

Pontifícia Universidade Católica de Goiás
Programa de Mestrado em Engenharia de Produção e Sistemas

**MODELAGEM DE CRONOGRAMA DE PROJETOS PELA
FERRAMENTA DSM COM APOIO AO
GERENCIAMENTO E TOMADA DE DECISÕES PELA
SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO**

HUGO ALEXANDRE DO CARMO CENTENO

GOIÂNIA
2018

**MODELAGEM DE CRONOGRAMA DE PROJETO PELA
FERRAMENTA DSM COM APOIO AO
GERENCIAMENTO E TOMADA DE DECISÕES PELA
SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO**

HUGO ALEXANDRE DO CARMO CENTENO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas da Pontifícia Universidade Católica de Goiás, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção e Sistemas.

Orientador: Prof. Dr. José Elmo de Menezes, *Ph.D.*

GOIÂNIA
ABRIL 2018

C397m

Centeno, Hugo Alexandre do Carmo

Modelagem de cronograma de projetos pela ferramenta
DSM com apoio ao gerenciamento e tomada de decisões
pela Simulação de Monte Carlo[recurso eletrônico
Hugo Alexandre do Carmo Centeno.-- 2018.

102; il. 30 cm

Texto em português com resumo em inglês

Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica
de Goiás, Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu
em Engenharia de Produção e Sistemas, Goiânia, 2018

Inclui referências f.92-95

1. Construção civil - Estimativas - Projetos. 2. Métodos
de simulação. 3. Monte Carlo, Método de. I.Menezes,
José Elmo de. II.Pontifícia Universidade Católica
de Goiás. III. Título.

CDU: 69(043)

**MODELAGEM DE CRONOGRAMA DE PROJETOS PELA
FERRAMENTA DSM COM APOIO AO GERENCIAMENTO E
TOMADA DE DECISÕES PELA SIMULAÇÃO DE MONTE
CARLO**

HUGO ALEXANDRE DO CARMO CENTENO

Esta Dissertação julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção e Sistemas, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas da Pontifícia Universidade Católica de Goiás em Abril de 2018.



Prof. Dr. Marcos Lajovic Carneiro, *Ph.D.*
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Produção e Sistemas

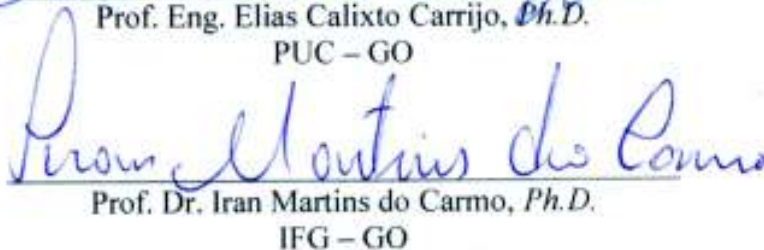
Banca Examinadora:



Prof. Dr. José Elmo de Menezes, *Ph.D.*
Orientador PUC – GO



Prof. Eng. Elias Calixto Carrizo, *Ph.D.*
PUC – GO



Prof. Dr. Iran Martins do Carmo, *Ph.D.*
IFG – GO

GOIÂNIA
ABRIL 2018

AGRADECIMENTOS

À Deus pelos dons da vida, inteligência e saúde que me capacitam ao trabalho.

Aos meus Pais, cuja criação dedicada e amorosa me possibilitam a paz de espírito necessárias para enfrentar as dificuldades na busca dos objetivos.

Aos Professores do Programa, cujos ensinamentos e instruções forneceram as ferramentas necessárias ao desenvolvimento deste trabalho.

À Empresa – que prefere o sigilo – a qual tendo cedido os dados viabilizaram os objetivos desta pesquisa.

Aos Amigos e Colegas do Mestrado, cujas trocas de experiência contribuíram para configuração deste trabalho.

“Se você vai ser original, você vai estar errado bastante vezes”.

(Roger Von Oech)

“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém pensou sobre aquilo que todo mundo vê”.

(Arthur Schopenhauer)

RESUMO

Os atrasos em projetos de construção civil são um fato recorrente em diversos países e regiões para os mais variados tipos de obras. Esses atrasos, além de impactar negativamente a imagem das empresas contratadas na prestação de serviços de construção, acarretam diversos prejuízos financeiros às partes interessadas: contratante e contratado. Diversas pesquisas que abordam os fatores que acarretam em atrasos no cronograma de obras elencam a variação na duração das atividades e, ou, a falta de estimativa inadequada para duração das atividades, dentre os dez maiores fatores de atraso nos projetos. Contribuem para a inadequada estimativa de produção das atividades o desconhecimento da complexidade das mesmas e, também, a falta ou insuficiência de dados históricos que permitam estimar com segurança a duração das atividades. Assim, este trabalho visa descrever o comportamento de variabilidade na duração das atividades em um ambiente com poucos dados de produtividade das atividades. Os dados de produtividade analisados foram tomados de três projetos de construção civil semelhantes executados pela mesma empresa e que se prestaram como estudos de caso deste trabalho. Para análise da variabilidade e descrição do comportamento das atividades, após a coleta de dados de produtividade das atividades dos projetos, foram utilizadas como técnicas a reamostragem Bootstrap não paramétrica dos dados associada a Simulação de Monte Carlo (SMC). Posteriormente, para verificar a confiabilidade dos resultados de variação na duração das atividades, o cronograma dos estudos de caso foi modelado utilizando o Método do Caminho Crítico (CPM) e a Matriz de Estrutura de Dependência (DSM); e submetido a SMC. Os resultados simulados de duração total dos projetos mostraram-se adequados ao prazo real de conclusão dos projetos estudados, conduzindo à conclusão de que os resultados de variação na duração das atividades, obtidos pela técnica citada, são confiáveis.

Palavras-chave: Construção civil – Estimativas – Projetos. Métodos de simulação. Monte Carlo, Método de.

ABSTRACT

Delays in construction projects are a recurrent fact in several countries and regions for the most varied types of works. These delays, in addition to negatively impacting the image of companies contracted in the provision of construction services, cause several financial losses to interested parties: contractor and hired. Several researches that address the factors that lead to delays in the work schedule indicate the variation in the duration of the activities and, or the lack of an inadequate estimate for the duration of the activities, among the ten major delay factors in the projects. They contribute to the inadequate estimation of production of the activities, the lack of knowledge of the complexity of the activities, and also the lack or insufficiency of historical data that allow a safe estimate of the duration of the activities. Thus, this study aims to describe the behavior of variability in the duration of activities in an environment with little activity productivity data. The productivity data analyzed were taken from three similar construction projects carried out by the same company and which were provided as case studies of this work. For the analysis of the variability and description of the behavior of the activities, after the data collection of productivity of the project activities, the non-parametric Bootstrap data resampling associated with Monte Carlo Simulation (MCS) was used as techniques. Later, in order to verify the reliability of the results of variation in the duration of the activities, the schedule of the case studies was modeled using the Critical Path Method (CPM) and the Dependency Structure Matrix (DSM); and submitted to MCS. The simulated results of the total duration of the projects were adequate for the actual completion period of the projects studied, leading to the conclusion that the results of variation in the duration of the activities obtained by the cited technique are reliable.

Keywords: Construction - Estimates - Projects. Simulation methods. Monte Carlo, Method of.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo de grafo ou rede de projeto. Fonte: (ARENALES et al., 2011). ...	29
Figura 2 – Harmonograma de Adamiecki. Fonte: (WEAVER, 2012).	30
Figura 3 – Exemplo de Diagrama de Precedência do projeto. Fonte: (PMI, 2013).	31
Figura 4 – Modelo de Matriz de Estrutura de Dependência (DSM). Fonte: Adaptado de (GÁLVEZ; ORDIERES; CAPUZ-RIZO, 2015).	33
Figura 5 – Representação gráfica das dependências das atividades na DSM. Fonte: (GÁLVEZ; CAPUZ-RIZO; ORDIERES, 2012).	34
Figura 6 – Recurso computacional para reamostragem dos dados. Fonte: Elaborado pelo Autor.	50
Figura 7 – Sistema comparativo de distribuições estatísticas. Fonte: Elaborado pelo Autor.	53
Figura 8 – Gráfico comparativo de curvas de probabilidade. Fonte: Elaborado pelo Autor.	54
Figura 9 – Quadro de transformação dos parâmetros. Fonte: Elaborado pelo Autor.	56
Figura 10 – Representação gráfica do algoritmo de particionamento passo a passo. Fonte: Elaborado pelo Autor.	61
Figura 11 – Gráfico de barras demonstrando o efeito do particionamento sobre a organização no cronograma do projeto. Fonte: Elaborado pelo Autor.	62
Figura 12 – Modelagem DSM do cronograma do projeto. Fonte: Elaborado pelo Autor.	64
Figura 13 – DSM do projeto particionada. Fonte: Elaborado pelo Autor.	65
Figura 14 – Matriz de Caminho Crítico (MCP). Fonte: Elaborado pelo Autor.	66
Figura 15 – Resultados da SMC do Projeto 1: Sem variação de vínculo. Fonte: Elaborado pelo Autor.	78
Figura 16 – Resultados da SMC do Projeto 2: Sem variação de vínculo. Fonte: Elaborado pelo Autor.	78
Figura 17 – Resultados da SMC do Projeto 3: Sem variação de vínculo. Fonte: Elaborado pelo Autor.	79
Figura 18 – Gráfico de Tornado do Projeto 1. Fonte: Elaborado pelo Autor.	80
Figura 19 – Gráfico de Tornado do Projeto 2. Fonte: Elaborado pelo Autor.	80

Figura 20 – Gráfico de Tornado do Projeto 3. Fonte: Elaborado pelo Autor.....	81
Figura 21 – DSM particionada com vínculos variáveis. Fonte: Elaborado pelo Autor	82
Figura 22 – Resultados da SMC do Projeto 1: Com variação de vínculo. Fonte: Elaborado pelo Autor.....	83
Figura 23 – Resultados da SMC do Projeto 2: Com variação de vínculo. Fonte: Elaborado pelo Autor.....	84
Figura 24 – Resultados da SMC do Projeto 3: Com variação de vínculo. Fonte: Elaborado pelo Autor.....	84
Figura 25 – Gráfico de Tornado do Projeto 1: Com variação de vínculo. Fonte: Elaborado pelo Autor.....	85
Figura 26 – Gráfico de Tornado do Projeto 2: Com variação de vínculo. Fonte: Elaborado pelo Autor.....	86
Figura 27 – Gráfico de Tornado do Projeto 3: Com variação de vínculo. Fonte: Elaborado pelo Autor.....	86
Figura 28 – Montagem do problema para mudança dos parâmetros utilizando o recurso Solver. Fonte: Elaborado pelo Autor.....	99
Figura 29 – Solução do Solver para mudança de parâmetros. Fonte Elaborado pelo Autor.....	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Apresentação e descrição dos Estudos de Caso.....	47
Tabela 2 – Procedimento de coleta de dados de produtividade.....	48
Tabela 3 – Dados de produtividade das atividades.....	49
Tabela 4 – Reamostragem dos dados de produtividade da atividade A5.	51
Tabela 5 – Resultado da inferência de distribuição estatística.	55
Tabela 6 – Duração mediana das atividades do Projeto 1.	63
Tabela 7 – Resultados do Caminho Crítico e Duração total do Projeto 1.	69
Tabela 8 – Parâmetros estatísticos de duração das atividades do Projeto 1.	72
Tabela 9 – Parâmetros estatísticos de duração das atividades do Projeto 2.	73
Tabela 10 – Parâmetros estatísticos de duração das atividades do Projeto 3.	73
Tabela 11 – Resultados do Caminho Crítico e Duração total do Projeto 2.....	76
Tabela 12 – Resultados do Caminho Crítico e Duração total do Projeto 3.....	76
Tabela 13 – Risco e comparação dos resultados da SMC: Sem variação de vínculo....	88
Tabela 14 – Risco e comparação dos resultados da SMC: Com variação de vínculo...	88

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CI	<i>Criticality Index</i>
CP	<i>Critical Path</i>
CPM	<i>Critical Path Method</i>
CRI	<i>Cruciality Index</i>
DSM	<i>Dependency Structure Matrix</i>
EAP	Estrutura Analítica do Projeto
ICB	<i>International Competence Baseline</i>
IPMA	<i>International Project Management Association</i>
MCP	Matriz de Caminho Crítico
PERT	<i>Program and Evaluation and Review Technique</i>
PMBOK	<i>Project Management Body Of Knowledge</i>
PMI	<i>Project Management Institute</i>
PRINCE2	<i>Project in Controlled Enviroment</i>
SI	<i>Sensitivity Index</i>
SMC	Simulação de Monte Carlo
VBA	<i>Visual Basic for Applications</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
1.1 Temática.....	14
1.1.1 Contextualização	14
1.1.2 Problemática.....	16
1.2 Justificativa	18
1.3 Objetivo Geral.....	20
1.4 Objetivos Específicos	20
1.5 Classificação da Pesquisa	21
1.6 Estrutura do Trabalho	22
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
2.1 Gerenciamento de Projetos e de Cronograma.....	23
2.2 Método PERT/CPM.....	25
2.3 Ferramentas de Representação de Cronograma.....	30
2.4 Matriz de Estrutura de Dependência.....	32
2.5 Simulação e Modelagem.....	36
2.6 Simulação de Monte Carlo	38
2.6.1 Resultados de Monte Carlo e Medidas de Sensibilidade	40
2.6.2 Gerador de Números Aleatórios.....	41
2.6.3 Erro de Monte Carlo.....	42
2.7 A Técnica de Reamostragem Bootstrap.....	43
3. METODOLOGIA.....	45
3.1 Métodos e Técnicas	45
3.2 Estudo de Caso.....	46
3.2.1 Coleta de Dados	47
3.2.2 Reamostragem dos Dados	50

3.2.3 Parâmetros Estatísticos dos Dados	52
3.3 Modelagem, Implementação e Simulação	57
3.3.1 Modelagem Matemática CPM	58
3.3.2 Modelagem Gráfica DSM	60
3.3.3 Implementação do Modelo	63
3.3.4 Algoritmo de Monte Carlo e Simulação	69
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	72
4.1 Resultados dos Estudos de Caso	72
4.2 Resultados da Simulação dos Modelos	75
4.2.1 Resultados da Simulação Sem Variação de Vínculos	77
4.2.2 Resultados da Simulação Com Variação de Vínculos	82
4.3 Risco e Comparação de Resultados	88
5. CONCLUSÃO	90
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	92
APÊNDICE A	96
APÊNDICE B	97
APÊNDICE C	98
APÊNDICE D	99
APÊNDICE E	100
APÊNDICE F	101
APÊNDICE G	102

1. INTRODUÇÃO

1.1 Temática

1.1.1 Contextualização

Em projetos de construção civil o cumprimento de prazos e cronogramas são problemas bastante recorrentes em muitas empresas, sendo problema de constantes reclamações por parte dos contratantes, interferindo na competitividade das empresas, e em alguns casos, num panorama em que muitas empresas trabalham com múltiplos projetos, os atrasos de um ou outro projeto podem manter presos recursos que deveriam atender outros projetos, interferindo assim na capacidade produtiva da empresa (ALENCAR; SANTANA, 2010).

O atraso de projetos é um problema recorrente em diversos países, cujas pesquisas nas mais diferentes regiões descrevem as razões que acarretam os atrasos observados. A literatura sobre os fatores de risco que influenciam no atraso de projetos de construção civil é bastante extensa e com resultados bastante esclarecedores de quais fatores afetam as atividades dos projetos, causando perdas consideráveis para as partes interessadas do projeto, uma vez que, um projeto de construção concluído dentro do prazo e orçamento planejados e de acordo com as especificações e satisfação dos envolvidos é considerado um projeto bem sucedido (GUALBERTO, 2011).

Em um estudo realizado na região metropolitana de Belém/PA, Reis *et al* (2016) identificaram em 20 trabalhos da literatura entre os anos de 1997 a 2015, 56 diferentes fatores que influenciaram nos atrasos em projetos de construção civil, classificando-os em 8 grupos segundo a fonte de origem como: viabilidade e documentação inicial do projeto; gestão do projeto ao longo da obra; proprietários; construtora; mão de obra; materiais; equipamentos; e fatores externos. Após a identificação dos fatores, os autores

enviaram questionários a 61 profissionais do ramo de construção civil sobre o impacto que estes fatores possuem sobre o atraso de obras. Entre os resultados apresentados o planejamento mal feito com programações ineficazes e estimativas inadequadas de duração das atividades é suscitado como uma causa de atrasos com 70% de respostas positivas por parte dos entrevistados.

Também na Nigéria a indústria da construção civil sofre com muitos problemas que acarretam em atrasos na execução de projetos, assim, Owolabi *et al* (2014) pesquisaram 150 profissionais do setor de construção civil, obtendo 90 respostas válidas que descrevem os fatores e os efeitos dos atrasos sobre os projetos de construção. Entre 15 fatores de atraso observados pelos autores nesta pesquisa, a variação na duração das atividades em virtude de uma estimativa inadequada do tempo aparece como a sétima causa responsável pelos atrasos.

Na Arábia Saudita, Assaf e Al-Hejji (2006), pesquisaram sobre os fatores de atrasos de obras pelo ponto de vista de cada uma das principais partes envolvidas contratados, consultores e proprietários. Nesta pesquisa os autores identificaram através de revisão da literatura 73 causas de atrasos classificando-as em 9 grupos denominados como contrato, proprietário, contratado, consultor, projeto, materiais, equipamentos, mão de obra e fatores externos. Posteriormente um questionário de avaliação das causas identificadas foi submetido a 23 contratados, 19 consultores e 15 proprietários e para cada uma das partes interessadas foram classificadas as 10 principais causas de atraso entre as quais, a ineficiência do planejamento e cronograma do projeto pelo contratado é apontada como a terceira e quarta causa pelos proprietários e consultores, respectivamente.

Uma outra pesquisa semelhante foi realizada na Lituânia e identificou por meio da literatura 71 fatores críticos para o sucesso de projetos de construção classificados em 7 grupos e denominados como fatores externos; institucionais; relacionados ao projeto;

relacionados ao gerenciamento do projeto e à equipe de gerenciamento; relacionado ao gerente do projeto; relacionado ao cliente; relacionados ao contratado. Posteriormente os autores desta pesquisa submeteram estes fatores a indagação de 45 profissionais que classificaram os 10 principais fatores em cada grupo, sendo que para o grupo de fatores relacionados ao projeto o planejamento inapropriado e a falta de estimativa realística de duração das atividades aparecem na segunda e sétima posição, respectivamente (GUDIENE; BANAITIS; BANAITIENE, 2013).

Os atrasos em obras causam prejuízos tanto aos contratantes (clientes) quanto aos contratados (executores); para os primeiros o atraso pode significar, por exemplo, prejuízo financeiro com em uma unidade fabril, que por atraso nas instalações de produção para início de suas atividades, compromete o retorno sobre o investimento; para o contratado além dos impactos negativos a imagem da empresa, entre outras questões advindas de rescisões contratuais e ações judiciais movidas pelos contratantes, os atrasos significam: perda de receita devido a multas contratuais, maiores custos indiretos devido a um período de trabalho mais longo, maiores custos com material através do processo inflacionário, e perda de produtividade em razão dos recursos permanecerem alocados além do esperado em um único projeto (VEZZONI et al., 2013).

1.1.2 Problemática

Para Gálvez, Ordieres e Capuz-Rizo (2015) as atividades de um projeto estão sujeitas a muitos fatores desconhecidos que podem alterar o agendamento, como por exemplo: indisponibilidade de recursos; subestimação da complexidade da tarefa; introdução ou retirada de atividades não previstas no projeto inicialmente; condições climáticas; e todo tipo de problema relacionado com a mão de obra como baixo

contingente, indisposição e procrastinação de funcionários, baixa qualificação aliada a inexperiência com alguma atividade, entre outros.

Ao tratar das incertezas que afetam as atividades de um projeto, Rabechini Junior e Carvalho (2013) elencam quatro tipos de incertezas que afetam as durações das atividades denominadas como:

1. Variabilidade: variações aleatórias, contudo previsíveis e controláveis em torno dos objetivos de custo e prazo;
2. Incerteza previsível: poucos fatores conhecidos afetam o projeto de forma imprevisível;
3. Incerteza imprevisível: fatores significativos que influenciam o projeto e não podem ser previstos;
4. Caos: fatores completamente imprevisíveis que invalidam completamente o planejamento, objetivos e abordagem do projeto.

Com respeito às fontes das incertezas estas assumem basicamente duas classificações conforme a sua origem, e são denominadas como incertezas internas ao projeto advindas das características das atividades e da abordagem do projeto; e incertezas externas ao projeto advindas da estrutura organizacional do executor (contratado) e externas à estrutura do contratado, onde se enquadram os fatores relacionados a clientes/proprietário, fornecedores, institucionais e climáticos (ZHENG; CARVALHO, 2016).

Na expectativa de definir o tempo de duração das atividades os gerentes de projeto deparam-se em muitos casos com a falta ou insuficiência de dados históricos que permitam estimar com segurança o tempo de duração das atividades. Quando os dados históricos de duração das atividades são insuficientes os gerentes de projeto usualmente utilizam a abordagem de estimativa de duração de três pontos para definir a duração

média esperada da atividade. No entanto, com a obtenção de mais dados é possível melhorar a estimativa de duração das atividades descrevendo o comportamento de variabilidade na duração das mesmas por meio de uma distribuição estatística conhecida (KIRYTOPOULOS; LEOPOULOS; DIAMANTAS, 2008).

Vê-se assim, que a eficácia na estimativa de duração das atividades do projeto é uma questão importante para o planejamento e gerenciamento do projeto e que consequentemente tem relativo impacto sobre o atraso e a confiabilidade no tempo de entrega de um projeto. Diante do exposto, a questão suscitada é como melhorar a confiabilidade da estimativa de duração das atividades em um ambiente com dados históricos insuficientes para inferir uma distribuição estatística adequada para descrever o comportamento de variabilidade da duração das atividades em decorrência das incertezas existentes.

1.2 Justificativa

Frente ao contexto dos problemas de atraso de obras mencionados na seção anterior, o planejamento e o gerenciamento de projetos visam administrar a execução do projeto, para com sucesso alcançar os seus objetivos, cumprindo os prazos e custos estimados para satisfação das partes envolvidas, coordenando e direcionando recursos em face dos fatores de risco presentes (ALENCAR; SANTANA, 2010). Evidenciando a contribuição do planejamento e gerenciamento de projetos, Rabechini Junior e Carvalho (2013) pesquisaram 415 projetos referentes a nove setores diferentes da economia, cujos resultados revelaram o impacto positivo e significativo para o sucesso dos projetos, que adotaram práticas de gerenciamento de projetos com foco no gerenciamento de riscos,

elencando como fatores de sucesso o uso de processos, técnicas e ferramentas de gestão de riscos, o cuidados com incertezas e a simulação de prazos e custos.

Diversas abordagens que, tradicionalmente, tratam do tema gerenciamento de projetos consideram que o sucesso do projeto ou mesmo de gerenciamento deste, está intimamente relacionado ao gerenciamento conjunto de três aspectos que caracterizam o projeto: escopo, custo e tempo (MACHADO; MARTENS, 2015). De tal forma que se um projeto demora este custa mais, e se custa mais então pode, mas nem sempre, demorar mais, e se o projeto demora mais há mais oportunidades para a mudança de escopo, e quanto mais houver mudanças de escopo muito provavelmente o custo e o tempo aumentarão (LEACH, 2000).

Muitas ferramentas foram desenvolvidas para auxiliar no planejamento e gerenciamento de projetos, diversas propostas são debatidas no meio acadêmico e profissional, que viabilizam uma melhora no planejamento do projeto para: favorecer o fluxo de informações; diminuir retrabalhos; e atenuar fatores limitantes para a produtividade do processo como, por exemplo, fatores de risco e incertezas associados às atividades do projeto (GUALBERTO, 2011).

Logo, a qualidade no gerenciamento do projeto para alcançar o sucesso esperado quanto aos seus objetivos está relacionada ao planejamento prévio do mesmo em termos de tempo das atividades e recursos. Pois, quando os dados do projeto são insuficientes a possibilidade de fracasso aumenta e, para que o gerente do projeto não coloque a empresa em uma situação de risco é necessário que este tenha uma boa estimativa de duração das atividades que compõem o projeto, pois se este tempo é mal estimado consequentemente os atrasos são inevitáveis (BOMFIN; NUNES; HASTENREITER, 2012).

1.3 Objetivo Geral

Diante da questão suscitada no item 1.1.2 o objetivo deste trabalho é descrever o comportamento de variabilidade na duração das atividades dos projetos por meio de distribuições estatística de probabilidade, em um ambiente com dados insuficientes para inferir uma distribuição estatística. Posteriormente, procura-se testar a confiabilidade destes resultados modelando projetos de estudo de caso e submetendo-os a simulação para comparação dos resultados.

