Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Centro de Tecnologia e Ciências
Faculdade de Engenharia

Diego Cesar Cavalcanti de Andrade

Estudo do gerenciamento do tempo em projetos de construção civil enxuta através da simulação de eventos discretos

Rio de Janeiro
2012

Diego Cesar Cavalcanti de Andrade

Estudo do gerenciamento do tempo em projetos de construção civil enxuta através da simulação de eventos discretos

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Estruturas.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Miyashita

Coorientador: Prof. Dr. Cyro Alves Borges Júnior

Rio de Janeiro

2012

CATALOGAÇÃO NA FONTE

UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

A554 Andrade, Diego Cesar Cavalcanti de.
Estudo do gerenciamento do tempo em projetos de construção civil enxuta através da simulação de eventos discretos / Diego Cesar Cavalcanti de Andrade. - 2012.
116 f.

Orientador: Ricardo Miyashita.
Coorientador: Cyro Alves Borges Júnior
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia Civil. 2. Construção civil - Projetos – Dissertações. I. Mangiavacchi, Norberto. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. III. Título.

CDU 624.(083.94)

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Diego Cesar Cavalcanti de Andrade

Estudo do gerenciamento de tempo em projetos de construção civil enxuta através da simulação de eventos discretos

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Estruturas.

Aprovado em: 20 de dezembro de 2012.

Banca Examinadora:

_____

Prof. Dr. Ricardo Miyashita (Orientador)
Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ

_____

Prof. Dr. Cyro Alves Borges Júnior (Coorientador)
Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ

_____

Prof. Dr. Antônio Marcos Duarte Junior
Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ

_____

Prof. Dr. Eduardo Saliby
Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ

Rio de Janeiro

2012

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Ricardo Miyashita, pela confiança, paciência, apoio, incentivo e suporte durante todo o curso de mestrado.

Ao professor Cyro Borges pelo grande incentivo e receptividade principalmente durante os primeiros períodos do mestrado.

Aos professores Francisco Soeiro, Luiz Biondi e Eduardo Saliby que também contribuíram imensamente para minha formação durante suas disciplinas.

As pessoas que tive a oportunidade de conhecer e estudar junto como: Otacílio, Fabrício, Nívea e Robson, como também a Shirley ex-secretária do PGECIV.

Agradeço também a Rodolfo Cardoso, Iara Tammela, Edwin MItacc e Anibal Vilcapoma pelo incentivo a começar, como também, a concluir o mestrado.

A minha família, especialmente a minha mãe que sempre me apoiou e me incentivou para os estudos.

RESUMO

ANDRADE, Diego Cesar Cavalcanti de. **Estudo do gerenciamento do tempo em projetos de construção civil enxuta através da simulação de eventos discretos**. Rio de Janeiro, 2012. 129f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

O gerenciamento do tempo nos projetos de construção civil usualmente utiliza algoritmos determinísticos para o cálculo dos prazos de finalização e algoritmos PERT para avaliação da probabilidade de o mesmo terminar até uma determinada data. Os resultados calculados pelos algoritmos tradicionais possuem defasagens nos prazos se comparados aos encontrados na realidade o que vem fazendo com que a simulação venha se tornando uma ferramenta cada vez mais utilizada no gerenciamento de projetos. O objetivo da dissertação é estudar o problema dos prazos de finalização dos projetos desenvolvendo novas técnicas de cálculo que reflitam melhor os prazos encontrados na vida real. A partir disso é criada uma ferramenta prática de gerenciamento do tempo de atividades de projetos de construção enxuta baseada em planilha eletrônica onde serão utilizadas técnicas de simulação a eventos discretos, com base em distribuições de probabilidade como, por exemplo, a distribuição beta.

Palavras-chave: Simulação de eventos discretos; Construção enxuta; Gerenciamento de projetos; PERT/CPM.

ABSTRACT

Time management in construction projects usually use deterministic algorithms to calculate the time of fulfillment, and PERT algorithms to evaluate the probability of such project ending by a certain date. The results achieved by traditional algorithms are not accurate when compared to those found in the field, which is increasing the use of simulation as a tool in project management. The aim of this dissertation is to study the deadline fulfillment problems of projects, developing new calculation techniques that better represent the deadlines found in real life. For such study is developed a practical tool for time management of lean construction projects based on spreadsheet which will be used discrete event simulation techniques based in probability distributions, such as, the beta distribution.

Keywords:. Discrete-event simulation; Lean construction; Project management; PERT/CPM.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – O Modelo FTV 15

Figura 2 – Relação entre desperdício, sobrecarga e a variabilidade em relação a capacidade da equipe de trabalho 16

Figura 3 – O mundo real 18

Figura 4 – Distribuição de probabilidade de tempos estimados 19

Figura 5 – Exemplo de Rede PERT 20

Figura 6 – Famílias de PERT Beta de acordo com a variação de m 28

Figura 7 – PERT Beta f.d.p.s para m = 1,2,3,4,5,6,7,8,9 em [a = 0,m,b=10] 29

Figura 8 – Construção da distribuição bi parabólica 30

Figura 9 – Procedimento para obter a média e a variância através da distribuição SGBP 32

Figura 10 - Variável de estado em um sistema discreto 36

Figura 11 – Variável de estado em um sistema contínuo 36

Figura 12 – Ilustração do método da transformação inversa para se obter a observação aleatória de dada distribuição de probabilidades 45

Figura 13 – Metodologia utilizada 49

Figura 14 – Etapas de Desenvolvimento do Modelo 52

Figura 15 – Rede de Atividades 56

Figura 16 – Tabela de exemplo 57

Figura 17 – Simulando as folgas 57

Figura 18 – Etapas para encontrar o caminho crítico 58

Figura 19 – Probabilidade de um do caminho ser o caminho crítico 59

Figura 20 – Probabilidade de uma atividade ser crítica 61

Figura 21 – Rede de atividades do exemplo 1. 63

Figura 22 – Comparação da função densidade de probabilidade exemplo 1a 64

Figura 23 – Comparação da função densidade de probabilidade exemplo 1b 64

Figura 24 – Comparação da função densidade de probabilidade exemplo 1c 65

Figura 25 – Comparação da função densidade de probabilidade exemplo 1d 65

Figura 26 – Comparação da função de probabilidade acumulada exemplo 1d 66

Figura 27 – Rede do Exemplo 2. 68
Figura 28 – Distribuição sugerida pelo PERT para o exemplo 2 69
Figura 29 – Distribuição obtida na simulação 70
Figura 30 – Exemplo 2 PERT x Simulação 70
Figura 31 – Comparação das curvas em S. 71
Figura 32 – Exemplo 2 Beta x Simulação 72
Figura 33 – Comparação das curvas em S Beta x Simulação 73
Figura 34 – Comparação das curvas em S PERT x Beta x Simulação 74
Figura 35 – Foto do esqueleto metálico do Ed. Alfacon, São Paulo 75
Figura 36 – Rede Pert 76
Figura 37 – Corte transversal da estrutura utilizada na montagem do steel deck 77
Figura 38 – Estrutura proposta por Azevedo (2010) 77
Figura 49 – Visão sistêmica dos macro processos 78
Figura 40 – Modelagem da rede PERT baseada nas macro atividades. 79
Figura 41 – Visão sistêmica do problema (rede explodida) 81
Figura 42 – Modelando a rede na ferramenta 81
Figura 43 – Distribuição qui-quadrado 84
Figura 44 – Inserindo os parâmetros das atividades na ferramenta 86
Figura 45 – Histograma da data de término do projeto 88
Figura 46 – Probabilidade de o projeto terminar até determinadas datas de execução em horas 89
Figura 47 – Probabilidade das atividades que compõem o Steel Deck serem críticas em função do pavimento executado. 89
Figura 48 – Probabilidade das atividades que compõem a Armação serem críticas em função do pavimento executado. 90
Figura 49 – Probabilidade das atividades que compõem a Concretagem serem críticas em função do pavimento executado. 90
Figura 50 – Modificando as estimativas na ferramenta - cenário 1 a) 90
Figura 51 – Histograma para o caso a). 92
Figura 52 – SD cenário 1 item a) 92
Figura 53 – AR cenário 1 item a) 93
Figura 54 – CC cenário 1 item a) 94

Figura 55 – Modificando as estimativas na ferramenta - cenário 1 b) 94
Figura 56 – Histograma cenário 1 item b) 95
Figura 57 – SD cenário 1 item b) 96
Figura 58 – AR cenário 1 item b) 96
Figura 59 – CC cenário 1 item b) 97
Figura 60 – Modificando as estimativas na ferramenta - cenário 1 c) 97
Figura 61 – Histograma cenário 1 item c) 98
Figura 62 – SD cenário 1 item c) 98
Figura 63 – AR cenário 1 item c) 99
Figura 64 – CC cenário 1 item c) 99
Figura 65 – Inserindo as estimativas do cenário 2 na ferramenta 100
Figura 66 – Histograma do cenário 2 101
Figura 67 – SD no cenário 2 101
Figura 68 – AR no cenário 2 102
Figura 69 – CC no cenário 2 102
Figura 70 – Processo de melhoria contínua com base na simulação 104
Figura 71 – Visão do painel final 108
Figura 72 – Visão da análise do caminho crítico no painel final 109

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Lista de dissertações da linha de Aplicação de Métodos Industriais Avançados no Processo Construtivo do programa de pós graduação em Engenharia Civil da UERJ que deram sustentação para este trabalho.	02
Quadro 2 – Principais referências ao tema Construção Enxuta	09
Quadro 3 – A Teoria TFV	14
Quadro 4 – Lista dos fatores que afetam a confiabilidade do fluxo	17
Quadro 5 – Principais referências ao tema PERT	18
Quadro 6 – Principais referências ao tema Simulação	33
Quadro 7 - Vantagens e Limitações da Simulação de Eventos Discretos na Gestão de Projetos	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tabela de precedentes 20
Tabela 2 – Estimativas das atividades da rede 22
Tabela 3 - Cálculo das "durações mais cedo" 23
Tabela 4 – Cálculo das durações 23
Tabela 5 – Valores de Dcrítico do teste Kolmogorov-Smirnov 40
Tabela 6 – Ilustração do método congruente misto 44
Tabela 7 – Convertendo números aleatórios inteiros em números aleatórios uniformes 44
Tabela 8 – Dados da rede 56
Tabela 9 – Cálculo do caminho crítico mais provável 59
Tabela 10 – Contando o número de folgas iguais a zero 60
Tabela 11 – Calculando a probabilidade de uma atividade estar no caminho crítico 60
Tabela 12 - Tabela de predecessores do exemplo 1 63
Tabela 13 – Estimativas utilizadas no exemplo 1d 66
Tabela 14 – Resultado do teste KS 67
Tabela 15 – Tabela de predecessores do exemplo 2 68
Tabela 16 – Variância do caminho crítico 69
Tabela 17 – Probabilidades PERT x Simulação 71
Tabela 18 – Atividades, atividades precedentes e duração estimada 76
Tabela 19 – Lista de precedência das macro atividades 78
Tabela 20 – Inter-relações das atividades. 80
Tabela 21 – Estimativas utilizadas por Azevedo (2010) 84
Tabela 22 – Estimativas utilizadas no estudo de caso 86

