma tendência e por ter gráfico muito extenso não foi representado.

4.2.1 Incerteza nos lucros retornados

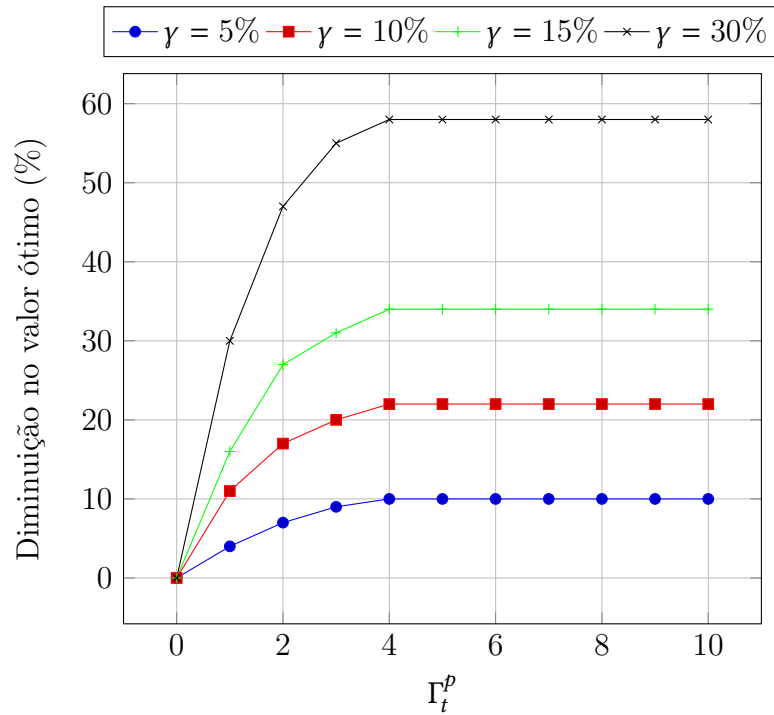


Figura 4.1: Diminuição (em %) no valor ótimo do modelo robusto com incerteza nos lucros retornados em função de Γ_t^p com 10 atividades e $s=30$.

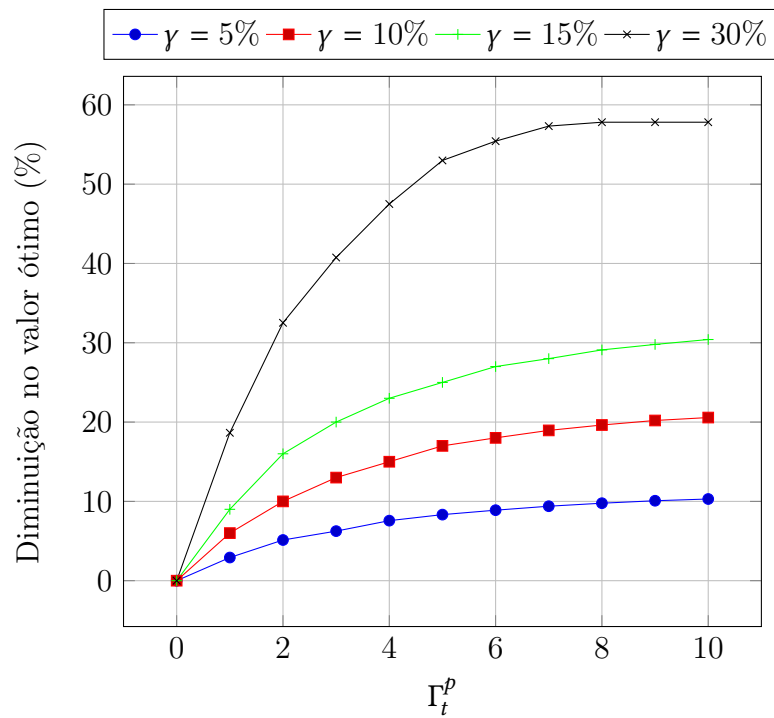


Figura 4.2: Diminuição (em %) no valor ótimo do modelo robusto com incerteza nos lucros retornados em função de Γ_t^p com 10 atividades e $s=50$.

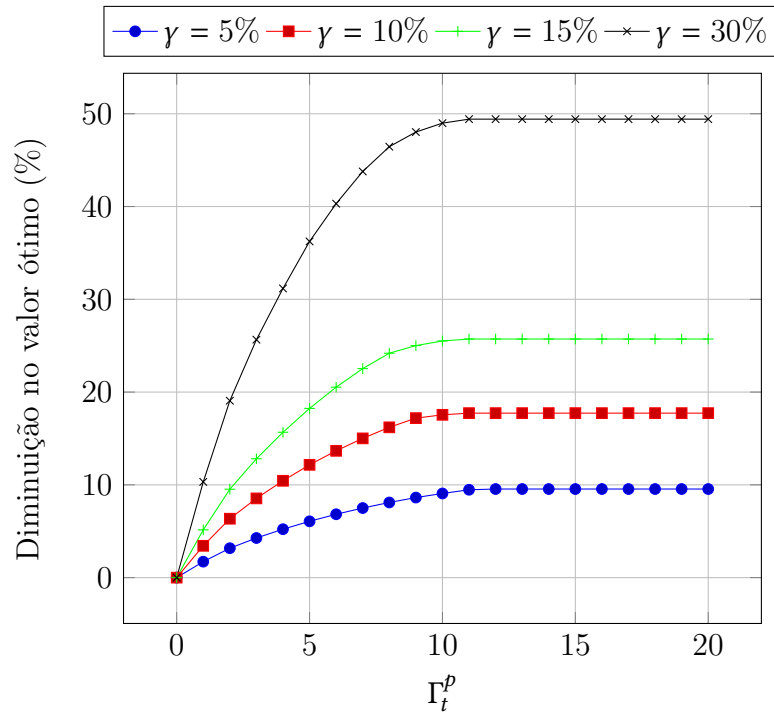


Figura 4.3: Diminuição (em %) no valor ótimo do modelo robusto com incerteza nos lucros retornados em função de Γ_t^p com 20 atividades e $s=40$.

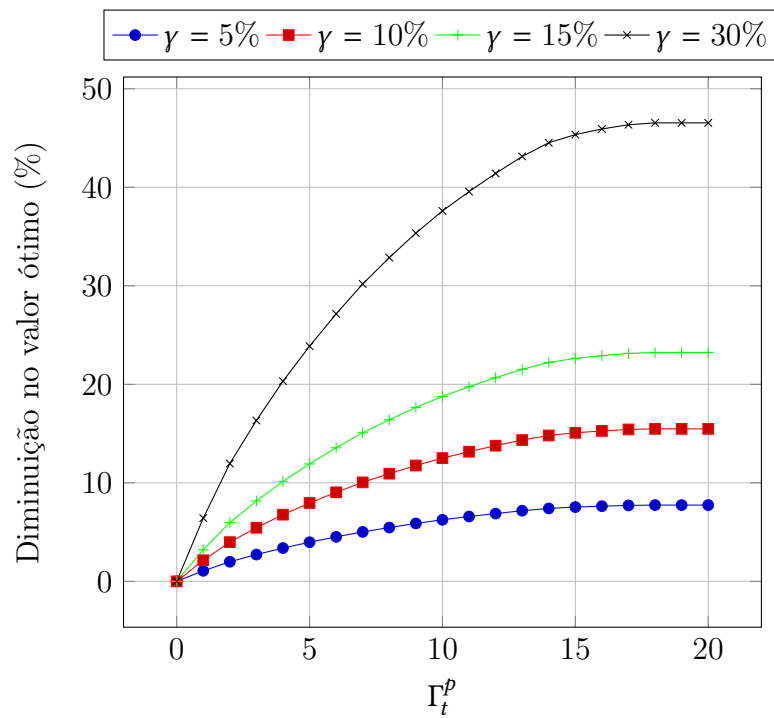


Figura 4.4: Diminuição (em %) no valor ótimo do modelo robusto com incerteza nos lucros retornados em função de Γ_t^p com 20 atividades e $s=52$.

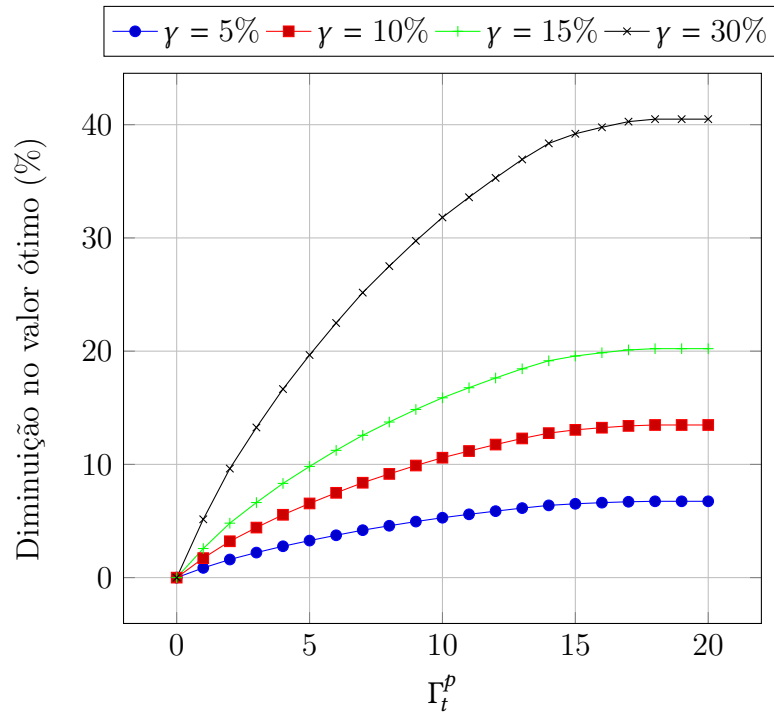


Figura 4.5: Diminuição (em %) no valor ótimo do modelo robusto com incerteza nos lucros retornados em função de Γ_t^p com 20 atividades e $s=64$.

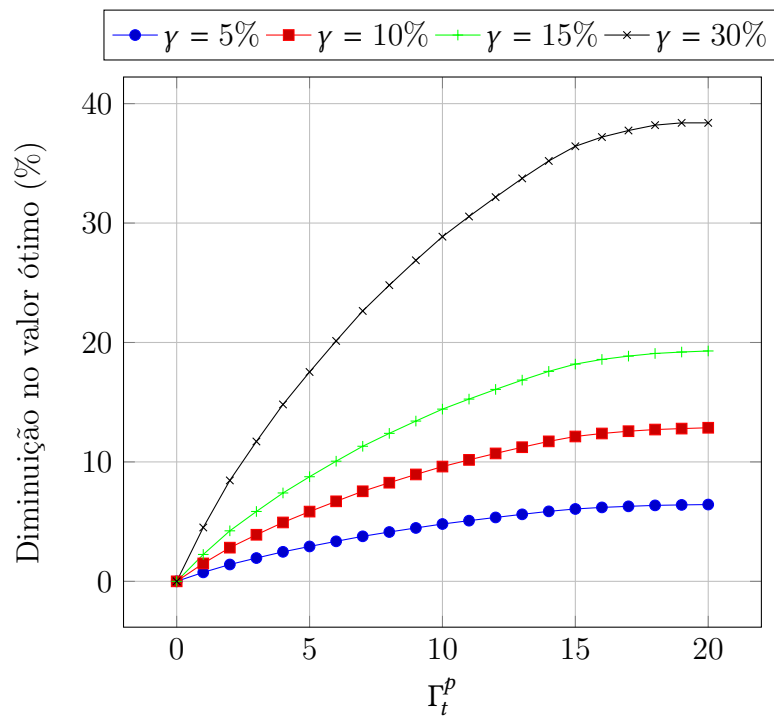


Figura 4.6: Diminuição (em %) no valor ótimo do modelo robusto com incerteza nos lucros retornados em função de Γ_t^p com 20 atividades e $s=76$.