1.4 Objetivos Específicos

Para descrever o comportamento de variabilidade na duração das atividades e testar a confiabilidade destes resultados são tomados como estudo de caso 3 projetos de construção civil, cuja execução está concluída. Assim, este trabalho encontra-se dividido em duas etapas, sendo que a primeira é a coleta de dados dos estudos de caso para estudo do comportamento de variabilidade na duração das atividades; e a segunda é a modelagem e simulação dos estudos de caso alimentados com os resultados da primeira etapa para verificação de confiabilidade dos resultados da primeira etapa.

Desta forma, para cumprir as etapas propostas no objetivo deste trabalho são objetivos específicos desta pesquisa:

- Coletar dados de produtividade das atividades que compõem os estudos de caso;
- Utilizar técnicas de reamostragem para estudar o comportamento de variabilidade na duração das atividades e utilizando um teste de aderência baseado em Simulação de Monte Carlo (SMC) inferir a distribuição estatística de cada uma das atividades;

- Modelar o cronograma dos estudos de caso em ambiente do *software* Excel, utilizando como técnicas o Método do Caminho Crítico (CPM) e a Matriz de Estrutura de Dependência (DSM);
- Alimentar os modelos com os parâmetros das distribuições estatísticas das atividades e submetê-los a SMC, a fim de testar a confiabilidade dos resultados.

1.5 Classificação da Pesquisa

A pesquisa é uma atividade da ciência que busca investigar e descobrir as relações entre os aspectos que envolvem as situações ou coisas, fatos ou fenômenos observáveis, e é tida como um procedimento sistemático e reflexivo que demanda uma organização previamente estabelecida pelo pesquisador, e que se estabelece no momento de classificação do tipo da pesquisa (HEERDT; LEONEL, 2007).

Para realizar a classificação da pesquisa é necessário o estabelecimento de critérios que segundo, Gerhardt e Silveira (2009), a pesquisa deve ser classificada quanto aos critérios de abordagem, natureza, objetivos e procedimentos metodológicos.

Assim, a presente pesquisa pode ser classificada: quanto a abordagem, esta pesquisa é quantitativa, pois entre outras coisas analisa dados numéricos para solução do problema abordado; quanto a natureza, esta pesquisa é aplicada, pois o conhecimento aqui tratado tem aplicação prática voltada para solução de um problema específico; quanto aos objetivos, esta pesquisa é descritiva, pois visa descrever o comportamento de variabilidade na duração das atividades; e quanto aos procedimentos metodológicos, esta pesquisa trata-se de modelagem e simulação associado ao estudo de casos.

1.6 Estrutura do Trabalho

A estrutura deste trabalho é composta de cinco capítulos, sendo esta Introdução o primeiro capítulo. No segundo capítulo é apresentada uma Revisão Bibliográfica com objetivo de elucidar os conceitos que serão aplicados na metodologia e que, portanto, trata dos temas: Gerenciamento de projetos e de cronograma; Método PERT/CPM; Ferramentas de representação de cronograma; Matriz de Estrutura de Dependência; Simulação e modelagem; Simulação de Monte Carlo; e Técnica de reamostragem Bootstrap. O terceiro capítulo é denominado de Metodologia, neste são apresentados o passo a passo dos métodos e técnicas utilizados na solução do problema proposto apresentando os estudos de caso, variabilidade da duração das atividades e a modelagem, implementação e simulação dos projetos de estudo. O quarto capítulo é chamado de Resultados e Discussões, neste são apresentados os resultados dos parâmetros das distribuições estatísticas das atividades, os resultados da simulação dos modelos comparados aos dados reais. O quinto capítulo é a conclusão referente a este estudo desenvolvido bem como sugestões para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

“Os que se encantam com a prática sem a ciência são como os timoneiros que entram no navio sem timão nem bússola, nunca tendo certeza do seu destino”.

(Leonardo da Vinci)

2.1 Gerenciamento de Projetos e de Cronograma

Segundo Williams (2003), a partir dos anos de 1960 começaram a surgir as primeiras organizações e associações com o objetivo de propiciar um meio onde os gerentes de projeto poderiam compartilhar informações e discutir problemas em comum. Estas instituições foram aos poucos, consolidando um corpo de conhecimentos e práticas de gerenciamento de projetos com foco no cronograma, orçamento e gerenciamento dos mesmos.

Desde 1965 a *International Project Management Association* (IPMA) tornou-se a primeira organização internacional com objetivo de desenvolver competências em gerenciamento de projetos, publicando em 1998 o seu guia em gerenciamento de projetos, o *International Competence Baseline* (ICB), o qual enfatiza que utilizando das competências técnicas o gerente de projeto deve entregar às partes interessadas os objetivos do projeto, produzindo os resultados acordados dentro do prazo e orçamento definidos e dentro de parâmetros de risco aceitáveis (IPMA, 2006, 2015).

Muito popular na Europa, o *Project in Controlled Enviroment* (PRINCE2) foi lançado pelo governo britânico em 1996 como um método para gerenciamento de projetos. O seu guia de gerenciamento, chamado *Managing Succesfull Projects with PRINCE2*, descreve que a gestão e administração do projeto deve ser realizada através do planejamento, delegação, monitoramento e controle do projeto e que deste modo a função

do gerente de projeto é alcançar os objetivos do projeto dentro do tempo, custo e qualidade/escopo definidos (TURLEY, 2010).

Também muito popular nos Estados Unidos o *Project Management Body Of Knowledge* (PMBOK) de autoria do *Project Management Institute* (PMI), fundado em 1969, é um guia que apresenta diretrizes para o gerenciamento de projetos descrevendo o ciclo de vida do gerenciamento do projeto e os processos que o compõem, o que torna o gerenciamento de projeto, na concepção do guia, a aplicação de ferramentas e técnicas a fim de equilibrar as restrições conflitantes do projeto que são: escopo; qualidade; cronograma; orçamento; recursos; e riscos. (PMI, 2013).

Nota-se, que os guias de gerenciamento de projetos citados trazem como tema central que o gerenciamento de projeto é um processo integrador cujo núcleo está no equilíbrio entre as três dimensões de tempo, custo e produção (escopo) designadas como objetivos do projeto. Estas dimensões constituem o termo que em 1969 o Dr. Martins Barnes denominou “Triângulo de Ferro”. O desenvolvimento das dimensões custo e escopo tiveram relativa evolução durante os séculos XIV e XVIII respectivamente, porém medidas efetivas de controle do tempo somente apareceram à partir dos anos de 1960 com o desenvolvimento do CPM. O método do caminho crítico foi desenvolvido à partir dos esforços da Pesquisa Operacional, cujo desenvolvimento foi impulsionado pelo surgimento dos computadores (WEAVER, 2007).

Contudo, os conceitos de “agendamento” ou “programação” de atividades em projeto são provavelmente tão antigos quanto às grandes construções da antiguidade como, por exemplo, as pirâmides do Egito Antigo, pois de fato nenhuma obra poderia ser cumprida sem um entendimento mínimo da sequência de trabalho a ser realizado. No entanto, somente a partir do Século XIX é que começam a aparecer os primeiros indícios

de alguma sistematização de sequenciamento e agendamento de atividades em projetos (WEAVER, 2012).

A definição do escopo das atividades do projeto é denominada Estrutura Analítica do Projeto (EAP) que decompõem hierarquicamente o projeto de modo que a cada nível descendente as atividades do projeto são mais detalhadas. A EAP constitui um dos primeiros dados de entrada para o desenvolvimento do cronograma do projeto seguida da estimativa de duração das atividades. Posteriormente, o desenvolvimento e o controle do cronograma estão estritamente ligados à utilização de ferramentas e técnicas que possibilitem este trabalho. O guia PMBOK exemplifica algumas ferramentas e técnicas que podem ser utilizadas (apenas uma, ou uma combinação de técnicas e ferramentas) nos processos de gerenciamento de cronograma, conforme se podem destacar (PMI, 2013):

- Para estimar a duração das atividades: opinião especializada, estimativa análoga, estimativa paramétrica, estimativa de três pontos, etc;
- Para o sequenciamento e relacionamento das atividades: Método do Diagrama de Precedência (MDP);
- Para o desenvolvimento do cronograma: Gráfico de Gantt, Método do Caminho Crítico (CPM), diagramas de rede, etc; e
- Para controlar o cronograma: Método da Corrente Crítica e análise de valor agregado.

2.2 Método PERT/CPM

Em 1956, estando a Marinha Americana a desenvolver um projeto balístico que devido a sua complexidade demandava uma ferramenta de organização e controle das

atividades dos projetos, uma equipe da *Du Pont Corporation* liderada por Kelly e Walker desenvolveram um método no qual assumindo que a duração das atividades não varia é capaz de calcular o tempo total para execução do projeto e identificar qual é o caminho mais longo que responde pela duração total do projeto, tal caminho é conhecido como Caminho Crítico (*Critical Path – CP*) e assim, o método é conhecido como Método do Caminho Crítico (*Critical Path Method – CPM*) (D’ONOFRIO, 2017; LASLO; GUREVICH, 2013). Na mesma época a empresa *General Dynamics* e a Marinha Americana desenvolveram um método baseado no CPM que, no entanto introduzia variáveis estatísticas para considerar as incertezas na variação de duração das atividades conhecida hoje como, Técnica de Avaliação e Revisão de Programas (*Program and Evaluation and Review Technique – PERT*) (D’ONOFRIO, 2017; LASLO; GUREVICH, 2013; WYROZĘBSKI; WYROZĘBSKA, 2013).

Segundo Weaver (2012) os gráficos de barra surgiram como as primeiras ferramentas para um gerenciamento sistemático do tempo em projetos de construção, mais tarde denominados gráficos de Gantt. Porém, aos gráficos faltavam as relações lógicas para determinar o fluxo das atividades no desenvolvimento dos projetos de construção, assim quando algum atraso era percebido os gerentes de projeto inundavam todo o projeto com mais recursos tornando-o dispendioso, pois eles não dispunham de nenhuma ferramenta de análise capaz de avaliar quais eram as atividades mais críticas em todo o processo, sendo neste contexto que a partir de 1959 o CPM começa a penetrar nos projetos de construção (D’ONOFRIO, 2017).

Levantamentos de 1974 revelaram que 80% dentre os 400 maiores empreiteiros entrevistados utilizavam o CPM no gerenciamento de cronograma em seus projetos, em 1990 este índice aumentou para 92%, e depois em 2003 já eram 98%. Outros dados deste estudo revelaram que os entrevistados nem sempre utilizavam o CPM em todos os seus

projetos, porém desde 1974 a 1990 este índice obteve acréscimo de 25% de implementação em todos os projetos, assim como também diminuiu o grau de implementação mal sucedido do CPM (D'ONOFRIO, 2017).

Esses levantamentos apresentados revelam a penetração e aceitação do CPM nos projetos de construção, assim como corrobora Galloway (2006a), cuja pesquisa com 430 entrevistados (entre empresas, profissionais e clientes) à cerca da utilização, desenvoltura, vantagens e desvantagens do CPM, indicaram depender sempre de seus cronogramas de CPM para tomar decisões sobre a execução do projeto, e que os mesmos indicaram também ter havido sucesso moderado a alto na obtenção de benefícios tais como:

- Melhor planejamento antes do início do trabalho;
- Melhor conhecimento do projeto;
- Melhor controle do projeto após o trabalho começar;
- Melhoria das comunicações entre a força de trabalho;
- Aumento do controle sobre risco e incerteza;
- Redução de atrasos;
- Minimização de litígios entre o empreiteiro e o proprietário; e
- Efeito psicológico positivo sobre os funcionários.

Dois pontos interessantes na pesquisa de Galloway (2006a) é em primeiro lugar referente ao aumento do controle sobre os riscos e incertezas na duração dos projetos, pois dos entrevistados que indicaram realizar avaliações de risco 75% não usam modelagem e simulação, do contrário, restringem suas avaliações de risco baseadas na programação pelo CPM em cenários “e se” para determinar impactos nas mudanças e atrasos no projeto. Em segundo lugar a minimização de litígios entre o empreiteiro e o proprietário é outro ponto que revela a penetração e as vantagens do CPM, pois em uma reivindicação de extensão de prazo devido a atrasos na entrega do projeto, normalmente

o contratado precisa provar casualidade e responsabilidade para se recuperar por atrasos o que é facilmente explicável a partir da programação CPM.

Assim é que desde a década de 1960 39 decisões legais foram publicadas por tribunais e conselhos baseando suas decisões em cronogramas de CPM, e já em 2003 86% dentre os 400 maiores empreiteiros utilizavam os cronogramas de CPM para fins de reivindicações (D'ONOFRIO, 2017).

Continuando em sua pesquisa, Galloway (2006a) identificou poucas desvantagens com relação ao uso do CPM, mas elas existem e se restringem mais ao campo de domínio da ferramenta, haja vista que 50% dos clientes entrevistados preferiram como técnica de agendamento das atividades do projeto a utilização de gráficos de barra, pois consideraram serem mais fáceis de entender. Também alguns empreiteiros e profissionais não se acharam qualificados para utilizar os *softwares* baseados em programação CPM preferindo a facilidade no uso dos gráficos de barra.

Galloway (2006b) afirma não se surpreender com a falta de domínio da ferramenta CPM por parte dos profissionais, pois em uma pesquisa sobre o ensino do CPM nas universidades espalhas pelos Estados Unidos, Europa e Ásia, a autora citada verificou que há muita ênfase na teoria, e pouco tempo dedicado a prática de elaboração de cronograma baseado no CPM, bem como sobre a importância do Método e também como adaptar o cronograma de CPM à medida que mudanças ocorrem no projeto.

Ainda na mesma pesquisa, Galloway (2006b) concluiu haver uma falta de uniformidade no ensino do CPM, argumentando que este é um fato que serve de raiz para mal entendidos entre as partes de um contrato de projetos de construção com relação ao que é necessário pelo contrato, como a ferramenta pode ser usada para monitorar e controlar um projeto, e também para determinar o atraso e a resolução de disputas durante e após a conclusão do projeto.

Arenales *et al* (2011) definem o CPM como um algoritmo no qual, reconhecendo o relacionamento entre as atividades do projeto e a duração das mesmas, busca resolver os instantes de início e término das atividades do projeto para assim encontrar a sequência mais longa de atividades logicamente conectadas em um cronograma, que define a duração total do projeto. A Figura 1 abaixo representa um tipo de grafo ou rede de projeto a partir do qual se pode determinar o CP.

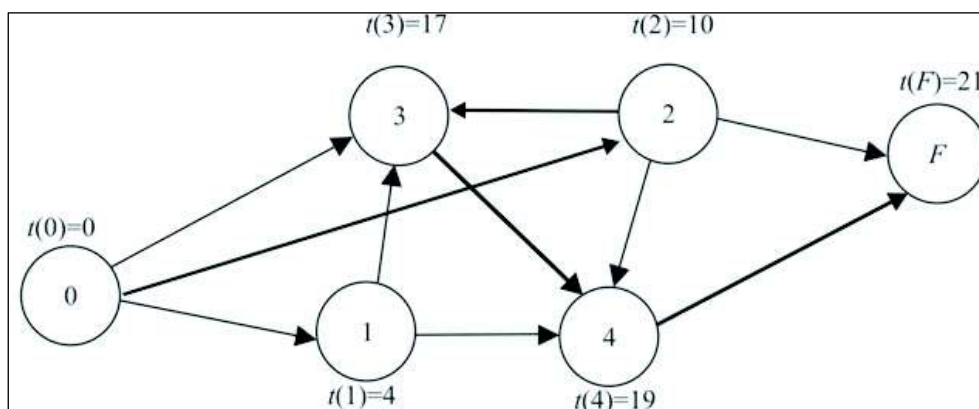


Figura 1 – Exemplo de grafo ou rede de projeto. Fonte: (ARENALES et al., 2011).

Na Figura 1 as setas representam as atividades do projeto cujos módulos indicam a duração das atividades. Os círculos são os nós que indicam o relacionamento entre as atividades e são chamados eventos, os valores de $t(n^{\circ} \text{ evento})$ indicam os instantes de término do evento, o evento termina quando todas as atividades que chegam a um evento terminam e assim a data de término do evento é definida pela atividade ou atividades (caminho) mais longas que chegam ao evento. Consequentemente a data de término do evento Final (F) que representa a data de conclusão do projeto será definida pelo conjunto de atividades mais longas que chegam ao evento, denominado Caminho Crítico (CP). Além de conhecer a duração total do projeto e as atividades que compõem o caminho crítico é possível com o CPM determinar o quanto as atividades não críticas podem atrasar sem afetar a duração total do projeto, ou seja, a folga das atividades não pertencentes ao CP.

2.3 Ferramentas de Representação de Cronograma

Sendo o Método do Caminho Crítico (CPM) um algoritmo, logo sua modelagem é apenas matemática e, portanto, este necessita de uma ferramenta que representando o agendamento das atividades, ou cronograma do projeto, estabeleça também o relacionamento entre as atividades do projeto que servirão de parâmetro para aplicação do CPM.

Tendo revisado historicamente o surgimento dos gráficos de barra Weaver (2012) conta que o surgimento dos gráficos, tal qual são conhecidos, datam pela primeira vez de 1896 com os trabalhos do polonês Karol Adamiecki, um engenheiro, economista e pesquisador da área de gerenciamento que desenvolveu o Harmonograma de Adamiecki que possuía um escala de datas no eixo vertical e no eixo horizontal a lista de atividades do projeto conforme exemplificado na Figura 2.

time	From	-	-	-	A-1	B-1	...
	To	A-2	B-2,C	D-2	A-3	E-1	...
	activity	A-1<4>	B-1<4>	D-1<2>	A-2<4>	B-2<3>	...
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							
11							
12							
13							
14							

Figura 2 – Harmonograma de Adamiecki. Fonte: (WEAVER, 2012).

Já por volta de 1912 tem se as primeiras notícias que o gráfico de barras moderno já estaria totalmente desenvolvido e em uso pelo menos na Alemanha. Contemporâneo a

esse período os gráficos de Gantt, desenvolvidos pelo engenheiro mecânico Henry L. Gantt, não foram elaborados com a intenção de serem aplicados em projetos com foco na administração do tempo, mas sim em operações contínuas. No entanto, na década de 1930 os gestores de projetos começaram a se referirem erroneamente a qualquer gráfico de escala temporal como sendo um gráfico de Gantt.

Apesar dos gráficos de barras terem um bom aspecto visual e serem de fácil entendimento do cronograma do projeto, estes não representam o relacionamento das atividades e, portanto, para aplicação do CPM outra ferramenta se faz necessária. Desde então a ferramenta mais apropriada tem sido o diagrama de redes do projeto em conjunto com o Método do Diagrama de Precedência (MDP), conforme ilustra a Figura 3.

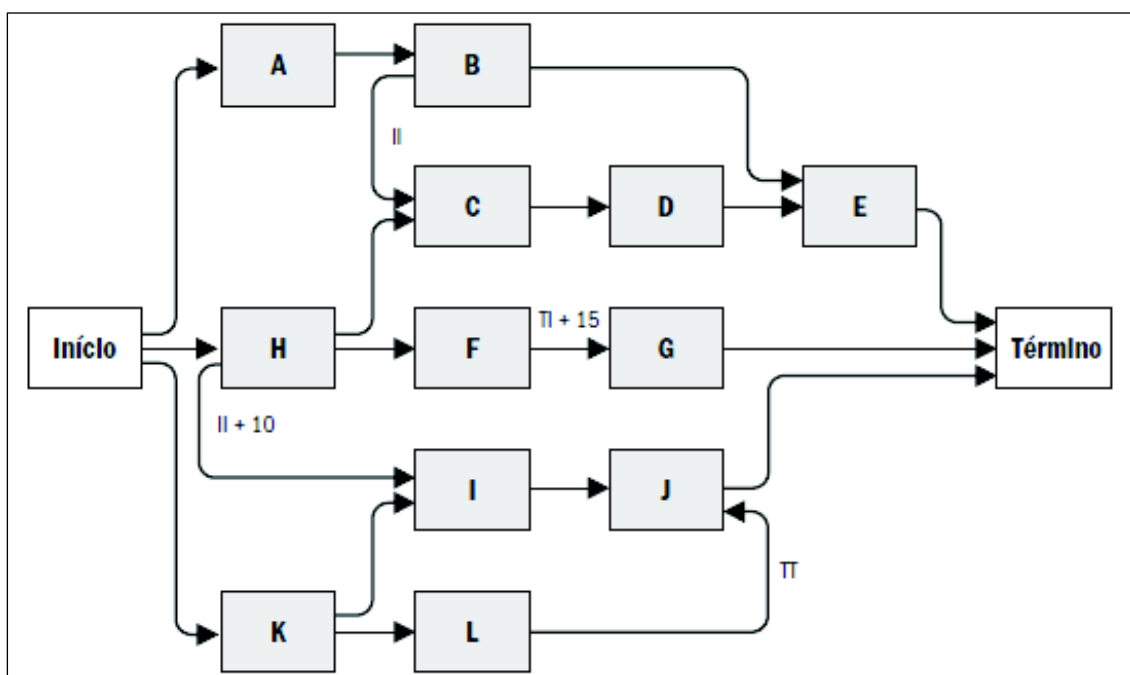


Figura 3 – Exemplo de Diagrama de Precedência do projeto. Fonte: (PMI, 2013).

Conforme demonstrado pela Figura 3 o diagrama de redes é uma representação gráfica das relações lógicas entre as atividades do projeto, que são definidas pelo MDP. Este Método estabelece dependência entre as atividades por meio dos conceitos de atividade predecessora, ou seja, uma atividade cuja execução precede a execução de outra

atividade; e atividade sucessora, ou seja, uma atividade que sucede a execução de outra atividade. Mais ainda, a dependência entre as atividades é sempre estabelecida por um entre os quatro tipos de relacionamento existentes, ou seja, modos distintos desta dependência ocorrer, designados como segue (GÁLVEZ et al., 2016; PMI, 2013):

- *Finish-Start* (FS) a sucessora inicia quando a predecessora termina;
- *Start-Finish* (SF) a sucessora termina quando a predecessora inicia;
- *Finish-Finish* (FF) a sucessora termina quando predecessora termina; e
- *Start-Start* (SS) a sucessora inicia quando a predecessora inicia.

2.4 Matriz de Estrutura de Dependência

Diferente dos grafos ou redes, outra maneira de representar um projeto descrevendo as suas atividades com a duração e relacionamento entre elas, e também poder calcular o caminho crítico, é por meio de uma Matriz de Estrutura do Projeto (*Design Structure Matrix* – DSM) conhecida também como Matriz de Estrutura de Dependência (*Dependency Structure Matrix* – DSM) (BROWNING, 2001). A DSM é uma matriz quadrada de ordem N , tal que N é igual ao número de atividades que compõem o projeto. Na DSM os rótulos de linhas e colunas ordenados respectivamente da mesma forma representam as atividades do projeto, e os vínculos ou relacionamento entre as atividades são representados pelas marcas “x”, ou “0”, ou “1”, assinaladas nas células da matriz, conforme o exemplo da Figura 4 (GUNAWAN, 2012; MAHESWARI; VARGHESE, 2005).

Duração	Atividades	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
6 dias	A	■									
8 dias	B		■		1						
7 dias	C	1		■							
4 dias	D	1			■		1				
9 dias	E		1			■					
1 dias	F	1		1			■				
2 dias	G						1	■			1
10 dias	H								■	1	
5 dias	I				1	1		1		■	
3 dias	J		1				1				■

Figura 4 – Modelo de Matriz de Estrutura de Dependência (DSM). Fonte: Adaptado de (GÁLVEZ; ORDIERES; CAPUZ-RIZO, 2015).

Na Figura 4 a leitura da matriz é realizada de modo a conhecer o relacionamento entre as atividades, assim tomando como exemplo a atividade B verifica-se na linha de B que a marca “1” assinalada na célula (B;D) indica que a atividade D é predecessora de B. Em outro exemplo fixando-se na coluna da atividade C verifica-se que a marca “1” assinalada na célula (F;C) indica que a atividade F é sucessora de C. Assim, conforme genericamente explanado por Steward (1981) uma marca assinalada em uma linha “i” coluna “j”, indica que a atividade da coluna “j” é predecessora da atividade da linha “i”, ou, ao contrário que a atividade da linha “i” é sucessora da atividade da coluna “j”. Na coluna “Duração” estão estabelecidas as durações das atividades A à J.

Como se vê a DSM é uma ferramenta compacta que permite visualizar de forma condensada todas as informações pertinentes ao gerenciamento de projetos: atividades; duração; e dependência entre as atividades. Em se tratando de dependência há três tipos de dependência entre as atividades que a DSM é capaz de analisar sendo elas (GÁLVEZ; CAPUZ-RIZO; ORDIERES, 2012):

- Sequencial – na qual as atividades são dependentes entre si de modo que uma é predecessora enquanto a outra é sucessora;
- Paralela – na qual as atividades são independentes entre si não havendo relação de predecessora/sucessora; e
- Acoplada – na qual as atividades são interdependentes de modo que a relação predecessora/sucessora ocorre como uma referência circular.