LISTA DE ABREVIATURAS E DE SIGLAS

AR	Armação
BP	Distribuição Bi Parabólica
CC	Concretagem
CPM	Critical Path Method
DCI	Data mais cedo de início
DCT	Data mais cedo de término
DTI	Data mais tarde de início
DTT	Data mais tarde de término
F.D.P.	Função Densidade de Probabilidade
F.M.P.	Função Massa de Probabilidade
GBP	Distribuição Bi Parabólica Generalizada
KS	Teste de Kolmogorov-Smirnov
PERT	Program Evaluation and Review Technique
SBP	Distribuição Bi Parabólica Padronizada
SD	Steel Deck
SGBP	Distribuição Padronizada Bi Parabólica Generalizada
TFV	Transformação-Fluxo-Valor
TLC	Teorema do Limite Central
UERJ	Universidade do Estado do Rio de Janeiro

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO 14

1.1 CONTEXTO DA PESQUISA 14
1.2 OBJETIVOS 18
1.3 RELEVÂNCIA 18
1.4 LIMITAÇÕES DA PESQUISA 19
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO 20

2. **REVISÃO DA LITERATURA** 22

2.1 **CONSTRUÇÃO ENXUTA** 22
2.1.1 PRODUÇÃO ENXUTA 23
2.1.2 LEAN CONSTRUCTION 25
2.2 **PERT** 31
2.2.1 PERT CLÁSSICO 32
2.2.2 PERT: CRÍTICAS E ALTERNATIVAS DE APRIMORAMENTO 37
2.2.3 PERT: ALTERNATIVAS AO MÉTODO TRADICIONAL 40
2.3 **SIMULAÇÃO** 45
2.3.1 TESTES DE ADERÊNCIA 50
2.3.2 GERAÇÃO DE NÚMEROS ALEATÓRIOS 54
2.3.3 A SIMULAÇÃO NA CONSTRUÇÃO 59

3. **PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS** 62

3.1 **DEFINIÇÃO DO ESCOPO DO ESTUDO** 62
3.2 **DEFINIÇÃO DO PROBLEMA A SER MODELADO** 63
3.3 **REVISÃO DA LITERATURA** 64
3.4 **DESENVOLVIMENTO DA FERRAMENTA** 64
3.4.1 A GERAÇÃO DO MODELO ESTÁTICO 64
3.4.2 A GERAÇÃO DO MODELO DINÂMICO 65
3.4.3 ANÁLISE DE DADOS E TOMADA DE DECISÃO 67

4. **DESENVOLVIMENTO DA FERRAMENTA PARA GERENCIAMENTO DO FLUXO DE ATIVIDADES** 68

4.1 **MODELAGEM PRÉVIA** 68
4.1.1 CAMINHO CRÍTICO E ATIVIDADES CRÍTICAS 68
4.1.2 LIMITAÇÕES DO PERT TRADICIONAL 74
4.1.3 ESTUDO SOBRE O COMPORTAMENTO DA DISTRIBUIÇÃO DE SAÍDA 75
4.2 **DESCRIÇÃO DO PROBLEMA** 87
4.3 **GERAÇÃO DO MODELO ESTÁTICO** 91

4.4 **GERAÇÃO DO MODELO DINÂMICO** 95
4.4.1 IDENTIFICAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE ENTRADA 95
4.4.1.1 UTILIZAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO PERT BETA 98
4.4.2 PARAMETRIZAÇÃO DO MODELO DE SIMULAÇÃO 99
4.4.3 EXECUÇÃO DO MODELO DE SIMULAÇÃO 100
4.4.4 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE 104
4.5 **ANÁLISE DOS RESULTADOS DA SIMULAÇÃO** 116

5. **CONCLUSÃO** 119

5.1 **ATENDIMENTO AOS OBJETIVOS DA PESQUISA** 119
5.2 **CONSIDERAÇÕES FINAIS** 123
5.3 **SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS** 124

REFERÊNCIAS 126

INTRODUÇÃO

1.1 Contexto da Pesquisa

Este trabalho visa dar continuidade a uma série de dissertações desenvolvidas ao longo dos últimos oito anos na linha de pesquisa de Aplicação de Métodos Industriais Avançados no Processo Construtivo que pertence ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UERJ.

A linha de pesquisa tem como um de seus principais objetivos a utilização de estruturas de aço na construção civil como uma alternativa economicamente viável. Para isso é necessário o desenvolvimento de um projeto estrutural aliado às técnicas construtivas como, por exemplo, a construção enxuta.

A Construção Enxuta é uma adaptação da Produção Enxuta, técnica a qual é bastante difundida e de grande relevância para a manufatura que tem por objetivo trazer um aumento significativo na produtividade. A Construção Enxuta por sua vez busca incorporar os princípios da Produção Enxuta, com as devidas adaptações para conseguir otimizar seus recursos, sejam eles físicos, humanos, materiais, tempo etc.

Silva (2005) em sua dissertação analisou as condições de implementação de procedimentos *lean* em um anteprojeto de construção predial, buscando o aumento de produtividade da obra. O autor ainda ressalta a necessidade de adotar os princípios *lean* desde a fase de concepção do projeto e a utilização do *Brainstorming* para evitar problemas que ocasionam desperdícios ao longo da construção e introduzir certa padronização nos projetos induzindo um aumento de produtividade.

Já Di Bello (2007) faz uso da gestão de estoques (e da cadeia de suprimentos), análise de processos (pela administração da produção) e da tecnologia da informação para desenvolver a concepção de um Sistema de Informações Gerenciais da obra visando uma continuidade dos processos de produção na construção contribuindo para o conhecimento em relação ao fluxo de trabalho nos canteiros.

ANO	AUTOR	TÍTULO DA DISSERTAÇÃO	BREVE DESCRIÇÃO
2005	SILVA, R. R. L.	Construção Predial Lean – Mapeamento da Cadeia de Valor das Estruturas Metálicas	Propõe uma organização para o processo de construção de um prédio comercial, encadeando a logística de abastecimento do canteiro com a montagem das estruturas metálicas
2005	ARAÚJO, P. R. C	Logísticas para o Suprimento de Estruturas Metálicas em Construção Predial Lean	Propõe uma organização para o processo de abastecimento de estruturas metálicas na construção de um prédio comercial, correlacionando a logística de suprimento do canteiro com a montagem das estruturas metálicas
2007	DI BELLO, B. C.	Uma Metodologia de Planejamento Aplicada à Cadeia de Suprimentos de Construções Prediais	Gerenciamento da cadeia de suprimentos a partir da sincronização do fluxo do processo construtivo à logística de abastecimento no canteiro de obras, visando à redução dos tempos de espera e à eliminação das paradas no processo produtivo
2007	OLIVEIRA, D. S.	Uma Metodologia de Avaliação de Concretagens de Lajes Prediais na Ótica da Construção Lean	Investiga e identifica como diferentes ferramentas de planejamento podem ser utilizadas para controle, manutenção e melhoria da produtividade
2007	DA ROCHA, M. Q. B.	Elaboração de Indicadores e Uso de Ferramentas de Controle da Qualidade na Execução de Obras Prediais	Propõe uma adaptação na metodologia de utilização dos indicadores da qualidade, em conjunto com as ferramentas da qualidade, a fim de obter melhorias no processo construtivo predial
2009	ROSENBLUM, A.	Pontes em Estruturas Segmentadas Pré-moldadas Protendidas: Análise e Contribuições ao Gerenciamento do Processo Construtivo	Contribui para a melhoria do gerenciamento do processo construtivo de execução de pontes e viadutos em estruturas segmentadas pré-moldadas protendidas, construídas em balanços sucessivos, com base em uma análise das metodologias adotadas e verificando a viabilidade de implantação de um modelo nos processos de gestão que utilizam métodos industriais para execução de obras de arte especiais
2010	AZEVEDO, V. S.	Planejamento de Atividades da Construção Predial Visando a Redução de Perdas de Processo na Ótica da Construção Enxuta.	Avaliação das perdas ocorridas durante a execução das atividades pertencentes ao processo de execução de lajes prediais de edifícios construídos em estruturas metálicas, sob a ótica do conceito de atrasos e esperas através de uma simulação

Quadro 1: Lista de dissertações da linha de Aplicação de Métodos Industriais Avançados no Processo Construtivo do programa de pós graduação em Engenharia Civil da UERJ que deram sustentação para este trabalho.

Di Bello (2007) afirma que é necessário solucionar o problema da falta de informações relevantes e oportunas como também a utilização de novas tecnologias na forma de ferramentas que modelem as informações e gerenciem os dados de um empreendimento fornecendo informações aos gestores do projeto que permitindo assim as melhores tomadas de decisão.

Oliveira (2007), Rosenblum (2009) e Azevedo (2010) em seus trabalhos começam a fazer uso de simulações no Excel com visando compreender melhor o comportamento do fluxo de atividades no processo construtivo. Oliveira (2007) possui foco em identificar e eliminar diversas formas de desperdício como a espera pela próxima etapa do processo, o transporte desnecessário de materiais ou movimentação de pessoal e estoques acima nível do necessário.

Resenblum (2009) trata do problema do desbalanceamento da cadeia de suprimentos em função da programação do nível de estoque nas obras de pontes segmentadas fazendo uso da simulação para melhor acompanhamento do estoque. Azevedo (2010) desenvolve uma ferramenta com base no Excel que procura indicar desperdícios de tempo no processo construtivo caracterizados por Atrasos e Esperas.

Esta dissertação também procura adicionar mais uma ferramenta a literatura que permita um melhor gerenciamento do fluxo de atividades no processo construtivo, tendo como base a metodologia PERT e a simulação de eventos discretos.

Koskela (1992) apresentou um paradigma de gestão de produção, onde a produção foi concebida em três formas complementares - transformação, fluxo e geração de valor - que ficou conhecido como modelo FTV. A visão desses três conceitos levou ao nascimento da Construção Enxuta.

Um dos principais princípios utilizados pela Construção Enxuta é o do balanceamento do fluxo das atividades, que impacta diretamente na duração de todo o projeto. Srisuwanrat e Ioannou (2007) apontam que o impacto das incertezas e variabilidade no negócio agravam o problema da interrupção do trabalho e da ociosidade em atividades repetidas.

A incerteza na duração, como também a variação na qualidade da execução e a dependência lógica das atividades fazem com que os cronogramas sejam obrigados a mudar com o avanço da construção. No PERT é possível modelar essa

incerteza durante a fase de planejamento, utilizando distribuições de probabilidade que caracterizem as durações das atividades. (TOMMELEIN, 1998)

A variável tempo é importante quando se trabalha com o conceito de fluxo, pois ela indica a duração da atividade (AZEVEDO, 2010). O tempo necessário para a realização de um projeto de Engenharia Civil precisa ser gerenciado de alguma forma, pois existem prazos para serem cumpridos em um empreendimento, e assim surge uma demanda pela aplicação de técnicas como a PERT que buscam ter um melhor entendimento do tempo de cada atividade que compõem um projeto para poder entendê-lo como um todo.