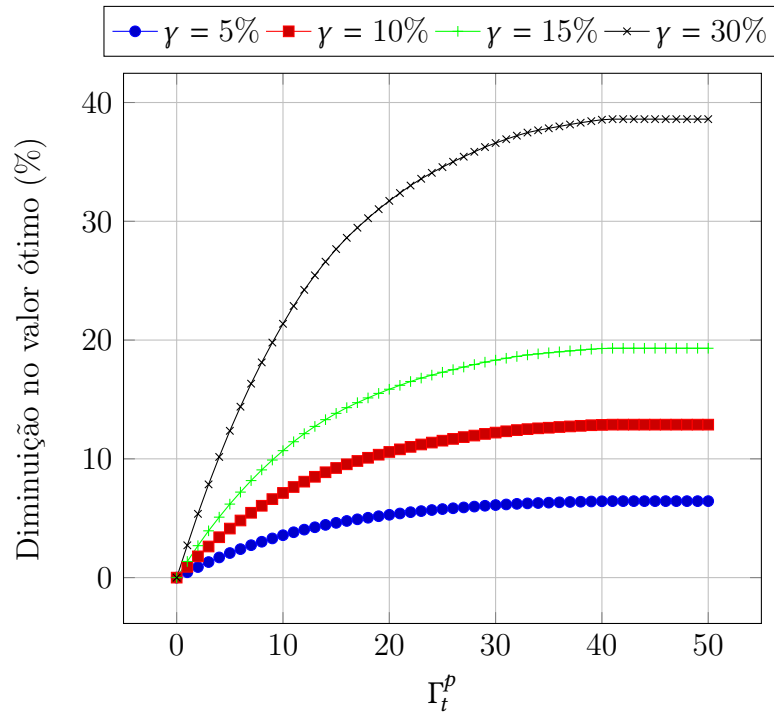


Figura 4.7: Diminuição (em %) no valor ótimo do modelo robusto com incerteza nos lucros retornados em função de Γ_t^p com 50 atividades e $s=78$.

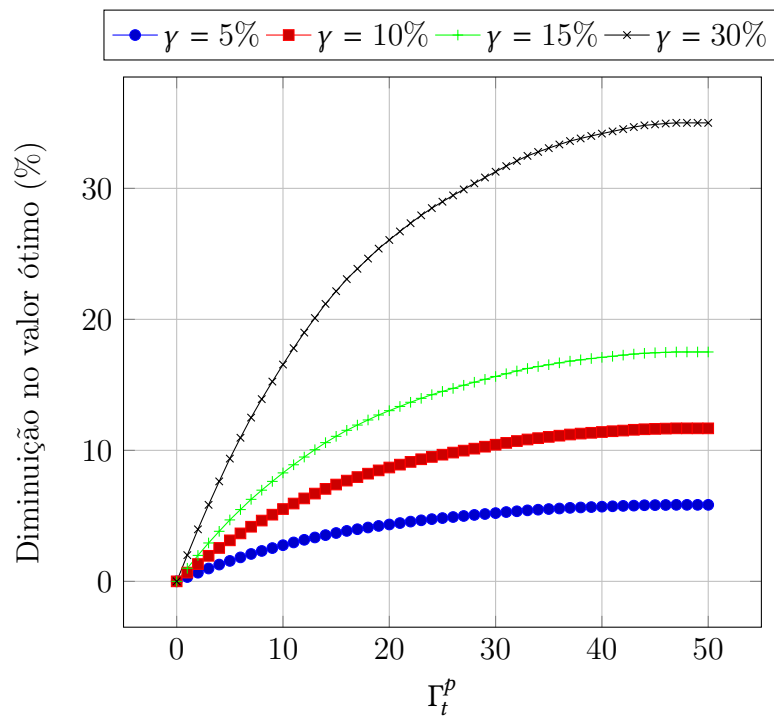


Figura 4.8: Diminuição (em %) no valor ótimo do modelo robusto com incerteza nos lucros retornados em função de Γ_t^p com 50 atividades e $s=112$.

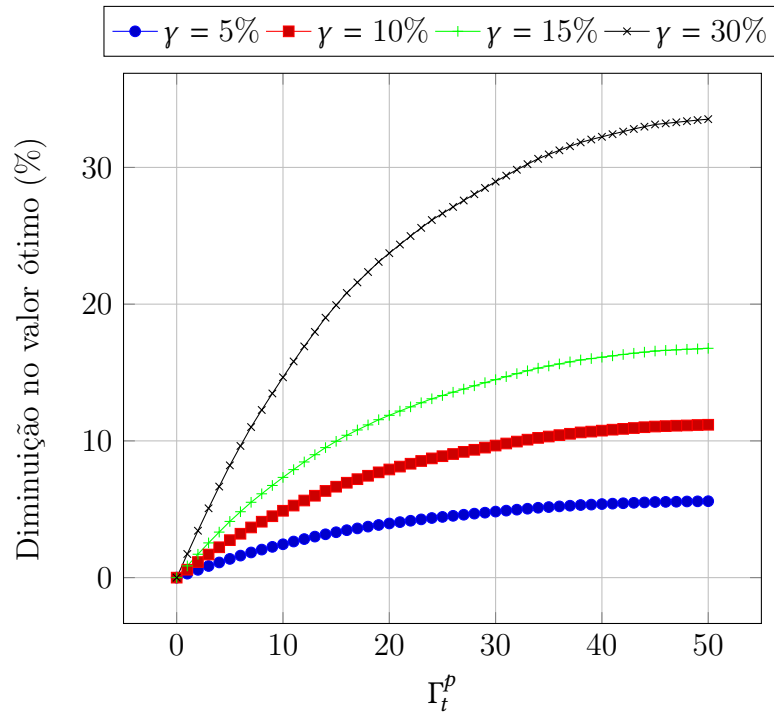


Figura 4.9: Diminuição (em %) no valor ótimo do modelo robusto com incerteza nos lucros retornados em função de Γ_t^p com 50 atividades e $s=146$.

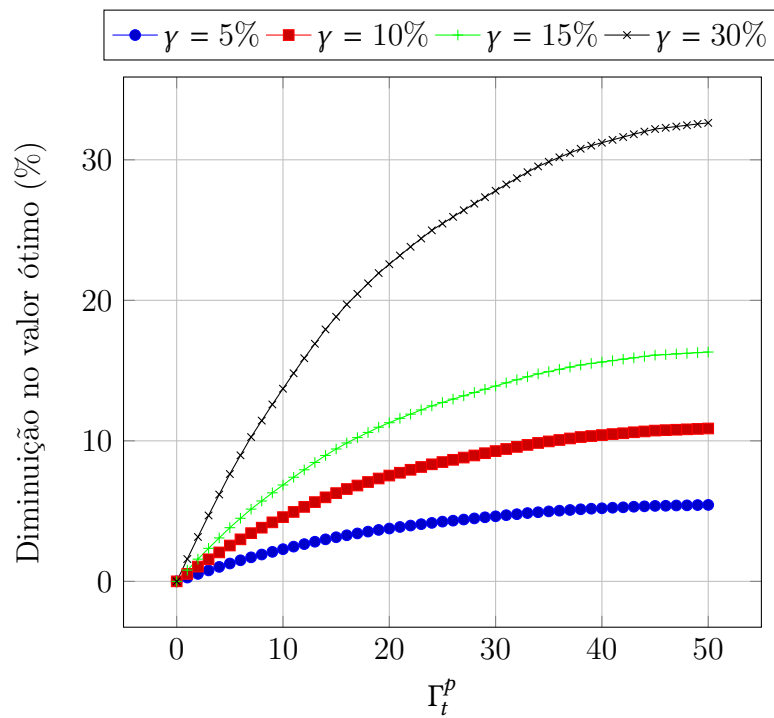


Figura 4.10: Diminuição (em %) no valor ótimo do modelo robusto com incerteza nos lucros retornados em função de Γ_t^p com 50 atividades e $s=180$.

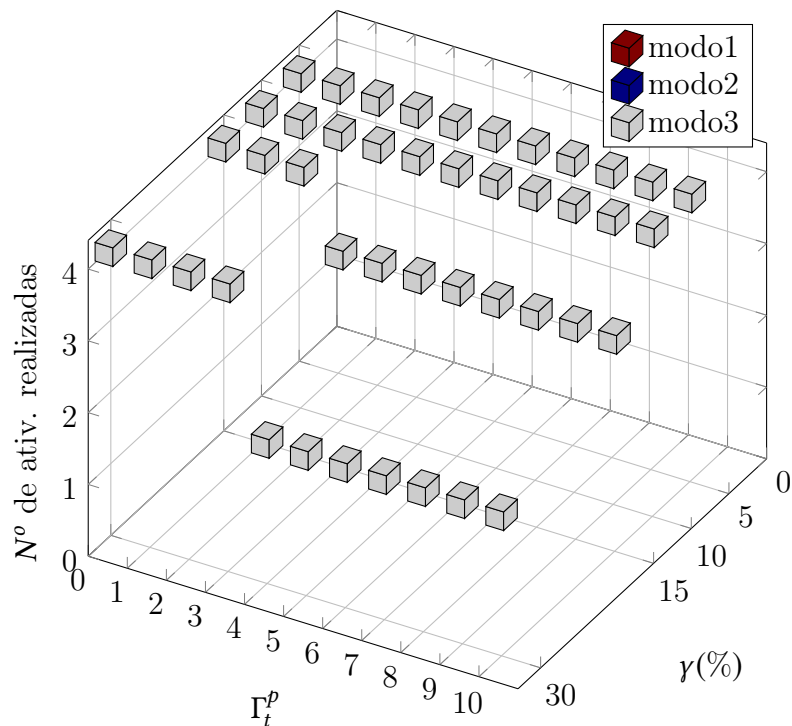


Figura 4.11: Quantidade de atividades implementadas e seus respectivos modos predominantes considerando incerteza nos lucros retornados em função de Γ_t^p e γ com 10 atividades e $s=30$.

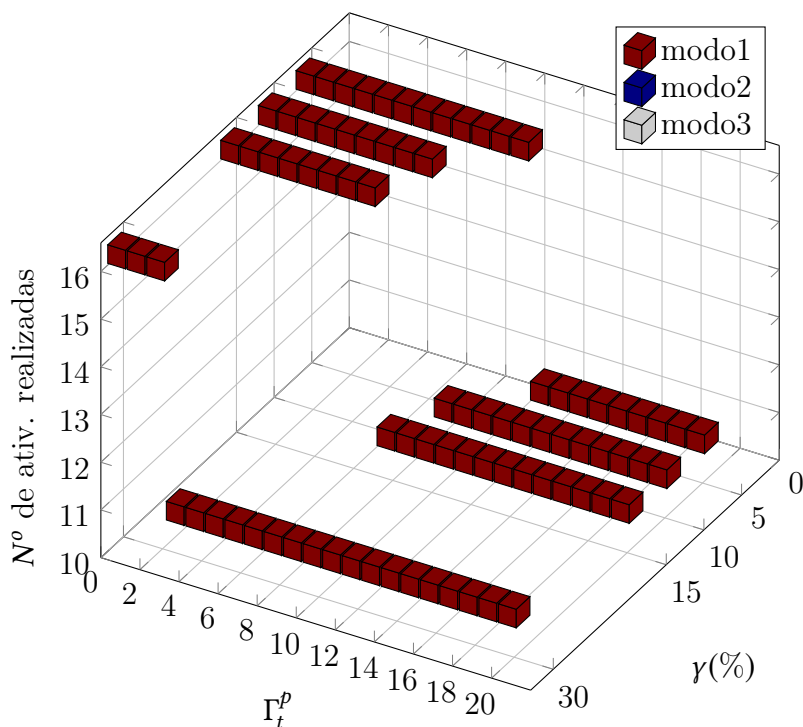


Figura 4.12: Quantidade de atividades implementadas e seus respectivos modos predominantes considerando incerteza nos lucros retornados em função de Γ_t^p e γ com 20 atividades e $s=40$.

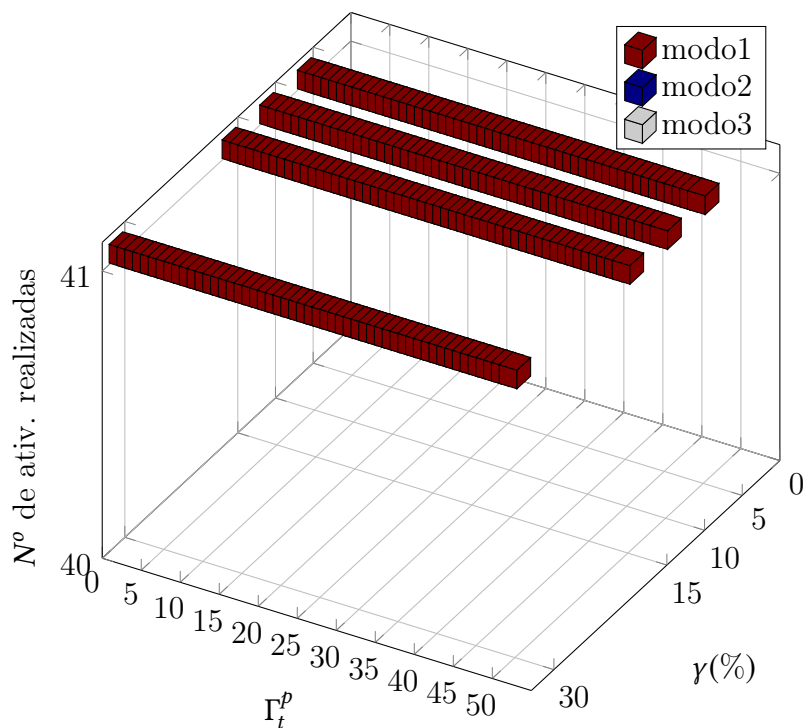


Figura 4.13: Quantidade de atividades implementadas e seus respectivos modos predominantes considerando incerteza nos lucros retornados em função de Γ_t^p e γ com 50 atividades e $s=78$.