Estas relações de dependência são mais bem visualizadas na Figura 5 abaixo.

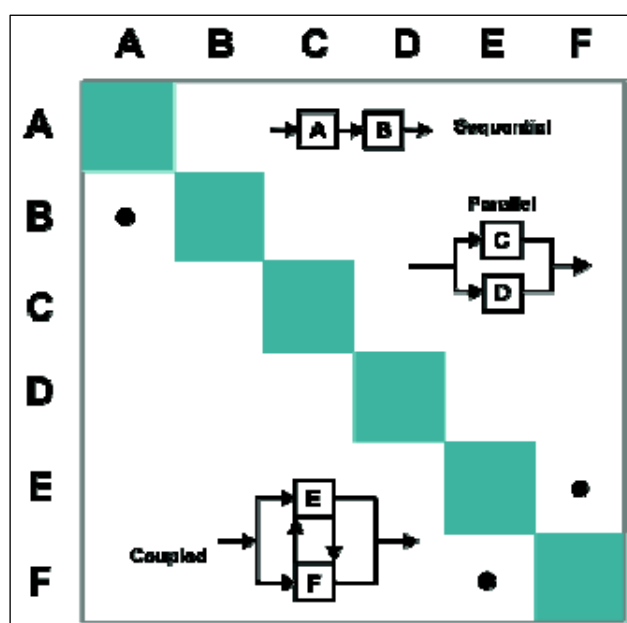


Figura 5 – Representação gráfica das dependências das atividades na DSM. Fonte: (GÁLVEZ; CAPUZ-RIZO; ORDIERES, 2012).

Na Figura 5 verifica-se que as atividades A e B são do tipo sequencial, pois a marca “•” sinalizada na célula (B;A) indica que a atividade A é predecessora de B enquanto B é sucessora de A. As atividades C e D são atividades paralelas o que se nota pela ausência de marcas que relacionem as atividades. Enquanto que as atividades E e F são do tipo acopladas pois as marcas nas células (E;F) e (F;E) indicam que a atividade E é ao mesmo tempo predecessora e sucessora de F e vice-versa, ou seja, como uma referência circular.

Apesar de ser uma ferramenta compacta e poderosa para o gerenciamento de projeto a DSM não substitui o Método do Caminho Crítico (CPM), mas pode ser utilizada para fornecer uma análise preliminar e também informações para cálculo do Caminho Crítico (CP). Assim, destaca-se entre as vantagens para utilização da DSM: em primeiro lugar a sua capacidade de condensar e simplificar a informação para análise e visualização total em uma única tomada, superando a complexidade visual dos grafos ou redes do CPM; em segundo lugar as matrizes são fáceis de manipular e armazenar em computador; e em terceiro lugar a modelagem DSM tem sido muito utilizada por pesquisadores como ferramenta de cronograma e gerenciamento de projetos. (CHEN; LING; CHEN, 2003; MAHESWARI; VARGHESE, 2005).

A fim de propiciar análise e melhorar o planejamento, execução e gerenciamento de projetos complexos diferentes algoritmos são aplicados como: particionamento; clustering; tearing; banding; simulação; e análise de valor próprio (GUNAWAN; AHSAN, 2010). Segundo Maheswari e Varghese (2005) o particionamento é o processo de rearranjar a ordem das atividades movimentando inteiramente as linhas e colunas da matriz, de tal forma que movendo uma linha para cima a sua respectiva coluna deve movimentar-se na mesma proporção para a esquerda, ou movendo uma linha para baixo a sua respectiva coluna deve movimentar-se na mesma proporção para a direita. O objetivo do particionamento é fazer com que as células marcadas fiquem posicionadas abaixo ou próxima da diagonal reduzindo a matriz a uma forma triangular inferior (GÁLVEZ; ORDIERES; CAPUZ-RIZO, 2015; GUNAWAN, 2012; MAHESWARI; VARGHESE, 2005).

2.5 Simulação e Modelagem

Neste trabalho a simulação será tomada como um ensaio, teste ou experiência de funcionamento de um sistema à partir da operação de um modelo representativo do sistema, assim cabe discutir sobre os conceitos de sistema e modelo. Sistema pode ser definido com um conjunto de partes que operam em consonância para alcançar um objetivo comum, logo o modelo é uma simplificação ou representação do sistema que se assemelha ao seu funcionamento, assim o modelo é uma abstração da realidade, e é tanto mais fidedigna quanto melhor capturar o âmago do sistema. Os modelos podem ser simbólicos os quais são modelos estáticos que geralmente não fornecem elementos quantitativos e representam o sistema por meio de símbolos gráficos, e há também os modelos matemáticos que visam representar as leis que regem um sistema por meio de relações matemáticas (CHWIF; MEDINA, 2015).

No campo da pesquisa operacional a modelagem matemática compreende aspectos objetivos com respeito às técnicas matemáticas mais utilizadas e, subjetivos no que diz respeito à criatividade e experiência de quem está realizando o processo de modelagem. Quanto ao processo de modelagem, para melhor entendimento, este pode ser decomposto em 5 fases conforme segue (ARENALES et al., 2011):

- **Fase 1** – esta é a fase de observações, estudo e compreensão do sistema, a fim de definir então o escopo do problema;
- **Fase 2** – esta pode ser denominada de fase de formulação ou propriamente de modelagem do problema, pois é o momento em que as variáveis são definidas e também as relações matemáticas que representam da maneira mais relevante o funcionamento do sistema;
- **Fase 3** – as duas primeiras fases podem ser entendidas como um momento de concepção do modelo, porém esta é a fase de implementação, na qual se decide

sobre as ferramentas, técnicas, métodos e outras tecnologias que serão aplicadas para resolver o modelo;

- **Fase 4** – esta é uma fase de análise, interpretação e julgamento do modelo, também pode ser denominado de uma fase de validação do modelo, pois neste momento é que se verifica com base nos resultados gerados se o modelo proposto representa adequadamente o sistema e é capaz de prever o seu comportamento;
- **Fase 5** – esta é a fase em que as soluções geradas pelo modelo apoiam o processo de tomada de decisões sobre o sistema, podendo assim ser denominada de fase de implementação da solução.

No quesito apoio à tomada de decisão é que a simulação e modelagem de problemas têm sido percebidas como uma ferramenta confiável para aplicação ao gerenciamento de projetos, no entanto vale notar que a qualidade das soluções obtidas pelo modelo depende não só da precisão com que o modelo reflete o sistema, mas também da qualidade dos dados de entrada no modelo (ARENALES et al., 2011; LEAL; OLIVEIRA, 2011).

Dentre as categorias de simulação têm ganhado especial destaque no gerenciamento de projetos de construção, para apoiar as tomadas de decisão quanto aos riscos de prazo e de custo, a Simulação de Eventos Discretos, a qual é utilizada para modelos cujo estado deste muda em momentos discretos no tempo, e também a Simulação de Monte Carlo (SMC) cujas variáveis são geradas aleatoriamente para simular modelos matemáticos (CHWIF; MEDINA, 2015; LEAL; OLIVEIRA, 2011).

2.6 Simulação de Monte Carlo

Segundo Williams (2004) a Simulação de Monte Carlo (SMC) em redes de projetos é uma técnica estatística utilizada por gerentes de projeto e analistas, que tem se mostrado uma adição à caixa de ferramentas da análise de projetos, permitindo modelar combinações complexas de incertezas para mostrar o risco para os prazos do projeto. Para Kwak e Ingall (2009) a SMC é qualquer técnica de amostragem estatística que pode ser empregada para obter soluções aproximadas de problemas quantitativos. Barreras (2011) expõe que a SMC é um método usado para analisar incertezas. Também Robert (2016) define que a SMC é um meio de resolver um problema determinístico por aproximação, tal como integração ou otimização, utilizando números aleatórios.

Todas as definições convergem para o aspecto de que a SMC é uma técnica estatística que utiliza números aleatórios na solução de problemas e auxilia no apoio a tomada de decisões analisando o desempenho cumulativo de processos em ambientes sujeitos a fatores de risco. No entanto, o uso de métodos estatísticos no gerenciamento de projeto de construção não é uma exclusividade da SMC, pois o método PERT foi o primeiro método a introduzir componentes estatísticos ao planejamento de projeto para avaliar o impacto dos riscos e das incertezas no projeto, assumindo que os valores de duração das atividades não são certos e que podem variar segundo uma distribuição de probabilidades.

Porém, diferente do Método do Caminho Crítico (CPM) que toma a duração das atividades por um valor fixo determinado, o método PERT considera que a duração esperada das atividades do projeto é a média de três parâmetros segundo uma distribuição de probabilidade, cujas distribuições são normalmente uma distribuição Beta ou Triangular, e os três parâmetros são estimativas de duração das atividades em que: (a) é a duração otimista da atividade, correspondente ao cenário mais favorável; (m) é a

duração mais provável da atividade, correspondente ao cenário mais típico e dominante; e (b) é a duração pessimista da atividade, correspondente ao cenário desfavorável. Deste modo, assim como a duração total do projeto pode ser calculada pela soma das durações médias esperadas das atividades críticas do projeto, também a variância da duração total é a soma da variância na duração das atividades críticas, logo utilizando tabelas de distribuição estatística normal padrão se pode calcular a probabilidade de conclusão do projeto no tempo especificado (WYROZĘBSKI; WYROZĘBSKA, 2013).

Contudo, o Método PERT trazia consigo premissas que Van Slyke (1963) julgou inadequadas e que, portanto, invalidavam o modelo PERT. A primeira premissa era supor que existia um único Caminho Crítico (CP) para o projeto, quando devido a variação da duração das atividades outros caminhos poderiam se tornar críticos. A segunda premissa era a suposição de que o CP possuía atividades suficientes para satisfazer o Teorema do Limite Central a ponto de que, fazendo uso de tabelas de distribuição estatística normal padrão se pudesse calcular a probabilidade de conclusão do projeto no tempo especificado. Assim, tendo demonstrado a falibilidade dessas premissas é que Van Slyke (1963) propõe a SMC como uma técnica estatística para avaliação de desempenho cumulativo das incertezas em processos de projetos.

Para aplicar a SMC é necessário implementar um algoritmo, denominado algoritmo de Monte Carlo, que em termos gerais possui as seguintes características (ROBERT, 2016):

- 1 - Há muitas repetições de um processo simples, denominadas iterações, que geram resultados para uma análise estatística descritiva de desempenho total do modelo e permita inferir medidas de sensibilidade;
- 2 - O funcionamento do algoritmo requer uma fonte geradora de números aleatórios uniformes; e

- 3 - Os resultados da SMC são sempre uma aproximação, logo existe um erro que deve ser considerado.

2.6.1 Resultados de Monte Carlo e Medidas de Sensibilidade

Em uma Simulação de Monte Carlo (SMC) milhares de iterações do modelo são realizadas, gerando uma amostra de resultados cujo histograma segundo o Teorema do Limite Central se ajusta adequadamente a curva de distribuição de densidade de probabilidades normal, a partir da qual se pode gerar uma curva de distribuição de probabilidade acumulada que permite ao gerente de projeto, com relação a dimensão do tempo, responder a importantes questões que são: qual a probabilidade de que o projeto seja concluído na data especificada; e qual deve ser a reserva adicional, ou contingência, de tempo necessária para que o projeto seja concluído com uma probabilidade de sucesso X% (WYROŻEBSKI; WYROŻEBSKA, 2013).

Desde Van Slyke, outros autores que o sucederam contribuíram para o estudo da aplicação da SMC como ferramenta de apoio à tomada de decisão, propondo medidas de sensibilidade para avaliar a importância de uma atividade ou processo dentro do projeto, de modo que ações mais direcionadas possam ser tomadas para efetivamente controlar o cronograma do projeto (HU et al., 2016).

Van Slyke (1963) ao demonstrar a falibilidade das premissas PERT verificou que durante a SMC outros Caminhos Críticos (CP) podem ocorrer e, portanto, não fazia mais sentido em se falar de CP, mas sim em criticalidade ou criticidade da atividade, definindo assim o Índice de Criticalidade (*Criticality Index* – CI) como sendo a probabilidade da atividade tornar-se crítica, expressando o resultado de CI pela Equação (1).

$$CI = \left(\frac{Qtd. \text{repetições } CP}{Qtd. \text{de iterações}} \right) \times 100\% \quad (1)$$

Williams (1992) definiu o Índice de Crucialidade (*Cruciality Index* – CRI) como sendo a medida que expressa o impacto de uma atividade no resultado total do projeto, expressando o resultado de CRI pelo módulo da correlação entre a duração de uma atividade e a duração total do projeto. O PMBOK (2008, apud HU et al., 2016) combina os dois índices anteriores a fim de expressar um grau de importância que a atividade possui dentro do cronograma, denominado Índice de Sensibilidade (*Sensitivity Index* – SI), expressado pela Equação (2).

$$SI = CI * CRI \quad (2)$$

Graves (2001) observou que é comum a utilização de distribuições de probabilidade do tipo Beta ou Triangular, ambas parametrizadas por uma estimativa de três pontos considerada: otimista (a); mais provável (m); e pessimista (b). Graves denominou estas distribuições de distribuições fechadas, e sugeriu o uso de distribuições abertas, tal como normal ou log-normal, por acreditar que as distribuições abertas resguardam uma probabilidade de que as durações das atividades extrapolem o máximo considerado pessimista (b). Assim, Graves conclui que alterações nas distribuições de probabilidade das tarefas causam relativo impacto no resultado final da simulação.

2.6.2 Gerador de Números Aleatórios

Atualmente as fontes geradoras de números aleatórios são algoritmos que trabalham de modo determinístico gerando valores pseudoaleatórios, denominados assim em razão da possibilidade de reprodução, o que faz dos números pseudoaleatórios

números reais, uniformemente distribuídos num intervalo de $[0,1]$, e gerados por um processo determinístico (algoritmo) (BARRY, 1996; DECKER, 1991).

A qualidade de uma sequência de números aleatórios pode ser dada pelas seguintes características: a periodicidade da sequência deve ser muito maior do que o tamanho da amostra desejada; a sequência deve possuir uma distribuição uniforme; as sequências devem ser estatisticamente independentes; reprodutibilidade; e geração rápida e barata. (BARRY, 1996; DECKER, 1991).

Assim é de vital importância testar o gerador de números aleatórios quanto aos aspectos citados sendo que os mais importantes são: verificar se a sequência é uniformemente distribuída; e testar sua independência estatística. Isto pode ser realizado de duas formas: uma forma empírica é aplicar um teste estatístico a posteriori sobre os valores da sequência gerada; e outra forma teórica é um teste a priori, baseado em uma análise matemática sobre o algoritmo de geração da sequência (BARRY, 1996).

Assim como este trabalho é inteiramente elaborado em Excel deve-se conhecer o gerador randômico do *software* e como tal, ao consultar o site do fabricante a descrição do gerador é o algoritmo AS 183 de Wichmann-Hill, segundo o qual é capaz de gerar uma sequência cujo ciclo excede $2,78 \times 10^{13}$ (MICROSOFT, 2017).

2.6.3 Erro de Monte Carlo

A abordagem PERT ao analisar as probabilidades de risco de atraso em projetos, considera que as atividades que compõem o Caminho Crítico (CP) analisado são suficientemente numerosas de modo que o Teorema do Limite Central pode ser aplicado, no entanto nenhum cálculo é realizado sobre a quantidade necessária de atividades para

aplicação do método PERT tornando este inapropriado para um projeto com poucas atividades (VAN SLYKE, 1963; WYROZĘBSKI; WYROZĘBSKA, 2013).

Segundo o Teorema do Limite Central, uma função de distribuição acumulada (cdf) de uma soma de variáveis aleatórias independentes aproxima-se de uma cdf normal, independente da distribuição de probabilidade de cada variável aleatória, para um número considerável de variáveis aleatórias sob pena de tornar a simulação sem efeito, assim o erro associado à resposta deve refletir a hipótese do Teorema. Assim, na Simulação de Monte Carlo (SMC) as N sucessivas iterações do modelo geram uma amostra de resultados referente a duração total do projeto que devem ser testadas contra um modelo estatístico, que vem a ser na verdade uma distribuição de probabilidade para o risco de atraso no cronograma do projeto, assim o tamanho ideal da amostra, consequência da quantidade de iterações, deve refletir segundo o Teorema do Limite Central um curva normal para responder o risco de atraso do projeto (ROBERT, 2016).

2.7 A Técnica de Reamostragem Bootstrap

Em muitos problemas práticos não é possível obter um número suficiente de amostras que permitam deduzir o comportamento estatístico do fenômeno estudado; inviabilizado por exemplo por situações como o alto custo dos experimentos, ou em razão da não existência de outras amostras viáveis. Qualquer que seja o motivo que dificulte ou impeça a obtenção de um conjunto amostral substancialmente grande para avaliação do comportamento estatístico do fenômeno em estudo este problema pode ser contornado pelo uso de técnicas de reamostragem (SILVA FILHO, 2010).

A técnica de reamostragem Bootstrap proposta por Efron e Tibshirani (1986) pode ser aplicável para os casos em que se deseja conhecer a distribuição da população, pois

baseia-se no princípio de que a distribuição das médias amostrais possui a mesma distribuição da população, apesar de seus parâmetros estarem centrados na média da população. A técnica de Bootstrap possui duas formas de aplicação denominadas: forma paramétrica que gera reamostras baseadas em uma distribuição de probabilidade conhecida utilizando como parâmetros as estimativas obtidas da amostra mestre (dados originais); e forma não paramétrica (HENDERSON, 2005).

A técnica Bootstrap não paramétrica é a mais utilizada e consiste em obter uma distribuição discreta da amostra mestre de tamanho “n” para então replicar esta mesma amostra por centenas ou milhares de vezes, com o mesmo tamanho “n”, sem acrescentar novos valores e mantendo a mesma distribuição discreta da amostra mestre, assim, cada nova reamostra gerada é denominada amostra Bootstrap. Para realização da reamostragem é utilizado esforço computacional, e o número de reamostras pode ser obtido pela verificação da variação do desvio padrão das médias das reamostras, de modo que quando este valor se estabilizar, então, o tamanho da reamostra Bootstrap estará adequado. A maioria dos autores que utilizaram a técnica Bootstrap em seus trabalhos verificaram que o desvio padrão das médias, denominado erro padrão, tende a estabilizar em 1.000 reamostras (HASHEMI; MOUSAVI; MOJTAHEDI, 2011).

Para a maioria dos casos a distribuição das médias Bootstrap possui aproximadamente a mesma forma e amplitude da distribuição da população, porém está centrada nas estatísticas da amostra mestre, ao passo que a distribuição amostral está centrada nos parâmetros estatísticos da população (SONMEZ, 2008). Desta maneira é possível inferir sobre qual é a forma da distribuição estatística da população à partir de uma pequena amostra mestre, pois utiliza-se das médias das reamostras para estimar como a média amostral, obtida de um conjunto amostral de tamanho “n” extraído da população, varia em razão da amostragem aleatória (SILVA FILHO, 2010).

3. METODOLOGIA

“A imaginação é mais importante que a ciência, porque a ciência é limitada, ao passo que a imaginação abrange o mundo inteiro”.

(Albert Einstein)

3.1 Métodos e Técnicas

Neste capítulo denominado Metodologia são apresentados os procedimentos metodológicos utilizados para alcançar os objetivos propostos nesta pesquisa. Os conceitos apresentados na Revisão Bibliográfica são a base de conhecimento necessária para a realização dos objetivos propostos. Assim, sendo o objetivo desta pesquisa resumidamente proposto como a descrição do comportamento de variabilidade na duração das atividades de projetos de construção civil seguida de uma validação dos resultados baseada em modelagem e simulação é que esta Metodologia se divide em duas etapas.

A primeira etapa desta Metodologia é denominada Estudo de Caso, cujo objetivo é descrever o comportamento de variabilidade de duração das atividades dos projetos estudados por meio dos seguintes passos:

1. Apresentação e descrição dos Estudos de Caso;
2. Obtenção dos dados de produtividade das atividades dos projetos estudados a partir da leitura dos documentos de medição das atividades dos projetos;
3. Reamostragem dos dados pela aplicação da técnica Bootstrap não paramétrico, para descrever a variabilidade na produtividade das atividades;

4. Parametrização dos dados de produtividade por meio de um teste de aderência baseado em Simulação de Monte Carlo (SMC), transformando-os em parâmetros de duração das atividades.

A segunda etapa desta Metodologia é denominada Modelagem, Implementação e Simulação, cujo objetivo é testar a validade dos resultados obtidos na primeira etapa através dos seguintes passos:

1. Modelagem matemática do cronograma dos projetos estudados por meio do Método do Caminho Crítico (CPM);
2. Modelagem gráfica do cronograma dos projetos estudados por meio da Matriz de Estrutura de Dependência (DSM);
3. Implementação do modelo de cronograma dos projetos no ambiente do *software* Excel juntando as modelagens CPM e DSM;
4. Desenvolvimento do algoritmo de simulação, alimentação do modelo com os resultados da primeira etapa e simulação dos modelos.

3.2 Estudo de Caso

Os estudos realizados nesta dissertação podem ser aplicados a qualquer tipo de projeto, no entanto a aplicação dos estudos discutidos neste trabalho se limitou a projetos de construção civil referente a obras prediais cujas características construtivas básicas são: obra térrea com área construída de aproximadamente 900,00 m²; fundações do tipo rasa; estrutura convencional de concreto armado moldada in loco; vedações predominantemente em alvenaria de tijolo cerâmico; revestimento habituais de mercado e sistemas de instalações prediais cujo domínio da tecnologia está bastante disseminada

no mercado. A Tabela 1 descreve as principais atividades dos projetos e suas respectivas quantidades de serviço.

Tabela 1 – Apresentação e descrição dos Estudos de Caso.

Atividades	Descrição das Atividades	Unidade	Projeto 1	Projeto 2	Projeto 3
			Quantidade	Quantidade	Quantidade
A1	LOCAÇÃO DA OBRA	m2	982,00	853,50	957,49
A2	INSTALAÇÃO DO CANTEIRO	m2	285,42	367,00	212,93
A3	TERRAPLENAGEM	m3	555,66	1.500,00	1.800,00
A4	FUNDAÇÕES	m3	157,36	68,57	57,60
A5	ESTRUTURA DE CONCRETO ARMADO	m3	129,93	208,42	214,79
A6	ESTRUTURA METÁLICA	kg	6.167,35	10.138,00	11.098,00
A7	ALVENARIA	m2	1.233,80	1.066,82	1.623,15
A8	DIVISÓRIAS EM GRANITO	m2	25,10	14,76	13,59
A9	ESQUADRIAS DE ALUMÍNIO (JANELAS)	m2	105,05	156,75	119,67
A10	ESQUADRIAS DE MADEIRA (PORTAS)	m2	69,35	56,24	65,79
A11	VIDROS	m2	105,05	164,75	138,15
A12	COBERTURA	m2	1.007,23	1.004,28	1.015,01
A13	IMPERMEABILIZAÇÃO DE FUNDAÇÕES	m2	540,80	277,20	548,93
A14	IMPERMEABILIZAÇÃO DE LAJE	m2	137,30	122,90	157,76
A15	FORROS EM GESSO	m2	868,14	932,73	965,47
A16	REVESTIMENTO CERÂMICO (PAREDE)	m2	3.584,60	2.585,20	4.106,40
A17	PISOS	m2	740,71	772,71	836,43
A18	INSTALAÇÕES HIDROSSANITÁRIAS	m	921,00	878,00	2.595,45
A19	INSTALAÇÃO ELÉTRICA	pto	510,00	432,00	1.260,00
A20	INSTALAÇÃO DE LÓGICA E TELEFONIA	pto	239,00	236,00	492,00
A21	INSTALAÇÃO DE ALARME	pto	29,00	18,00	32,00
A22	INSTALAÇÃO DE SPDA	pto	53,00	89,00	47,00
A23	INSTALAÇÃO DE AR-CONDICIONADO	pto	72,00	19,00	71,00
A24	PAISAGISMO E URBANIZAÇÃO	m2	327,63	1.040,97	0,00
A25	PINTURA	m2	3.114,93	2.597,10	4.887,20
A26	LOUÇAS E METAIS	pto	158,00	149,00	310,00
A27	BRISES	m2	120,85	17,76	189,98
A28	LIMPEZA E ENTREGA DE OBRA	m2	982,00	853,50	957,49

Fonte: Elaborado pelo Autor.

3.2.1 Coleta de Dados

Para realizar a coleta de dados foram tomadas as planilhas de medição das atividades de cada projeto, das quais tomou-se nota da variação na percentagem de execução das atividades durante o período de realização destas. Então, conhecendo o número de dias úteis (dd) do período de execução e medição da atividade, relacionando com a respectiva quantidade apresentada na Tabela 1 obtêm-se a produtividade,

expressada em unidades de serviço por dia (und/dia), para cada atividade através da Equação (3).

$$Produtividade = \frac{(\%)executado \times Qtd. Serviço}{dd} \quad (3)$$

A seguir, a Tabela 2 demonstra o procedimento de cálculo dos dados de produtividade para a atividade A5 (ESTRUTURA DE CONCRETO ARMADO) para cada um dos projetos estudados. Os valores de percentual executado e dias úteis foram obtidos dos documentos de medição e acompanhamento de serviços das obras.