Também devemos levar em consideração o fato de que a indústria da construção tem sido historicamente muita lenta no que se refere a mudanças nas técnicas de gerenciamento dos processos produtivos, o que faz com que seja muito difícil a implementação de conceitos da *lean production*. Profissionais do setor são receosos quanto à implementação de novas técnicas em projetos grandes e complexos. A implementação de um sistema de gestão fundamentalmente diferente em um projeto de milhões de dólares pode ser visto como um risco. Por esse motivo, a utilização da simulação computacional proporciona um excelente ambiente para avaliar os efeitos da implementação dos princípios da *lean production*, estudando seus efeitos, e ganhando um melhor entendimento de como esses princípios podem ser aplicados a projeto de construção na prática. (FARRAR *et al*., 2004)

Segundo Abu Hammad (2002), a simulação é a imitação da operação de um processo ou sistema do mundo real ao longo do tempo. Ela é utilizada para investigar uma ampla variedade de questões do tipo *what-if* sobre o sistema do mundo real. Além disso, dentre suas aplicações, temos que ela pode ser usada para avaliar melhorias sugeridas para os sistemas existentes. Essa abordagem ajudará a indústria a entender o valor das práticas enxutas e quais níveis de melhoria podem ser alcancados. (VELARD *et al,* 2009)

Várias corridas na simulação podem ajudar a medir e demonstrar os possíveis efeitos negativos de cenários que apresentam problemas observados em atividades tradicionais da construção. Esse procedimento também é conhecido como análise de sensibilidade, pois refere-se a várias corridas na simulação do modelo no qual pelo menos um parâmetro é modificado em cada corrida. (GEHBAUER *et al* 2007)

1.2 Objetivos

Esta dissertação se propõe a atingir quatro objetivos:

1. - Identificar, dentre as várias distribuições de probabilidade, se é possível encontrar uma que descreva melhor o tempo de execução de uma atividade típica de Construção Enxuta;
2. - Analisar se a técnica PERT clássica traz resultados precisos para o gerenciamento do tempo de projeto na construção enxuta;
3. - Elaborar uma ferramenta de simulação para o gerenciamento do tempo das atividades de projetos construção enxuta.
4. - Identificar quais distribuições de probabilidade descrevem melhor o tempo total de duração de uma rede de atividades de construção enxuta

1.3 Relevância

Para Koskela *et al* (2007) o gerenciamento do fluxo de processos ainda é mal compreendido, mesmo que existam boas práticas e muitos experimentos, proporcionando claramente um terreno fértil para a pesquisa.

Azevedo (2010) ressalta que a simulação é uma ferramenta interessante enquanto análise do comportamento das atividades, porém seria importante verificar sua extensão a atividades simultâneas, assim como a execução de um número maior de atividades, verificando a extensão ou potencialidade desta ferramenta. Desta maneira seria possível analisar o processo construtivo sob uma ótica menos pontual e verificar se este modelo é melhor aplicado a pequenos grupos de atividades, ou se encaixa de modo a analisar o processo construtivo de forma global.

Para Gehbauer *et al* (2007), a simulação do andamento das atividades produtivas frente a distúrbios pode ser útil para formar uma base de conhecimento experimental durante a fase de planejamento, permitindo a rápida identificação de áreas problemáticas. A simulação também ajuda ao gestor a antever quais as

repercussões nos âmbitos temporal e financeiro do projeto, podem ocorrer frente a mudanças no planejamento e nos processos devido a algum problema.

Do ponto de vista prático, a aplicabilidade da teoria da construção enxuta depende de estudos práticos. Uma alternativa seria por meio da simulação do processo construtivo utilizando recursos computacionais e a análise dos resultados.

Pretende-se, por meio deste estudo, cobrir uma lacuna existente na literatura no que relaciona ao gerenciamento do fluxo de atividades na construção enxuta, e que consiste em gerenciar o impacto que as variações dos tempos de duração das atividades presentes em um projeto de construção enxuta, causam no prazo final de realização do projeto.

Srisuwanrat e Ioannou (2007) afirmam que para se eliminar as interrupções e a ociosidade com objetivo de melhorar o fluxo, atividades são intencionalmente atrasadas, induzindo um *tradeoff* entre o custo do projeto e sua duração. Schramm e Formoso (2007) defendem que os modelos de simulação são úteis para modelar o comportamento de sistemas de produção, e na compreensão dos efeitos combinados da variabilidade, interdependência e incerteza.

Além disso, o instrumento prático gerado por esse estudo facilitará gestão do tempo das atividades e projeto no cotidiano de um projeto de construção civil de forma otimizada.

O atual cenário de intensa competitividade eleva a importância da realização de projetos bem gerenciados, que devem ser concluídos no menor tempo possível e utilizando o mínimo de recursos. Nesse contexto fica clara a importância do gerenciamento do tempo das atividades na Construção Enxuta.

1.4 Limitações da Pesquisa

Uma das propostas deste trabalho é gerar uma ferramenta para simulação de projetos de construção civil. Esta ferramenta será gerada utilizando a planilha eletrônica Microsoft Excel e, portanto apresenta algumas limitações inerentes ao software utilizado tais como a velocidade com que se consegue processar os dados das simulações e a geração de números aleatórios realizada pelo *software*.

Este trabalho se propõe a ter como um dos principais resultados a aplicação da ferramenta desenvolvida em problemas de construção enxuta. Seu escopo não envolve, portanto, a análise do processo logístico, nem de problemas com materiais fora de especificação.

Outra limitação do trabalho é que não aplicaremos o instrumento de simulação a um projeto real, mas a um fictício. A limitação se deu porque não dispomos de dados reais de aplicação de construção enxuta, por ser uma técnica recente e ainda fase de conceituação teórica, não tendo ainda nenhum caso de aplicação conhecida na construção civil brasileira.

O presente trabalho estudará apenas um caso simulado. Talvez fosse interessante analisar outros casos, mas isso não foi possível devido ao horizonte de tempo da pesquisa. Acreditamos, no entanto, que o caso estudado seja bastante representativo da situação estudada.

1.5 Estrutura do Trabalho

Esta dissertação foi organizada em 6 capítulos incluindo este primeiro capítulo de Introdução, onde abordamos suas principais características.

O capítulo 2 apresenta uma Revisão da Literatura, onde a primeira parte é direcionada para os conceitos da *lean construction*. A segunda parte apresenta uma das principais técnicas de gerenciamento de tempo de projeto utilizada atualmente, a PERT, e algumas das suas variações que atualmente se encontram na literatura. A terceira parte contempla a Simulação a Eventos Discretos e visa embasar teoricamente o desenvolvimento da ferramenta de simulação que será utilizada nos capítulos seguintes.

O capítulo 3 apresenta os procedimentos metodológicos utilizados, com a descrição das atividades realizadas durante a realização deste trabalho.

No capítulo 4 são feitas simulações do andamento de atividades em projetos de construção enxuta, segundo vários cenários. Depois são feitas as análises de resultados, de modo a extrair as principais informações relevantes para este trabalho.

O capítulo 5 é destinado às conclusões, onde serão feitas considerações sobre a adequação do método e sobre a o atingimento dos objetivos propostos. Serão feitas também as recomendações para trabalhos futuros.

2. REVISÃO DA LITERATURA

A revisão da literatura está divida em três partes: Construção Enxuta, PERT e Simulação de Eventos Discretos. No início de cada parte será apresentada um quadro, organizado por tema e ordem cronológica, das principais referências bibliográficas utilizadas nesse trabalho. Esta tabela tem como utilidade orientar de forma resumida o entendimento do que foi lido nas publicações disponíveis nos respectivos assuntos.

2.1 Construção Enxuta

Tema	Autor - Título	Ano
LEAN CONSTRUCTION	Koskela - Application of the New Production Philosophy to Construction	1992
	Howell - What is Lean Construction	1999
	Koskela - An exploration towards a produtcion theory and its application to construction	2000
	Bertelsen e Koskela - Managing the Three Aspects of Production in Construction	2002
	Bertelsen et al - Construction Physics	2007
	Bertelsen e Sacks - Towards a New Understanding of the Construction Industry and the Nature of its Production	2007
	Koskela et al - The FTV Theory of Production: New Developments	2007

Quadro 2: Principais referências ao tema Construção Enxuta.

A construção enxuta tem por objetivo melhor atender as necessidades dos clientes enquanto utiliza cada vez menos recursos. E para isso a construção enxuta se baseia nos princípios da Produção Enxuta, então a seguir faremos uma breve descrição da história e particularidades da Produção Enxuta para uma melhor compreensão das características da Construção Enxuta.

2.1.1 Produção Enxuta

O conceito de produção enxuta foi desenvolvido na Toyota, através do engenheiro Taiichi Ohno. Ao invés de olhar para a produtividade de um único trabalhador na produção, Ohno procurou considerar o sistema como um todo, e deu continuidade ao trabalho de Henry Ford, desenvolvendo um gerenciamento de produção baseado no fluxo. (Howell, 1999).

Draper and Martinez (2002) apontam as três dimensões que caracterizaram o ambiente da manufatura no qual a *lean production* foi desenvolvida e foi teve bastante sucesso:

- Complexidade: em termos de números de negociações e subcontratados envolvidos na montagem final do produto, número de transferências e conflitos de espaço, a manufatura apresenta uma baixa complexidade;

- Incerteza: o *design* do produto é totalmente detalhado de forma que já se saiba a localização, tamanho, e especificações de torque de cada parafuso.
Procedimentos padronizados e sequenciamento das atividades são estabelecidos para toda tarefa. O movimento automático da linha de montagem imprimi a taxa com a qual o trabalho é feito. Os materiais e equipamentos utilizados são totalmente especificados em termos de tamanho e disposições de montagem;

- Sequenciamento: a sequência nas quais componentes e partes individuais são montados para produzir o produto final são bem definidas e extremamente rigorosas.