4.2.2 Incerteza na taxa de financiamento

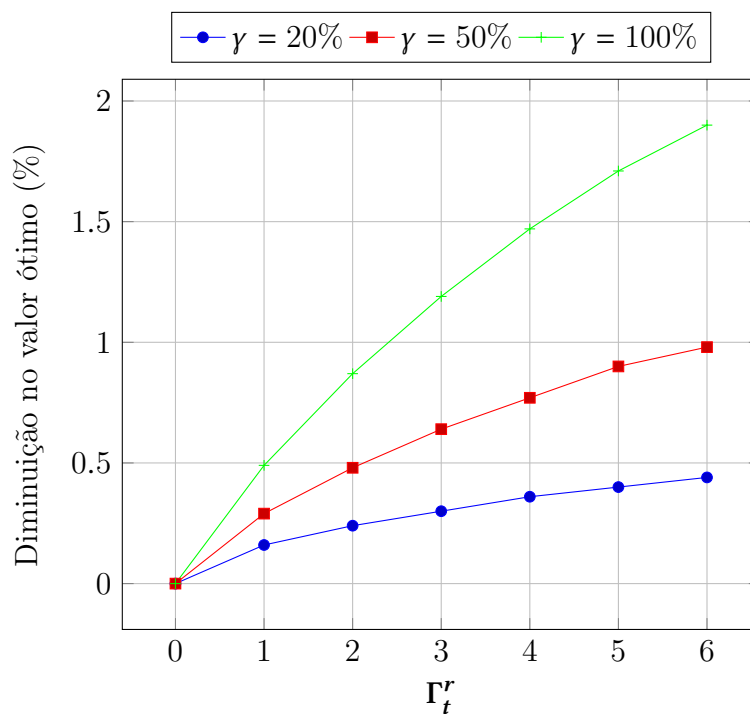


Figura 4.14: Diminuição (em %) no valor ótimo do modelo robusto com incerteza na taxa de financiamento em função de Γ_t^r com 10 atividades e $s=30$.

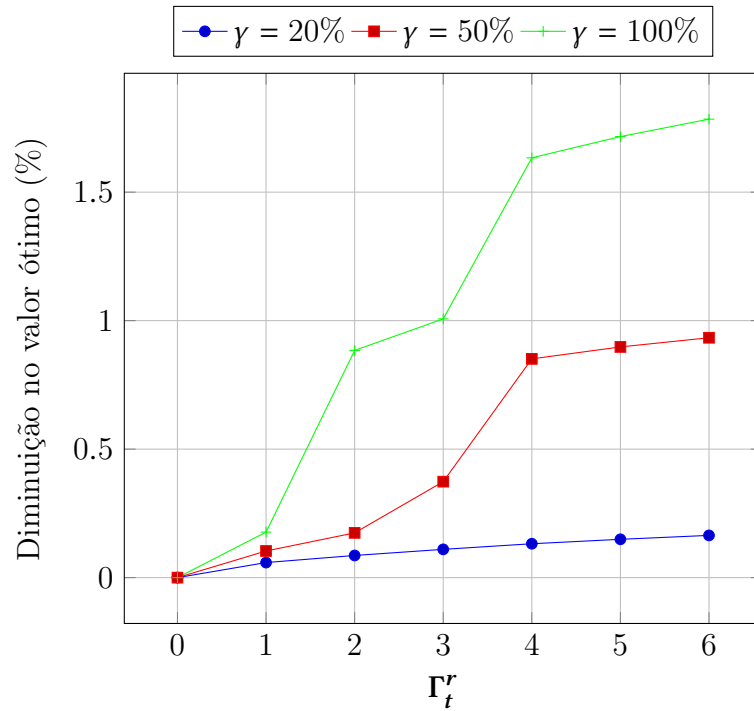


Figura 4.15: Diminuição (em %) no valor ótimo do modelo robusto com incerteza na taxa de financiamento em função de Γ_t^r com 10 atividades e $s=50$.

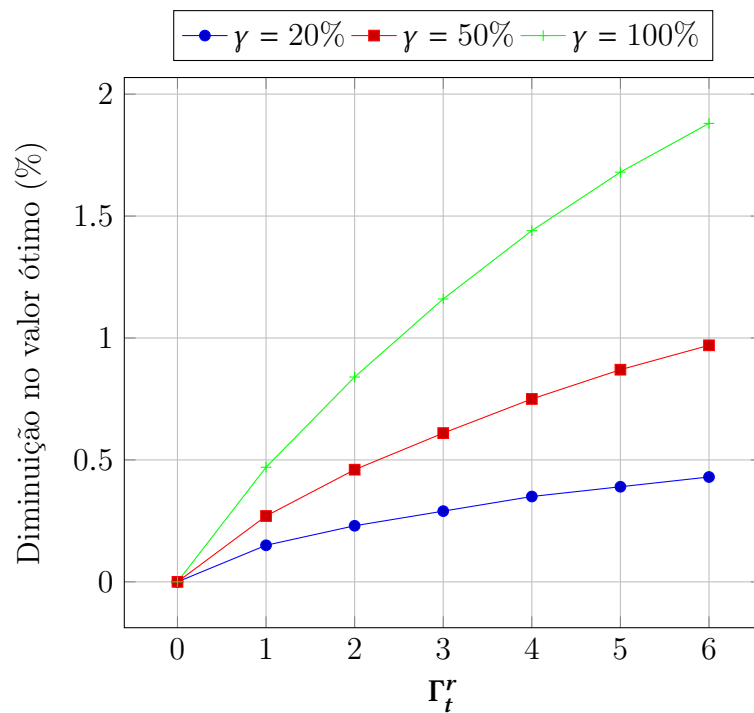


Figura 4.16: Diminuição (em %) no valor ótimo do modelo robusto com incerteza na taxa de financiamento em função de Γ_t^r com 20 atividades e $s=40$.

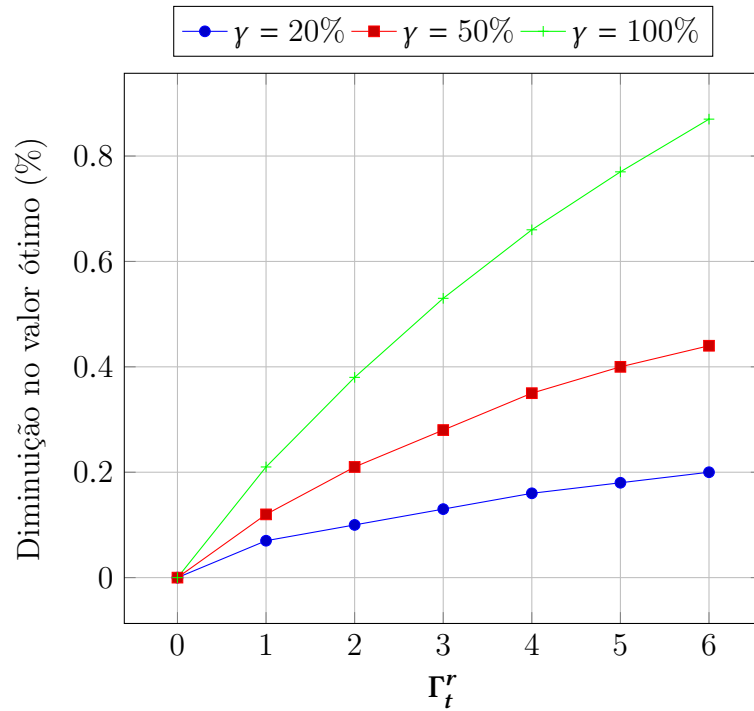


Figura 4.17: Diminuição (em %) no valor ótimo do modelo robusto com incerteza na taxa de financiamento em função de Γ_t^r com 20 atividades e $s=52$.

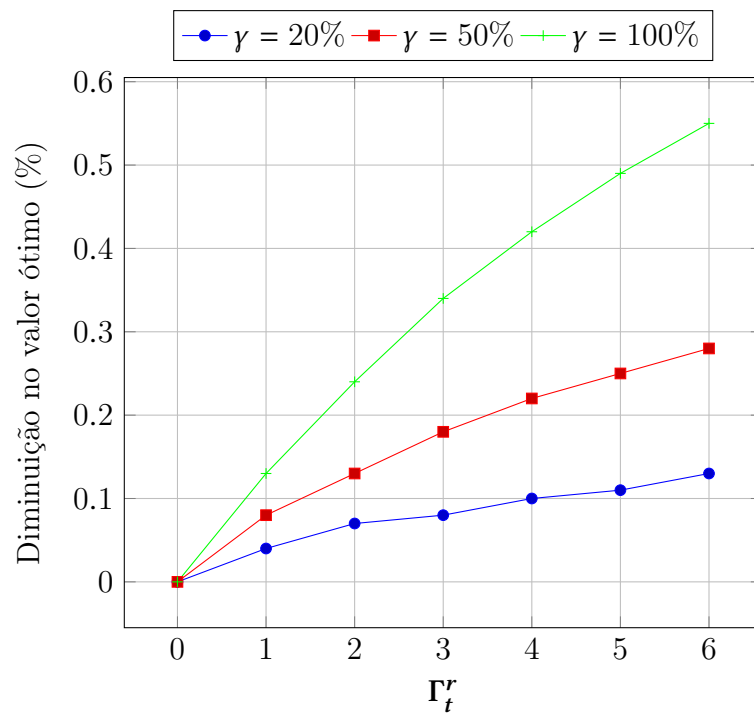


Figura 4.18: Diminuição (em %) no valor ótimo do modelo robusto com incerteza na taxa de financiamento em função de Γ_t^r com 20 atividades e $s=64$.

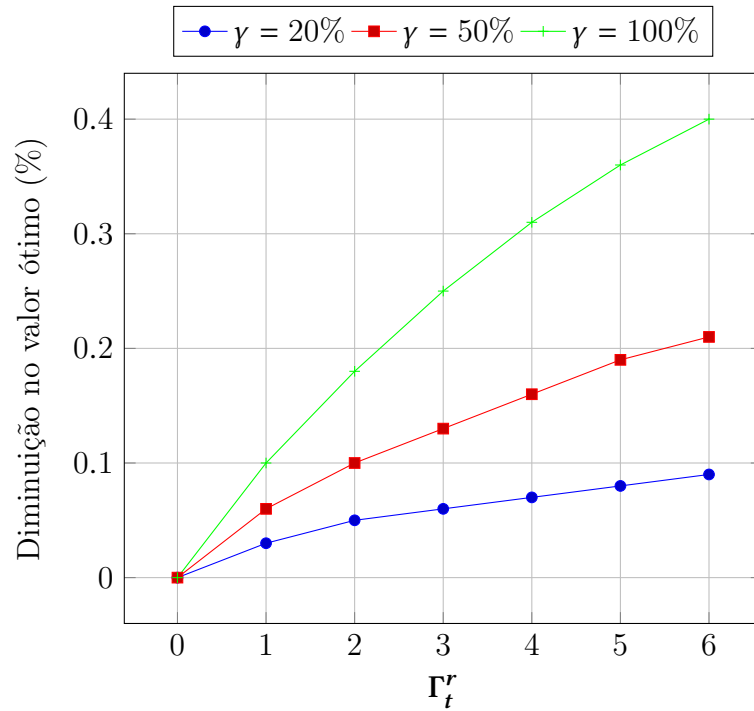


Figura 4.19: Diminuição (em %) no valor ótimo do modelo robusto com incerteza na taxa de financiamento em função de Γ_t^r com 20 atividades e $s=76$.

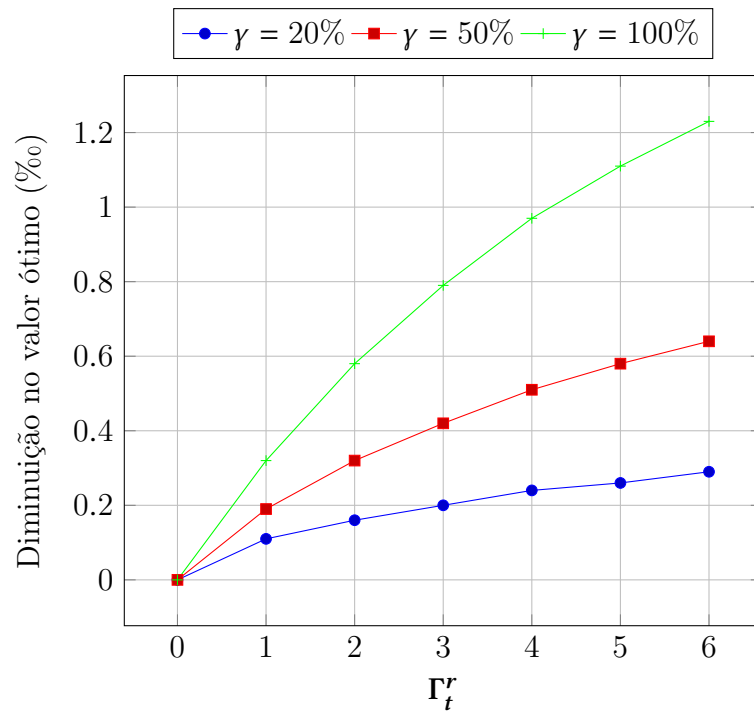


Figura 4.20: Diminuição (em %₀₀) no valor ótimo do modelo robusto com incerteza na taxa de financiamento em função de Γ_t^r com 50 atividades e $s=78$.