Tabela 2 – Procedimento de coleta de dados de produtividade.

PROJETO	ATIVIDADE	UNID.	QUANT.
Projeto 1	A5	m3	129,93
Medição	(%) Executado	Dias Úteis (dd)	Produtividade
1	31%	20	2,01
2	69%	27	3,32

PROJETO	ATIVIDADE	UNID.	QUANT.
Projeto 2	A5	m3	208,42
Medição	(%) Executado	Dias Úteis (dd)	Produtividade
1	18%	18	2,08
2	32%	22	3,03
3	50%	22	4,74

PROJETO	ATIVIDADE	UNID.	QUANT.
Projeto 3	A5	m3	214,79
Medição	(%) Executado	Dias Úteis (dd)	Produtividade
1	31%	25	2,66
2	41%	31	2,84
3	28%	16	3,76

Fonte: Elaborado pelo Autor.

O procedimento exemplificado através da atividade A5, demonstrado na Tabela 2, foi realizado para todas as atividades descritas na Tabela 1, cujos dados de produtividade das atividades são demonstrados na Tabela 3.

Tabela 3 – Dados de produtividade das atividades.

Atividades	Amostra	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9	x10	x11	x12	x13	x14	x15	x16	x17	x18	x19	
A1	(m2/d)	21,19	32,24	54,44	61,08	73,20	82,11	106,52													
A2	(m2/d)	11,40	13,20	13,93	14,13	18,36	18,99														
A3	(m3/d)	15,81	31,50	37,07	37,63	37,87	38,45	43,73	48,84												
A4	(m3/d)	1,24	1,41	1,49	1,84	1,85	2,73	2,86													
A5	(m3/d)	2,01	2,08	2,66	2,84	3,03	3,32	3,76	4,74												
A6	(kg/d)	161,29	211,39	277,45	299,53	308,37															
A7	(m2/d)	20,09	21,03	30,63	31,52	32,36	50,95	51,69	52,64												
A8	(m2/d)	1,10	1,15	1,42	1,42	1,63	2,12	2,35													
A9	(m2/d)	3,72	3,96	4,23	4,78	5,45	5,54	7,14	7,84												
A10	(m2/d)	2,84	2,85	3,33	5,24	5,91	6,96	8,15													
A11	(m2/d)	4,08	10,85	11,36	12,55	17,82	17,93	18,71													
A12	(m2/d)	14,67	19,07	26,98	32,49	32,84	40,30	49,03													
A13	(m2/d)	8,57	16,89	16,29	23,57	23,81	27,87														
A14	(m2/d)	4,53	8,72	9,11	15,75	16,19	17,70														
A15	(m2/d)	11,02	13,17	13,32	17,36	20,52	23,68	32,18													
A16	(m2/d)	26,25	26,98	26,98	29,33	30,09	30,83	30,83	36,79	40,67	42,05	42,22	42,39	56,65	57,80	58,67	77,07				
A17	(m2/d)	8,77	8,81	10,24	10,42	10,86	10,87	15,18	15,79	16,40	17,68										
A18	(m/d)	8,51	8,74	9,02	11,00	11,03	11,25	12,75	13,22	14,25	14,96	20,50	20,95	22,17	22,20	23,38					
A19	(pto/d)	1,19	2,28	3,97	4,26	4,37	4,67	5,26	5,52	5,94	6,09	6,24	6,48	6,53	6,68	7,37	7,72	7,75	8,91	8,92	
A20	(pto/d)	2,01	3,16	3,46	3,73	4,50	5,38	5,82	5,90	6,45	7,80	10,03	10,35								
A21	(pto/d)	2,08	2,21	2,31	2,81	2,88	3,40	3,76	3,84	4,33	4,37										
A22	(pto/d)	1,08	1,63	2,05	2,21	2,21	2,62	2,68													
A23	(pto/d)	0,22	0,70	0,72	0,95	1,07	1,18	1,30	1,44												
A24	(m2/d)	16,03	19,86	21,88	23,17	24,33															
A25	(m2/d)	34,89	35,42	38,21	40,12	41,57	42,54	43,29	45,85	50,94	56,04	57,87	58,58	65,50	70,84	73,55					
A26	(pto/d)	2,43	2,50	2,87	2,95	3,10	3,23	3,74	4,51	4,67											
A27	(m2/d)	1,85	2,63	2,75	3,59	3,73	3,77	4,71	4,81												
A28	(m2/d)	20,99	22,92	32,14	34,38	34,61	36,12	38,57	59,34	60,17	60,75										

Fonte: Elaborado pelo Autor.

A Tabela 3 mostra os dados de produtividade que foram possíveis de obter, para cada uma das atividades analisando os Estudos de Caso apresentados, conforme o procedimento exemplificado na Tabela 2. O próximo passo é realizar a reamostragem das amostras x“n” de produtividade das atividades.

3.2.2 Reamostragem dos Dados

Antes de submeter as amostras à técnica de Bootstrap foram analisadas as ocorrências de “outliers”, dos quais pouquíssimos foram identificados e optou-se por não retirá-los, uma vez que sua ocorrência representa um problema típico do projeto mesmo que tenha baixa probabilidade de manifestar-se.

Para operação da técnica Bootstrap foi utilizado o recurso de “Amostragem” do *software* Excel demonstrado na Figura 6.

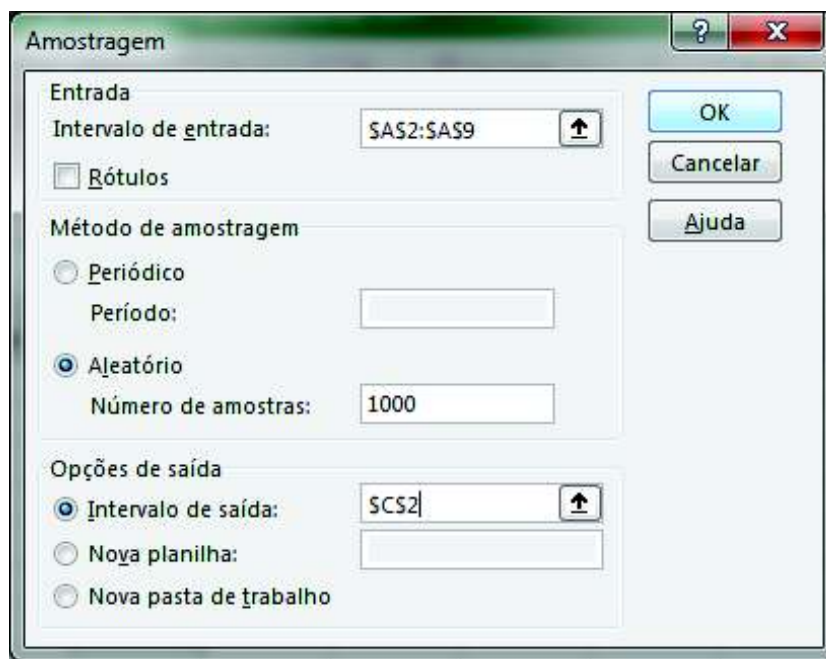


Figura 6 – Recurso computacional para reamostragem dos dados. Fonte: Elaborado pelo Autor

A Figura 6 auxilia no entendimento do *modus operandi* do Bootstrap não paramétrico, de modo que a solicitação de “Intervalo de entrada” é o conjunto amostral

que se quer replicar e o “Método de amostragem” selecionado é “Aleatório” e replicável por 1.000 vezes. Este procedimento deve ser repetido tantas vezes quanto o número de amostras do conjunto.

Para complementar o entendimento desta operação a Tabela 4 demonstra a reamostragem da amostra de produtividade da atividade A5.

Tabela 4 – Reamostragem dos dados de produtividade da atividade A5.

Amostra	Reamostras	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	Média
2,01	BT*1	2,08	4,74	2,84	2,66	2,08	2,08	2,66	2,08	2,65
2,08	BT*2	3,03	2,08	2,66	2,08	3,03	2,01	4,74	3,76	2,92
2,66	BT*3	3,76	4,74	3,76	3,76	2,08	3,76	2,84	2,84	3,44
2,84	BT*4	3,03	2,66	2,08	4,74	2,01	2,08	2,66	2,84	2,76
3,03	BT*5	2,01	2,01	3,32	3,76	2,84	2,84	2,84	2,08	2,71
3,32	BT*6	2,84	3,76	2,66	2,08	2,84	3,03	3,32	2,66	2,90
3,76	BT*7	3,03	3,32	3,32	2,01	4,74	2,01	3,76	3,32	3,19
4,74	BT*8	2,66	2,84	2,01	2,66	3,32	3,03	2,84	2,08	2,68
	BT*9	2,08	2,84	2,66	3,76	3,76	2,66	2,66	2,84	2,91
	BT*10	2,08	4,74	4,74	3,76	2,84	2,66	4,74	2,84	3,55

	BT*1000	3,03	2,01	2,08	2,84	3,76	2,66	2,84	2,84	2,76

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Na Tabela 4, a coluna “Amostra” traz o conjunto amostral de produtividade da atividade A5 que foi replicado por 1.000 vezes por tantas vezes quanto o número de amostras do conjunto, ou seja, cada coluna x“n” repete o procedimento demonstrado na Figura 6. Ao final, cada vetor BT é denominado reamostra Bootstrap que contém o mesmo número de amostras do conjunto original.

Finalmente, de cada reamostra BT é calculada a média, gerando um conjunto com 1.000 amostras de produtividade da atividade, do qual será estudado a variabilidade da produtividade da atividade e inferência da distribuição estatística de duração da atividade.

3.2.3 Parâmetros Estatísticos dos Dados

Cada um dos conjuntos amostrais apresentados na Tabela 3 foram submetidos ao procedimento descrito na subseção 3.2.2. Posteriormente, para cada atividade são calculados parâmetros do conjunto de médias Bootstrap de produtividade das atividades. Os parâmetros calculados são de interesse para geração de valores aleatórios de distribuições estatísticas conhecidas e que serão comparadas à distribuição estatística do conjunto de médias Bootstrap de produtividade das atividades.

Assim, para finalizar esta etapa de metodologia foi desenvolvido um sistema em ambiente Excel conforme demonstrado pela Figura 7, cuja qual apresenta 8 tabelas de frequência sendo 1 para a distribuição EMPÍRICA (distribuição da média Bootstrap de produtividade) e as outras 7 são distribuições estatísticas conhecidas e geradas aleatoriamente, cujas distribuições escolhidas foram a distribuição NORMAL, LOGNORMAL, GAMA, BETA, TRIANGULAR, EXPONENCIAL e STUDENT.

O funcionamento do sistema comparativo de distribuições que a Figura 7 busca demonstrar é a construção de curvas de probabilidade – colunas “Probab.” – a partir de valores gerados aleatoriamente – colunas “Bloco” – obtidos pelos parâmetros estatísticos da distribuição das médias Bootstrap. Após a geração das curvas de probabilidade das distribuições conhecidas estas são comparadas com a curva da distribuição EMPÍRICA através da Equação (4).

$$D(n)^{Dist.Conhecida} = Probab.(n)^{Dist.Conhecida} - Probab.(n)^{Dist.EMPÍR.} \quad (4)$$

Na Equação (4) a variável n refere-se as classes que compõem as curvas de probabilidade demonstradas na Figura 7; D refere-se a distância entre a probabilidade de uma distribuição conhecida ($Dist.Conhecida$) e a probabilidade da distribuição empírica ($Dist.EMPÍR.$).

Classe	NORMAL		LOGNORMAL		GAMA		BETA		TRIANGULAR		EXPONENCIAL		STUDENT		EMPIRICA		
	Bloco	Probab.	Bloco	Probab.	Bloco	Probab.	Bloco	Probab.	Bloco	Probab.	Bloco	Probab.	Bloco	Probab.	Bloco	Probab.	
1	2,39	1%	2,48	2%	2,45	2%	2,53	3%	2,48	4%	1,69	43%	0,28	21%	2,43	1%	
2	2,55	5%	2,65	8%	2,62	7%	2,68	10%	2,65	11%	3,37	67%	0,56	43%	2,61	6%	
3	2,71	12%	2,81	20%	2,78	17%	2,82	21%	2,82	20%	5,06	81%	0,83	60%	2,79	17%	
4	2,87	25%	2,98	41%	2,94	35%	2,97	36%	2,99	34%	6,74	88%	1,11	74%	2,96	39%	
5	3,03	45%	3,15	63%	3,11	56%	3,12	51%	3,15	49%	8,43	93%	1,39	84%	3,14	62%	
6	3,19	67%	3,31	81%	3,27	77%	3,27	69%	3,32	66%	10,11	96%	1,66	90%	3,32	81%	
7	3,35	85%	3,48	92%	3,43	90%	3,42	82%	3,49	79%	11,80	98%	1,94	95%	3,50	92%	
8	3,51	94%	3,64	97%	3,60	96%	3,57	92%	3,66	88%	13,48	98%	2,22	97%	3,67	97%	
9	3,68	98%	3,81	99%	3,76	99%	3,72	97%	3,83	94%	15,17	99%	2,50	98%	3,85	100%	
10	3,84	99%	3,97	100%	3,92	100%	3,87	99%	4,00	98%	16,85	100%	2,77	99%	4,03	100%	
11	4,00	100%	4,14	100%	4,08	100%	4,01	100%	4,17	100%	18,54	100%	3,05	100%	4,21	100%	
	D1	0,00600	D1	0,00900	D1	0,00800	D1	0,01800	D1	0,02700	D1	0,42500	D1	0,19800	D1	0,19800	
	D2	0,01700	D2	0,01600	D2	0,00500	D2	0,03800	D2	0,04700	D2	0,61000	D2	0,36900	D2	0,36900	
	D3	0,04900	D3	0,03400	D3	0,00000	D3	0,04400	D3	0,03400	D3	0,63900	D3	0,43000	D3	0,43000	
	D4	0,13300	D4	0,02000	D4	0,03600	D4	0,02600	D4	0,04100	D4	0,49900	D4	0,35300	D4	0,35300	
	D5	0,17300	D5	0,00900	D5	0,05900	D5	0,10600	D5	0,12600	D5	0,31100	D5	0,22000	D5	0,22000	
	D6	0,14400	D6	0,00100	D6	0,03900	D6	0,12700	D6	0,15800	D6	0,14600	D6	0,08500	D6	0,08500	
	D7	0,07200	D7	0,00400	D7	0,02400	D7	0,10100	D7	0,13800	D7	0,05600	D7	0,02200	D7	0,02200	
	D8	0,03400	D8	0,00300	D8	0,01300	D8	0,05700	D8	0,09800	D8	0,01000	D8	0,00000	D8	0,00000	
	D9	0,01300	D9	0,00700	D9	0,00900	D9	0,02600	D9	0,05500	D9	0,00600	D9	0,01100	D9	0,01100	
	D10	0,00500	D10	0,00400	D10	0,00400	D10	0,00900	D10	0,01900	D10	0,00400	D10	0,00600	D10	0,00600	
	D11	0,00000	D11	0,00000	D11	0,00000	D11	0,00000	D11	0,00000	D11	0,00000	D11	0,00000	D11	0,00000	
	Dmáx	0,17300	Dmáx	0,03400	Dmáx	0,05900	Dmáx	0,12700	Dmáx	0,15800	Dmáx	0,63900	Dmáx	0,43000	Dmáx	0,43000	
																LOGNORMAL	
																Dmín	0,03400

Figura 7 – Sistema comparativo de distribuições estatísticas. Fonte: Elaborado pelo Autor

O gráfico da Figura 8 demonstra o que se deseja comparar no sistema descrito na Figura 7.

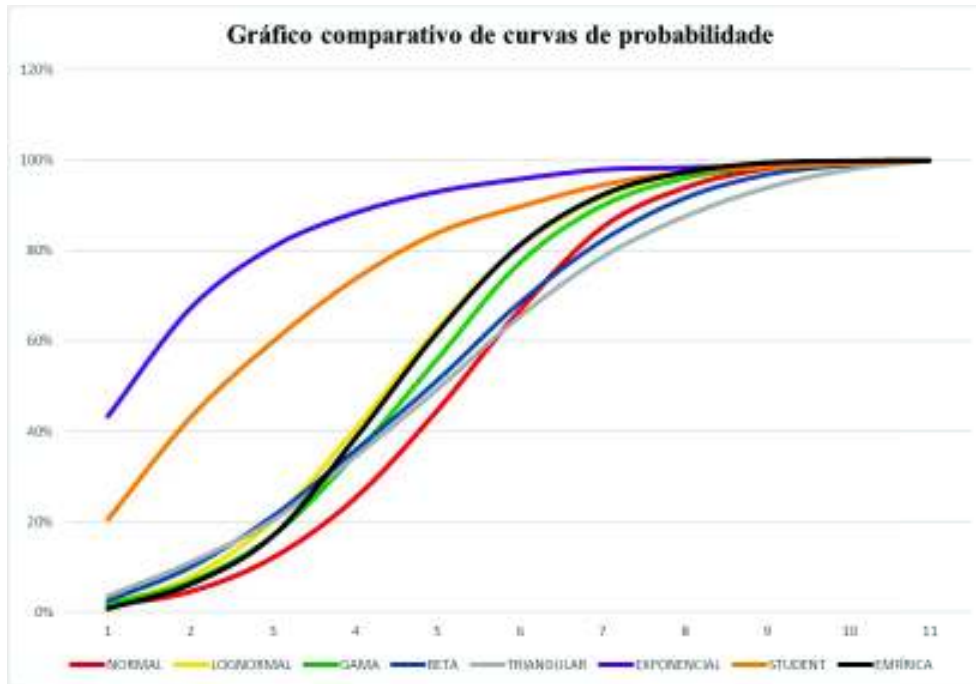


Figura 8 – Gráfico comparativo de curvas de probabilidade. Fonte: Elaborado pelo Autor.

A Figura 7 e Figura 8 foram construídas utilizando os dados da atividade A5. No Gráfico verifica-se que a curva da distribuição EMPÍRICA é bastante similar à curva da distribuição LOGNORMAL. Então, aquilo que se nota visualmente no Gráfico de curvas é expresso matematicamente no sistema da Figura 7 pela Equação (4) em conjunto com as Equações (5) e (6).

$$Dmáx = \max_{1 \leq n \leq 11} D(n) \quad (5)$$

$$Dmín = \min_{Dist.} Dmáx \quad (6)$$

Resumidamente, a distribuição que apresentar o menor valor de $Dmáx$ é aquela que descreve a distribuição EMPÍRICA.

No entanto, os valores de D estão sujeitos a mudanças por que os valores aleatórios das amostras das distribuições conhecidas também o estão. Conseqüentemente, os valores de $D_{\text{máx}}$ e $D_{\text{mín}}$ se alteram, e altera também a distribuição que descreve a amostra de médias Bootstrap. Assim, o sistema da Figura 7 foi submetido a uma Simulação de Monte Carlo (SMC), cujo algoritmo é apresentado no Apêndice F, com a finalidade de inferir a distribuição que descreve a distribuição EMPÍRICA a partir do maior número de ocorrências conforme demonstra a Tabela 5.

Tabela 5 – Resultado da inferência de distribuição estatística.

Ocorrência	Distribuição	Probabilidade
36	NORMAL	4%
712	LOGNORMAL	71%
192	GAMA	19%
24	BETA	2%
36	TRIANGULAR	4%
0	EXPONENCIAL	0%
0	STUDENT	0%
Ocorrência Máxima		712
Distribuição Adequada		LOGNORMAL

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Na SMC do Sistema são realizadas 1.000 iterações cujos resultados avaliam o número de ocorrências de cada uma das distribuições conhecidas, cuja distribuição que apresenta o maior número de ocorrências é inferida como a distribuição que melhor descreve a distribuição EMPÍRICA. Para o exemplo da atividade A5 tratado até então, a distribuição LOGNORMAL apresentou-se como a mais adequada para descrever a sua produtividade conforme demonstra a Tabela 5.

Obtida a forma da distribuição de produtividade das atividades, assume-se que a distribuição de duração das atividades possui a mesma forma e variabilidade da distribuição de produtividade. Então, o próximo passo é calcular os parâmetros de

distribuição de duração das atividades em função das quantidades das atividades para cada um dos projetos estudados, conforme é observado na Figura 9.

PARÂMETROS ESTATÍSTICOS DAS ATIVIDADES				
Atividade	Und	Projeto 1	Projeto 2	Projeto 3
A5	m3	129,93	208,42	214,79
Amostra	1.000,00			
μ	3,06	42,43	68,06	70,14
σ	0,30	4,10	6,58	6,79
CV	9,67%	9,67%	9,67%	9,67%
Var	0,09	16,85	43,35	46,04
$\mu(\log)$	1,11	3,74	4,22	4,25
$\sigma(\log)$	0,10	0,10	0,10	0,10
$\alpha(\text{gama})$	106,87	106,87	106,87	106,87
$\beta(\text{gama})$	0,03	0,40	0,64	0,66
mínimo	2,25	31,66	50,79	52,34
modo	3,05	41,90	67,22	69,27
máximo	4,21	56,29	90,29	93,05
$\alpha(\text{beta})$	3,44	3,50	3,50	3,50
$\beta(\text{beta})$	4,42	4,39	4,39	4,39
λ	0,33	0,02	0,01	0,01
Inflexão	0,40601			

Figura 9 – Quadro de transformação dos parâmetros. Fonte: Elaborado pelo Autor.

O quadro da Figura 9 mostra a sua esquerda os parâmetros estatísticos da atividade A5 calculados do conjunto amostral de médias Bootstrap de produtividade (distribuição EMPÍRICA), e que foram utilizados para geração dos valores aleatórios das distribuições conhecidas. A sua direita estão os parâmetros de duração da atividade A5 transformados em função do quantitativo em cada projeto.

Matematicamente, dizer que a distribuição de duração possui a mesma forma da distribuição de produtividade, alterada em função do quantitativo de serviço, é descrever o parâmetro de tendência central, média (μ), pela Equação (7).

$$\mu_{\text{duração}} = \frac{Qtd}{\mu_{\text{produtividade}}} \quad (7)$$

Da mesma forma, dizer que a variabilidade da duração é igual a variabilidade da produtividade é dizer que ambas possuem o mesmo Coeficiente de Variação (CV). Assim, o Desvio Padrão (σ) da duração pode ser obtida pela Equação (8).

$$CV = \frac{\sigma_{produtividade}}{\mu_{produtividade}} = \frac{\sigma_{duração}}{\mu_{duração}} \quad (8)$$

Também a distribuição BETA e a distribuição TRIANGULAR dependem de parâmetros invariáveis que descrevem as suas variabilidades, sendo eles: α (alpha); β (beta); e Inflexão. Todos os demais parâmetros de produção são obtidos a partir da média e desvio padrão das durações, Equações (7) e (8). Nos Apêndices A, B, C, D e E são apresentados os conjuntos de equações para cálculo dos parâmetros de distribuição, geração dos valores aleatórios das distribuições e mudança dos parâmetros de produtividade em parâmetros de duração das atividades.

3.3 Modelagem, Implementação e Simulação

Nesta seção é realizada a Modelagem, Implementação e Simulação dos Estudos de Caso. Pode se dizer que esta seção engloba as fases 1, 2, e 3 do processo de modelagem e simulação, assim embasado nos métodos, técnicas e ferramentas discutidas na Revisão Bibliográfica os projetos estudados são modelados matematicamente pelo Método do Caminho Crítico (CPM), e modelados graficamente pela Matriz de Estrutura de Dependência (DSM).

A implementação dos modelos é feita computacionalmente empregando o *software* Excel, no qual, utilizando seu ambiente de programação *Visual Basic for Applications* (VBA) é desenvolvido um algoritmo de Monte Carlo para, conseqüentemente, após a parametrização dos dados que alimentarão os modelos gerar

os resultados que serão apresentados e discutidos no capítulo posterior, fases 4 e 5 do processo de modelagem e simulação.

Esta seção segue estruturada em quatro subseções que tratam dos assuntos: modelagem matemática pelo CPM; modelagem gráfica pela DSM; implementação dos modelos utilizando o *software* Excel; e desenvolvimento do algoritmo de Monte Carlo utilizando o VBA para simulação dos modelos.

3.3.1 Modelagem Matemática CPM

Projetos são compostos de atividades que possuem duração e estabelecem dependência sequencial entre si por meio de relações de precedência conforme discutido no item 2.4 da Revisão Bibliográfica pelo Método do Diagrama de Precedência (MDP). No entanto, todos os relacionamentos de atividades estabelecidas pelo MDP podem ser resumidos, por simples lógica ou usando algum artifício, em um único e trivial relacionamento, que é o relacionamento *Finish-Start* (FS) cuja sucessora inicia quando a predecessora termina.