É importante ter em mente que a natureza repetitiva da produção na manufatura permite um ganho de conhecimento sobre os processos e a oportunidade de agir através desse conhecimento para otimizar os processos (DRAPER e MARTINEZ 2002)

Ohno se preocupava em eliminar desperdícios (*waste*) e uma de suas idéias era desenvolver técnicas simples de troca de moldes, e trocá-los com frequência. Ao aperfeiçoar essa técnica descobriu que o custo por peça fabricada era menor na produção de pequenos lotes do que no processamento de lotes imensos e também que ao se produzir pequenos lotes eliminava os custos financeiros dos imensos estoques de peças acabadas que os sistemas de produção exigiam. (WOMACK *et al,* 1997)

Para Farrar *et al* (2004), o objetivo intrínseco da produção enxuta é evitar, eliminar ou reduzir o desperdício. Abaixo seguem algumas das definições de desperdício (ou *muda*, em japonês):

- Um critério de performance para o sistema de produção. Falha em cumprir os requisitos específicos de um cliente é desperdício, como também é o tempo de permanência de uma peça no estoque. (HOWELL, 1999)

- Qualquer atividade humana que absorve recursos, mas não cria valor; erros que exigem retificação, produção de itens que ninguém deseja, e acúmulo de mercadorias nos estoques, etapas de processamento que na verdade não são necessárias, movimentação de funcionários e transporte de mercadorias de um lugar para outro sem propósito, grupos de pessoas em uma atividade posterior que ficam esperando porque uma atividade anterior não foi realizada dentro do prazo, e bens e serviços que não atendem as necessidades do cliente. (WOMACK e JONES, 1996)

Para combater o desperdício existe um antídoto: *o pensamento enxuto*. O pensamento enxuto é uma forma de especificar valor, alinhar na melhor sequência as ações que criam valor, realizar essas atividades sem interrupção toda vez que alguém as solicita e realizá-las de forma cada vez mais eficaz. Em suma, o pensamento enxuto é enxuto porque é uma forma de fazer cada vez mais com cada vez menos - menos esforço humano, menos equipamento, menos tempo e menos espaço - e, ao mesmo tempo, aproximar-se cada vez mais de oferecer aos clientes exatamente o que eles desejam, transformando *muda* em valor. (WOMACK e JONES, 1996)

Womack e Jones (1996) definem como sendo os princípios que norteiam o *Lean Thinking* (pensamento enxuto):

1 - <u>Especificar o valor:</u> É o ponto de partida essencial para o pensamento enxuto. O valor só pode ser definido pelo cliente final e só é significativo quando expresso em termos de um produto específico que atenda às necessidades do cliente a um preço específico em um momento específico. Não oferecer o bem ou serviço da forma certa é *muda*.

2 - <u>Identificar a cadeia de valor:</u> Esta etapa quase sempre expõe quantidades enormes de *muda*, pois é necessário olhar além da empresa, e olhar o todo: conjunto inteiro de atividades envolvido na criação e na fabricação de um produto específico, da concepção à sua disponibilidade. Para se fazer isso é necessário

que haja uma reunião contínua de todas as partes envolvidas para criar um canal para a cadeia de valor como um todo, eliminando qualquer *muda.*

3 - Fluxo: Uma vez que o valor tenha sido especificado com precisão, a cadeia de valor de determinado produto totalmente mapeada pela empresa enxuta e, obviamente, as etapas que geram desperdício eliminadas, deve-se fazer com que as etapas restantes que criam valor, fluam em um sem interrupções.

4 - Produção Puxada: Um processo inicial não deve produzir um bem ou serviço sem que o cliente de um processo posterior o solicite.

5 - Perfeição: O processo de redução de esforço, tempo, espaço, custos e erros é infinito e, ao mesmo tempo, oferece um produto que se aproxima ainda mais do que o cliente realmente quer. Logo a perfeição é uma meta a ser alcançada utilizando da interação dos quatro primeiros princípios, pois fazer com que o valor flua mais rápido sempre expõe *muda* oculto na cadeia de valor e quanto mais rápido você puxar, mais revelará os obstáculos do fluxo, permitindo sua eliminação.

2.1.2 Lean Construction

A construção enxuta foi introduzida no cenário mundial através de Lauri Koskela, em 1992, em seu artigo: *Application of the New Production Philosophy to Construction.* Desde então vários autores vem publicando artigos sobre o tema principalmente no *Journal of Lean Construction* e no IGLC (*International Group of Lean Construction*).

A construção enxuta é resultado da aplicação de uma nova forma de gestão da produção para a construção. As características essenciais da construção enxuta incluem um conjunto claro de objetivos para o processo de entrega, visando a maximização do desempenho para o cliente ao nível do projeto, design simultâneo de produto e processo, bem como a aplicação do controle de produção ao longo da vida do produto, desde a concepção à entrega. Pesquisas significativas continuam a concluir a tradução do pensamento enxuto para construção. (HOWELL, 1999)

Draper e Martinez (2002), ressaltam que o processo construtivo, especificamente no setor de construção civil, geralmente pode ser caracterizado pela sua natureza de ser feito "de uma só vez", proporcionando uma pequena oportunidade para se ganhar conhecimento do processo e consequentemente sua

otimização. Os autores descrevem o comportamento da construção, em comparação com a manufatura, em termos das três dimensões abaixo:

- Complexidade: Muitos negócios e subcontratados são envolvidos na montagem final da construção. As tarefas e processos possuem uma relação próxima com muitas das transações, necessitando de coordenação entre elas. O espaço é um recurso valioso que deve ser utilizado racionalmente.

- Incerteza: os documentos que contem o *design* final apresentam esquematicamente a natureza de muitos dos componentes e montagens realizadas. Previsões do tamanho e montagem de muitos dos equipamentos e materiais não são conhecidos com antecedência da instalação. Portanto quando se chega no campo que são determinadas a localização exata, método de instalação e o modo de fixar vários dos componentes a estrutura.

- Sequenciamento: Nenhum detalhamento da sequência da construção é pré-estabelecido. Uma sequência geral é definida pelas restrições físicas do que será construído (ex: fundação antes da estrutura) e outras prerrogativas são reconhecidas. Entretanto, mesmo nessas situações nas quais documentos com planejamento detalhado são desenvolvidos, existe uma ampla desorientação no sequenciamento exato das inúmeras tarefas envolvidas.

A *Lean Construction* incorpora do pensamento enxuto a meta da perfeição, fazendo com que seja necessário um olhar mais profundo. Ter como meta entregar um projeto que esteja de acordo com as necessidades do cliente no menor tempo possível parece o objetivo de qualquer projeto, mas acaba revelando uma quantidade esmagadora de desperdício. Desperdício tanto na construção como na manufatura surge do mesmo pensamento, "Manter uma pressão intensa na produção de cada atividade porque a redução do custo e da duração de cada passo é a chave para a melhoria". (HOWELL, 1999).

Um dos grandes problemas dos modelos tradicionais de construção é que eles ignoram o fato que a construção deva ser vista como sendo composta por fluxos de processos. (KOSKELA 1992)

Koskela (2000) para melhor entendimento do processo construtivo sugere sua análise por três pontos de vista: Transformação, Fluxo e Valor, construindo o modelo que ficou conhecido como TFV.

	Visão da Transformação	Visão do Fluxo	Visão da Geração de Valor
Conceituação da produção	Como a transformação de entradas em saídas	Como fluxo de materiais, composto de transformação, inspeção, transporte e espera	Como um processo onde o valor para o cliente é criado através do atendimento de suas necessidades
Princípio Fundamental	Realizar a produção eficientemente	Eliminação do desperdício (das atividades que não agregam valor)	Eliminação da perda de valor (valor alcançado em relação ao melhor valor possível)
Princípios Associados	Decomposição das atividades de produção. Minimizar os custos de todas essas atividades	Reduzir o *lead time* e a variabilidade. Simplificar. Aumentar a transparência e a flexibilidade	Método de pesquisa de mercado, onde se busca o conhecimento da qualidade sob o ponto de vista do consumidor
Métodos e práticas (exemplos)	Detalhamento da estrutura de trabalho, MRP, Gráfico de Responsabilidade Organizacional	Fluxo contínuo, controle da produção puxada, melhoria contínua	Métodos para captura de requisitos. Desdobramento da Função Qualidade (QFD)
Contribuição prática	Cuidar do que tem que ser feito	Cuidar o menos possível das coisas desnecessárias	Fazer com que as necessidades dos clientes sejam atendidas do melhor modo
Nome sugerido para aplicação prática desses conceitos	Gerenciamento das tarefas	Gerenciamento do fluxo	Gerenciamento do valor

Quadro 3: A Teoria TFV. Fonte: Adaptado de Koskela (2000)

De acordo com Bertelsen e Koskela (2002), o modelo TFV mostra que a construção deve ser entendida como geradora de valor para o cliente, e isso ocorre através de uma série de processos que depende de três funções de gerenciamento:

- Gerenciamento de Valor: Busca assegurar que o processo construtivo gere o valor desejado pelo cliente. Durante a construção, procura olhar para fatores como a pontualidade, diálogo com o proprietário, clientes, usuários e outros *stakeholders*, relações públicas.

- Gerenciamento de Contratos: Tem por objetivo gerir os acordos contratuais individuais e customizados, que estão sempre associados com a construção. Também pode compreender a gestão de reclamações e de sanções, como também a gestão de pagamentos e bônus.

- Gerenciamento de Processos: Possui como objetivo manter o fluxo de produção com uma alta eficiência. Preza pelo estabelecimento de uma cooperação

frutífera entre as partes que trabalham no projeto da construção e os que trabalham no canteiro de obra.

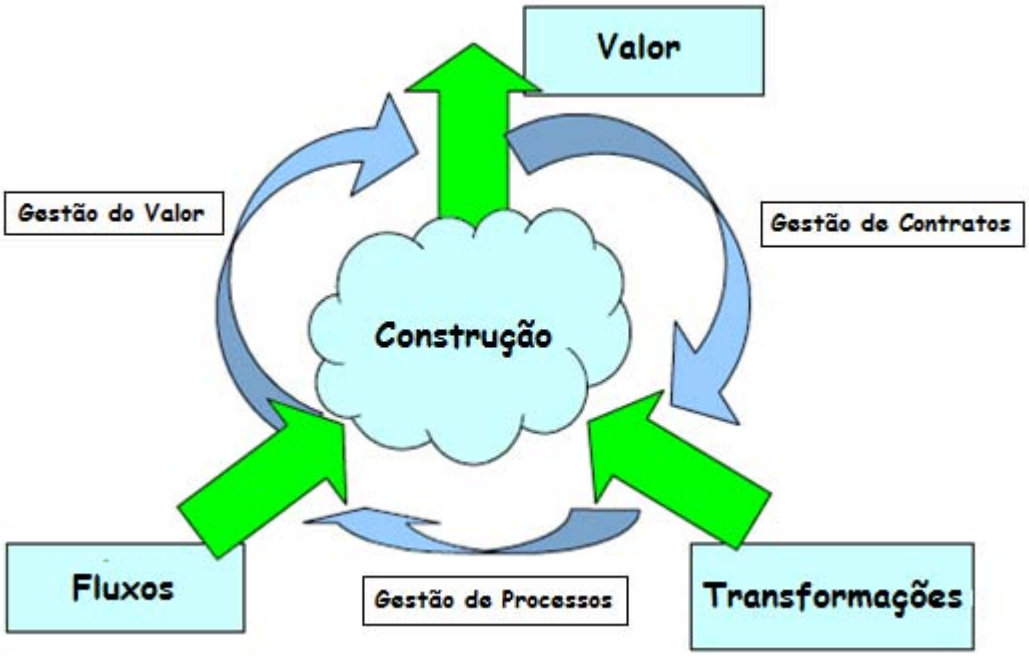

Figura 1: O Modelo TFV. Fonte: Adaptado de Bertelsen e Koskela (2002)

A produção enxuta concentra-se em agregar valor à matéria-prima na medida em que ela passa por várias etapas do processo até virar o produto final. Isso proporciona que se evite, elimine, ou reduza os desperdícios no chamado fluxo de valor. A construção enxuta por sua vez adota uma visão sistêmica, ao considerar o desperdício produzido não somente em operações individuais, mas no fluxo de valor como um todo. (TOMMELEIN, 1998)

A minimização do desperdício em um sistema de produção é um dos pilares da *lean construction*. Segundo Womack e Jones (1996), o desperdício resulta de recursos consumidos sem a criação de valor. Por exemplo, excesso de estoque, etapas do processo desnecessárias, e trabalhadores ociosos são exemplos de desperdício.