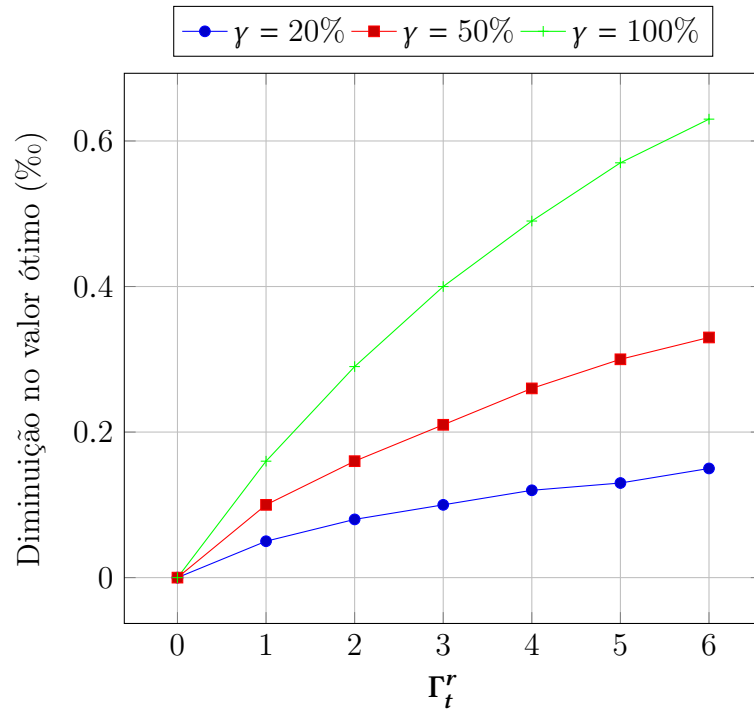


Figura 4.21: Diminuição (em %) no valor ótimo do modelo robusto com incerteza na taxa de financiamento em função de Γ_t^r com 50 atividades e $s=112$.

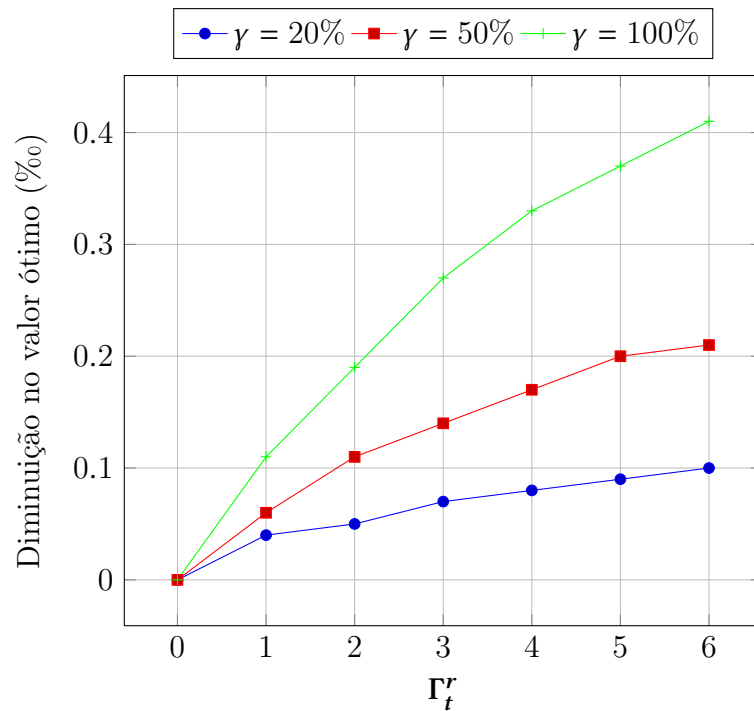


Figura 4.22: Diminuição (em %) no valor ótimo do modelo robusto com incerteza na taxa de financiamento em função de Γ_t^r com 50 atividades e $s=146$.

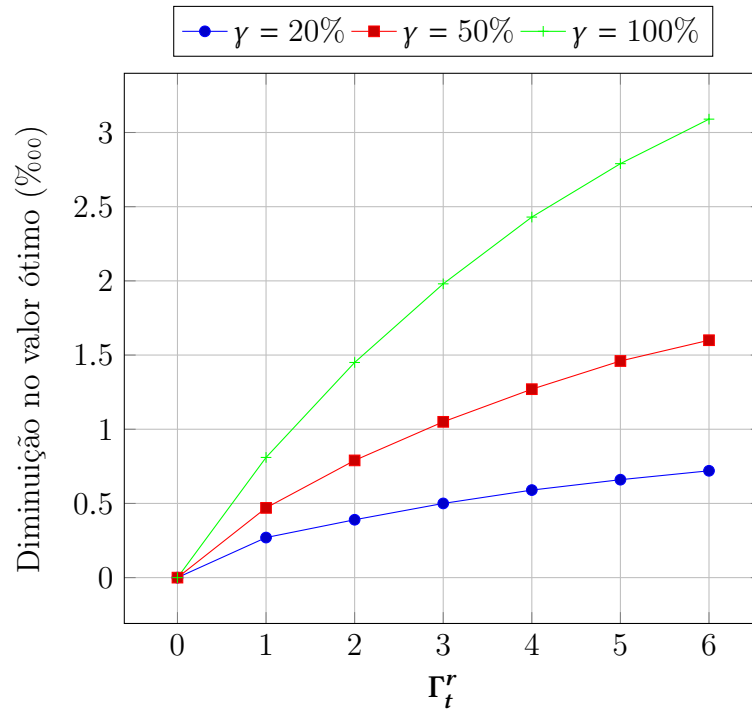


Figura 4.23: Diminuição (em %) no valor ótimo do modelo robusto com incerteza na taxa de financiamento em função de Γ_f^r com 50 atividades e $s=180$.

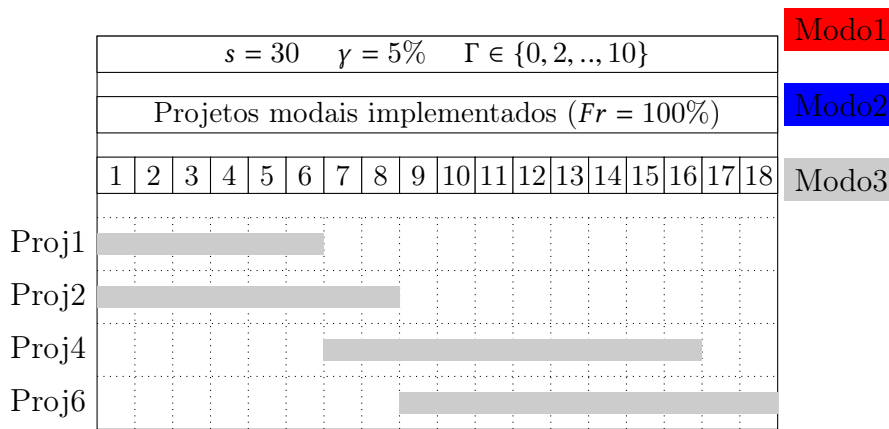


Figura 4.24: Projetos modais implementados considerando incerteza nos lucros retornados para 10 atividades, $s=30$ e $\gamma = 5\%$.

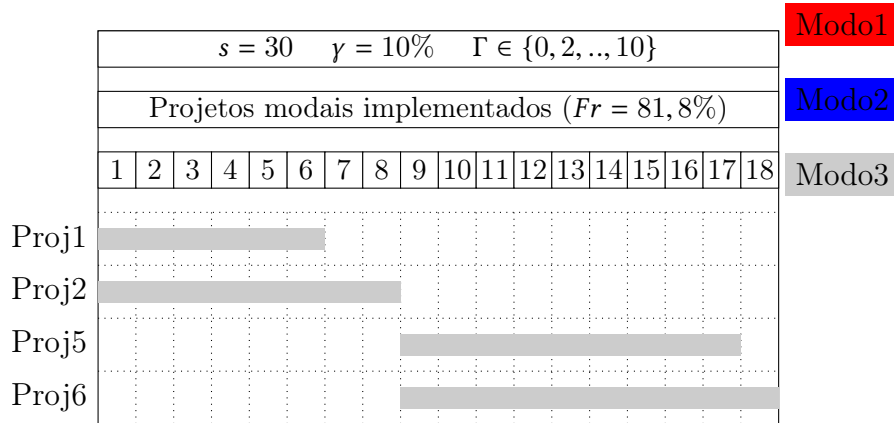


Figura 4.25: Projetos modais implementados considerando incerteza nos lucros retornados para 10 atividades, $s=30$ e $\gamma = 10\%$.

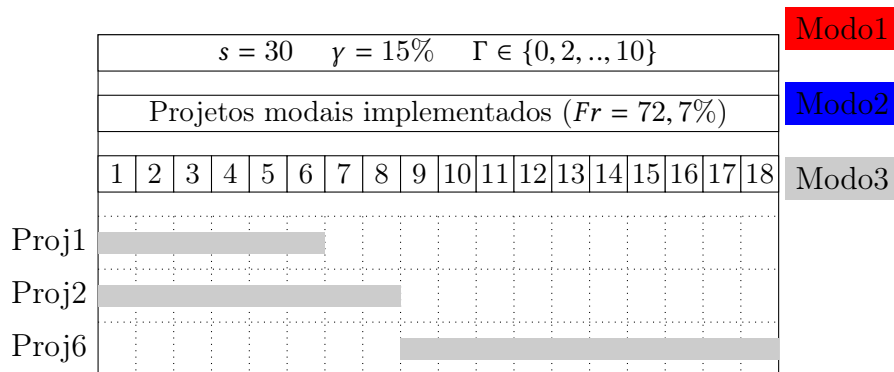


Figura 4.26: Projetos modais implementados considerando incerteza nos lucros retornados para 10 atividades, $s=30$ e $\gamma = 15\%$.

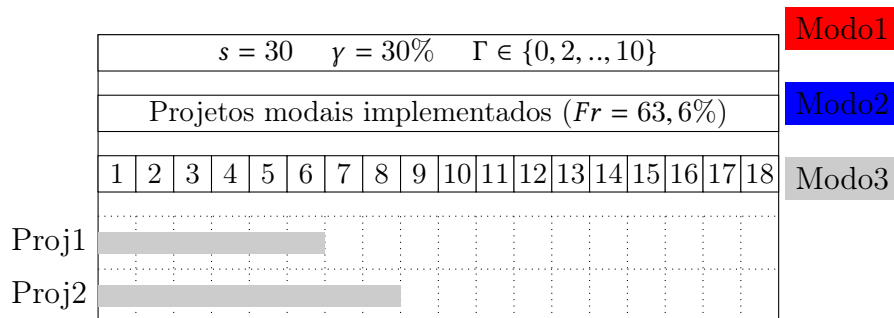


Figura 4.27: Projetos modais implementados considerando incerteza nos lucros retornados para 10 atividades, $s=30$ e $\gamma = 30\%$.