Neste caso, tomando o relacionamento *Start-Start* (SS) para dizer que a sucessora inicia junto com a predecessora por meio do relacionamento FS basta fazer o vínculo da sucessora igual ao vínculo da predecessora. Em outro caso, tomando o relacionamento *Finish-Finish* (FF) para dizer que a sucessora termina junto com a predecessora por meio do relacionamento FS basta fazer da sucessora uma predecessora de uma terceira atividade. E finalmente, para reescrever o relacionamento *Start-Finish* (SF) na forma FS basta inverter a ordem das atividades.

Deste modo, para toda atividade no projeto que possui entre si uma dependência sequencial cujo relacionamento será sempre do tipo FS, e assim, a formulação matemática

do Método do Caminho Crítico (CPM) consiste em encontrar os tempos de início (*Start*) e término (*Finish*) de cada uma das atividades do projeto, pois com estes tempos será possível determinar o caminho crítico e a duração máxima do projeto conforme indicam as Equações (9) e (10).

$$Prazo = Finish - Start \quad (9)$$

$$Prazo - Duração = 0 \quad (10)$$

Assim, as atividades que satisfizerem a Equação (10) serão consideradas atividades sem folga e, portanto, estas são as atividades que compõem o caminho crítico do projeto.

Os tempos de início de uma atividade ($Start_i$) são calculados como sendo o máximo valor do tempo de início da predecessora mais a duração da respectiva predecessora, conforme a Equação (11).

$$Start_i = MÁX(Start_{Predec.} + Duração_{Predec.}) \quad (11)$$

As atividades que não possuem predecessora recebem automaticamente valor nulo ($Start = 0$), assim a sequência de cálculo para todas as atividades inicia-se pelas atividades sem predecessoras.

Os tempos de término das atividades não serão o tempo programado para término como função do início mais duração, mas sim o tempo máximo que a atividade poderá ser concluída. Diferente dos tempos de início que são calculados avançando-se no tempo, os tempos de término são calculados recuando-se no tempo, desta forma os tempos de término de uma atividade ($Finish_i$) são o mínimo valor do tempo de término da sucessora menos a duração da sucessora, conforme a Equação (12).

$$Finish_i = MÍN(Finish_{Sucess.} - Duração_{Sucess.}) \quad (12)$$

Atividades sem sucessora recebem automaticamente o máximo tempo de início mais a duração da respectiva atividade (i) conforme a Equação (13).

$$Finish = MÁX(Start_i + Duração_i) \quad (13)$$

Desta maneira a duração total do projeto é o tempo de término máximo e não a soma de todas as atividades que compõem o caminho crítico conforme a Equação (14). Pois, caso haja atividades concorrentes (atividades que possuem o mesmo vínculo e a mesma duração) não será cometido o erro de considerar duplicidade de duração das atividades à duração total do projeto.

$$Duração_{projeto} = MÁX(Finish) \quad (14)$$

3.3.2 Modelagem Gráfica DSM

A Matriz de Estrutura de Dependência (DSM) é um modelo gráfico que representa um projeto, descrevendo suas atividades, duração das atividades e os vínculos ou dependências entre as atividades do projeto. Na seção 2.5 da Revisão Bibliográfica foi apresentado um modelo DSM que será a base de modelagem gráfica deste trabalho para em conjunto com a modelagem matemática discutida na seção anterior viabilizar o trabalho de simulação do estudo de caso.

Nos experimentos de modelagem realizados via implementação computacional a união entre a modelagem matemática e a modelagem gráfica propostas demandou a utilização de um algoritmo de particionamento mencionado no item 2.5 deste trabalho. A

seguir é apresentado o processo sistemático do algoritmo de particionamento, bem como os efeitos que este produz no gerenciamento do projeto.

Segundo Gunawan (2012), o algoritmo de particionamento é composto de três passos simples, os quais ao serem executados devem sempre observar uma regra básica de movimentação das linhas e colunas da DSM. Tal como já apontado na Revisão Bibliográfica, a regra de movimentação de linhas e colunas é:

- Ao movimentar uma linha para cima, sua respectiva coluna deve mover-se proporcionalmente (igual número de linhas e colunas) para a esquerda, e vice-versa;
- A movimentar uma linha para baixo, sua respectiva coluna deve mover-se proporcionalmente (igual número de linhas e colunas) para a direita, e vice-versa.

Days	Tasks	A	B	C	D	E	F
4	A	■					1
3	B	1	■			1	
5	C			■			
2	D		1		■		
9	E			1		■	
6	F						■

DSM original

Days	Tasks	C	F	A	B	E	D
5	C	■					
6	F		■				
4	A		1	■			
3	B			1	■	1	
9	E	1				■	
2	D				1		■

DSM após os passos 1 e 2

Days	Tasks	C	F	A	E	B	D
5	C	■					
6	F		■				
4	A		1	■			
9	E	1			■		
3	B			1	1	■	
2	D					1	■

DSM particionada

Figura 10 – Representação gráfica do algoritmo de particionamento passo a passo. Fonte: Elaborado pelo Autor.

A Figura 10 auxilia o entendimento do processo de particionamento, cujos passos são descritos a seguir:

- **1º Passo** – movimentar para cima as linhas de todas as atividades que não possuem predecessoras, ou seja, aquelas atividades cujas linhas não apresentam qualquer marca. Na execução deste passo deve-se observar a regra de movimentação;

A Figura 11 representa um gráfico de barras para o projeto particionado na Figura 10, acima está o projeto antes do particionamento, e abaixo o mesmo projeto logo após o particionamento, onde se nota a diferença no fluxo temporal das barras que evolui desembaraçadamente no tempo, após o particionamento.

3.3.3 Implementação do Modelo

Para demonstrar a implementação do modelo foi tomado um conjunto de resultados obtidos do Projeto 1 após a aplicação dos procedimentos descritos na seção 3.2. que são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Duração mediana das atividades do Projeto 1.

ATIVIDADES	DESCRIÇÃO DAS ATIVIDADES	DURAÇÃO	ATIVIDADES	DESCRIÇÃO DAS ATIVIDADES	DURAÇÃO
A1	LOCAÇÃO DA OBRA	16 dias	A15	FORRROS EM GESSO	46 dias
A2	INSTALAÇÃO DO CANTEIRO	19 dias	A16	REVESTIMENTO CERÂMICO (PAREDE)	88 dias
A3	TERRAPLENAGEM	16 dias	A17	PISOS	59 dias
A4	FUNDAÇÕES	81 dias	A18	INSTALAÇÕES HIDROSSANITÁRIAS	62 dias
A5	ESTRUTURA DE CONCRETO ARMADO	42 dias	A19	INSTALAÇÃO ELÉTRICA	88 dias
A6	ESTRUTURA METÁLICA	24 dias	A20	INSTALAÇÃO DE LÓGICA E TELEFONIA	42 dias
A7	ALVENARIA	34 dias	A21	INSTALAÇÃO DE ALARME	9 dias
A8	DIVISÓRIAS EM GRANITO	15 dias	A22	INSTALAÇÃO DE SPDA	26 dias
A9	ESQUADRIAS DE ALUMÍNIO (JANELAS)	20 dias	A23	INSTALAÇÃO DE AR-CONDICIONADO	75 dias
A10	ESQUADRIAS DE MADEIRA (PORTAS)	14 dias	A24	PAISAGISMO E URBANIZAÇÃO	16 dias
A11	VIDROS	7 dias	A25	PINTURA	62 dias
A12	COBERTURA	33 dias	A26	LOUÇAS E METAIS	47 dias
A13	IMPERMEABILIZAÇÃO DE FUNDAÇÕES	28 dias	A27	BRISES	35 dias
A14	IMPERMEABILIZAÇÃO DE LAJE	12 dias	A28	LIMPEZA E ENTREGA DE OBRA	25 dias

Fonte: Elaborado pelo Autor.

A Tabela 6 apresenta a duração mediana das atividades do Projeto 1 que foram obtidas através do estudo de variabilidade de produtividade das atividades conforme os procedimentos demonstrados na seção 3.2. Os resultados apresentados na Tabela 6 são utilizados para alimentar o modelo do cronograma do Projeto 1, servindo para calcular o Caminho Crítico e duração total do Projeto conforme é demonstrado à partir da

modelagem da Matriz de Estrutura de Dependência (DSM) dos Projetos, apresentada na Figura 12.

Duração	Atividades	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	A13	A14	A15	A16	A17	A18	A19	A20	A21	A22	A23	A24	A25	A26	A27	A28
16	A1	1	1																										
19	A2		1																										
16	A3		1	1																									
81	A4	1		1	1																								
42	A5	1			1	1																							
24	A6					1	1																						
34	A7						1	1					1																
15	A8							1	1								1	1											
20	A9								1	1							1	1											
14	A10									1	1						1	1											
7	A11										1	1																	
33	A12											1	1																
28	A13				1								1	1															
12	A14													1	1														
46	A15								1				1	1	1														
88	A16								1							1	1												
59	A17								1									1	1										
62	A18					1													1	1									
88	A19					1														1	1								
42	A20					1															1	1							
9	A21																1	1				1	1						
26	A22												1	1									1	1					
75	A23																1	1						1	1				
16	A24																								1	1			
62	A25																									1	1		
47	A26																										1	1	
35	A27																											1	1
25	A28																												1

Figura 12 – Modelagem DSM do cronograma do projeto. Fonte: Elaborado pelo Autor.

A Figura 12 apresenta a modelagem do cronograma representado por meio da DSM do projeto trazendo os principais elementos: atividades do projeto segundo um código que resume a descrição; duração das atividades; e a dependência entre as atividades descrita pela marca “1” nas células da DSM. O próximo passo é realizar o particionamento sobre a DSM do projeto para então introduzir a modelagem matemática, conforme demonstrado na Figura 13.

Duração	Atividades	A2	A3	A1	A4	A5	A6	A13	A7	A16	A17	A8	A9	A10	A11	A12	A14	A15	A18	A19	A25	A26	A27	A20	A21	A22	A23	A24	A28
19	A2	■																											
16	A3	1	■																										
16	A1	1	1	■																									
81	A4		1	1	■																								
42	A5			1	1	■																							
24	A6				1	■																							
28	A13			1		■																							
34	A7				1		1	■																					
88	A16							1	■																				
59	A17							1		■																			
15	A8								1	1	■																		
20	A9								1	1		■																	
14	A10								1	1			■																
7	A11										1	■																	
33	A12					1									■														
12	A14													1	■														
46	A15							1							1	1	■												
62	A18				1													■											
88	A19				1														■										
62	A25									1	1			1				1	■										
47	A26									1	1	1							1	■									
35	A27														1						■								
42	A20				1																	■							
9	A21									1									1	■									
26	A22															1	1						■						
75	A23									1								1							■				
16	A24									1																	■		
25	A28														1					1	1	1	1						■

Figura 13 – DSM do projeto particionada. Fonte: Elaborado pelo Autor.

A Figura 13 apresenta a DSM do projeto particionada, na qual as atividades foram reordenadas e as marcações de dependência “1” ocupam; todas; o triângulo inferior da DSM. Assim, neste momento aplicando as Equações (9), (11), (12) e (13) sobre a DSM particionada foi possível construir uma matriz semelhante a partir da qual com as Equações (9), (10) e (14) pode-se encontrar o Caminho Crítico (CP) e a duração total do projeto, respectivamente. Essa nova matriz é denominada aqui de Matriz de Caminho Crítico (MCP) apresentada na Figura 14.

Start	A2	A3	A1	A4	A5	A6	A13	A7	A16	A17	A8	A9	A10	A11	A12	A14	A15	A18	A19	A25	A26	A27	A20	A21	A22	A23	A24	A28	Finish
0	19	19	35																										19
19	19	16	35	51																									35
35	19	35	16	51	132																								51
51		35	51	81	132	146																							132
132			51	132	42	195	174											263	284				355					174	
174				174	45								219																219
132				132			42	174																					174
174				174		160	34	208	237							264											381		208
208							208	88		310	310	296								310	325			388	322			296	
208							208	88		310	310	296								310	325							296	
296								296	267	29											325							325	
296								296	267		34		330															330	
296								296	267			14								310								310	
316										316		21										337						372	337
198					198								54	252	264										371			252	
231													231	33	264										371			264	
243						208							231	243	67				310				388	322				310	
174				174														151			325							325	
174				174															198									372	372
310							296	267		310						289				62								372	372
311							296	267	311							236				61								372	372
323													323									49						372	372
174				174																				223					397
296							296									289									101				397
243													231	243												154			397
296							296								289											101			397
208							208																				189		397
372													323						262	372	358	358					25	397	

Figura 14 – Matriz de Caminho Crítico (MCP). Fonte: Elaborado pelo Autor.

Na Figura 14 cada célula dentro da MCP possui uma equação que gera os resultados observados na MCP, pois mesmo as células aparentemente vazias são na verdade células cujo resultado é zero. Os dados de entrada das equações estão na DSM particionada. As células do triângulo inferior da MCP em conjunto com a coluna “Start” calculam os tempos de início das atividades através da Equação (11) que, para esta implementação, é desdobrada nas Equações (15) e (16).

$$x_{i,j} = (d_j + S_j) * v_{i,j} \quad (15)$$

$$S_i = \max_{1 \leq j \leq (i-1)} (x_{i,j}) \quad (16)$$

A Equação (15) está inscrita em cada uma das células do triângulo inferior de modo que:

- i e j representam respectivamente as linha e colunas para a MCP, DSM particionada e os vetores “Start” e “Finish”;
- $x_{i,j}$ é o tempo de início de cada atividade em relação a uma predecessora (caso a atividade possua mais de uma predecessora);
- d_j é a duração de uma predecessora da atividade cujo dado vem da coluna “Duração” na DSM do projeto particionada demonstrada na Figura 13;
- S_j é o tempo máximo de início de uma atividade predecessora cujo valor vem da coluna “Start” na Figura 14 e é constantemente recalculado pela Equação (16); e
- $v_{i,j}$ é o vínculo entre as atividades representado pela marca “1” sinalizada nas células da DSM particionada.

A Equação (16) é inscrita na coluna “Start” da Figura 14 e fornece por resultado o tempo máximo de início de cada uma das iésimas atividades, sendo que caso a atividade não possua predecessora esta recebe automaticamente o valor nulo ($Start = 0$).

Ainda com relação a Figura 14, as células do triângulo superior da MCP em conjunto com a coluna “Finish” calculam os tempos de término das atividades através da Equação (12) que, para esta implementação, é desdobrada nas Equações (17) e (18).

$$y_{i,j} = (F_j - d_j) * v_{j,i} \quad (17)$$

$$F_i = \min_{(i-1) \leq j \leq N} (y_{i,j}) \quad (18)$$

A Equação (17) está inscrita em cada uma das células do triângulo superior de modo que:

- i e j representam respectivamente as linha e colunas para a MCP, DSM particionada e os vetores “Start” e “Finish”;
- $y_{i,j}$ é o tempo de término de cada atividade em relação a uma sucessora (caso a atividade possua mais de uma sucessora);
- d_j é a duração de uma sucessora da atividade cujo dado vem da coluna “Duração” na DSM do projeto particionada demonstrada na Figura 13;
- F_j é o tempo mínimo de término de uma atividade sucessora cujo valor vem da coluna “Finish” na Figura 14 e é constantemente recalculado pela Equação (18); e
- $v_{i,j}$ é o vínculo entre as atividades representado pela marca “1” sinalizada nas células da DSM particionada.

A Equação (18) é inscrita na coluna “Finish” da Figura 14 e fornece por resultado o tempo mínimo de término de cada uma das iésimas atividades, sendo que caso a atividade não possua sucessora esta recebe automaticamente o resultado da Equação (13).

Finalmente, dentro das células da diagonal destacada e que separam os triângulos da MCP na Figura 14 está inscrita a Equação (9) que calcula os prazos de cada uma das atividades do projeto, e em conjunto com as Equações (10) e (14) fornecem os resultados do Caminho Crítico e duração total do projeto, conforme demonstrado na Tabela 7, que mostra o resultado para o Projeto 1 modelado.

Verifica-se que o “Prazo das atividades” representa o prazo máximo que cada atividade possui para sua execução, e assim, comparando este prazo com a duração da

respectiva atividade pela Equação (10) se verifica que as atividades cuja “Folga” é igual a zero são as atividades que compõem o CP do projeto, cuja duração total é dada pela Equação (14), sendo esta igual a 397 dias.

Tabela 7 – Resultados do Caminho Crítico e Duração total do Projeto 1.

Ativida des	Prazo das atividades	Folga das atividades	Caminho Crítico	Duração 397 dias	Ativida des	Prazo das atividades	Folga das atividades	Caminho Crítico	Duração 397 dias
A2	19	0	A2	19	A12	54	21		
A3	16	0	A3	16	A14	33	21		
A1	16	0	A1	16	A15	67	21		
A4	81	0	A4	81	A18	151	89		
A5	42	0	A5	42	A19	198	110		
A6	45	21			A25	62	0	A25	62
A13	42	14			A26	61	14		
A7	34	0	A7	34	A27	49	14		
A16	88	0	A16	88	A20	223	181		
A17	88	29			A21	101	92		
A8	29	14			A22	154	128		
A9	34	14			A23	101	26		
A10	14	0	A10	14	A24	189	173		
A11	21	14			A28	25	0	A28	25

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Esta modelagem implementada é a mesma para todos os Estudos de Caso, cuja única alteração está na duração mediana das atividades e nos parâmetros de distribuição das mesmas que alimentarão o modelo na realização da Simulação de Monte Carlo (SMC). Assim, na seção seguinte é apresentado como esta modelagem é utilizada para realizar SMC e também o algoritmo que viabiliza esta Simulação.

3.3.4 Algoritmo de Monte Carlo e Simulação

A seção 2.7 tratou sobre as principais características que um algoritmo de Monte Carlo deve possuir. Assim, para realizar uma Simulação de Monte Carlo (SMC) na modelagem implementada na seção anterior, basta que os valores de duração das

atividades atribuídos na coluna “Duração”, da Matriz de Estrutura de Dependência (DSM) particionada (ver Figura 13, pág.65), sejam substituídos por funções de distribuição de densidade de probabilidade segundo uma forma e parâmetros que foram obtidos por meio dos procedimentos descritos na seção 3.2.

Alguns dos mais conhecidos *softwares* de mercado que realizam SMC tais como @Risk, Risk+, RiskAMP e Monte Carlo Primavera trabalham com *Add-in* associados a *softwares* proprietários de programação e planejamento de projetos cujo relacionamento das atividades, ainda que baseado no Método de Diagrama de Precedência (MDP) são uma “caixa preta” quanto a função que estabelece o vínculo entre as atividades. Na modelagem com a DSM, sendo os vínculos estabelecidos pelo número “1” sinalizado nas células, este trabalho traz então a possibilidade de simular um novo parâmetro passível de incertezas dentro do projeto que é o próprio vínculo entre as atividades.

Não somente as durações nas atividades do projeto estão sujeitas a incertezas, mas também o vínculo entre as atividades dentro de uma gama de possibilidades, que deve ser avaliada pelo gerente do projeto, está sujeita a alterações durante o desenvolvimento do projeto, e os *softwares* proprietários não possibilitam ao gerente testar esta variação em tempo real de simulação. Assim, ao realizar a SMC neste trabalho, será possível não somente substituir a duração das atividades por distribuições de probabilidade que representem as suas incertezas, mas também substituir o vínculo sinalizado nas células da DSM particionada por uma distribuição binária entre 0 e 1, para representar, respectivamente, a não existência e a existência de dependência entre as atividades.

Por fim, sendo feita a substituição de dados conforme indicado nos parágrafos anteriores, o próximo passo é a realização das iterações que possibilitarão a geração dos resultados que serão posteriormente analisados. Para gerar as iterações foi desenvolvido um algoritmo de Monte Carlo adequado ao modelo, que está apresentado no Apêndice G.

A função do algoritmo é recalculando a Matriz de Caminho Crítico (MCP) milhares de vezes (10.000 vezes segundo o algoritmo) e armazenar os resultados gerados pela MCP em planilhas distintas. A cada vez que o comando de cálculo é acionado pela função *ActiveSheet.Calculate* o gerador de números aleatório do *software* Excel gerará um novo valor de duração e vínculos das atividades, e então, a cada nova geração a MCP do projeto é recalculada.

O algoritmo não traz em si a função de geração dos números aleatórios, pois esta é implementada juntamente com a entrada dos parâmetros de duração das atividades no modelo. Conforme já observado na subseção 3.2.3, as funções geradoras de valores aleatórios são descritas nos Apêndices B e E.

Concluída a apresentação dos procedimentos metodológicos este trabalho alcançou os objetivos propostos. Doravante, no próximo capítulo, são apresentados, os resultados obtidos na operação dos procedimentos descritos para comparação entre resultados simulados e dados reais, fazendo, então, a validação dos resultados de descrição da variabilidade na duração das atividades dos projetos, obtidas por meio dos métodos propostos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Resultados dos Estudos de Caso

Tendo realizado os procedimentos descritos nas seções 3.2.2 e 3.2.3 sobre os dados da Tabela 3 (pág.49) em conjunto com os dados da Tabela 1 (pág.47), os resultados obtidos são a mediana, e a forma e parâmetros das distribuições estatísticas que descrevem a variabilidade na duração das atividades dos projetos estudados.

Abaixo, estão a Tabela 8, Tabela 9 e Tabela 10 que apresentam os parâmetros estatísticos de duração das atividades para o Projeto 1, Projeto 2 e Projeto 3, respectivamente.

Tabela 8 – Parâmetros estatísticos de duração das atividades do Projeto 1.

Atividade	Aderência (%)	Distribuição	Mediana	Mínimo	Modo	Máximo	α	β	μ	σ
A1	55%	Gama	16				34,26	0,47		
A2	70%	LogNormal	19						2,95	0,08
A3	88%	Beta	16	11	16	19	4,52	3,23		
A4	40%	LogNormal	81						4,40	0,13
A5	71%	LogNormal	42						3,74	0,10
A6	100%	Beta	24	15	25	31	4,52	3,23		
A7	46%	Gama	34				62,71	0,54		
A8	38%	Gama	15				91,27	0,17		
A9	44%	LogNormal	20						2,98	0,09
A10	54%	Gama	14				48,11	0,29		
A11	94%	Triangular	7	4	8	10				
A12	72%	Normal	33						33,00	4,00
A13	77%	Normal	28						28,00	4,00
A14	61%	Beta	12	5	12	17	4,38	3,51		
A15	90%	LogNormal	46						3,83	0,14
A16	33%	Beta	88	69	86	115	3,19	4,54		
A17	35%	Gama	59				144,80	0,41		
A18	72%	Normal	62						62,00	6,00
A19	62%	Normal	88						88,00	7,00
A20	48%	Gama	42				63,89	0,66		
A21	40%	Normal	9						9,00	1,00
A22	53%	Beta	26	17	26	33	4,30	3,64		
A23	99%	Beta	75	39	77	99	4,54	3,17		
A24	86%	Beta	16	12	16	19	4,34	3,58		
A25	46%	LogNormal	62						4,13	0,06
A26	64%	LogNormal	47						3,86	0,07
A27	74%	Normal	35						35,00	3,00
A28	68%	Normal	25						25,00	3,00

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Tabela 9 – Parâmetros estatísticos de duração das atividades do Projeto 2.

Atividade	Aderência (%)	Distribuição	Mediana	Mínimo	Modo	Máximo	α	β	μ	σ
A1	55%	Gama	14				34,26	0,41		
A2	70%	LogNormal	25						3,20	0,08
A3	88%	Beta	41	28	42	50	4,55	3,15		
A4	40%	LogNormal	36						3,57	0,13
A5	71%	LogNormal	67						4,21	0,10
A6	100%	Beta	40	25	41	50	4,56	3,13		
A7	46%	Gama	29				62,71	0,47		
A8	38%	Gama	9				91,27	0,10		
A9	44%	LogNormal	29						3,38	0,09
A10	54%	Gama	11				48,11	0,23		
A11	94%	Triangular	12	7	13	16				
A12	72%	Normal	33						33,00	4,00
A13	77%	Normal	14						14,00	2,00
A14	61%	Beta	10	4	10	14	4,44	3,40		
A15	90%	LogNormal	49						3,90	0,14
A16	33%	Beta	63	50	62	83	3,15	4,55		
A17	35%	Gama	62				144,80	0,43		
A18	72%	Normal	59						59,00	5,00
A19	62%	Normal	75						75,00	6,00
A20	48%	Gama	41				63,89	0,65		
A21	40%	Normal	6						6,00	1,00
A22	53%	Beta	43	29	43	54	4,29	3,65		
A23	99%	Beta	19	10	20	26	4,52	3,23		
A24	86%	Beta	50	39	50	58	4,37	3,53		
A25	46%	LogNormal	51						3,94	0,06
A26	64%	LogNormal	45						3,80	0,07
A27	74%	Normal	5						5,00	1,00
A28	68%	Normal	21						21,00	2,00

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Tabela 10 – Parâmetros estatísticos de duração das atividades do Projeto 3.