Segundo Koskela (1992) nunca houve nenhuma tentativa sistemática para observar todos os tipos de desperdícios no processo construtivo. Entretanto, estudos de vários países vêm revelando um alto índice de atividades que não agregam valor na construção.

Muitos pesquisadores vêem o processo construtivo como um fluxo de atividades que agregam valor para o cliente. Com o passar dos anos esse entendimento tem crescido em importância e sua utilidade em vários casos tem sido registradas, juntamente, com estudos detalhados de alguns dos fluxos.

Estudiosos da *Lean Construction* tem referenciado dois tipos de falhas nas atividades: o primeiro tipo corresponde às falhas de planejamento ou fatores que impeçam o trabalho de começar, como por exemplo, problemas de coordenação, inspeções regulatórias, falta de especificações, de disponibilidade de espaço, mão-de-obra, material e/ou equipamento. Essa lista de fatores pode ser resumida por três categorias: Atividades pré-requeridas, Diretrizes e Recursos. (ABDELHAMID *et al,* 2010)

Quando todos os elementos que pertencem a essas três categorias são cumpridos, então o início das atividades está assegurado - não existem falhas de planejamento. Contudo, isso não garante que o trabalho seja finalizado depois que é iniciado. Isso porque para terminar uma atividade é necessário que não hajam falhas de execução. As falhas de execução podem ser divididas em três categorias principais: *Muda* (Desperdício, trabalho desnecessário), *Mura* (Variação) e *Muri* (Sobrecarga). A figura abaixo ilustra a relação entre essas três categorias em relação à capacidade da equipe para o trabalho. Por exemplo, se uma equipe está trabalhando muito abaixo de sua capacidade então temos desperdício. No sentido oposto, se a equipe está trabalhando acima de sua capacidade então temos a sobrecarga e a probabilidade de fatiga e acidentes aumentam. (ABDELHAMID *et al,* 2010)

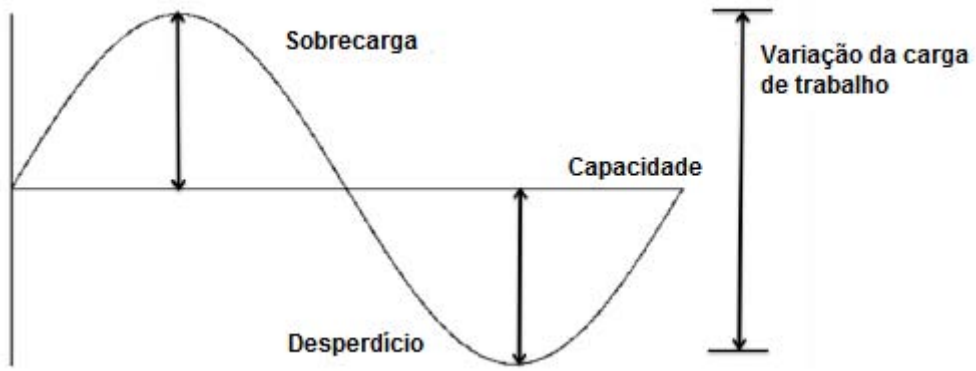

Figura 2: Relação entre desperdício, sobrecarga e a variabilidade em relação a capacidade da equipe de trabalho. Fonte: Adaptado de Abdelhamid *et al* (2010)

Todos os tipos de fatores que se enquadram como *Muri, Mura* ou *Muda* devem ser considerados como restrições de produção importantes que diminuem a confiabilidade do fluxo de trabalho.

Falhas de Planejamento *(Fatores que impedem que o trabalho comece)*	**Falhas de Execução** *(Fatores que impedem que o trabalho termine)*
Atividades pré-requeridas	Atividades que não agregam valor (Muda)
Diretrizes	Variabilidade de desempenho (Mura)
Recursos	Sobrecarga (Muri)

Quadro 4: Lista dos fatores que afetam a confiabilidade do fluxo. Fonte: Adaptado de Abdelhamid et al (2010)

Bertelsen *et al* (2007) em seu artigo discute a idéia de, ao invés de tratar o processo construtivo como sendo alimentado por fluxos nos quais um é crítico, decidindo a velocidade do processo, e utiliza um novo modelo para entender a natureza da produção de um projeto, com foco em todos os fluxos que alimentam esse processo complexo.

Bertelsen e Sacks (2007) numa visão bastante abrangente e inovadora abordam a questão de que o fluxo de operações de um projeto possui vínculos com qualquer outro projeto que esteja em andamento na região, através do sistema de produção que podem compartilhar, pois cada projeto faz parte de um todo, um universo de redes, as quais influenciam altamente na performance do projeto

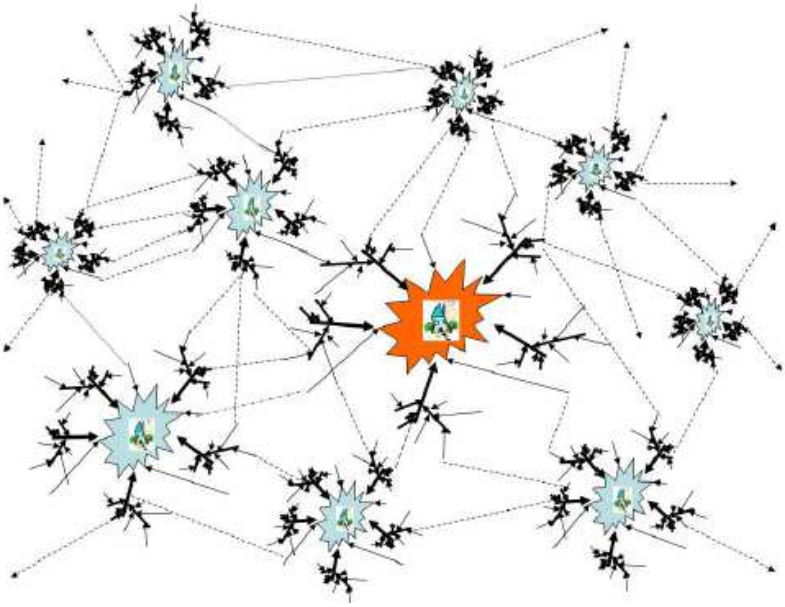

Figura 3: O mundo real. Fonte: Bertelsen e Sacks (2007)

2.2 PERT

Tema	Autor - Título	Ano
PERT	Malcom *et al.* - Application of a Technique for Research and Development Programa Evaluation	1959
	Clark - The PERT Model for the Distribution of na Activity Time	1962
	Grubbs - Attempts to Validate Certain PERT Statistics or 'Picking on PERT'	1962
	Sasieni - A Note on PERT Times	1986
	Slack *et al.* - Administração da Produção	1999
	Premachandra - An Aproximation of Activity Duration Distribution in PERT	2001
	van Dorp e Kotz - Generalizations of Two-sized Power Distributions and their Convolution	2003
	Davis - Teaching Project Simulation in Excel Using PERT-*Beta* Distributions	2008
	García *et al.* - The Generalized Biparabolic Distribution	2009
	García *et al.* - Proposal of a New Distribution in PERT Methodology	2010
	Bem-Yair - Upon Implementing the Beta Distribution in Project Management	2010

Quadro 5: Principais referências ao tema PERT.

A técnica PERT (*Program evaluation and review technique*) teve sua origem em planejamento e controle de grandes programas de defesa da Marinha americana. O primeiro sucesso relatado foi o término do programa do míssel Polaris dois anos à frente do programado, em 1958. A técnica reconhece que as durações das atividades e os custos em gerenciamento de projeto não são determinísticos (fixos) e que a teoria da probabilidade pode ser aplicada para fazer estimativas, como mostrado na figura 4.

Figura 4: Distribuição de probabilidade de tempos estimados. Fonte: Slack *et al* (1999)

2.2.1 PERT Clássico

Malcom *et al* (1959) descreve as etapas de como foi o desenvolvimento e a aplicação da técnica PERT no programa do míssil Polaris. Essas etapas, a saber, desenho da rede de atividades, estimação dos tempos decorridos, organização e análise dos dados, hoje já são amplamente conhecidas com a difusão do modelo.

A rede de Atividades

Ao iniciar a construção da rede de atividades do PERT é necessário organizar as informações sobre a relação de dependência entre as atividades, como mostrado na tabela 1.

Todas as atividades que são identificadas como compondo um projeto terão algum relacionamento com as demais e vão depender da lógica do projeto. Algumas

atividades vão, por necessidade, precisar ser executadas em uma ordem particular. (Slack *et al* 1999)

ATIVIDADES DO PROJETO	ATIVIDADES PRECEDENTES
A	-
B	A
C	A
D	B
E	C
F	D, E

Tabela 1: Tabela de precedentes.

Com a conclusão da tabela 1 a rede é facilmente construída como podemos ver na figura 5.

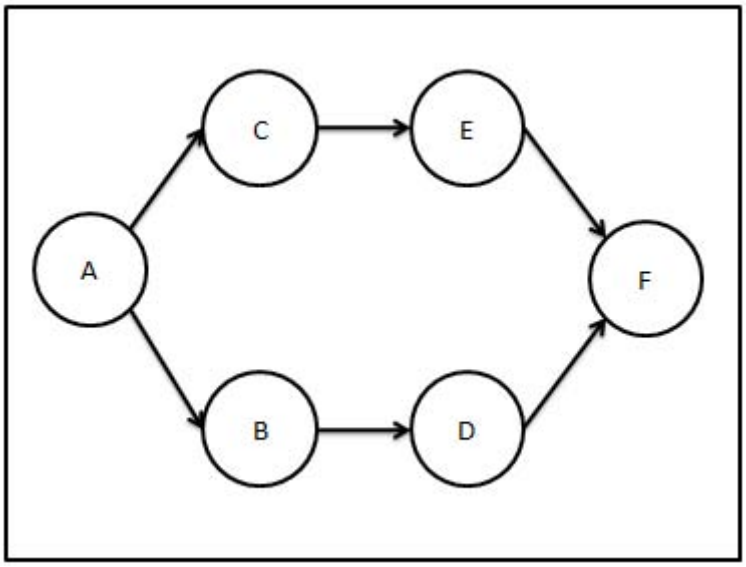

Figura 5: Exemplo de Rede PERT.

Estimativa dos Tempos Decorridos

Com o desenho da rede, que representa as interações e o sequenciamento das atividades a serem realizadas no projeto, pode-se estimar o tempo de duração de cada atividade. Malcon *et al* (1959) ressalta que essa estimativa do tempo deve ser realizada por pessoas que tenham competência no assunto através de um interrogatório, onde no caso do projeto do míssil Polaris os engenheiros ficaram responsáveis pelo assunto.