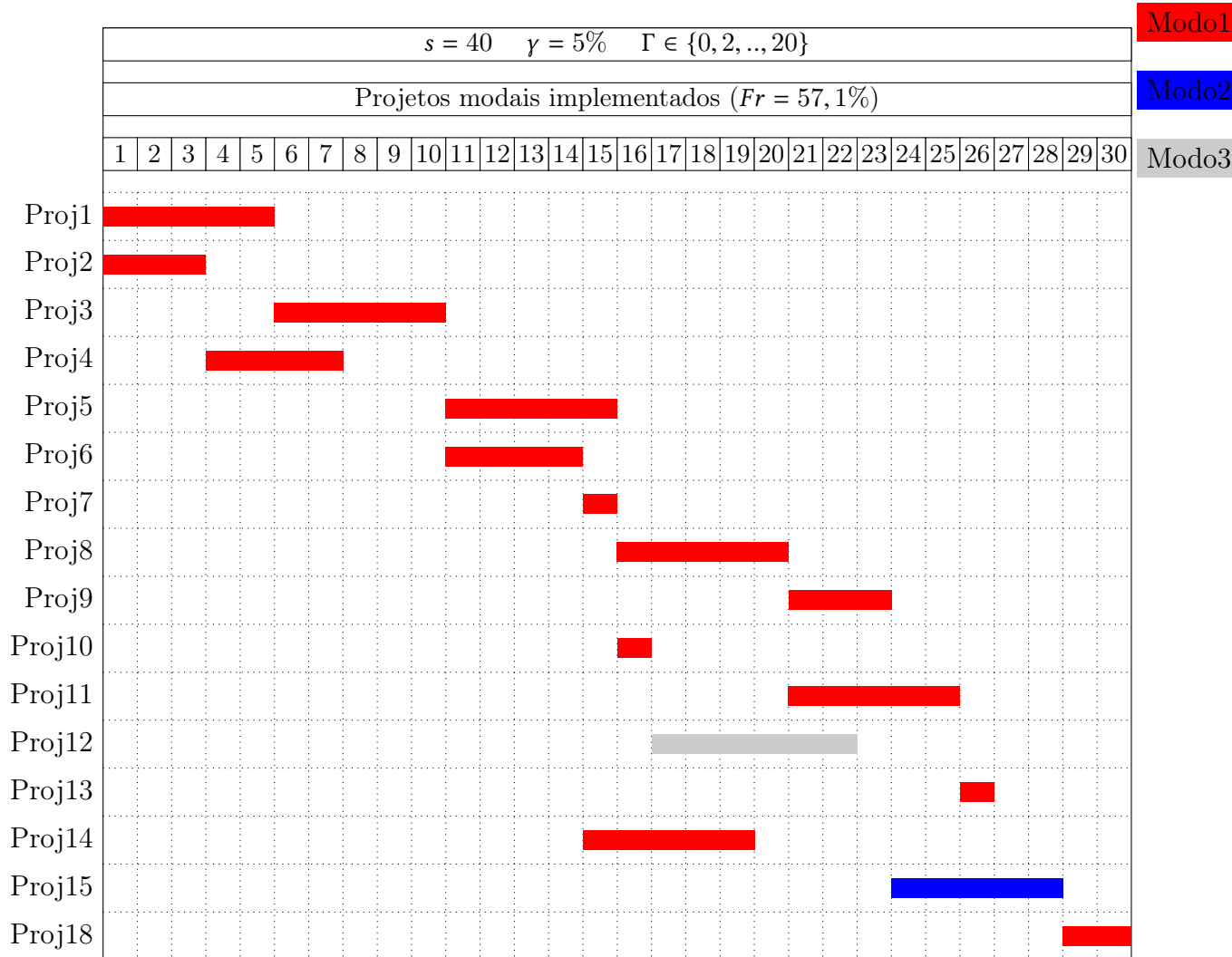


Figura 4.28: Projetos modais implementados considerando incerteza nos lucros retornados para 20 atividades, s=40 e γ = 5%.

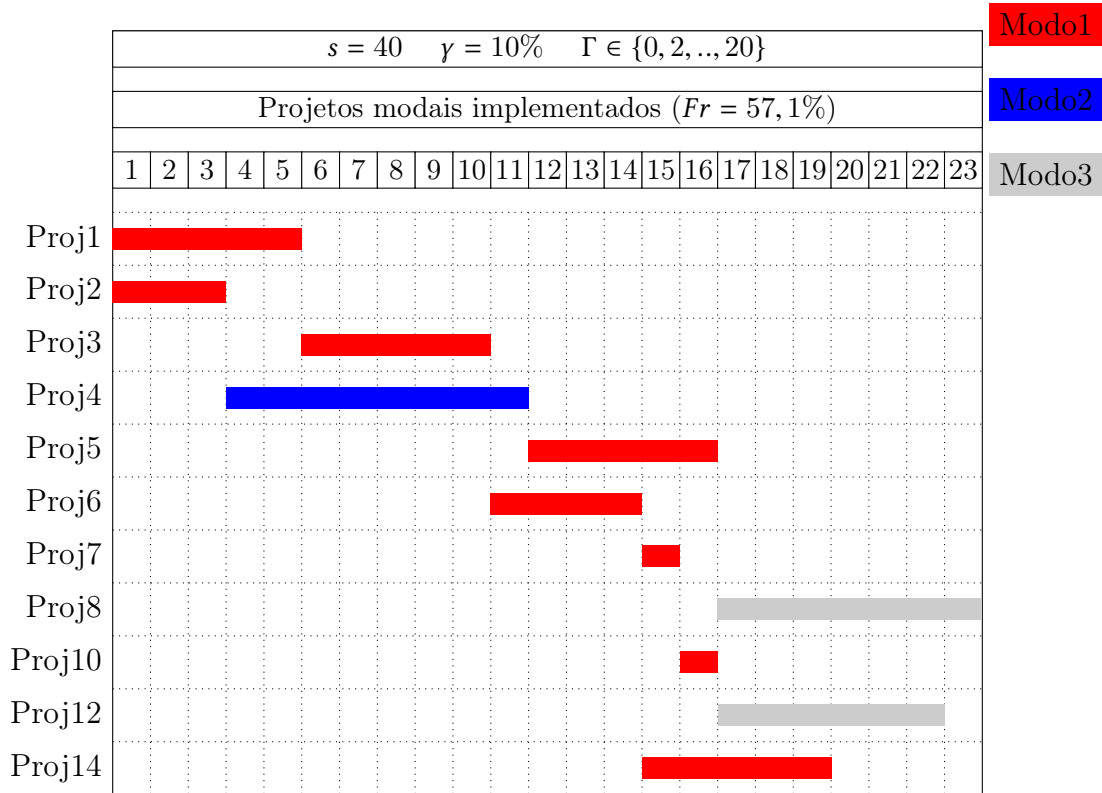


Figura 4.29: Projetos modais implementados considerando incerteza nos lucros retornados para 20 atividades, $s=40$ e $\gamma = 10\%$.

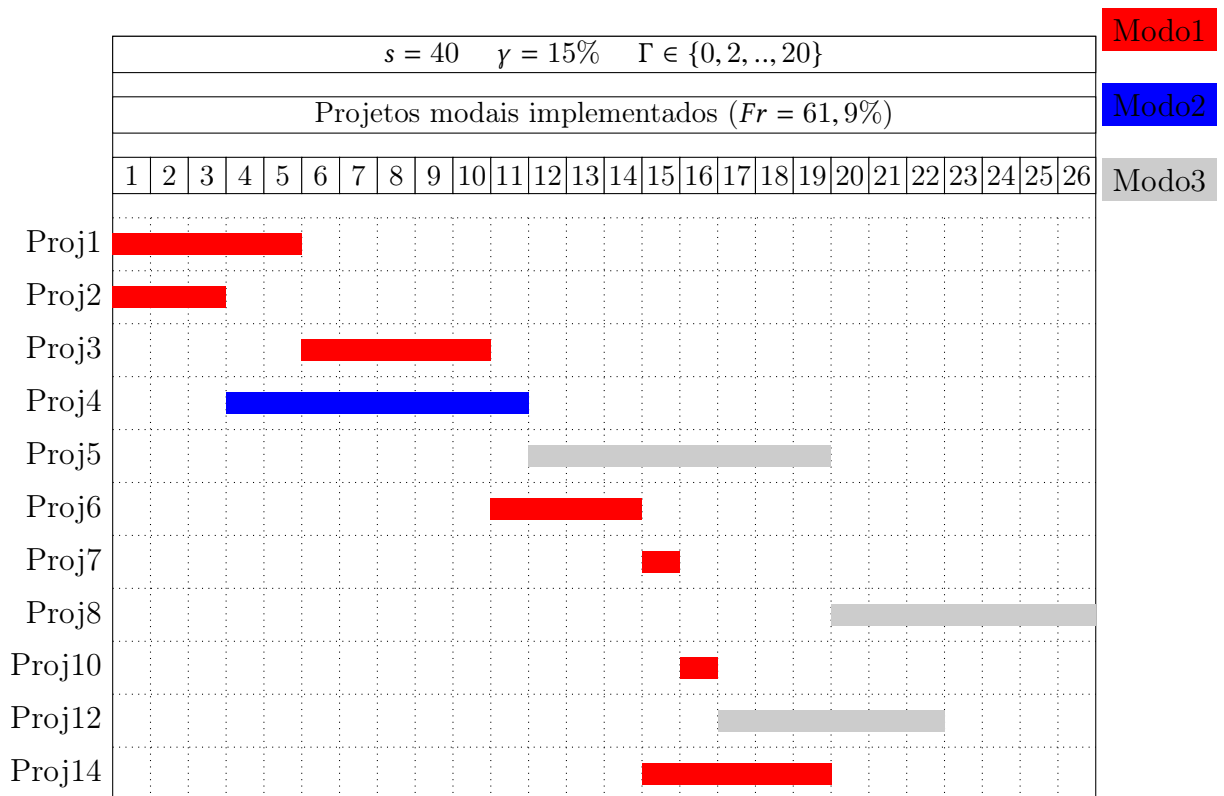


Figura 4.30: Projetos modais implementados considerando incerteza nos lucros retornados para 20 atividades, $s=40$ e $\gamma = 15\%$.

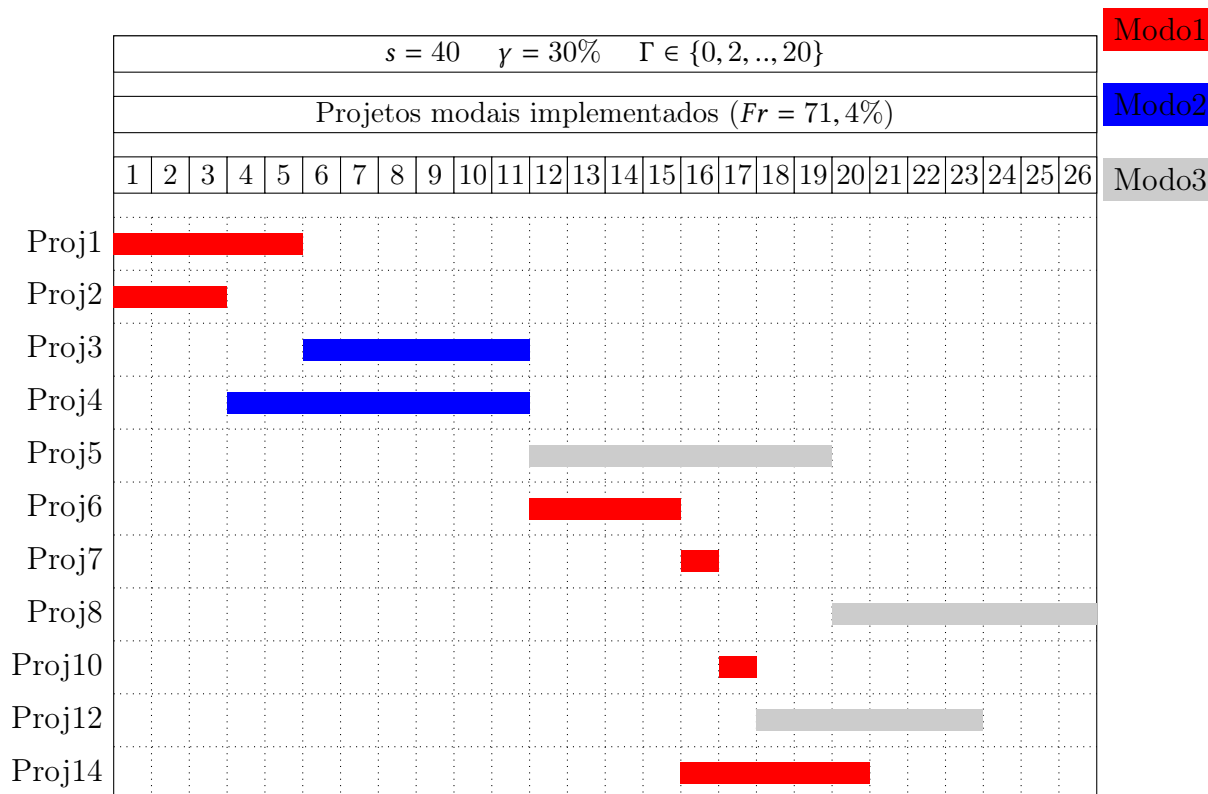


Figura 4.31: Projetos modais implementados considerando incerteza nos lucros retornados para 20 atividades, s=40 e γ = 30%.

4.2.3 Incerteza no lucro retornado e na taxa de financiamento

Ao considerarmos os lucros retornados e a taxa de financiamento simultaneamente incertos e gerarmos os resultados correspondentes às respectivas instâncias, todos os resultados foram muito próximos dos resultados obtidos ao considerar incerteza apenas nos lucros retornados, o que já era esperado devido às grandes diferenças entre os resultados obtidos através dos modelos considerando incerteza em cada parâmetro isoladamente. Por não trazerem nenhuma informação nova e/ou relevante os resultados provenientes de tais simulações foram apresentados no apêndice e apenas em relação à instância I-P10-s30.