Atividade	Aderência (%)	Distribuição	Mediana	Mínimo	Modo	Máximo	α	β	μ	σ
A1	55%	Gama	16				34,26	0,46		
A2	70%	LogNormal	14						2,66	0,08
A3	88%	Beta	49	34	50	59	4,56	3,13		
A4	40%	LogNormal	30						3,39	0,13
A5	71%	LogNormal	69						4,24	0,10
A6	100%	Beta	44	27	45	55	4,57	3,11		
A7	46%	Gama	44				62,71	0,71		
A8	38%	Gama	8				91,27	0,09		
A9	44%	LogNormal	22						3,11	0,09
A10	54%	Gama	13				48,11	0,27		
A11	94%	Triangular	10	6	11	13				
A12	72%	Normal	33						33,00	5,00
A13	77%	Normal	28						28,00	4,00
A14	61%	Beta	13	5	13	19	4,34	3,58		
A15	90%	LogNormal	51						3,94	0,14
A16	33%	Beta	100	79	98	131	3,16	4,55		
A17	35%	Gama	67				144,80	0,46		
A18	72%	Normal	174						174,00	16,00
A19	62%	Normal	217						217,00	17,00
A20	48%	Gama	86				63,89	1,35		
A21	40%	Normal	10						10,00	1,00
A22	53%	Beta	23	15	23	29	4,34	3,58		
A23	99%	Beta	75	39	77	98	4,57	3,10		
A24		Vazia								
A25	46%	LogNormal	97						4,58	0,06
A26	64%	LogNormal	93						4,53	0,07
A27	74%	Normal	54						54,00	5,00
A28	68%	Normal	24						24,00	3,00

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Os resultados contidos na Tabela 8, Tabela 9 e Tabela 10 são a forma da distribuição das atividades acompanhada do (%) de Aderência obtido durante a inferência de distribuição através da Simulação (resultados da Tabela 5, pág.55). Os mais importantes resultados são os parâmetros da distribuição necessários para geração de valores aleatórios em cada forma de distribuição, que foram calculados conforme o Quadro exposto na Figura 9 (pág.56). Ao fim, a mediana de duração das atividades é obtida com base na geração de uma distribuição aleatória utilizando os parâmetros obtidos.

Nota-se dos resultados apresentados que das 7 distribuições testadas nenhuma atividade apresentou aderência com as distribuições EXPONENCIAL e STUDENT. Apenas uma atividade – A11 – apresentou aderência com a distribuição TRIANGULAR, um resultado baixo que confirma as literaturas que desaconselham o uso desta distribuição, afirmando que a transição brusca de valores (modo para o máximo, ou modo para o mínimo) não é compatível com fenômenos da vida real. A distribuição denominada, VAZIA, na atividade A24 do Projeto 3 significa que o quantitativo deste serviço no Projeto é nulo e, portanto, não há distribuição para representa-lo.

Quanto a aderência das atividades às demais distribuições os resultados apresentam o seguinte espectro:

- 7 de 28 (25%) atividades possuem distribuição NORMAL;
- 7 de 28 (25%) atividades possuem distribuição LOGNORMAL;
- 6 de 28 ($\approx 21\%$) atividades possuem distribuição GAMA; e
- 7 de 28 (25%) atividades possuem distribuição BETA.

Logo, verifica-se que entre as quatro distribuições que dominam o espectro de distribuições das atividades, não existe preferência de uma em detrimento de outra. Por fim, pode-se classificar essas quatro distribuições pela ordem de grandeza das

percentagens de aderência – somando as percentagens de cada distribuição – da seguinte forma: BETA (520%); NORMAL (465%); LOGNORMAL (425%); e GAMA (276%). Esta constatação mostra que as distribuições BETA, NORMAL e LOGNORMAL são ainda mais adequadas para descrever a variabilidade de duração das atividades dos projetos.

Na sequência dos resultados, os parâmetros estatísticos da Tabela 8, Tabela 9 e Tabela 10 foram utilizados para alimentar os modelos dos respectivos projetos com o objetivo de verificar a validade dos resultados obtidos nas Tabelas. Então, na próxima seção são apresentados os resultados da Simulação dos modelos de cronograma dos projetos, comparando estes resultados aos dados reais de conclusão dos projetos.

4.2 Resultados da Simulação dos Modelos

O modelo implementado na subseção 3.3.3 é o mesmo utilizado para todos os projetos, variando apenas as durações das atividades e parâmetros de variabilidade das durações em função do quantitativo das atividades em cada projeto (ver Tabela 1, pág.47).

Antes de operar a simulação dos modelos de cronograma dos projetos, foram utilizados os valores medianos de duração das atividades para calcular o Caminho Crítico (CP) e duração total dos projetos. O uso da mediana nesta aplicação se deve ao fato de que o valor mediano representa o percentil 50 da distribuição de duração das atividades, assim todas as atividades estão sujeitas a mesma probabilidade.

Na subseção 3.3.3, a Tabela 7 (pág.69) apresentou os resultados de CP e duração total do Projeto 1 usando os valores medianos de duração das atividades. Então, a Tabela 11 e a Tabela 12 apresentam a seguir o CP e duração total do Projeto 2 e Projeto 3, respectivamente.

Tabela 11 – Resultados do Caminho Crítico e Duração total do Projeto 2.

Ativida des	Prazo das atividades	Folga das atividades	Caminho Crítico	Duração 387 dias	Ativida des	Prazo das atividades	Folga das atividades	Caminho Crítico	Duração 387 dias
A2	25	0	A2	25	A12	33	0	A12	33
A3	41	0	A3	41	A14	10	0	A14	10
A1	14	0	A1	14	A15	49	0	A15	49
A4	36	0	A4	36	A18	138	79		
A5	67	0	A5	67	A19	183	108		
A6	40	0	A6	40	A25	51	0	A25	51
A13	96	82			A26	82	37		
A7	58	29			A27	50	45		
A16	92	29			A20	204	163		
A17	92	30			A21	72	66		
A8	46	37			A22	121	78		
A9	74	45			A23	72	53		
A10	40	29			A24	175	125		
A11	57	45			A28	21	0	A28	21

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Tabela 12 – Resultados do Caminho Crítico e Duração total do Projeto 3.

Ativida des	Prazo das atividades	Folga das atividades	Caminho Crítico	Duração 469 dias	Ativida des	Prazo das atividades	Folga das atividades	Caminho Crítico	Duração 469 dias
A2	14	0	A2	14	A12	62	29		
A3	49	0	A3	49	A14	42	29		
A1	16	0	A1	16	A15	80	29		
A4	30	0	A4	30	A18	174	0	A18	174
A5	69	0	A5	69	A19	267	50		
A6	73	29			A25	110	13		
A13	82	54			A26	93	0	A26	93
A7	57	13			A27	91	37		
A16	113	13			A20	291	205		
A17	113	46			A21	147	137		
A8	30	22			A22	201	178		
A9	59	37			A23	147	72		
A10	26	13			A24	247	247		
A11	47	37			A28	24	0	A28	24

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Avaliando os resultados da Tabela 7, Tabela 11 e Tabela 12 verifica-se que algumas atividades (A1, A2, A3, A4, A5 e A28) são críticas em todos os projetos, e outras

não. Logo, é possível notar que a duração das atividades tem bastante influência sobre a definição de Caminho Crítico do projeto, pois mesmo projetos semelhantes, e que possuem as mesmas atividades, desenvolvem caminhos diferentes durante a sua execução.

Quanto a duração total dos projetos, a expectativa é de que os valores calculados com as durações medianas representem uma probabilidade de conclusão dentro destes prazos de aproximadamente 50%. No entanto, a validade desta expectativa é comparada aos resultados da simulação.

Então, para o entendimento do comportamento dos projetos, face a variabilidade na duração das atividades dos mesmos, e validação dos parâmetros estatísticos de duração das atividades são apresentados os resultados das simulações dos projetos. Tal como descrito na subseção 3.3.4 os projetos foram submetidos a duas etapas de simulação, uma sem variação nos vínculos entre as atividades, e outra com variação nos vínculos entre as atividades. Os resultados destas etapas de simulação dos modelos, para cada um dos projetos, são apresentados nas subseções a seguir.

4.2.1 Resultados da Simulação Sem Variação de Vínculos

Conforme descrito na Revisão Bibliográfica, para realização da Simulação de Monte Carlo (SMC) os valores de entrada do modelo são substituídos por funções geradoras de valores aleatórios (Apêndice B e E) segundo a forma e parâmetros da distribuição estatística escolhida, cujos dados são os resultados apresentados nas Tabelas da seção 4.1. Assim, segue na Figura 15, Figura 16 e Figura 17 os resultados da SMC.

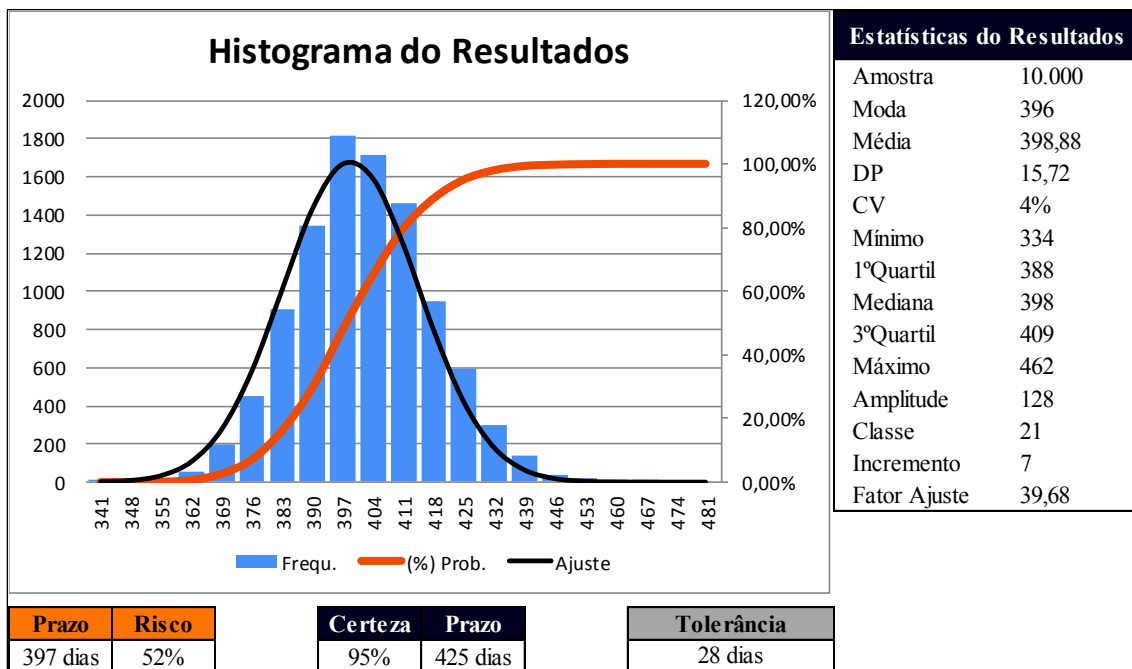


Figura 15 – Resultados da SMC do Projeto 1: Sem variação de vínculo. Fonte: Elaborado pelo Autor.

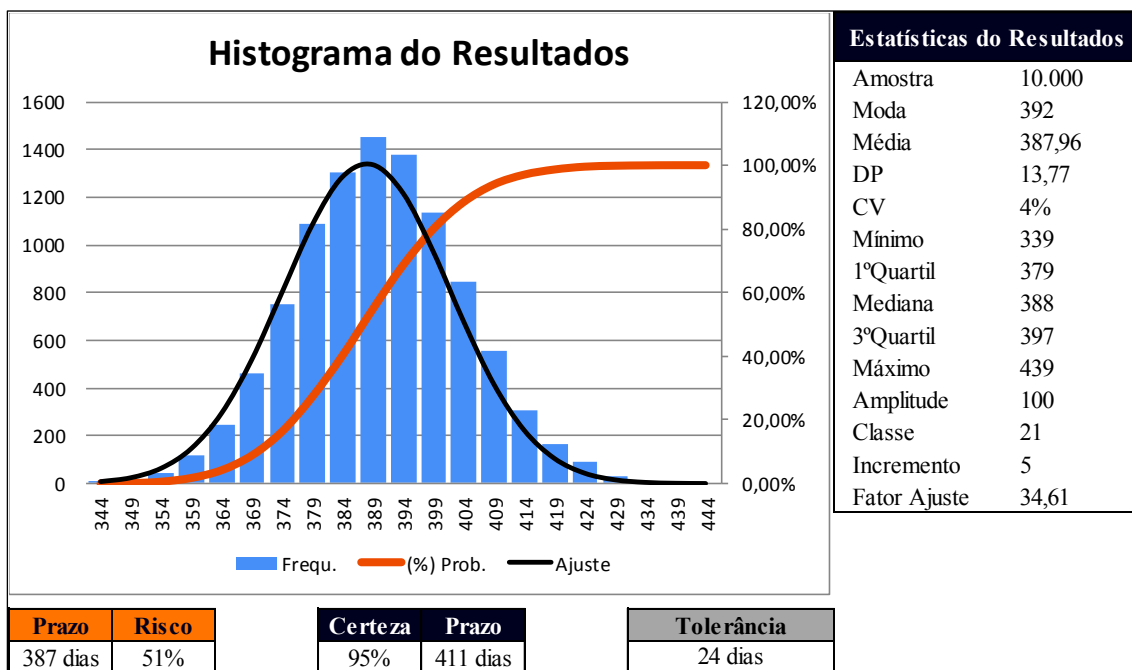


Figura 16 – Resultados da SMC do Projeto 2: Sem variação de vínculo. Fonte: Elaborado pelo Autor.

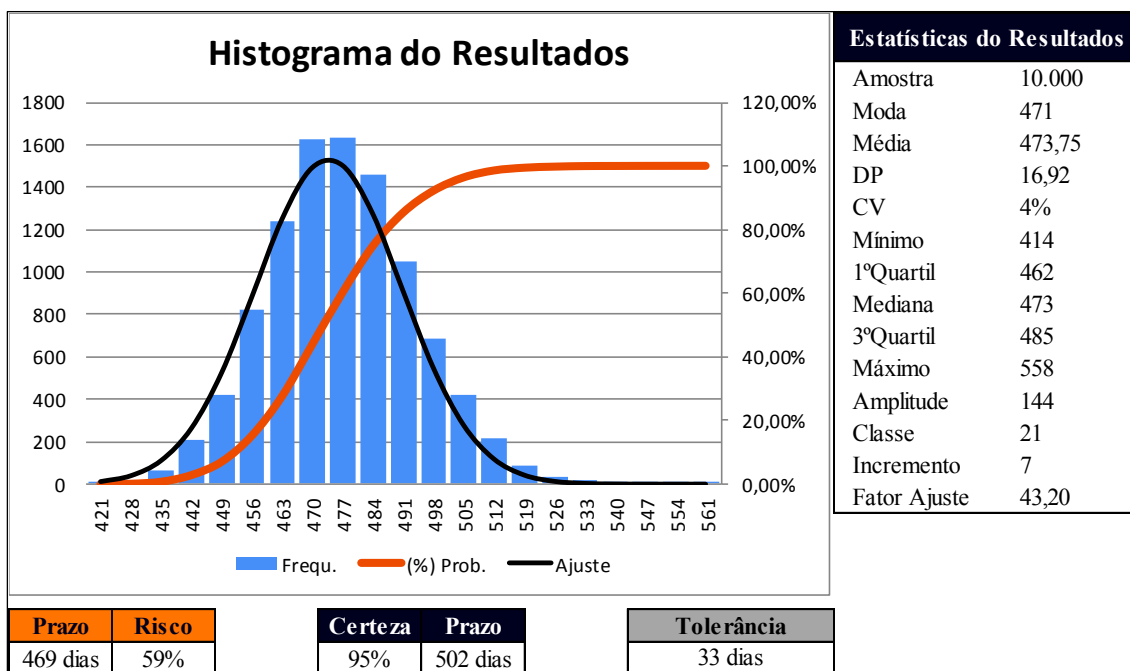


Figura 17 – Resultados da SMC do Projeto 3: Sem variação de vínculo. Fonte: Elaborado pelo Autor.

Os resultados apresentados na Figura 15, Figura 16 e Figura 17 são o histograma referente a 10.000 resultados de duração total dos projetos, que foram gerados no recálculo do modelo a cada nova geração de duração das atividades, e o resumo das estatísticas destes resultados. Estão presentes, também, nas Figuras uma breve análise de risco do prazo de conclusão dos projetos, onde é calculado o risco associado ao resultado de duração total presente na Tabela 7, Tabela 11 e Tabela 12.

Também, para auxiliar o gerente do projeto é calculado o Prazo associado a uma probabilidade maior de Certeza para o projeto, cujo valor atribuído foi de 95%. Conseqüentemente, a Tolerância é a diferença entre o Prazo associado a Certeza e o Prazo calculado pelo Método do Caminho Crítico (CPM).

Além dos resultados apresentados, a SMC é capaz de gerar resultados referentes a influência da variabilidade de duração das atividades sobre o cronograma do projeto. Estes resultados são denominados medidas de sensibilidade das atividades, conforme indica a subseção 2.6.1, e são apresentados a seguir pelos chamados gráficos de tornado mostrados na Figura 18, Figura 19 e Figura 20.

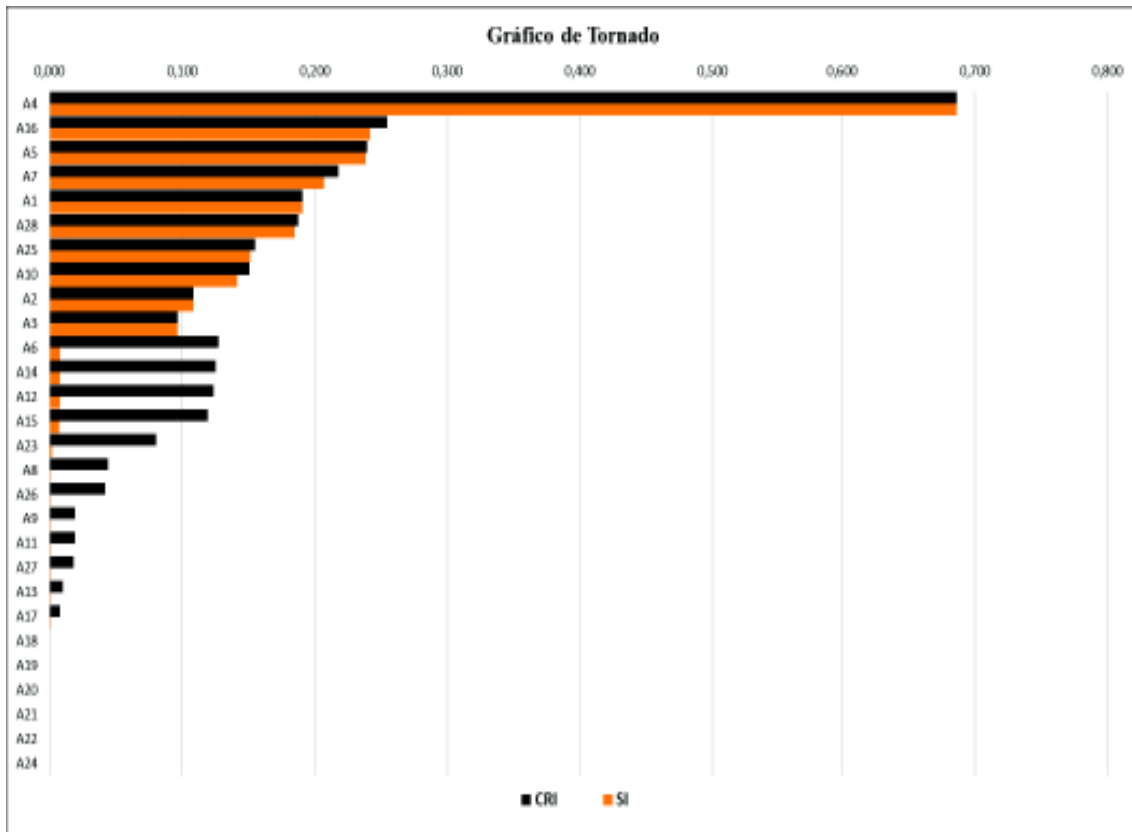


Figura 18 – Gráfico de Tornado do Projeto 1. Fonte: Elaborado pelo Autor.

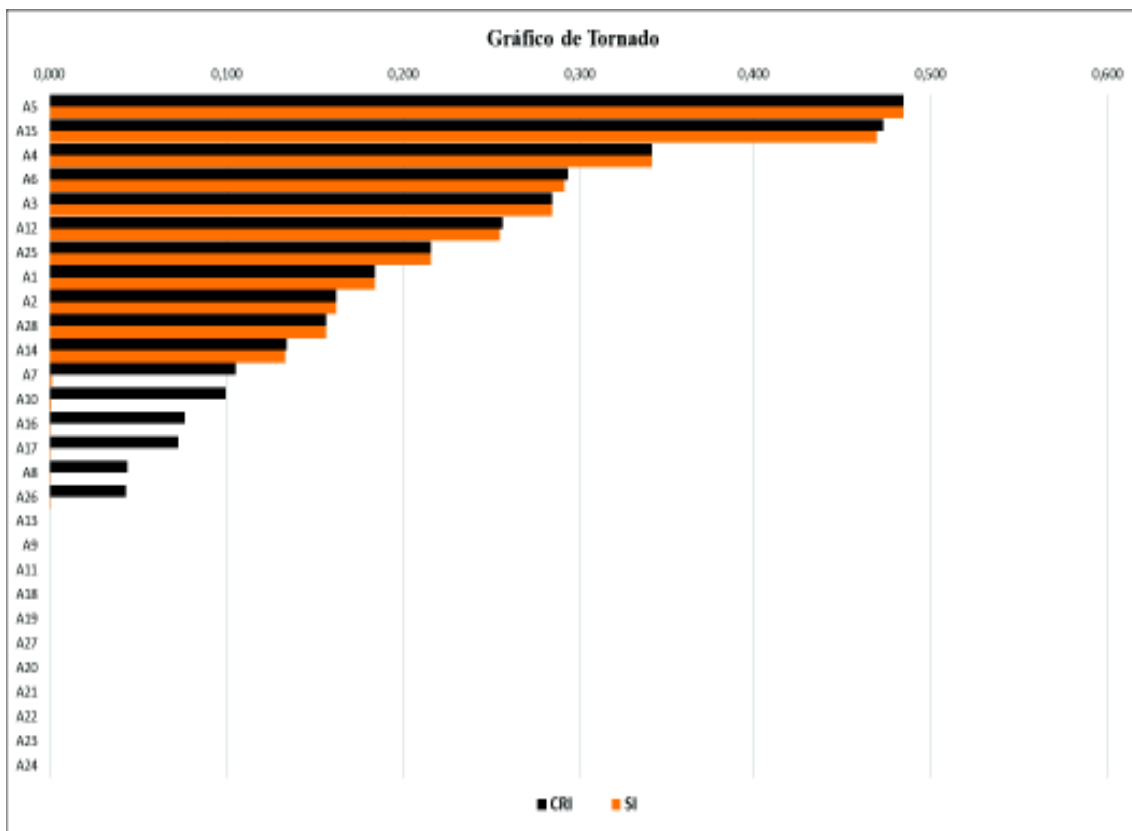


Figura 19 – Gráfico de Tornado do Projeto 2. Fonte: Elaborado pelo Autor.

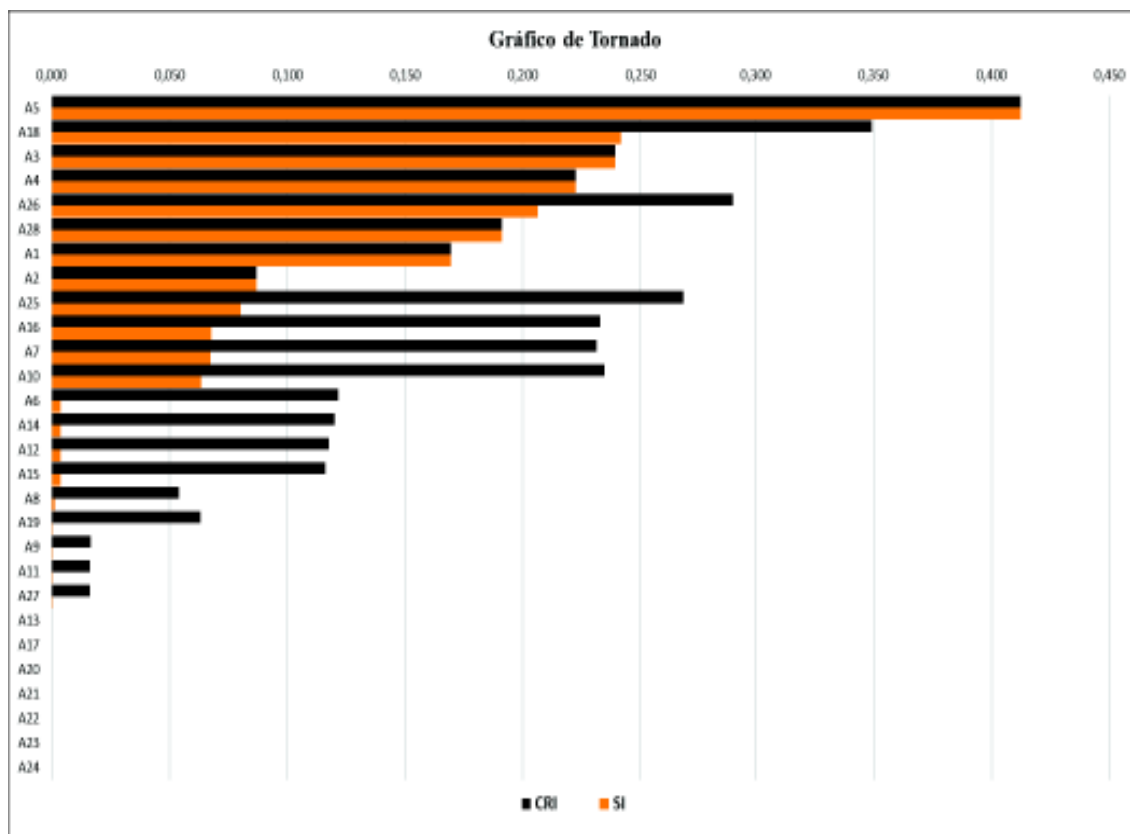


Figura 20 – Gráfico de Tornado do Projeto 3. Fonte: Elaborado pelo Autor.