A quantidade de incertezas de um projeto relaciona-se fortemente com o nível de confiança que pode ser colocado em uma estimativa. O impacto de incertezas sobre os tempos estimados leva alguns gerentes de projeto a usar uma curva de probabilidade para descrever estimativas. Na prática, isso é usualmente uma distribuição, como mostrado na figura 4. Quanto maior o risco, maior a faixa de distribuição. (Slack *et al* 1999)

A estimativa do tempo de cada atividade, para levar em consideração as incertezas, é feita segundo três parâmetros:

- Estimativa otimista (**a**): Representa o tempo que seria despendido se tudo ocorresse bem;

- Estimativa pessimista (**b**): Representa o tempo numa situação em que quase tudo que pode dar errado dará errado;

- Estimativa mais provável (**m**): Representa o tempo que têm uma maior probabilidade de se comprovar e está situado entre **a** e **b**.

Observa-se na Figura 4 que as estimativas, otimista e pessimista, representam situações com pequenas probabilidades de se concretizarem e por causa da natureza inclinada da distribuição, o tempo esperado para a atividade pode não ser o tempo mais provável.

Malcon *et al* (1959) assume que o desvio padrão da distribuição de probabilidade $\sigma(t_e)$, onde t_e representa o tempo esperado (média), pode ser estimado como:

$$\sigma(\mathrm{t_e}) = \frac{1}{6}(b - a) \qquad \text{(Eq. 1)}$$

E que a distribuição beta (ver Eq. 2) é um modelo adequado para a distribuição de probabilidade do tempo de uma atividade, e então desenvolve as equações para calcular t_e e $\sigma^2(t_e)$:

$$f(t) = K\,(t-a)^{\alpha}(b-\ t)^{\gamma} \qquad \text{(Eq. 2),}$$

$$t_e\ = \frac{1}{6}(a+4m+b) \qquad \text{(Eq. 3),}$$

$$\sigma^2(t_e)\ =\ [\frac{1}{6}(b-a)]^2 \qquad \text{(Eq. 4).}$$

Logo com as três estimativas do tempo para cada atividade da rede é possível calcular o tempo esperado, t_e e sua variância $\sigma(t_e)$ para cada atividade, como mostra a tabela abaixo.

Atividades	Estimativas			Te	Variância
	a	***m***	***B***		
A	3	5	8	5,17	0,69
B	7	8	12	8,50	0,69
C	9	10	13	10,33	0,44
D	8	12	15	11,83	1,36
E	7	9	14	9,50	1,36
F	2	4	6	4,00	0,44

Tabela 2: Estimativas das atividades da rede.

Organização e Análise dos Dados:

O objetivo da análise é estimar, para cada atividade da rede, um tempo esperado (média) de realização, T_E. A partir desse resultado muito mais informação pode ser gerada. Para facilitar o trabalho com os dados e sua visualização é interessante construir a tabela 3.

O primeiro passo consiste em calcular a data mais cedo de início (DCI) e a data mais cedo de término (DCT) para cada atividade. A DCI para cada atividade é encontrada trabalhando da esquerda pra direita ao longo da rede. Onde a DCT de cada atividade é encontrado somando-se a duração com a DCI, como podemos ver na tabela abaixo.

Atividades	Duração (Te)	DCI	DCT
A	5,17	0	5,17
B	8,50	5,17	13,67
C	10,33	5,17	15,50
D	11,83	13,67	25,50
E	9,50	15,50	25,00
F	4,00	25,50	29,50

Tabela 3: Calculo das "durações mais cedo".

Em seguida, de acordo com as relações de dependência da rede o DCT de uma atividade se transforma no DCI da atividade seguinte, como podemos ver nas atividades A, B e C. Agora é necessário trabalhar com a rede da direita para esquerda, para calcular a data a mais tarde de início (DTI) e a data mais tarde de término (DTT), como podemos ver na tabela abaixo:

Atividades	Duração (Te)	DCI	DCT	DTI	DTT	Folga
A	5,17	0	5,17	0,00	5,17	0,00
B	8,50	5,17	13,67	5,17	13,67	0,00
C	10,33	5,17	15,50	5,67	16,00	0,50
D	11,83	13,67	25,50	13,67	25,50	0,00
E	9,50	15,50	25,00	16,00	25,50	0,50
F	4,00	25,50	29,50	25,50	29,50	0,00

Tabela 4: Cálculo das durações.

A folga de cada atividade é calculada fazendo a diferença entre a DCI e a DTI ou entre a DCT e a DTT, se a folga for zero, então a atividade faz parte do caminho crítico. Portanto o caminho crítico é composto pelas atividades A-B-D-F e possui duração igual a 29,5 (5,17+8,50+11,83+4). A variância do caminho crítico será igual a soma das variâncias das atividades que compõem o caminho crítico, neste caso igual a 3,18 (0,69+0,69+1,36+0,44).

Malcon *et al* (1959) utiliza então o teorema do limite central para assumir que a distribuição da probabilidade do tempo para um evento pode ser aproximado por

uma normal. E assim pode determinar a probabilidade de se terminar o projeto em uma data específica. Em nosso exemplo essa distribuição normal terá média igual a 29,5 e desvio-padrão igual a 1,78 (desvio padrão = raiz de 3,18).

2.2.2 PERT: Críticas e Alternativas de Aprimoramento

Uma das críticas sobre as estimações feitas no PERT é com relação as equações 3 e 4, que são baseadas nos parâmetros *a, m* e *b,* não podem ser obtidas diretamente da Eq. 2, mostrando uma falta de base teórica. (CLARK (1962) , GRUBBS (1962) , SASIENI (1986) , apud PREMACHANDRA (2001)).

Ben-Yair (2010) em sua pesquisa justificou teoricamente o uso da distribuição beta para as atividades sob alguns pontos de vistas, tendo em vista que uma maioria esmagadora de publicações na área de PERT consideram que a função densidade de probabilidade (f.d.p.) do tempo das atividades deve ser assimétrica com limites, inferiores e superiores, finitos. Ele também ressalta as propriedades que são usualmente aceitas *a priori* em todos os sistemas de gestão de projetos que utilizam redes de atividades:

- A f.d.p. do tempos das atividades é uma curva contínua;
- A f.d.p. dos tempos das atividades possui uma única moda;
- Os dois pontos de interseção da f.d.p dos tempos das atividades com o eixo das abscissas são não-negativos.

Segundo Ben-Yair (2010) a f.d.p da distribuição beta é atualmente a função de densidade de probabilidade mais simples que satisfaz todos esses requisitos. Sendo assim as suposições na análise dos tempos das atividades focam em determinar uma das numerosas "famílias" de distribuições beta com diferentes versões, de acordo dos parâmetros α e β. Essas versões podem resultar em uma mudança de certas estimativas para determinadas atividades que compõem um projeto, entretanto para o projeto como um todo essas diferenças são praticamente insignificantes.

Ben-Yair (2010) conclui em seu estudo que:

- Para um amplo espectro de atividades, na análise do PERT, a função de densidade de probabilidade dos tempos das atividades é assimétrica com limites,

superior e inferior, finitos. Essa f.d.p são bem próximas de uma f.d.p da distribuição beta;

- As muitas funções de densidade de probabilidade que foram estudadas ao longo do tempo, sendo aplicadas em diferentes redes PERT, não mostraram nenhuma relevância estatística em estimar os vários parâmetros do projeto como um todo. Sendo assim, deve se aplicar a mais simples f.d.p. possível para análise no PERT, mesmo para projetos de tamanho médio, sem nenhuma perda de precisão;

- Sob certas suposições realísticas provou-se teoricamente que a f.d.p. do tempo das atividades é satisfeita por uma distribuição beta (Eq. 2);

- Mudando muitas ou poucas das suposições feitas, pode-se alterar até certo ponto a estrutura da f.d.p mas, ao mesmo tempo, as suas características essenciais. (assimetria, somente uma moda etc) permanecem inalteradas;

- A distribuição beta pode ser aplicada para modelar a atividades semi-automatizadas, mas não em locais totalmente automatizados.

Sasieni (1986) aponta como um dos problemas a determinação dos quatro parâmetros da distribuição beta partindo dos dados obtidos pelos especialistas (outro problema é a precisão desses dados). García *et al* (2010) comenta que a resposta dessa questão é baseada no esclarecimento feito pelos criadores do PERT, que tentaram escolher uma distribuição beta básica, tão parecida quanto possível de uma distribuição normal. Nesse caso, parecido a uma distribuição normal significa possuir tanto a variância como o coeficiente de curtose idênticos de uma distribuição normal (que é mesocúrtica).

A seguir será explorada com mais detalhes a aproximação que é feita no PERT tradicional e também as modificações no PERT original feitas por alguns autores.

<u>Aproximação do PERT tradicional:</u>

Abaixo vemos a forma geral da função de densidade de probabilidade da distribuição beta de uma atividade de duração *y*:

$$f(y) = \frac{\Gamma(\alpha+b)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \frac{(y-a)^{\alpha-1}(b-y)^{\beta-1}}{(b-a)^{\alpha+\beta-1}} \quad , a < y < b\,,\ \alpha\,,\beta > 0 \quad \text{(Eq. 5)}$$

Realizando a transformação de variável *x = (y - a)/(b - a)* e fazendo *p = α - 1* e *q = β - 1*, a equação 5 pode ser expressa como:

$$f(x) = \frac{\Gamma(p+q+2)}{\Gamma(p+1)\Gamma(q+1)} x^p (1-x)^q \quad , \quad 0 < x < 1 \, , \, p \, , q > -1 \quad \text{(Eq. 6)}$$

A média, variância e moda da distribuição são as descritas abaixo:

$$\mu_x = \frac{P+1}{p+q+2}$$

$$\sigma_x^2 = \frac{(p+1)(q+1)}{(p+q+2)^2(p+q+3)}$$

$$m_x = \frac{p}{p+q}$$

A partir das três expressões acima podemos obter a média, variância e o a moda para atividade cuja distribuição é representada pela equação 5:

$$\mu_y = a + (b-a)\mu_x$$
$$\sigma_y^2 = (b-a)^2 \sigma_x^2$$
$$m_y = a + (b-a) m_x$$

Premachandra (2001) fornece uma possível explicação para como devem ser calculadas as fórmulas do PERT. O valor da moda m_x , determinado por um especialista é transformado em uma estimação do valor da média $\hat{\mu}_x$. Para tornar o PERT compatível com a fórmula da distribuição Beta, devem-se fazer duas aproximações. A média deve ser calculada pela aproximação $\hat{\mu}_x = \frac{1}{6}(4m_x + 1)$ e deve-se assumir que $\alpha = 2 \pm \sqrt{2}$ e $\beta = 2 \mp \sqrt{2}$, ou seja *α* + *β* = 4, com o desvio padrão normalizado $\hat{\sigma}_x = \frac{1}{6}$.

Ao se fazerem essas aproximações permite-se que se possa fazer uso da distribuição Beta no algoritmo PERT, como propuseram seus autores sem, no

entanto, expressarem a forma como isso poderia ser feito na época em que o artigo original foi publicado.

2.2.3 PERT: Alternativas ao Método Tradicional

PERT Beta :

Davis (2008) em seu trabalho apresenta uma metodologia para simular a duração de projetos, com as ferramentas disponíveis no Excel, utilizando as fórmulas corretas de um PERT com distribuição beta.