4.2.4 Simulação de Monte Carlo

Consideramos duas fontes de incerteza (taxa de financiamento e lucros retornados) que podem variar concomitantemente. Por não tratarmos a correlação entre as mesmas, faz-se necessário utilizar simulação de Monte Carlo para verificar qual o real impacto da incerteza no problema apresentado nesse trabalho. Apresentamos a seguir o processo utilizado para aplicação da Simulação de Monte Carlo:

Passo1 (Modelagem da taxa de financiamento): Para tal modelagem, já que se trata de assunto discutido amplamente e bem consolidado, utilizaremos o modelo apresentado em Glasserman [35]:

$$r(t_{i+1}) = r(t_i) + \alpha(\phi - r(t_i))(t_{i+1} - t_i) + \sigma\sqrt{r(t_i)}\sqrt{t_{i+1} - t_i}Z$$

Onde: t_k = período k , $r(\theta)$ = taxa de financiamento no período θ , ϕ = média de dados históricos da taxa, σ_r = desvio padrão de dados históricos da taxa, α = parâmetro que controla a velocidade que r_t tende a ϕ , $r(0)$ = taxa de financiamento atual e Z = variável aleatória normal padrão.

No presente trabalho, adotaremos a taxa Selic mensal como base para determinarmos os parâmetros e utilizarmos assim o modelo para prevermos o comportamento da taxa de financiamento período a período no horizonte de planejamento das instâncias que serão escolhidas para realizarmos a simulação de Monte Carlo.

Utilizamos a série histórica (15 anos) da Selic [3] tomando o devido cuidado de calcular a taxa equivalente mensal por meio de capitalização composta. Tal série foi a base para calcularmos $r(0) = 0,60\%$ a.m., $\phi = 0,94\%$ a.m. e $\sigma_r = 0,25\%$ a.m.

Como em Glasserman [35] temos que, caso $2\alpha\phi \geq \sigma_r^2$ então $r(t)$ é estritamente positivo para todo t , utilizamos tal expressão para encontrar um limitante inferior de α e levando em consideração a série histórica da Selic e que tal parâmetro controla a velocidade que r_t tende a ϕ (média histórica), adotamos $\alpha = 101,178\%$.

Passo2 (Escolha das instâncias): As instâncias escolhidas foram: I-P10-s30, I-P20-s40 e I-P50-s78, de forma que cada uma represente uma rede de projetos, ou seja, rede de 10, 20 e 50 projetos, respectivamente.

Passo3 (Escolha da distribuição representativa dos lucros): Os lucros retornados foram simulados por distribuições lognormais. Como o nome sugere o logaritmo de uma variável com distribuição Lognormal com parâmetros μ e σ tem uma distribuição Normal com média μ e desvio padrão σ . Consideramos tal média (μ) igual ao valor mais provável do lucro (valor determinístico) e o desvio padrão (σ) igual a 10% da média. Escolhemos esse percentual para determinar o parâmetro σ da lognormal por já ser um γ adotado na análise dos modelos robustos e por ser um valor intermediário entre os valores de γ que utilizamos.

Passo4 (Escolha dos valores de Γ): Para cada instância escolhemos três valores de Gamma, a saber, $\Gamma=0$, $\Gamma=$ o valor a partir do qual o valor ótimo estabiliza, e um Γ intermediário. Para I-P10-s30, executamos as simulações de Monte Carlo correspondentes a $\Gamma=0$, $\Gamma=1$ e $\Gamma=4$. Para a instância I-P50-s78, $\Gamma=0$, $\Gamma=8$ e $\Gamma=41$. Nos dois casos o Γ intermediário corresponde ao valor cuja diminuição no valor ótimo ($\Delta(\%)$) é aproximadamente 50% do decréscimo ocorrido para o pior caso. Para verificarmos o impacto na simulação a escolha de um Γ intermediário mais próximo do pior caso, ao tratarmos a instância I-P20-s40, executamos as simulações correspondentes a $\Gamma=0$, $\Gamma=5$ e $\Gamma=11$. Nesse caso o decréscimo correspondente ao caso intermediário correspondia aproximadamente a 66% da diminuição correspondente ao pior caso. A escolha do casos $\Gamma=0$ e $\Gamma=$ o valor a partir do qual o valor ótimo estabiliza, foi com a finalidade de analisarmos os casos extremos. E a escolha do caso intermediário tem a finalidade de verificar o comportamento do modelo robusto DAp-R (Modelo robusto considerando incerteza nos lucros) para um caso mediano entre tais extremos.

Passo5 (Escolha do ambiente de simulação e modelagem): As simulações de Monte Carlo foram realizadas no Microsoft Excel 2016. Para tal, inicialmente foi modelado, para cada instância, em arquivos distintos do Microsoft Excel, cada expressão correspondente às restrições de cada modelo (nominal e robusto DAp-R (Modelo robusto considerando incerteza nos lucros)). Os outputs advindos de termos rodado as instâncias escolhidas em cada modelo (nominal e robusto DAp-R (Modelo robusto considerando

incerteza nos lucros)) tornaram-se os inputs das simulações de Monte Carlo. O suplemento @RISK7.6 do Excel nos permitiu inserir, nas células correspondentes aos períodos de conclusão dos projetos escolhidos nos outputs (tanto do modelo nominal quanto no modelo robusto), a distribuição lognormal com parâmetros μ e σ escolhidos conforme descrito no **Passo3**. O mesmo suplemento nos permite escolher quantas iterações desejamos rodar por simulação. Optamos por utilizar 100.000 iterações e, ao terminar a simulação, tal suplemento gera relatórios em novas planilhas do próprio Microsoft Excel com os resultados.

Logo, fizemos 3 simulações para cada instância, com inputs provenientes dos outputs do modelo robusto DAp-R (Modelo robusto considerando incerteza nos lucros) e comparamos os valores médios obtidos de cada simulação com o valor ótimo obtido através do modelo nominal. Totalizamos assim 9 simulações, cada uma com 100.000 iterações. Os gráficos comparativos apresentados nas figuras (4.32 a 4.34) são os seguintes (Como no caso do modelo nominal, para cada instância, resultou em 3 gráficos praticamente simétricos em relação à média (igual ao valor ótimo obtido através do mesmo modelo) optamos por representar graficamente apenas tal média):

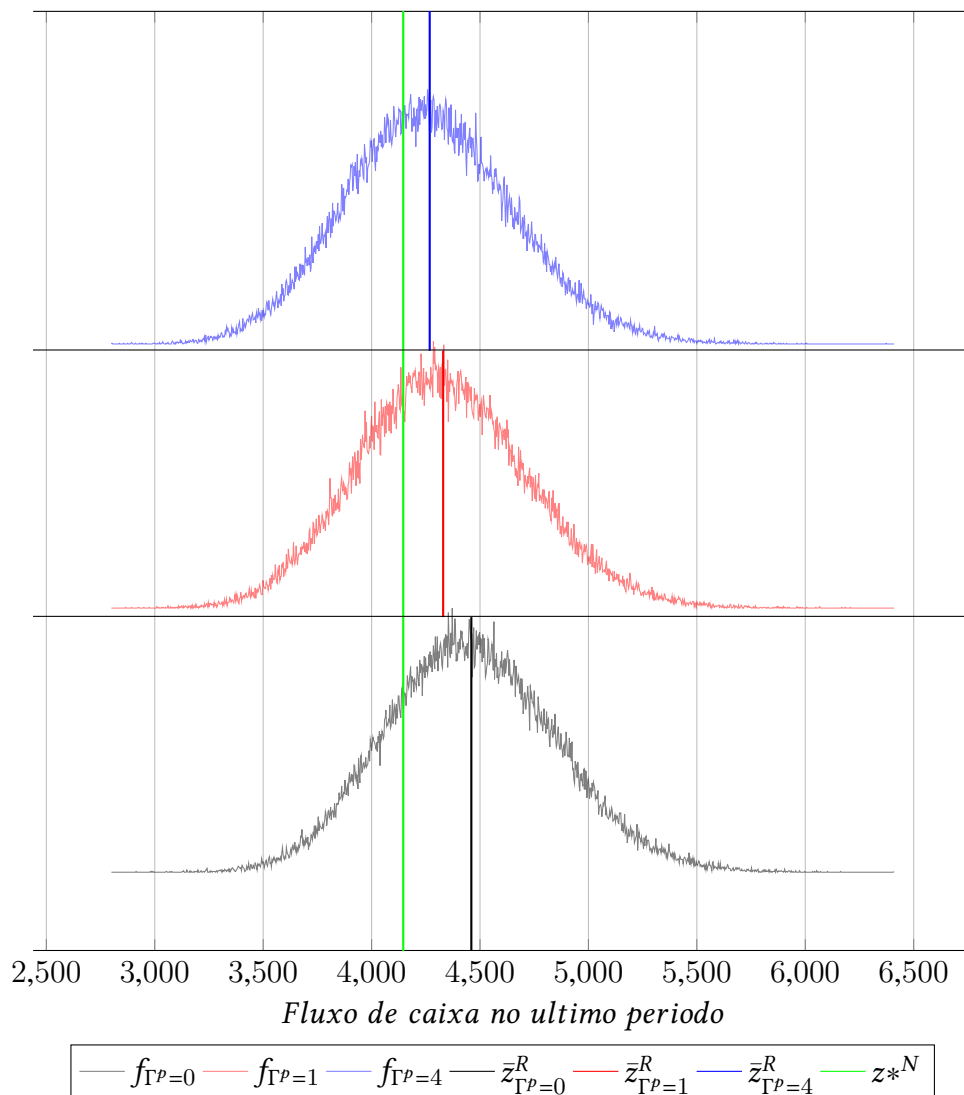


Figura 4.32: Simulação de Monte Carlo: Comparação entre médias das simulações com I-P10-s30 e $\gamma = 10\%$ no Modelo Robusto DAp-R e o valor ótimo do Modelo Nominal

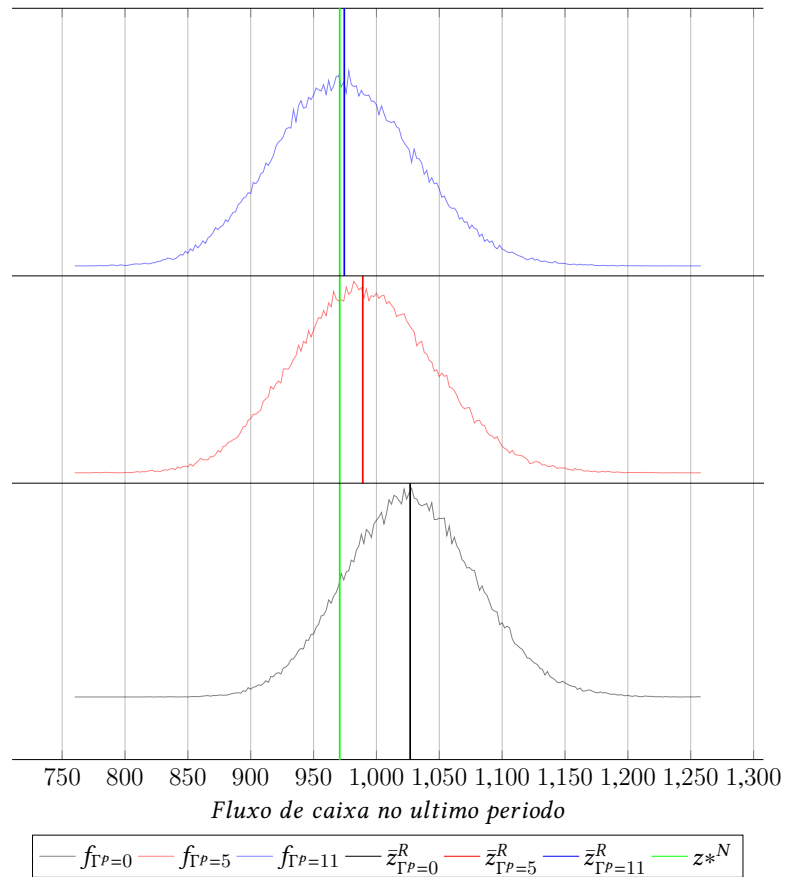


Figura 4.33: Simulação de Monte Carlo: Comparação entre médias das simulações com I-P20-s40 e $\gamma = 10\%$ no Modelo Robusto DAp-R e o valor ótimo do Modelo Nominal