Na subseção 2.6.1 foram comentadas, três tipos de medidas de sensibilidade. No entanto, os Gráficos de Tornado aqui apresentados trazem apenas dois tipos de medidas: Índice de Crucialidade (CRI) que é a correlação entre o Prazo das Atividades e a duração total do projeto; e Índice de Sensibilidade (SI) que é o produto entre o Índice de Criticalidade (CI) e o CRI. Assim, as atividades cujo CRI é igual ao SI são atividades nas quais CI é igual a 100%. Doravante, a ordenação decrescente das atividades pelo valor de SI mostra que em alguns casos, atividades cujo valor de CI é menor do que 100% demandam maior atenção do gerente do projeto do que atividades cujo CI é igual a 100%.

A seguir, são apresentados os mesmos resultados de comportamento do cronograma do projeto em função da variabilidade de duração nas atividades e agora em função, também, da variação no vínculo entre as atividades.

4.2.2 Resultados da Simulação Com Variação de Vínculos

Para realização da Simulação de Monte Carlo (SMC) com variação de vínculo entre as atividades foi implementada na DSM particionada (ver Figura 13, pág.65) a Equação (19).

$$= ALEATÓRIOENTRE(0; 1) \quad (19)$$

A Equação (19) é uma função do *software* Excel que retorna os valores 0 ou 1 distribuídos aleatoriamente. Esta função foi implementada em substituição a alguns vínculos de atividades conforme demonstrado na Figura 21.

Duração	Atividades	A2	A3	A1	A4	A5	A6	A13	A7	A16	A17	A8	A9	A10	A11	A12	A14	A15	A18	A19	A25	A26	A27	A20	A21	A22	A23	A24	A28	
19	A2	1																												
16	A3	1	1																											
16	A1	1	1	1																										
81	A4		1	1	1																									
42	A5			1	1	1																								
24	A6				1	1	1																							
28	A13				1	1	1	1																						
34	A7				0	1	1	1	1																					
88	A16						1	1	1	1																				
59	A17						1	1	1	1	1																			
15	A8							1	0	1	1	1																		
20	A9							1	0	1	1	1	1																	
14	A10							0	1	1	1	1	1	1																
7	A11									1	1	1	1	1	1															
33	A12					1										1	1	1												
12	A14															1	1	1	1											
46	A15						1								1	1	1	1	1											
62	A18				1															1	1	1								
88	A19				1																1	1	1							
62	A25								1	1			1					1												
47	A26								1	1	1								1											
35	A27													1																
42	A20				1																									
9	A21								1										0											
26	A22														1	1														
75	A23								1										1											
16	A24							1																						
25	A28													1							1	1	1	1						

Figura 21 – DSM particionada com vínculos variáveis. Fonte: Elaborado pelo Autor

Na Figura 21 as células marcadas no triângulo inferior da DSM são as que receberam a Equação (19).

O critério de escolha de quais células devem receber a função são células cujas linhas e colunas a qual pertencem tiverem números de vínculos maior do que 1 simultaneamente, caso contrário a célula deve pertencer a uma linha inicial ou coluna final. Este critério visa manter o particionamento da DSM sem prejudicar as regras de particionamento. Assim, também, não se deve produzir variação em todos os vínculos de uma única atividade.

Após a implementação da Equação (19) os projetos foram simulados e os resultados seguem apresentados na Figura 22, Figura 23 e Figura 24.

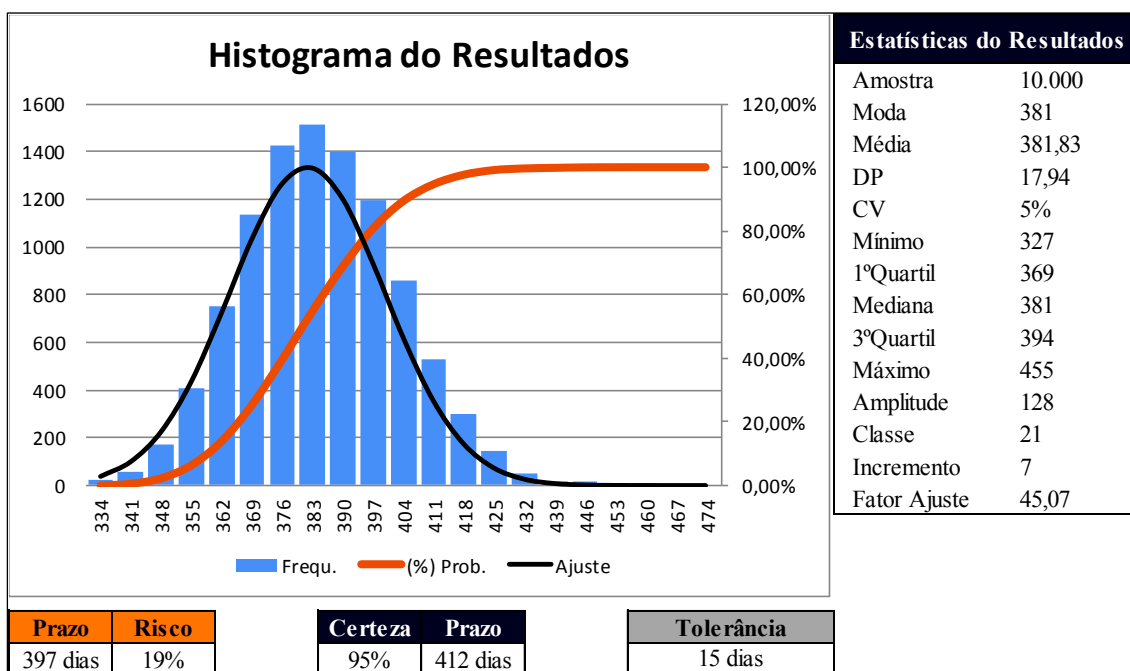


Figura 22 – Resultados da SMC do Projeto 1: Com variação de vínculo. Fonte: Elaborado pelo Autor.

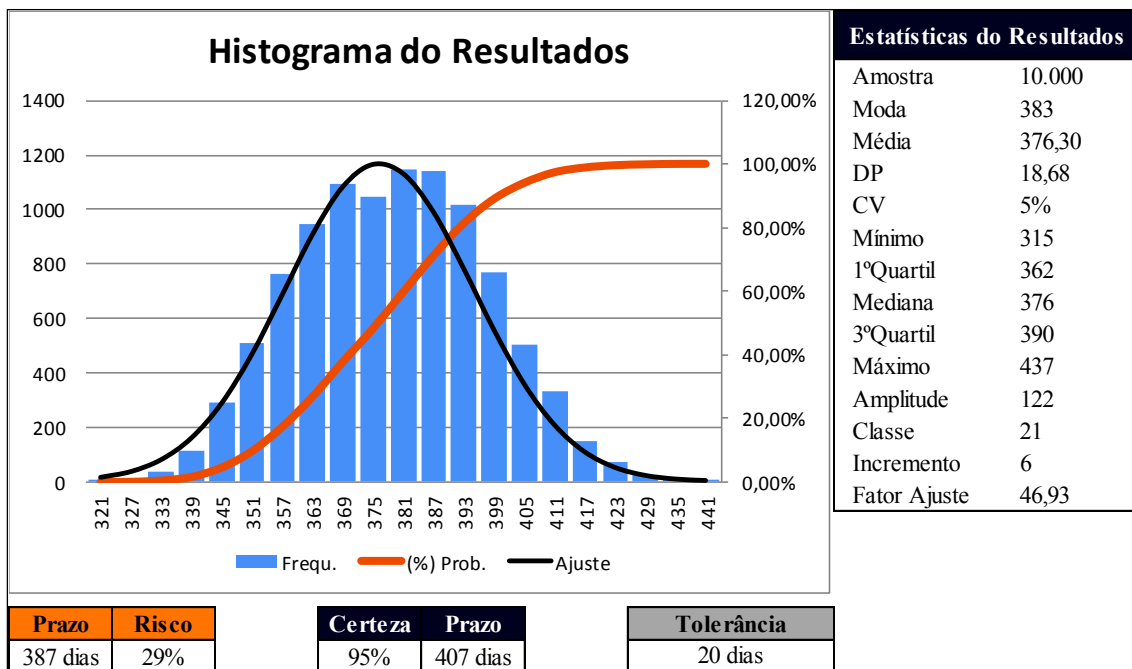


Figura 23 – Resultados da SMC do Projeto 2: Com variação de vínculo. Fonte: Elaborado pelo Autor.



Figura 24 – Resultados da SMC do Projeto 3: Com variação de vínculo. Fonte: Elaborado pelo Autor.

Os resultados da Figura 22, Figura 23 e Figura 24 são similares aos resultados das respectivas Figuras da subseção anterior. Porém, vale notar os efeitos que a variação entre os vínculos das atividades tem produzido na simulação do cronograma em comparação com os resultados da simulação anterior, pontuando:

- Pequeno aumento na variabilidade da amostra, ou seja, o CV passou de 4% para 5%;
- Redução dos tempos de duração total do projeto, notado pela redução dos percentis; e
- Redução no risco de atraso dos Prazos calculados pelo CPM, apresentados na Tabela 7, Tabela 11 e Tabela 12.

Para este caso, a SMC gerou, também, resultados referente às medidas de sensibilidade das atividades cujos Índice de Crucialidade (CRI) e Índice de Sensibilidade (SI) são mostrados no Gráfico de Tornado da Figura 25, Figura 26 e Figura 27.

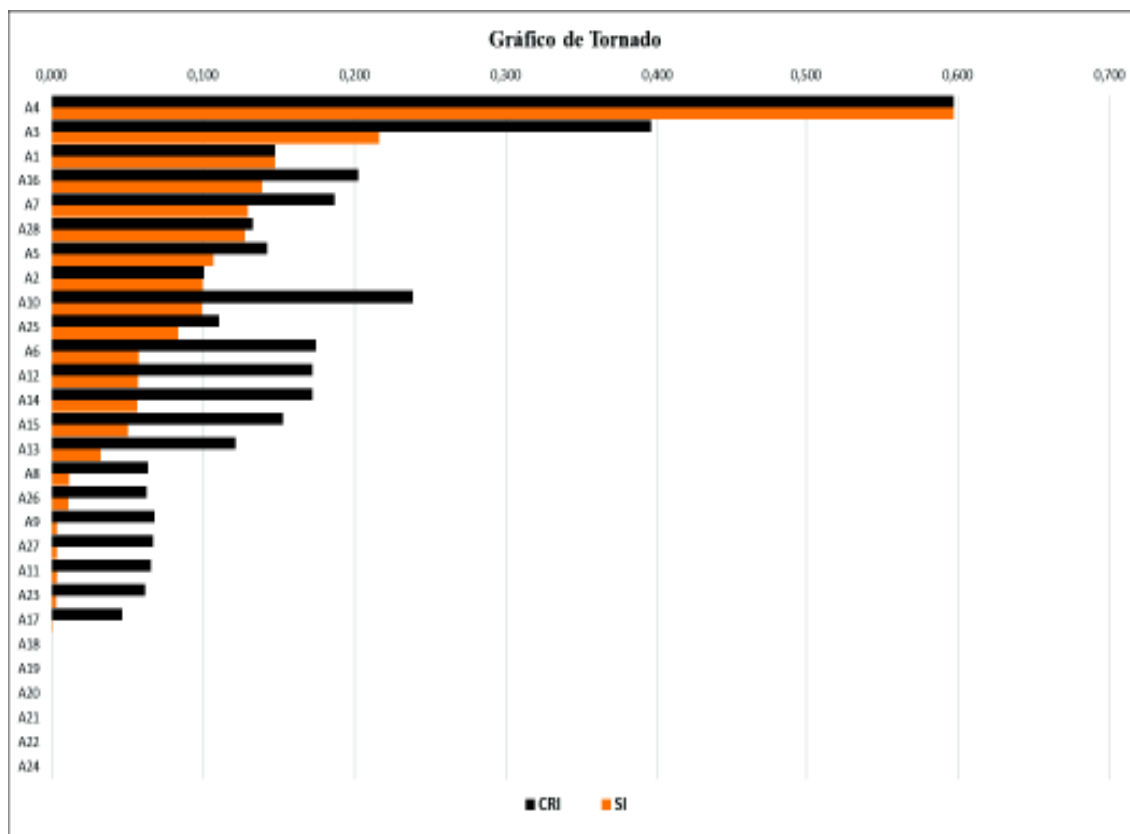


Figura 25 – Gráfico de Tornado do Projeto 1: Com variação de vínculo. Fonte: Elaborado pelo Autor.

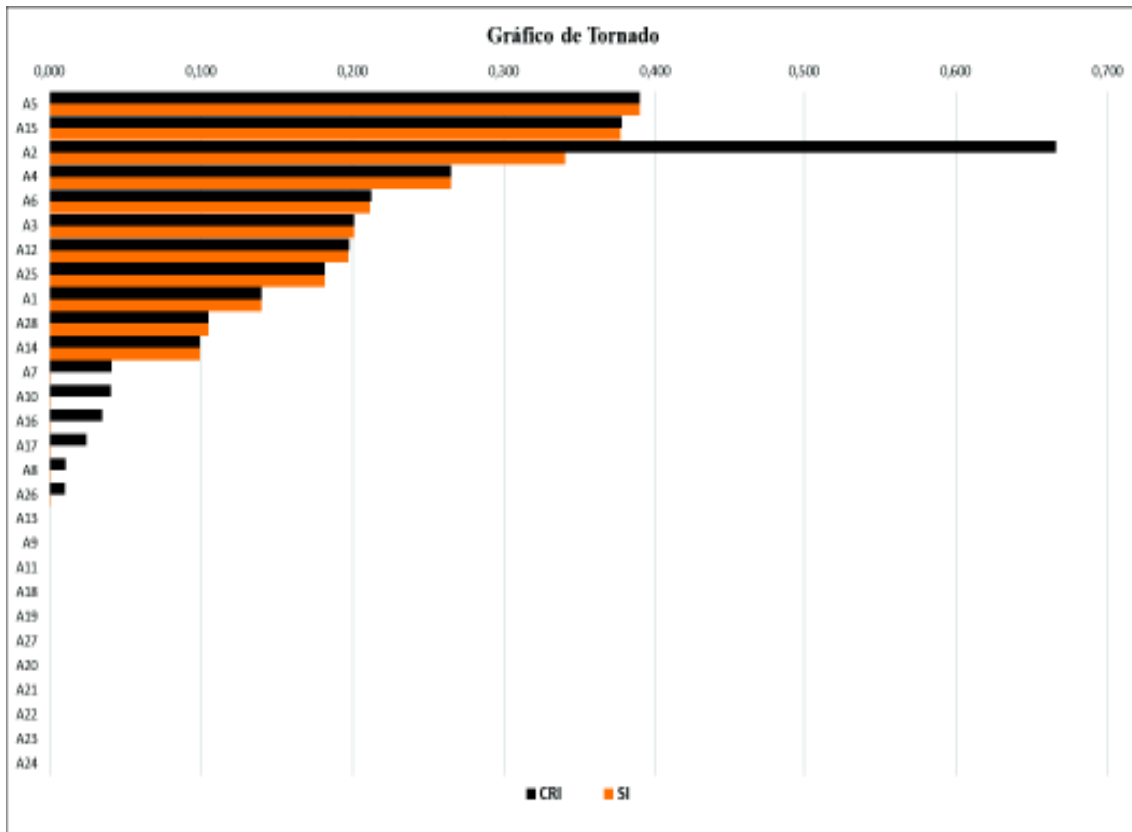


Figura 26 – Gráfico de Tornado do Projeto 2: Com variação de vínculo. Fonte: Elaborado pelo Autor.

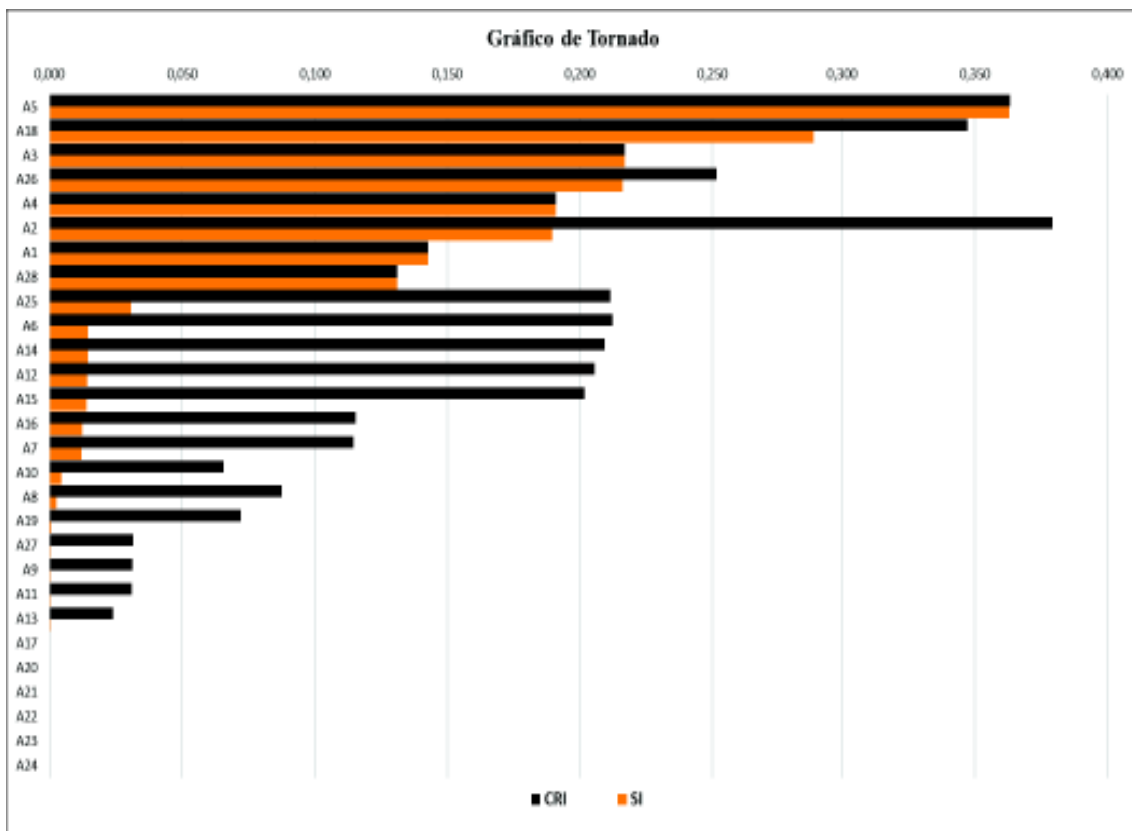


Figura 27 – Gráfico de Tornado do Projeto 3: Com variação de vínculo. Fonte: Elaborado pelo Autor.

Para comparar os resultados entre os gráficos desta subseção e os gráficos da subseção anterior, cada caso deve ser analisado à parte. Assim, no comparativo dos Gráficos de Tornado do Projeto 1 – Figura 18 e Figura 25 – observa-se que a atividade A4 permaneceu como atividade mais importante do projeto, quanto as demais atividades sofrem bastantes alterações de CRI, SI e posição, porém, as atividades, cuja importância SI, eram nulas, assim se mantiveram.

No comparativo dos Gráficos de Tornado do Projeto 2 – Figura 19 e Figura 26 – nota-se que as atividades A5 e A15 mantêm-se como as mais importantes, as atividades A1, A2, A3, A4, A6, A12 e A25 tiveram alterações entre si de suas posições de importância, e as demais atividades mantiveram suas posições de importância. Vale anotar que a atividade A2 teve um forte aumento no valor de CRI.

Comparando os Gráficos de Tornado do Projeto 3 – Figura 20 e Figura 27 – verifica-se que as atividades A5 e A18 permanecem como as mais importantes do projeto. As demais atividades sofrem alterações de CRI, SI e posição, porém, as atividades, cuja importância SI, eram nulas, assim se mantiveram.

Todavia, independente das comparações caso a caso, nota-se que os Gráficos mantiveram mais ou menos a mesma forma. Este fato demonstra que o grau de importância de uma atividade dentro do projeto varia em decorrência do cenário planejado (determinação dos vínculos de atividades), porém, o grau de importância de uma atividade é mais sensível a variabilidade de duração da mesma.

Contudo, esta constatação não exime o gerente do projeto de uma avaliação de cenários do tipo “e se”, mas reforça que a avaliação de outros cenários eleva a profundidade de conhecimento do gerente do projeto sobre o impacto que cada atividade possui na duração total do projeto, e quais são as atividades que inegociavelmente demandam a maior atenção do gerente do projeto.

Na sequência, finalmente são comparados os resultados das etapas de simulação do modelo com os dados reais dos prazos totais empregados na execução dos projetos estudados. Esta comparação mostra a fidelidade dos modelos ao observado “in loco” e, também, mostra se a metodologia empregada para descrever a variabilidade de duração das atividades dos projetos gera resultados confiáveis.

4.3 Risco e Comparação de Resultados

O procedimento de comparação dos resultados é bastante simples, trata-se de verificar se os prazos totais reais dos projetos estão dentro do espectro de prazos totais simulados dos projetos. São conhecidos o prazo total estimado antes da execução do projeto e o prazo total empregado na execução do projeto; o primeiro é denominado “Previsão”; e o segundo é denominado “Conclusão”. Então, a comparação dos resultados segue as etapas das simulações conforme indicam a Tabela 13 e Tabela 14.

Tabela 13 – Risco e comparação dos resultados da SMC: Sem variação de vínculo.

		Previsão	Conclusão	CP	Mínimo	1° Quartil	Mediana	3° Quartil	Máximo	Amplitude
Projeto 1	Prazos >>	330 dias	374 dias	397 dias	334 dias	388 dias	398 dias	409 dias	462 dias	128 dias
	Riscos >>	100%	95%	52%	100%	75%	50%	25%	0%	
Projeto 2	Prazos >>	300 dias	396 dias	387 dias	339 dias	379 dias	388 dias	397 dias	439 dias	100 dias
	Riscos >>	100%	27%	51%	100%	75%	50%	25%	0%	
Projeto 3	Prazos >>	240 dias	462 dias	469 dias	414 dias	462 dias	473 dias	485 dias	558 dias	144 dias
	Riscos >>	100%	75%	59%	100%	75%	50%	25%	0%	

Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 14 – Risco e comparação dos resultados da SMC: Com variação de vínculo.

		Previsão	Conclusão	CP	Mínimo	1° Quartil	Mediana	3° Quartil	Máximo	Amplitude
Projeto 1	Prazos >>	330 dias	374 dias	397 dias	327 dias	369 dias	381 dias	394 dias	455 dias	128 dias
	Riscos >>	100%	64%	19%	100%	75%	50%	25%	0%	
Projeto 2	Prazos >>	300 dias	396 dias	387 dias	315 dias	362 dias	376 dias	390 dias	437 dias	122 dias
	Riscos >>	100%	15%	29%	100%	75%	50%	25%	0%	
Projeto 3	Prazos >>	240 dias	462 dias	469 dias	397 dias	451 dias	464 dias	478 dias	548 dias	151 dias
	Riscos >>	100%	53%	39%	100%	75%	50%	25%	0%	

Fonte: Elaborado pelo Autor

Na Tabela 13 e Tabela 14 os resultados simulados de duração total dos projetos são resumidamente apresentados na faixa de valores das colunas Mínimo, 1ºQuartil, Mediana, 3ºQuartil e Máximo. Logo, observa-se que os prazos totais de Conclusão dos projetos encaixam-se dentro do espectro de resultados da simulação, diferente dos prazos previstos, que salvo o resultado do Projeto 1 na Tabela 14, não se encaixam no espectro de resultados da simulação.