As fórmulas do PERT tradicional nos dão a média e a variância com base nas durações das atividades. Entretanto, a função Beta é geralmente expressa em termos dos dois parâmetros de forma α e β.

Uma distribuição beta definida em um intervalo [a,b] com parâmetros [α, β, a, b] possui:

$$\text{Média: } \mu = a + (b - a)\left(\frac{\alpha}{\alpha+\beta}\right) \qquad \text{(Eq. 6)}$$

$$\text{Variância: } \sigma^2 = \left(\frac{\alpha}{\alpha+\beta}\right)\left(\frac{\beta}{\alpha+\beta}\right)\left(\frac{(b-a)^2}{\alpha+\beta+1}\right) \qquad \text{(Eq. 7)}$$

Davis (2008) então resolve as equações 6 e 7 em termos de α e β encontrando:

$$(\alpha + \beta) = \left(\frac{(\mu-a)(b-\mu)}{\sigma^2}\right) - 1 \qquad \text{(Eq. 8)}$$

Dividindo a equação acima para α e β, ele conclui que:

$$\alpha = \left(\frac{\mu-a}{b-a}\right)\left[\left(\frac{(\mu-a)(b-\mu)}{\sigma^2}\right) - 1\right] \text{ , e} \qquad \text{(Eq. 9)}$$

$$\beta = \left(\frac{b-\mu}{b-a}\right)\left[\left(\frac{(\mu-a)(b-\mu)}{\sigma^2}\right) - 1\right] \qquad \text{(Eq. 10)}$$

Substituindo então, nas equações 8, 9 e 10, os valores da média e da variância pelas fórmulas tradicionais do PERT (Equações 3 e 4), pode-se encontrar que:

$$(\alpha+\beta) = 4 + 16\left(\frac{(m-a)(b-m)}{(b-a)^2}\right) \qquad \text{(Eq 11)}$$

$$\alpha = \left(\frac{2(b+4m-5a)}{3(b-a)}\right)\left[1+4\left(\frac{(m-a)(b-m)}{(b-a)^2}\right)\right]$$

$$\beta = \left(\frac{2(5b-4m-a)}{3(b-a)}\right)\left[1+4\left(\frac{(m-a)(b-m)}{(b-a)^2}\right)\right]$$

Davis (2008) se refere a distribuição definida acima como sendo a de um PERT Beta porque ela exibe média e variância como especificada pelo PERT. Com isso temos uma família infinita de Betas. Agora, observando a equação 11, nota-se que $4 \leq \alpha + \beta \leq 8$, onde α+β possui seu valor máximo , somente no caso simétrico, quando m = (a+b)/2, ou seja, quando α = β= 4.

A figura 6 mostra uma representação das famílias de PERT Beta , onde m está variando de 0 a 10 com a = 0 e b = 10. Os pontos onde m assume valores inteiros de 1 a 9 estão visíveis na figura 7 para comparação. Na figura 6 os casos em que β > α estão acima da linha de 45°, e os que α > β estão abaixo. Já o caso de simetria em que α = β= 4 está em cima da linha de 45º.

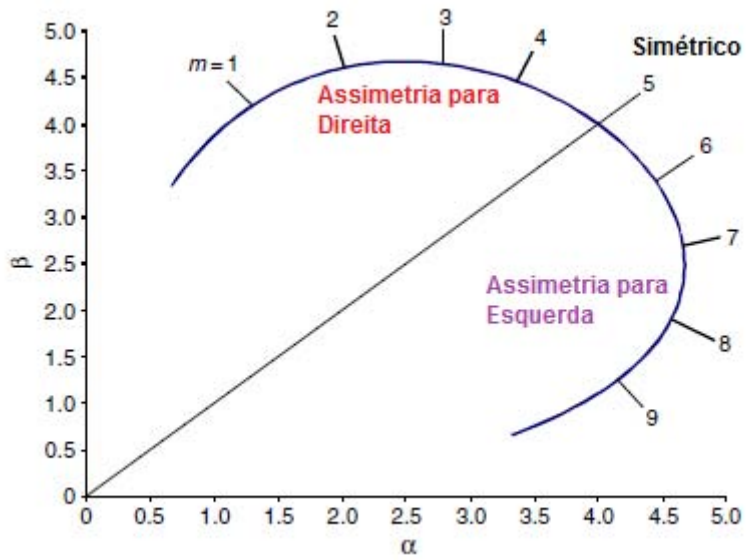

Figura 6: Famílias de PERT Beta de acordo com a variação de m. Fonte: Adaptado de Davis (2008)

A figura abaixo mostra várias formas da função de densidade de probabilidade que ocorrem quando m varia de 1 a 9 quando a =0 e b = 10. Onde vemos que α+β é máximo , com valor 8, quando a distribuição é simétrica (m = 5) e a soma decresce até 4 a medida que m se afasta do ponto médio do intervalo. A soma 4 resulta quando m = 0 ou m = 10. Modificando o valor de a ou b, ou ambos, não possui nenhum efeito nos valores de α, β, ou α+β, como também a forma da distribuição beta permanece inalterada.

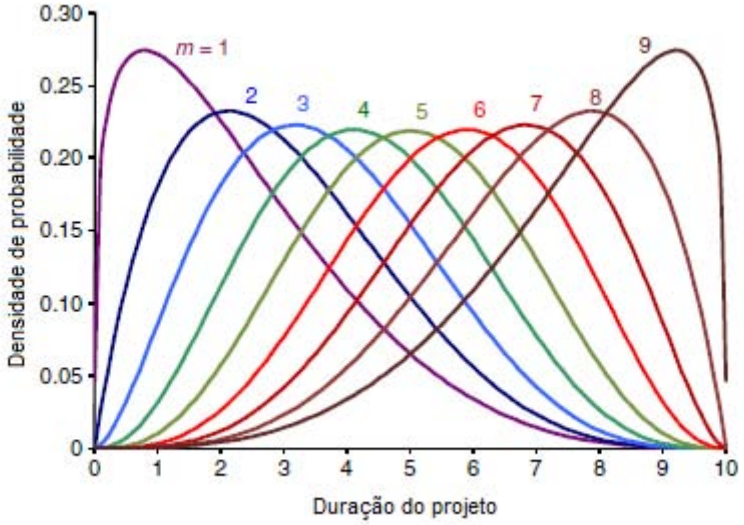

Figura 7: PERT Beta f.d.p.s para m = 1,2,3,4,5,6,7,8,9 em [a = 0,m,b=10] Fonte: Adaptado de Davis (2008)

Distribuição Bi-Parabólica:

García *et al* (2009, 2010) utiliza uma nova distribuição de probabilidade chamada de distribuição bi parabólica (BP) , a qual é uma distribuição definida em um domínio restrito e que pode ser obtida dos três valores clássicos do PERT fornecidos pelos especialistas *a, m* e *b*.

Os valores de *a, m* e *b* determinam as parábolas $f_1(x)$ que passa pelo ponto (a,0) com vértice (m,h), e a parábola $f_2(x)$ que passa pelo ponto (b,0) e com vértice em (m,h). A função densidade de probabilidade da BP é definida como:

$$f(x) = \begin{cases} f_1(x), & se\ \ a \leq x \leq m \\ f_2(x), & se\ m \leq x \leq b \end{cases}$$

A distribuição acima, como sugere o nome, é formada pela combinação dessas duas parábolas, que possuem o mesmo vértice (ver figura 8A). Na figura 8B, a a BP é representada pela linha em negrito.

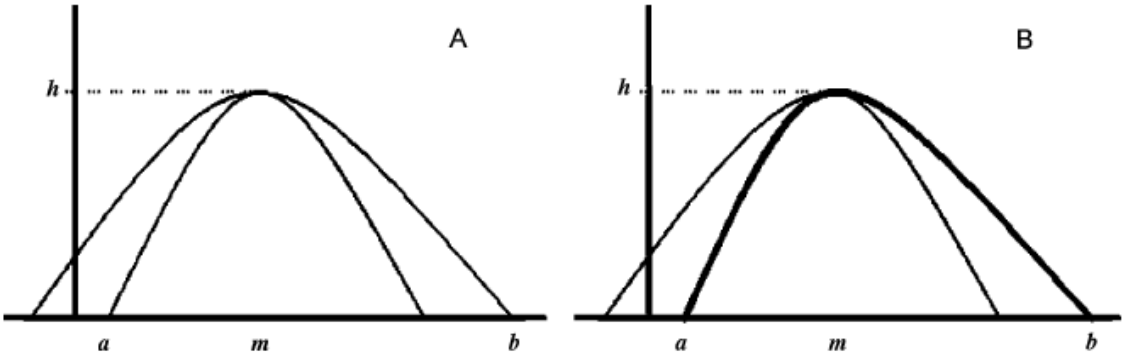

Figura 8: Construção da distribuição bi parabólica. Fonte: García *et al* (2010)

Pode-se deduzir então que a f.d.p da bi parabólica, valor esperado e variância são respectivamente:

$$f(x) = \begin{cases} -\frac{3}{2}\frac{1}{(m-a)^2(b-a)}\left[x^2 - 2mx + (2m-a)a\right], & se\ a \leq x \leq m \\ -\frac{3}{2}\frac{1}{(m-b)^2(b-a)}\left[x^2 - 2mx + (2m-b)b\right], & se\ m \leq x \leq b \end{cases} \qquad \text{(Eq. 12)}$$

$$E(X) = \frac{2m+3b+3a}{8} \qquad \text{(Eq. 13)}$$

$$Var(X) = \frac{12(m-a)^2 - 12(m-a)(b-a) + 19(b-a)^2}{320}$$

Utilizando a variável padronizada $T = \frac{X-a}{b-a}$, onde $M = \frac{m-a}{b-a}$, pode-se mostrar que o coeficiente de assimetria e de curtose são, respectivamente:

$$\beta_1 = \frac{\left(\frac{8M^3 - 12M^2 - 10M + 7}{1280}\right)^2}{\left(\frac{12M^2 - 12M + 19}{320}\right)^3}$$

$$\beta_2 = \frac{7}{5}\frac{624M^4 - 1248M^3 + 2088M^2 - 1464M + 1095}{(12M^2 - 12M + 19)^2}$$

Distribuição bi parabólica generalizada (GBP):

García *et al* (2010) mostra que a distribuição bi parabólica, BP(*a, m, b*), também pode ser construída usando o gerador de f.d.p. introduzido por van Drop and Kotz (2003), isso possibilita a generalização da distribuição de probabilidade bi parabólica introduzindo um quarto parâmetro *n*. Com isso obtemos a chamada distribuição padronizada bi parabólica generalizada, denotada por SGBP(0, M, 1, *n*).

Segundo García *et al* (2010) começando pelas três estimativas clássicas do PERT (*a, m* e *b*), é impossível determinar uma única distribuição GBP como é feito com distribuição Beta. Como estamos lidando com distribuições de quatro parâmetros, podemos optar por pedir mais informações para os especialistas ou introduzir algumas restrições na família de distribuições GBP. Nesse sentido é preciso restringir a escolha de uma única distribuição GBP dentro de grupo de subfamílias.