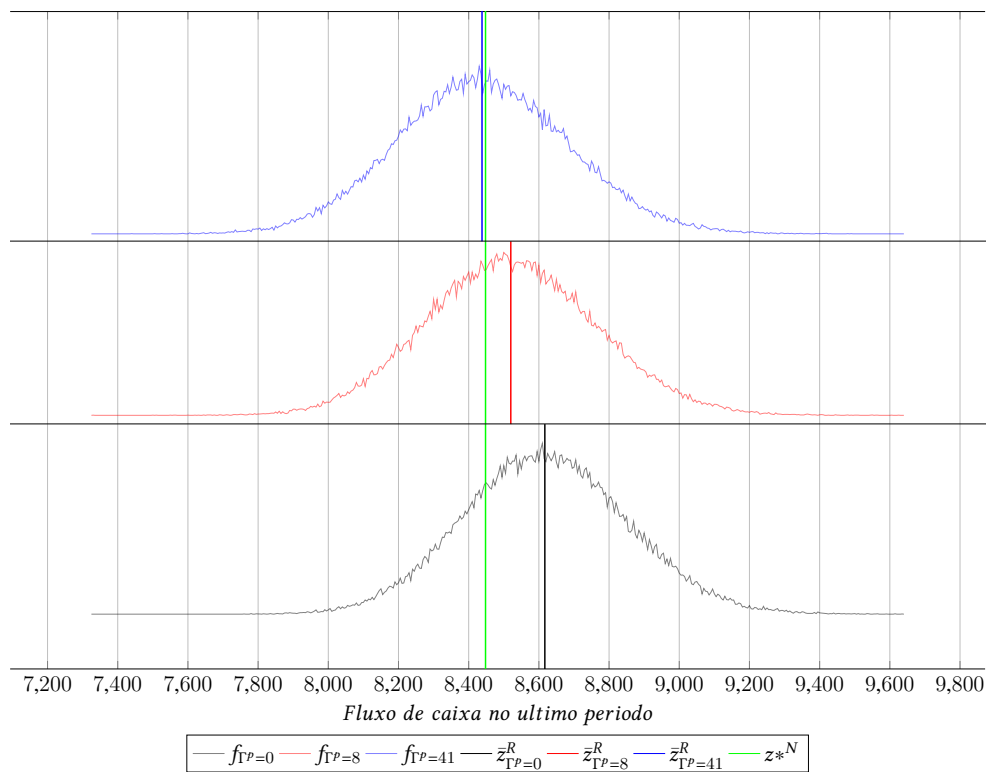


Figura 4.34: Simulação de Monte Carlo: Comparação entre médias das simulações com I-P50-s78 e $\gamma = 10\%$ no Modelo Robusto DAp-R e o valor ótimo do Modelo Nominal

Os gráficos apresentados nas figuras (4.32 a 4.34) permite-nos inferir que o valor médio do fluxo de caixa no último período, obtido através das simulações de Monte Carlo, diminui quando o valor de Γ aumenta. Podemos então deduzir que a probabilidade de obtermos um determinado valor para o fluxo de caixa no último período do horizonte de planejamento diminui ao aumentarmos o valor do budget de incerteza (grau de conservadorismo).

Ao analisarmos o gráfico apresentado na figura (4.32) relativo à instância I-P10-s30, notamos que os valores médios, mesmo ao considerarmos a solução de pior caso teórico, encontram-se acima do valor ótimo obtido a partir do modelo nominal. Até mesmo o valor médio obtido para $\Gamma=4$ (caso cujo valor ótimo estabiliza) é superior ao valor ótimo obtido a partir do modelo nominal.

O mesmo ocorre quando analisamos o gráfico apresentado na figura (4.33) relativo à instância I-P20-s40. Os valores médios obtidos através das simulações de Monte Carlo executadas com os outputs do modelo robusto continuaram superiores ao valor ótimo determinado a partir do modelo nominal. O valor médio obtido ao considerar o pior caso teórico ($\Gamma=11$) estava em torno do valor ótimo obtido a partir do modelo nominal.

Ao verificarmos o gráfico apresentado na figura (4.34), percebemos que o valor médio determinado a partir da simulação de Monte Carlo para os outputs obtidos do modelo robusto considerando $\Gamma=41$ foi um pouco menor (0,12%) que o valor ótimo obtido a partir do modelo nominal. Não obstante, percebe-se que tal valor médio, mesmo para esse caso (caso a partir do qual ocorre estabilização, ou seja, não há diminuição no valor ótimo robusto) tem valor em torno do ótimo da solução nominal.

Os valores de $\Delta(\%)$ apresentados nas tabelas 4.2 e 4.3 indicavam que, quanto maior o percentual de projetos implementados ($n_I/|J|$), a diferença percentual entre z^N e z^R diminuía. Para as instâncias I-P10-s30, I-P20-s40 e I-P50-s78 (menor horizonte fixo) com $\gamma=10\%$, por exemplo, temos 40%, 55% e 82% dos projetos implementados, respectivamente, ao levar em consideração incerteza nos lucros retornados. Para as mesmas instâncias I-P10-s30, I-P20-s40 e I-P50-s78 (menor horizonte fixo) com $\gamma=20\%$, temos 40%, 80% e 100% dos projetos implementados, respectivamente, ao considerar o caráter incerto na taxa de financiamento. E verificamos que, em ambas tabelas (4.2 e 4.3), ao aumentar ($n_I/|J|$) os valores de $\Delta(\%)$ diminuem. A mesma inferência é deduzida da simulação de Monte Carlo ao compararmos os valores médios \bar{z}^R com z^N . Temos decréscimos de 7,58% para 2,95%, de 5,77% para 0,38% e de 1,99% para -0,12%, relativos às instâncias I-P10-s30, I-P20-s40 e I-P50-s78, respectivamente, ao compararmos o valor médio obtido a partir das simulações de Monte Carlo com Γ no pior caso teórico e a solução nominal. Isso ocorre porque, quanto maior o percentual de atividades executadas, menor será a representatividade das variações dos parâmetros incertos em relação aos lucros retornados acumulados ao longo do horizonte de planejamento.

Capítulo 5

Conclusões

Abordar a gestão de portfólios considerando incerteza nos parâmetros através da técnica de otimização robusta demonstrou-se de grande importância uma vez que, os valores médios obtidos a partir da simulação de Monte Carlo, mesmo para os piores casos teóricos, encontravam-se em torno do valor ótimo nominal.

O processo de tomada de decisões a nível estratégico na gestão de portfólio de projetos pode ser auxiliado pelos resultados obtidos por meio do nosso trabalho desde que consideradas as limitações dos modelos aqui apresentados.

Ao gestor é permitido agregar suas métricas (ou de sua empresa) de gestão de risco às técnicas tratadas nesse trabalho por meio do controle do *budget* de incerteza (grau de conservadorismo) e ser munido de mais uma ferramenta no seu processo decisório.

Dentre as várias indagações que o gestor necessita responder e que esse trabalho pode auxiliá-lo, estão:

- Ao considerar o caráter incerto nos lucros retornados e na taxa de financiamento, qual será o impacto no fluxo de caixa final de meu portfólio?
- Qual risco assumo ao desconsiderar a incerteza associada a tais parâmetros?
- Quantos e quais projetos gerarão o portfólio mais rentável ao trabalhar num cenário incerto?
- Uma vez escolhidos os projetos constituintes do portfólio, como as programações dos mesmos (data de início e modos de execução) são influenciados pelo caráter estocástico dos parâmetros lucros e taxa de financiamento?
- Qual programação de tomada de empréstimos devo adotar?

Uma boa gestão de tomada de empréstimos leva a resultados melhores do que considerar limites pré-estabelecidos de empréstimos por período. Ao considerar incerteza nos lucros retornados o impacto no valor ótimo e na quantidade de atividades implementadas foi consideravelmente maior que o impacto gerado ao considerar incerteza na taxa de financiamento devido, principalmente, ao considerarmos tal limite em nossos cenários. Tal diferença é tão grande que, ao considerarmos tanto os lucros retornados quanto a taxa de financiamento incertos, os resultados são muito próximos dos resultados encontrados

ao considerar apenas incerteza nos lucros retornados. Caso não exista tal limite, essas diferenças não ocorrem tão acentuadamente.

Dentre as limitações dos resultados apresentados, estão:

- Aplicação de regime de capitalização simples no cálculo dos juros remuneratórios relativos aos empréstimos. Consideramos tal aplicação como limitação por não corresponder à inúmeras situações reais que apenas seriam devidamente representadas por meio de capitalização composta.
- Os fluxos positivos não serem aplicados em algum investimento, auxiliando assim, melhorar o resultado do fluxo de caixa no último período. A falta de investimento de fluxos positivos representa perda de oportunidade, e por isso também se trata de uma limitação aos resultados.

Como já apresentado em nosso trabalho, caso substituirmos as restrições 3.5 e 3.6 pelas restrições 3.11 e 3.12, ambas limitações são tratadas. Apesar de já termos desenvolvido a melhoria na modelagem do problema aqui tratado, deixamos o processo de rodar instâncias no modelo melhorado para futuros trabalhos.

Também sugerimos para trabalhos futuros:

(i) Rodar instâncias considerando as melhorias apresentadas em nosso trabalho. Algumas implicações que podem ocorrer são:

- Aumento no número n_t de projetos implementados, pois teríamos mais capital disponível no fluxo de caixa permitindo maior número de projetos escolhidos para o portfólio.
- Alteração nas datas de início dos projetos para adequação à estratégia de investimento implementada.

(ii) substituir cada projeto por sua respectiva rede de atividades. Tal procedimento permitiria:

- estudar o impacto de decisões de curto e médio prazo (níveis operacional e tático) nos resultados de longo prazo (nível estratégico).
- criar métricas de análise de desempenho da implementação dos projetos mais alinhadas com as metas estipuladas no nível estratégico.

(iii) tratar a relação entre os projetos permitindo compartilhamento de recursos entre eles. Assim, poderemos:

- Tratar a implementação dos projetos considerando alocação de recursos compartilhados, verificar o impacto de tal compartilhamento no custo e no prazo dos projetos, conseqüentemente, no custo e prazo do portfólio, e, no fluxo de caixa no último período do horizonte de planejamento.
- Tratar a possibilidade de reduzir gastos com processos admissionais e demissionais a partir de realocação de recursos a partir do compartilhamento.

(iv) aplicar a técnica de Otimização Robusta no modelo após tais melhorias, considerando, inclusive, incerteza na taxa de investimento, nos custos e nos prazos dos projetos.

Referências Bibliográficas

- [1] Concurso público nacional de arquitetura para novas tipologias de habitação de interesse social sustentáveis, 2010. URL <<https://www.vitruvius.com.br/revistas/read/projetos/11.126/3902?page=14>>Acessoem:15/03/2019.
- [2] Blog diário do parque da barragem santa lúcia, belo horizonte, minas gerais, brasil, 2013. URL <<http://parquedabarragem.blogspot.com/2013/11/>>Acessoem:15/03/2019.
- [3] Histórico das taxas de juros fixadas pelo copom e evolução da taxa selic, 2018. URL <<https://www.bcb.gov.br/acessoinformacao/legado?url=https:%2F%2Fwww.bcb.gov.br%2FPec%2FCopom%2FPort%2FtaxaSelic.asp>>Acessoem:23/11/2018.
- [4] Tipos de fundação, 2019. URL <<https://www.instazu.com/media/2141490266834246685>>Acessoem:10/out/2019.
- [5] C. Akkan. A lagrangian heuristic for the discrete time-cost tradeoff problem for activity-on-arc project networks. *Working Paper*, 1998.
- [6] C. Akkan. Iterated local search algorithms for the discrete time-cost tradeoff problem. *Working Paper*, 1999.
- [7] D. J. Alem. Programação estocástica e otimização robusta no planejamento da produção de empresas moveleiras. *Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo, São Carlos*, 81:208, 2011.
- [8] L. H. Alencar and M. Santana. Análise do gerenciamento de múltiplos projetos na construção civil. *ENEGETP*, pages 1–13, 2010.
- [9] E. Bacha. Saída para a crise tem mão dupla. *Estudos Avançados*, 31:23–26, 2017.
- [10] R. Barboza and E. Zilberman. Os efeitos da incerteza sobre a atividade econômica no brasil. *Revista Brasileira de Economia*, 72(2):144–160, 2018.
- [11] A. Ben-Tal and A. Nemirovski. Robust optimization-methodology and applications. *Mathematical Programming*, 92(3):453–480, 2002.
- [12] A. N. Ben-Tal. Robust solutions of linear programming problems contaminated with uncertain data. *Mathematical Programming*, 88(3):411–424, 2000.
- [13] D. Bertsimas and M. Sim. Robust discrete optimization and network flows. *Mathematical Programming*, 98(1-3):49–71, 2003.