Não é realizada nesta seção uma comparação entre os resultados da Tabela 13 e Tabela 14, pois esta comparação de resultados entre as diferentes simulações já foi realizada durante a apresentação dos resultados descritos na subseção 4.2.2.

Ademais, vale observar os riscos associados ao não cumprimento dos prazos expostos nas Tabelas desta seção, e anotar também, que os modelos simulados e alimentados pelos parâmetros estatísticos obtidos têm uma boa aderência com a realidade de execução dos projetos.

5. CONCLUSÃO

Avaliando os resultados apresentados no capítulo 4 pode-se dizer que o objetivo proposto nesta pesquisa foi alcançado. De fato, a descrição da variabilidade de duração das atividades por meio da técnica de reamostragem Bootstrap não paramétrico associado a Simulação de Monte Carlo (SMC) produziu resultados condizentes com a realidade, pois utilizando os parâmetros estatísticos de duração das atividades para alimentar os modelos de cronograma dos projetos durante a SMC, os resultados de duração total das simulações são adequados ao prazo real total de conclusão dos projetos.

Pode-se argumentar que a definição do modelo de cronograma dos projetos – através da definição dos vínculos entre as atividades – está ajustada para produzir os resultados desejados. No entanto, tendo realizado a SMC com variação de vínculos no intuito de testar outros cenários de cronograma para os projetos, produziu resultados igualmente adequados ao prazo real total de conclusão dos projetos. Logo, pode-se concluir que o resultado de duração total do projeto e os caminhos de sua execução são mais sensíveis à duração das atividades do que à vinculação entre elas.

Esta conclusão corrobora com as pesquisas citadas na subseção 1.1.1 que classificam a variação na duração das atividades e, ou, a falta de estimativa inadequada para duração das atividades como fatores, dentre muitos, que contribuem para o atraso no prazo de conclusão e entrega de projetos de construção civil.

Em consonância com a afirmativa do parágrafo acima, pode-se concluir pela verificação dos resultados da Tabela 13 e Tabela 14 (ambas na pág.88) que os Estudos de Caso desta pesquisa muito provavelmente não passaram por uma rígida avaliação de estimativa de prazos e duração das atividades. Pois, os prazos totais previstos para os

projetos não se aderem aos resultados das simulações realizadas, salvo caso do Projeto 1 na Tabela 14 por uma diferença mínima.

Todavia, não se pode afirmar se a variabilidade encontrada nas atividades é fator intrínseco da complexidade das atividades, ou é em decorrência de alguma característica inerente da empresa contratada para execução, como por exemplo: inexperiência; burocracia; falta de recursos; entre outros. Não se pode afirmar ainda se a variabilidade de duração das atividades é responsabilidade do contratante, ou em razão de fatores externos. Enfim, não se conhece os fatores de risco e os efeitos que estes possuem sobre a variabilidade de duração das atividades, seja em conjunto ou isoladamente.

Assim, segue como sugestão para ampliação desta pesquisa a realização do procedimento metodológico *ex-post-facto* com o objetivo de investigar as possíveis relações de causa e efeito entre os fatores de risco e a variabilidade na duração das atividades. Uma pesquisa desta magnitude demandará a obtenção de estudos de caso semelhantes empreendidos por diferentes clientes e executados por diferentes contratados, sendo necessário o acompanhamento rotineiro dos projetos, além de uma sistemática previamente estabelecida para coleta de dados.

Tal sugestão de pesquisa contribuirá para aprofundar o entendimento dos efeitos que os fatores de risco têm sobre o projeto, permitindo que as empresas possam compreender quais atitudes devem personificar frente as exigências de um projeto, ou se o cumprimento das exigências do projeto são viáveis e trazem substancial retorno para a empresa executora em face das suas características, ou da sua disponibilidade de mudanças e adaptação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALENCAR, L. H.; SANTANA, M. DE O. Análise do gerenciamento de múltiplos projetos na construção civil. **Revista de Gestão e Projetos**, v. 1, n. 1, p. 74–92, 2010.

ARENALES, M. et al. **Pesquisa Operacional para Cursos de Engenharia**. Digital ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2011.

ASSAF, S. A.; AL - HEJJI, S. Causes of delay in large construction projects. **International Journal of Project Management**, v. 24, n. 4, p. 349–357, 2006.

BARRERAS, A. T. J. **Risk Management – Monte Carlo Simulation in Cost Estimating Foundation in Risk Management**. PMI Global Congress. **Anais...**Dallas: 2011

BARRY, T. M. Recommendations on the Testing and Use of Pseudo-Random Number Generators Used in Monte Carlo Analysis for Risk Assessment. **Risk Analysis**, v. 16, n. 1, p. 93–105, 1996.

BOMFIN, D. F.; NUNES, P. C. DE Á.; HASTENREITER, F. Gerenciamento De Projetos Segundo O Guia Pmbok: Desafios Para Os Gestores. **Revista de Gestão e Projetos**, v. 3, n. 3, p. 58–87, 2012.

BROWNING, T. R. Applying the Design Structure Matrix to System Decomposition and Integration Problems: A Review and New Directions. **IEEE TRANSACTIONS ON ENGINEERING MANAGEMENT**, v. 48, n. 3, p. 292–306, 2001.

CHEN, C.-H.; LING, S. F.; CHEN, W. Project scheduling for collaborative product development using DSM. **International Journal of Project Management**, v. 21, n. 4, p. 291–299, 2003.

CHWIF, L.; MEDINA, A. C. **Modelagem e simulação de eventos discretos**. 4. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

D'ONOFRIO, R. M. CPM Scheduling: A 60-Year History. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 143, n. 10, p. 2517010, 2017.

DECKER, K. M. The Monte Carlo method in science and engineering: Theory and application. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, v. 89, n. 1–3, p. 463–483, 1991.

EFRON, B.; TIBSHIRANI, R. Bootstrap Methods for Standard Errors, Confidence Intervals, and Other Measures of Statistical Accuracy. **Statistical Science**, v. 1, n. 1, p. 54–77, 1986.

GALLOWAY, P. D. Survey of the Construction Industry Relative to the Use of CPM Scheduling for Construction Projects. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 132, n. 7, p. 697–711, 2006a.

GALLOWAY, P. D. Comparative Study of University Courses on Critical-Path Method

Scheduling. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 132, n. 7, p. 712–722, 2006b.

GÁLVEZ, E. D. et al. **On Project Scheduling Using DSM**. 20th International Congress on Project Management and Engineering. **Anais...**Cartagena: 2016

GÁLVEZ, E. D.; CAPUZ-RIZO, S. F.; ORDIERES, J. B. Estudio de la Incertidumbre en la Programación de Actividades usando la Matriz de Estructura Dependiente. **Información Tecnológica**, v. 23, n. 1, p. 19–34, 2012.

GÁLVEZ, E. D.; ORDIERES, J. B.; CAPUZ-RIZO, S. F. Evaluation of Project Duration Uncertainty using the Dependency Structure Matrix and Monte Carlo Simulations. **Journal of Construction**, v. 14, n. 2, 2015.

GERHARDT, T. E.; SILVEIRA, D. T. **Métodos de pesquisa**. 1. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009.

GRAVES, R. Open and closed the Monte Carlo model. **PM Network**, v. 15, n. 1, p. 48–52, 2001.

GUALBERTO, A. C. F. **Aplicação da ferramenta DSM – Design Structure Matrix ao planejamento do processo de projeto de edificações**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2011.

GUDIENE, N.; BANAITIS, A.; BANAITIENE, N. Evaluation of critical success factors for construction projects - an empirical study in Lithuania. **International Journal of Strategic Property Management**, v. 17, n. 1, p. 21, 2013.

GUNAWAN, I. DSM Methods To Improve Planning And Scheduling In Asset Management. **Asset Management and Maintenance Journal**, v. 25, n. 1, p. 50–55, 2012.

GUNAWAN, I.; AHSAN, K. Project scheduling improvement using design structure matrix. **International Journal of Project Organisation and Management**, v. 2, n. 4, 7, p. 311–327(17), 2010.

HASHEMI, H.; MOUSAVI, S. M.; MOJTAHEDI, S. M. H. Bootstrap Technique for Risk Analysis with Interval Numbers in Bridge Construction Projects. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 137, n. 8, p. 600–608, 2011.

HEERDT, M. L.; LEONEL, V. **Metodologia científica e da pesquisa: livro didático**. 5. ed. Palhoça: UnisulVirtual, 2007.

HENDERSON, A. R. The bootstrap: A technique for data-driven statistics. Using computer-intensive analyses to explore experimental data. **Clinica Chimica Acta**, v. 359, n. 1–2, p. 1–26, 2005.

HU, X. et al. Incorporation of activity sensitivity measures into buffer management to manage project schedule risk. **European Journal of Operational Research**, v. 249, n. 2, p. 717–727, 2016.

IPMA. **ICB - IPMA Competence Baseline, Version 3.0**. Digital ed. Amsterdam: IPMA,

2006.

IPMA. **IPMA 50 years: building briddges worldwide**. Panama ed. Amsterdam: IPMA, 2015.

KIRYTOPOULOS, K. A.; LEOPOULOS, V. N.; DIAMANTAS, V. K. PERT vs. Monte Carlo Simulation along with the suitable distribution effect. **International Journal of Project Organisation and Management**, v. 1, n. 1, p. 24, 2008.

KWAK, Y. H.; INGALL, L. Exploring Monte Carlo Simulation Applications for Project Management. **IEEE Engineering Management Review**, v. 37, n. 2, p. 83, 2009.

LASLO, Z.; GUREVICH, G. PERT-type projects: Time-cost tradeoffs under uncertainty. **Simulation**, v. 89, n. 3, p. 278–293, 2013.

LEACH, L. P. **Critical Chain Project Management**. Norwood: ARTECH HOUSE, INC., 2000.

LEAL, L. R.; OLIVEIRA, M. J. F. DE. Simulação aplicada ao gerenciamento de projetos: uma revisão. **Revista Produção Online**, v. 11, n. 2, p. 503–525, 2011.

MACHADO, F. J.; MARTENS, C. D. P. Project Management Success: A Bibliometric Analisis. **Revista de Gestão e Projetos**, v. 6, n. 1, p. 28, 2015.

MAHESWARI, J. U.; VARGHESE, K. Project Scheduling using Dependency Structure Matrix. **International Journal of Project Management**, v. 23, n. 3, p. 223–230, 2005.

MICROSOFT. **Descrição da função RAND no Excel 2007 e no Excel 2003**. Disponível em: <<https://support.microsoft.com/pt-br/help/828795/description-of-the-rand-function-in-excel>>. Acesso em: 20 jun. 2017.

OWOLABI, J. D. et al. Causes and effects of delay on project construction delivery time. **International Journal of Education and Research**, v. 2, n. 4, p. 197–208, 2014.

PMI. **Um Guia do Conhecimento em Gerenciamento de Projetos (Guia PMBOK)**. 5. ed. Filadélfia: PMI, 2013.

RABECHINI JUNIOR, R.; CARVALHO, M. M. DE. Relacionamento entre gerenciamento de risco e sucesso de projetos. **Production**, v. 23, n. 3, p. 570–581, 2013.

REIS, C. J. L. et al. **Identificação das causas de atrasos de obras: Um estudo de caso na região metropolitana de Belém**. XVI Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. **Anais...**São Paulo: 2016

ROBERT, C. P. Monte Carlo Methods. **Wiley StatsRef: Statistics Reference Online**, p. 1–13, 2016.

SILVA FILHO, A. S. DA. Inferência Em Amostras Pequenas: Métodos Bootstrap. **Revista de Ciências Exatas e Tecnologia**, v. 5, n. 5, p. 115–126, 2010.

SONMEZ, R. Parametric Range Estimating of Building Costs Using Regression Models and Bootstrap. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 134, n.

December, p. 1011–1016, 2008.

STEWART, D. V. The design structure system: A method for managing the design of complex systems. **IEEE Transactions on Engineering Management**, v. EM-28, n. 3, p. 71–74, 1981.

TURLEY, F. **The PRINCE2 Training Manual-Practitioner Level**. Digital ed. Tremelo: MgmtPlaza, 2010.

VAN SLYKE, R. M. Monte Carlo Methods and PERT Problems. **Operations Research**, v. 11, n. 5, p. 839–860, 1963.

VEZZONI, G. et al. Identificação e Análise de Fatores Críticos de Sucesso em Projetos. **Revista de Gestão e Projetos**, v. 4, n. 1, p. 116–137, 2013.

WEAVER, P. **Trends In Modern Project Management, Past, Present and Future**. PM OZ. **Anais...Queensland**: 2007

WEAVER, P. Henry L Gantt, 1861 - 1919 A retrospective view of his work. **PM World Journal**, v. 5, 2012.

WILLIAMS, T. The contribution of mathematical modelling to the practice of project management. **IMA Journal of Management Mathematics**, v. 14, n. 1, p. 3–30, 2003.

WILLIAMS, T. Why Monte Carlo Simulations of project networks can mislead. **Project Management Journal**, v. 35, n. 3, p. 53–61, 2004.

WILLIAMS, T. M. Criticality in Stochastic Networks. **The Journal of the Operational Research Society**, v. 43, n. 4, p. 353–357, 1992.

WYROŻĘBSKI, P.; WYROŻĘBSKA, A. Benefits of Monte Carlo simulation as the extension to the Programme Evaluation and Review Technique. **Electronic International Interdisciplinary Conference**, v. 2, n. 1, p. 95–99, 2013.

ZHENG, E. Z. H.; CARVALHO, M. M. DE. Managing Uncertainty in Projects: A Review, Trends and Gaps. **Revista de Gestão e Projetos**, v. 7, n. 2, p. 95–109, 2016.

APÊNDICE A

Parâmetros das Distribuições Conhecidas Calculados da Distribuição das Médias
Bootstrap de Produtividade das Atividades

Distribuição	Parâmetro	Equação
Normal	Média (μ)	$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$
	Desvio-Padrão (σ)	$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}$
LogNormal	$[\mu(\log); \sigma(\log)]$	Se $X=f(x;\mu,\sigma)$ for LogNormal, então $\ln(X)$ é Normal. Logo, $\mu(\log)$ e $\sigma(\log)$ são calculados de $\ln(X)$.
Gama	Alpha (α)	$\alpha = \frac{\mu^2}{\sigma^2}$
	Beta (β)	$\beta = \frac{\sigma^2}{\mu}$
Beta	Mínimo (a)	$a = \min_{1 \leq i \leq n} (x_i)$
	Modo (b)	$b = x, \text{ cuja frequência é máxima}$
	Máximo (c)	$c = \max_{1 \leq i \leq n} (x_i)$
	Alpha (α)	$\alpha = \left\{ \frac{2(c - 4b - 5a)}{3(c - a)} \right\} x \left\{ 1 + \left[\frac{4(b - a)(c - b)}{(c - a)^2} \right] \right\}$
	Beta (β)	$\beta = \left\{ \frac{2(5c - 4b - a)}{3(c - a)} \right\} x \left\{ 1 + \left[\frac{4(b - a)(c - b)}{(c - a)^2} \right] \right\}$
Triangular	$[a; b; c]$	Mínimo, Modo e Máximo são utilizados, também, para a distribuição triangular.
	Inflexão	$I = \frac{(b - a)}{(c - a)}$
Exponencial	Lambda (λ)	$\lambda = \frac{1}{\mu}$
Student	Grau de Liberdade (GL)	$GL = (n^\circ \text{ de observações}) - 1$

APÊNDICE B

Funções do Excel Versão 2016 para Geração dos Valores Aleatórios das Distribuições Conhecidas: Aplicadas à Simulação de Monte Carlo (SMC)

DISTRIBUIÇÃO	FUNÇÃO EXCEL
*ALEATÓRIO (X)	$X = ALEATÓRIO()$
NORMAL (N)	$N = INV.NORM.N(X; \mu; \sigma)$
LOGNORMAL (L)	$L = INV.LOGNORMAL(X; \mu(\log); \sigma(\log))$
GAMA (G)	$G = INV.GAMA(X; \alpha; \beta)$
BETA (B)	$B = INV.BETA(X; \alpha; \beta; a; c)$
TRIANGULAR (T)	Função do usuário implementada em VBA. Ver Apêndice E.
EXPONENCIAL (E)	$E = -LN(X) * (1/\lambda)$
STUDENT (S)	$S = INV.T.BC(X; GL)$

*A função ALEATÓRIO() não possui parâmetros e opera o algoritmo AS 183 de Wichmann-Hill, gerando valores aleatórios reais entre 0 e 1.

APÊNDICE C

Equações para Mudança dos Parâmetros de Produtividade (p) em Parâmetros de Duração (d) das Atividades em Função do Quantitativo de Serviço

Distribuição	Parâmetro	Equação
Normal	Média (μ)	$\mu_d = \frac{Qtd. Serv.}{\mu_p}$
	DP (σ)	$\sigma_d = CV * \mu_d$
LogNormal	$[\mu(\log); \sigma(\log)]$	Se $X=f(x; \mu_d, \sigma_d)$ for LogNormal, então $\ln(X)$ é Normal. Logo, $\mu_d(\log)$ e $\sigma_d(\log)$ são calculados de $\ln(X)$.
Gama	Alpha (α)	$\alpha_d = \frac{\mu_d^2}{\sigma_d^2}$
	Beta (β)	$\beta_d = \sigma_d^2 / \mu_d$
Beta	Mín. (a)	$a_d = \mu_d - \left[6\sigma_d * \left(\frac{\alpha_p}{\alpha_p + \beta_p} \right) \right]$
	Modo (b)	$b_d = a_d + \left[6\sigma_d * \left(\frac{\alpha_p - 1}{\alpha_p + \beta_p - 2} \right) \right]$
	Máx. (c)	$c_d = a_d + 6\sigma_d$
	Alpha (α)	$\alpha_d = \left\{ \frac{2(c_d - 4b_d - 5a_d)}{3(c_d - a_d)} \right\} x \left\{ 1 + \left[\frac{4(b_d - a_d)(c_d - b_d)}{(c_d - a_d)^2} \right] \right\}$
	Beta (β)	$\beta_d = \left\{ \frac{2(5c_d - 4b_d - a_d)}{3(c_d - a_d)} \right\} x \left\{ 1 + \left[\frac{4(b_d - a_d)(c_d - b_d)}{(c_d - a_d)^2} \right] \right\}$
Triangular	[a; b; c]	Os parâmetros [a_d ; b_d ; c_d] são calculados usando μ_d, σ_d^2, I_p . Ver Apêndice D.
	Inflexão	$I_d = I_p$, pois representa a variabilidade da distribuição
Exponencial	Lambda (λ)	$\lambda_d = \frac{1}{\mu_d}$

APÊNDICE D

Mudança dos Parâmetros da Distribuição Triangular de Produtividade para Duração das Atividades: Utilizando o Recurso Solver do *Software* Excel

	A	B	C	D	E	F
1	Definir Projeto >>>				Projeto 3	
2	Estatísticas	Dados	Cálculo		Parâmetros DistTriangular	
3	Média	10,39071	10,39071		Mínimo	6,416445
4	Variância	2,05469	2,054686		Modo	11,68357
5	Inflexão	0,791374	0,791374		Máximo	13,07212
6						
7	Legenda de definições do problema Solver					
8		Célula objetivo				
9		Restrições do problema				
10		Variáveis de objetivo e das restrições				
11		Definição dos dados estatísticos de entrada				

Figura 28 – Montagem do problema para mudança dos parâmetros utilizando o recurso Solver. Fonte: Elaborado pelo Autor.

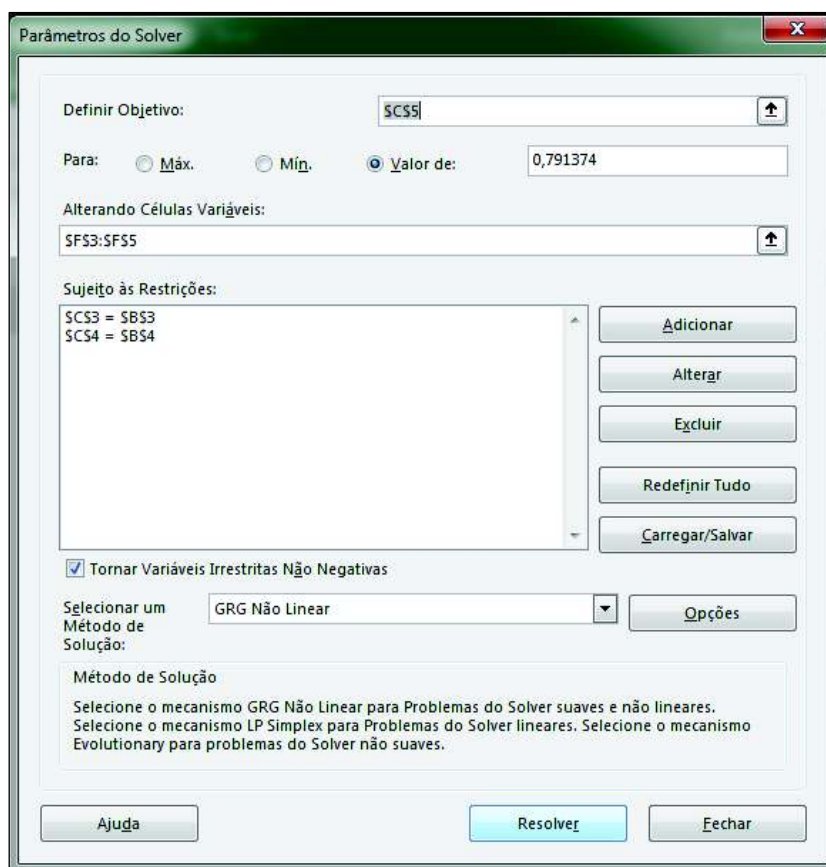


Figura 29 – Solução do Solver para mudança de parâmetros. Fonte Elaborado pelo Autor.

APÊNDICE E

Função Implementada Pelo Usuário em Ambiente VBA para Geração de Valores Aleatórios da Distribuição Triangular.

```
Attribute VB_Name = "Módulo1"  
Function DistTriangular(ByVal Aleatorio As Single, ByVal  
ValorMim As Single, ByVal ValorMaisProvavel As Single, ByVal  
ValorMax As Single)  
  
Dim A As Single  
Dim B As Single  
Inflex = (ValorMaisProvavel - ValorMim) / (ValorMax - ValorMim)  
  
A = ValorMim + Sqr((ValorMaisProvavel - ValorMim) * (ValorMax -  
ValorMim) * Aleatorio)  
B = ValorMax - Sqr((ValorMax - ValorMaisProvavel) * (ValorMax -  
ValorMim) * (1 - Aleatorio))  
  
If Aleatorio <= Inflex Then  
DistTriangular = A  
Else  
DistTriangular = B  
End If  
  
End Function
```

APÊNDICE F

Algoritmo de Monte Carlo Desenvolvido para Testar a Aderência das Distribuições

```

Attribute VB_Name = "Módulo2"
Sub ResultadoAderenciaDistribuicao()
Attribute
ResultadoAderenciaDistribuicao.VB_ProcData.VB_Invoke_Func = "
\n14"
'
' ResultadoAderenciaDistribuicao Macro
'
'
' desliga o cálculo automático
Application.Calculation = xlManual

' inicia o processo
i = 1

For i = 1 To 1000
' calcula a planilha AderenciaDist
ActiveSheet.Calculate

' copia e armazena os resultados da distribuição
Range("AD24").Select
Selection.Copy
Sheets("ResultadoDist").Select
Cells(i, 1).Select
Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues,
Operation:=xlNone, SkipBlanks _
:=False, Transpose:=False
Application.CutCopyMode = False

' retorna para a planilha AderenciaDist
Sheets("AderenciaDist").Select
Next i

' retorna e calcula a planilha ResultadoDist
Sheets("ResultadoDist").Select
ActiveSheet.Calculate
Range("F11").Select
End Sub

```

APÊNDICE G

Algoritmo de Monte Carlo Desenvolvido para Simular o Modelo de Cronograma dos Projetos Estudados

```

Attribute VB_Name = "Módulo1"
Sub SimulaProjetoDistribuicao()

    'SimulaProjetoDistribuicao Macro

    'seleciona a planilha SimModelo
    Sheets("SimModelo").Select

    'desliga o cálculo automático
    Application.Calculation = xlManual

    'inicia o processo
    i = 2
    For i = 2 To 10001
        'calcula a planilha SimModelo
        ActiveSheet.Calculate

        'copia e armazena os resultados de CP duração do projeto
        Range("BQ2:BQ30").Select 'seleciona
        Selection.Copy 'copia
        Sheets("Resultados").Select 'vai para Resultados
        Cells(i, 1).Select 'posiciona
        'cola os dados selecionados
        Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues,
Operation:=xlNone, SkipBlanks _
:=False, Transpose:=True
        Application.CutCopyMode = False

        'retorna para a planilha SimModelo
        Sheets("SimModelo").Select
    Next i

    'finaliza a aplicação
    Sheets("AnaliseSim").Select
    Range("R21").Select

End Sub

```