- [14] D. T. Bertsimas. A robust optimization approach to inventory theory. *Operations Research*, 54(1):150–168, 2006.
- [15] M. Bertsimas, D.; Sim. The price of robustness. *Operations Research*, 52(1):35–53, 2004.
- [16] J. G. Caetano, S.M. and W. Côrrea. Abordagem discreta para a dinâmica da taxa selic-meta. *Economia Aplicada*, 15(2):199–221, 2011.
- [17] H. G. Castro and M. Carvalho. Interest rate: Its behavior, determination, and implications for the brazilian economy. *Economia Contemporânea*, 12(3):463–490, 2008.
- [18] H. G. Castro and M. Carvalho. Gerenciamento do portfólio de projetos (ppm): estudos de caso. *Produção*, 20:303–321, 2010.
- [19] H. G. Castro and M. Carvalho. Gerenciamento do portfolio de projetos: um estudo exploratório. *G&P*, 17(2):283–296, 2010.
- [20] W. K. Chan, S. H. and J. Yang. The pricing of construction loans. *International Real Estate Review*, 19(4):411–434, 2016.
- [21] J. Costa and S. Serra. Comparação de processos de levantamento de quantitativos: Tradicional e bim. *ENTAC*, pages 1–11, 2014.
- [22] P. De, E. Dunne, J. Ghosh, and C. Wells. The discrete time-cost tradeoff problem revisited. *European Journal of Operational Research*, 81:225–238, 1995.
- [23] G. A. Dymski. Keynesian versus credit theories of money and banking: A reply to wray. *Journal of Post Keynesian Economics*, 12(1):157–163, 1989.
- [24] R. Etgar, A. Shtub, J. Larry, and L. Blanc. Scheduling projects to maximize net present value - the case of time-dependent, contingent cash flows. *European Journal of Operational Research*, 96:90–96, 1997.
- [25] S. A. V. D. Fernandes, B. and C. Fernandes. An adaptive robust portfolio optimization model with loss constraints based on data-driven polyhedral uncertainty sets. *European Journal of Operational Research*, 255(3):961–970, 2016.
- [26] A. Filho. Métodos modificados de avaliação de investimentos em condições de incerteza: uma abordagem baseada em números fuzzy. *Tese de Doutorado*, pages 1–238, 2014.
- [27] E. Filho and F. Costa. Financiamento de longo prazo no brasil: um mercado em transformação. *IPEA*, pages 1–54, 2013.
- [28] F. Filho. A crise econômica de 2014-2017. *Estudos Avançados*, 31:51–60, 2017.
- [29] T. Fliedner and J. Liesio. Adjustable robustness for multi-attribute project portfolio selection. *European Journal of Operational Research*, 252(3):931–946, 2016.
- [30] T. A. Frej and L. Alencar. Fatores de sucesso no gerenciamento de múltiplos projetos na construção civil em recife. *Produção*, 20(3):322–334, 2010.

- [31] D. Fulkerson. A network flow computation for project cost curves. *Management Science*, 1:167–178, 1961.
- [32] S. J. S. R. S. R. N. R. A. W. S. J. R. Galvão, B.B. and M. Amarante. Importância da sondagem spt na construção civil: Tipos de sondagens, seus métodos e utilidades. *Pesquisa e Ação*, 5(2):1–8, 2019.
- [33] O. F. Ghaoui, L.E. and H. Lebret. Robust solutions to uncertain semidefinite programs. *Siam Journal on Optimization*, 9(1):33–52, 2006.
- [34] L. J. Gitman. Princípios de administração financeira. *Pearson Education do Brasil*, page 801, 2010.
- [35] P. Glasserman. Monte carlo methods in financial engineering. *Springer*, pages 120–121, 2004.
- [36] D. S. Grimaldi and R. Madeira. Financiamento de longo prazo e bancos públicos: uma análise dos repasses do bndes finame no período 2005-2015. *Revista do BNDES*, 46:5–38, 2016.
- [37] M. Hallgren and E. Olsson. Deviations and the breakdown of project management principles. *International Journal of Managing Projects in Business*, 2(1):53–69, 2009.
- [38] R. Harvey and J. Patterson. An implicit enumeration algorithm for the time/cost tradeoff problem in project network analysis. *Foundations of Control Engineering*, 4:107–117, 1979.
- [39] F. Hassanzadeh, M. Modarres, H. Nemati, and K. Amoako-Gyampah. A robust red project portfolio optimization model for pharmaceutical contract research organizations. *Prod Econ*, 158:18–27, 2014.
- [40] W. Herroelen, P. Van Dommelen, and E. Demeulemeester. Project network models with discounted cash flows a guided tour through recent developments. *European Journal of Operational Research*, 100:97–121, 1997.
- [41] H. H. Hussain. Time management tools and techniques for project management. *Socio-economic Research Bulletin*, 14(55):1–6, 2014.
- [42] O. Icmeli and S. Erenguc. The resource constrained time/cost tradeoff project scheduling problem with discounted cash flows. *Operation Manage*, 14:255–275, 1996.
- [43] L. R. Julio and M. Piscopo. Influência da gestão estratégica de portfólios de projetos no desenvolvimento tecnológico. *ANPAD*, pages 1–13, 2013.
- [44] L. Junior and G. Plonski. Gestão de projetos em empresas no brasil: abordagem “tamanho único”? *G&P*, 18(1):1–12, 2011.
- [45] A. Kimms. Mathematical programming and financial objectives for scheduling projects. *Operation Manage*, 8, 2001.
- [46] E. L. Lacerda, R.T.O. and S. Ensslin. A case study about portfolio management and multicriteria decision aiding. *Gestão Industrial*, 06(1):01–29, 2010.

- [47] M. C. M. M. Lermen, F.H. and C. Roder. Optimization of times and costs of project of horizontal laminator production using pert/cpm technical. *Independent Journal of Management & Production*, 7(3):1–22, 2016.
- [48] H. A. Levine. Project portfolio management: A practical guide to selecting projects, managing portfolios and maximizing benefits. *AEW Services*, pages 1–8, 2006.
- [49] P. Leyman and M. Vanhoucke. A new scheduling technique for the resource-constrained project scheduling with discounted cash flows. *International Journal of Production Research*, 53(9):2771–2786, 2014.
- [50] Y. Liu and Y. Liu. Distributionally robust fuzzy project portfolio optimization problem with interactive returns. *Applied Soft Computing*, 56:655–668, 2017.
- [51] S. S. L. T. Marinho, M.L.M. and H. Moura. Uncertainty management in software projects. *Journal of Software*, 10(3):288–303, 2014.
- [52] P. Martins. Integrating financial planning, loaning strategies and project scheduling on a discrete-time model. *Journal of Manufacturing Systems*, 44:217–229, 2017.
- [53] A. D. Mattos. Como preparar orçamentos de obras. *PINI*, page 286, 2007.
- [54] M. Mika, G. Waligóra, and J. Weglarz. Simulated annealing and tabu search for multi-mode resource-constrained project scheduling with positive discounted cash flows and different payment models. *European Journal of Operational Research*, 164: 639–668, 2005.
- [55] L. J. Mild, P. and A. Salo. Selecting infrastructure maintenance projects with robust portfolio modeling. *Decision Support Systems*, 77:21–30, 2015.
- [56] P. Z. Mirza, M.N. and M. Shahnazari. Significance of scope in project success. *Procedia Technology*, 9:722–729, 2013.
- [57] M. M. Muller, R. and T. Blonquist. Project portfolio control and portfolio management performance in different contexts. *Project Management Journal*, 39(3):28–42, 2008.
- [58] J. T. Nangan, A. P. and D. Martinez. Concrete foundation systems and footings. *The Scientific World Journal*, 80:1–17, 2017.
- [59] M. L. Nazareth, M.M. and P. Chakour. Estudo comparativo entre pert/cpm e corrente crítica. *ENECEP*, pages 1–17, 2015.
- [60] J. L. Oreiro. A grande recessão brasileira: diagnóstico e uma agenda de política econômica. *Estudos Avançados*, 31:75–88, 2017.
- [61] R. Padman, D. Smith-Daniels, and S.-D. VL. Heuristic scheduling of resource-constrained projects with cash flows. *Logist*, 44:365–381, 1997.
- [62] J. Pajares and A. López. New methodological approaches to project portfolio management: the role of interactions within projects and portfolios. *Elsevier*, 119:645–652, 2014.

- [63] J. Patterson, K. Yang, and F. Talbot. Scheduling a project to maximize its net present value: An integer programming approach. *European Journal of Operational Research*, 64:188–198, 1993.
- [64] L. Paula. Riscos na atividade bancária em contexto de estabilidade. *Análise Econômica*, (34):1–23, 2000.
- [65] C. W. Pedrozo, O. A. M. and M. Bianchi. O gerenciamento do portfólio de projetos como ferramenta de execução da estratégia. *XXI Congresso Brasileiro de Custos*, pages 1–16, 2014.
- [66] N. G. C. R. Perez, F. and V. Lien. Project portfolio selection and planning with fuzzy constraints. *Technological Forecasting and Social Change*, 131:117–129, 2018.
- [67] L. C. Pich, M.T. and A. Meyer. On uncertainty, ambiguity, and complexity in project management. *Management Science*, 48(8):1008–1023, 2002.
- [68] J. M. Pinto. What is project finance? investment management and financial innovations. *Investment Management and Financial Innovations*, 14(1):200–210, 2017.
- [69] P. P. Ribeiro, J. A. and E. Brandão. Volume uncertainty in construction projects: A real options approach. pages 1–29, 2019.
- [70] G. Ritz. Total construction project management. *McGraw-Hill*, page 462, 1994.
- [71] A. H. Russel. Cash flows in networks. *Management Science*, 16:357–373, 1970.
- [72] A. C. Santos, A.P.L. and G. Balbinot. Levantamento de quantitativos de obras: Comparação entre o método tradicional e experimentos em tecnologia bim. *Iberoamerican Journal of Industrial Engineering*, 6(12):134–155, 2014.
- [73] P. R. M. S. Shankarmani, R. and V. Babu. Agile methodology adoption: Benefits and constraints. *International Journal of Computer Applications*, 58(15):31–37, 2012.
- [74] A. Shenrar and D. Dvir. Reinventing project management: the diamond approach to successful growth and innovation. *Harvard Business School Press*, 2007.
- [75] J. Silva and L. Zotes. Fontes de financiamento para a estruturação de projetos na modalidade project finance. *ENEGEP*, pages 1–11, 2012.
- [76] A. Soyster. Convex programming with set-inclusive constraints and applications to inexact linear programming. *Operations Research*, 21(5):1154–1157, 1973.
- [77] L. Y. Sun B. and Y. G. A robust pharmaceutical r&d project portfolio optimization problem under cost and resource uncertainty. *Journal of Uncertain Systems*, 11(3): 205–220, 2017.
- [78] J. Szmerekovsky. The impact of contractor behavior on the client’s payment-scheduling problem. *Management Science*, 51:629–640, 2005.
- [79] G. Ulusoy and S. Cebeli. An equitable approach to the payment scheduling problem in project management. *European Journal of Operational Research*, 127:262–278, 2000.

- [80] M. D. T. J. Ustinovičius, L. and E. Zavadskas. Uncertainty analysis in construction project's appraisal phase. *International Conference: Modern building materials, structures and techniques*, pages 1–9, 2007.
- [81] J. Yang and P. Wei. Causes of delay in the planning and design phases for construction projects. *Journal of Architectural Engineering*, 16(2):80–83, 2010.
- [82] E. Zheng and M. Carvalho. Managing uncertainty in projects: A review, trends and gaps. *G&P*, 7(2):95–109, 2016.

Apêndice A

Resultados ao considerar incerteza na taxa de financiamento e lucros retornados para instância I-P10-s30

Os resultados apresentados na tabela abaixo foram calculados considerando $\gamma^p = 5\%$ e

$$\Gamma_6^r = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 2 & 1 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 6 & 6 & 6 & 6 & 6 & 5 & 4 & 3 & 2 & 1 \end{pmatrix}$$

Tabela A.1: Comparação entre os resultados obtidos para a instância I-P10-s30 ao considerarmos incerteza apenas nos lucros retornados e na taxa de financiamento e nos lucros retornados simultaneamente

Γ^p	$z_{DAp-R}^{* \gamma^r=100\%}$	$z_{DA-R}^{* \gamma^r=1000\%}$	$\delta(\%)$
0	4145,68	4145,68	0,0000%
1	3967,72	3967,71	-0,0001%
2	3852,44	3852,43	-0,0002%
3	3784,19	3784,18	-0,0002%
4	3736,09	3736,08	-0,0002%
5	3736,09	3736,08	-0,0002%
6	3736,09	3736,08	-0,0002%
7	3736,09	3736,08	-0,0002%
8	3736,09	3736,08	-0,0002%
9	3736,09	3736,08	-0,0002%
10	3736,09	3736,08	-0,0002%

Onde $\delta(\%) = (z_{DA-R}^{* \gamma^r=1000\%} - z_{DAp-R}^{* \gamma^r=100\%}) / z_{DAp-R}^{* \gamma^r=100\%}$