O conjunto composto pelas distribuições SGBP com a mesma variância que uma distribuição normal, no caso de se trabalhar com variáveis aleatórias padronizadas, é chamado de *subfamília de variância constante*. Se considerarmos que 99,7% dos valores, na distribuição normal, estão entre μ - 3σ e μ + 3σ e então substituirmos a distribuição beta por uma normal, desprezando os 0,3%, $b - a = 6\sigma$, então $\sigma = \frac{b-a}{6}$ e $\sigma^2 = \frac{(b-a)^2}{36}$, que padronizando fica $\sigma^2 = \frac{1}{36}$. Por outro lado, podemos definir o conjunto composto por distribuições SGBP com coeficiente de curtose igual a 3 é chamado de *subfamília mesocúrtica*.

O método PERT almeja estimar a média e a variância de uma variável aleatória, partindo dos valores de *a, m* e *b* supridos por um especialista, e para isso uma distribuição beta é associada. Para obter a estimação da média só é preciso que esta distribuição beta (padronizada) seja mesocúrtica (β_2 = 3) ou possua variância constante ($\sigma^2 = 1/36$) (Kamburowski 1997; Herrerías *et al* 2003 *apud* García *et al* 2010).

Segundo García *et al* (2010) para se encontrar a média e a variância utilizando a distribuição SGBP deve se seguir a metodologia abaixo:

- Dada a variável aleatória *X* e sabendo-se os valores de *a, m* e *b*, podemos obter a variável normalizada *T*, partindo dos valores 0, *M* e 1.

- Escolhe-se entre a condição de variância constante ou de mesocurtose e então determina-se *n*.

- Uma vez que *n* é conhecido, pode-se estimar a média e a variância da variável *T* e em seguida obter ambas em relação a variável *X*. Ou seja, para cada valor de *M*, vai existir um único valor de *n*, que nos permite estimar a média e a variância.

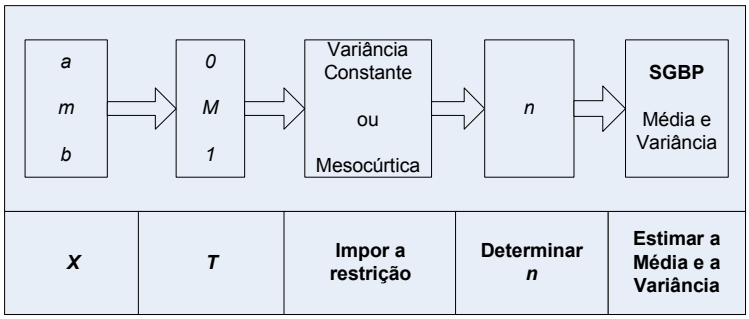

Figura 9: Procedimento para obter a média e a variância através da distribuição SGBP.
Fonte: Adaptado de García *et al* (2010)

Uma vez descritos o algoritmo PERT original e algumas distribuições de probabilidade para a descrição da duração das atividades de um projeto, passamos agora à conceituação da técnica utilizada para a modelagem computacional do problema estudado, que é a simulação a eventos discretos. Começamos com a conceituação da Simulação em geral.

2.3 Simulação

A simulação é uma das técnicas chave da pesquisa operacional, e se destaca por ser uma das mais utilizadas. Além disso, por ser uma ferramenta tão flexível, poderosa e intuitiva, ela continua a ganhar rapidamente popularidade (Hillier e Lieberman, 1988).

Banks *et al* (2004) defini a simulação como uma imitação do funcionamento do processo ou sistema do mundo real ao longo do tempo. A simulação é usada pra

descrever e analisar o comportamento dos sistemas, fazendo perguntas do tipo "*what-if*" sobre o sistema, e auxiliando no *design* do sistema.

Tema	Autor - Título	Ano
SIMULAÇÃO DE EVENTOS DISCRETOS e SIMULAÇÃO APLICADA NA CONSTRUÇÃO ENXUTA	Hillier e Lieberman - Introdução à Pesquisa Operacional	1988
	Tommelein - Pull-Driven Scheduling for Pipe-spool Installation: Simulation of a Lean Construction Technique	1998
	Abu Hammad - Simulation Modeling of Manufacturing Housing Process	2002
	Draper e Martinez - The Evaluation of Alternative Production System Designs with Discrete Event Simulation	2002
	Farrar et al - Generic Implementation of Lean Concepts in Simulation Models	2004
	Banks - Discrete-Event System Simulation	2004
	Schramm e Formoso - Using Visual Interactive Simulation to Improve Decision-Making in Production System Design	2007
	Gehbauer et al - Simulation-Base Analysis of Disturbances in Construction Operations	2007
	Srisuwanrat e Ioannou - The Investigation of Lead-Time Buffering Under Uncertainty Using Simulation and Cost Optimization	2007
	Kwak e Ingall - Exploring Monte Carlo Simulation Applications for Project Management	2007
	Raychaudhuri - Introduction to Monte Carlo Simulation	2008
	Velarde et al - Process flow improvement proposal using manufacturing philosophy and simulation techniques on a modular home manufacturer	2009
	Azevedo -Planejamento de Atividades da Construção Predial Visando a Redução de Perdas de Processo na Ótica da Construção Enxuta	2010

Quadro 6: Principais referências ao tema Simulação.

Banks (1999) lista uma série de vantagens e desvantagens da simulação como veremos abaixo:

Vantagens:

- **Escolher Corretamente**: permite que cada aspecto de uma mudança proposta seja testado sem precisar adquiri-los;
- **Compressão/Expansão do Tempo**: permite que se aumente ou diminua a velocidade de um fenômeno para que se possa investigá-lo detalhadamente;

- **Explorar Possibilidades**: uma vez desenvolvido um modelo válido de simulação, pode-se explorar novas políticas, procedimentos de operação ou métodos sem o grande custo e trabalho de experimentar no sistema real;
- **Diagnosticar Problemas**: a simulação permite um melhor entendimento das interações sobre as variáveis que fazem alguns sistemas tão complexos. Diagnosticando problemas e obtendo uma melhor visão da importância dessas variáveis aumenta o entendimento de seus importantes efeitos na performance do sistema como um todo;
- **Identificando Restrições**: pode-se descobrir a causa do atraso de informações, materiais, *work-in-process*, e outros processos;
- **Desenvolver um entendimento**: estudos de simulação auxiliam em prover um melhor entendimento de como o sistema realmente opera em vez da indicação de um indivíduo sobre como o sistema vai se comportar;
- **Visualização**: Dependendo do *software* utilizado, utilizando animações, pode-se ver as operações de vários ângulos e leveis de magnitude, até mesmo em 3D;
- **Construir um consenso**: é muito mais fácil aceitar os resultados confiáveis da simulação, que foi modelada, testada, validada e visualizada, do que a opinião de uma pessoa sobre os resultados que irão ocorrer;
- **Prepara para mudança**: a simulação provê uma idéia dos cenários que são interessantes e consegue responder as questões do tipo "E se?" (*What-if*);
- **Investir sabiamente**: um custo típico de um estudo de simulação é substancialmente menos que 1% da quantidade total que seria gasta na implementação de um sistema. Já que o custo de uma mudança ou modificação no sistema depois da instalação é muito alto;
- **Treinar a equipe**: modelos de simulação podem prover um treinamento excelente quando designado para esse objetivo. A equipe pode aprender com os próprios erros e por consequência aprender a operar melhor;

- **Especificação de requerimentos**: a simulação pode ser usada para especificar requerimentos do design um sistema.

Desvantagens:

- **A construção do modelo requer treinamento especial**: é uma arte que é aprendida pelo tempo e pela experiência. Se tivermos dois modelos de um mesmo sistema que foram construídos por duas pessoas competentes, eles podem ser similares, mas é muito improvável que eles sejam iguais
- **Resultados da simulação podem ser difíceis de serem interpretados:** pode ser difícil de determinar se uma observação é resultado do inter-relacionamento do sistema ou da aleatoriedade;
- **Modelagem da simulação e análise podem consumir tempo e dinheiro**: economizar nos recursos para a modelagem e análise pode resultado em um modelo de simulação e/ou análise que não é suficiente para a tarefa;
- **Simulação pode ser usada inapropriadamente**: Simulação é utilizada em alguns casos quando uma solução analítica é possível e muitas vezes preferível.

Hillier e Lieberman (1988) descrevem duas amplas categorias de simulações, as simulações por eventos discretos e as simulações contínuas:

- A simulação por eventos discretos: é aquela em que as mudanças no estado do sistema ocorrem instantaneamente em pontos aleatórios no tempo como resultado da ocorrência de eventos discretos. A maioria das aplicações de simulação, na prática, é por eventos discretos.

- A simulação contínua: é aquela na qual as mudanças no estado do sistema ocorrem continuamente ao longo do tempo. As simulação contínuas normalmente exigem o emprego de equações diferenciais para descrever a taxa de mudança das variáveis de estado, aumentando o grau de complexidade da análise.

Os autores ainda ressaltam que, para simplificar a análise, é possível usar a simulação por eventos discretos para aproximar o comportamento de um sistema contínuo.

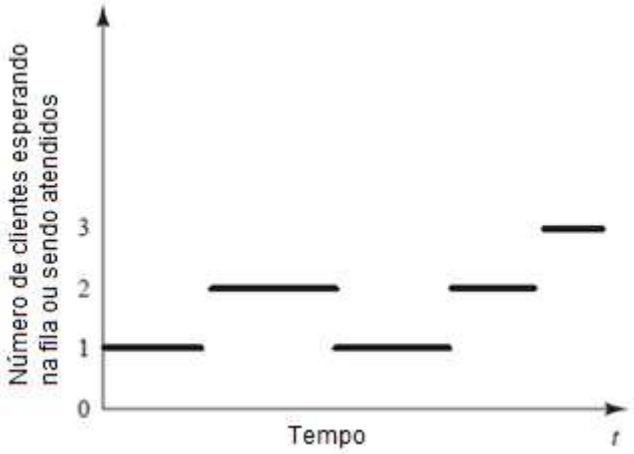

Figura 10: Variável de estado em um sistema discreto. Fonte: Adaptado de Banks *et al* (2004)

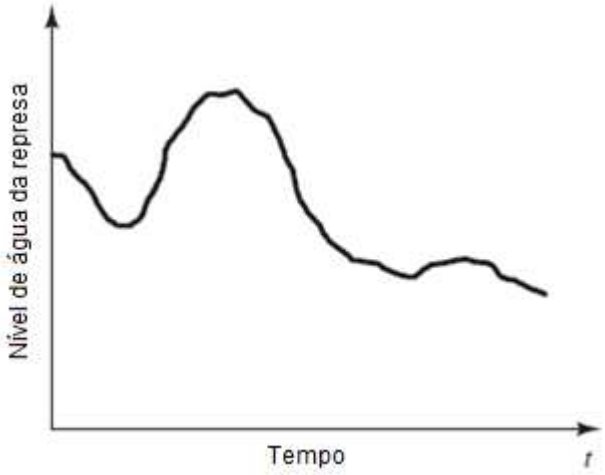

Figura 11: Variável de estado em um sistema contínuo. Fonte: Adaptado de Banks *et al* (2004)

Segundo Banks *et al* (2004) os modelos utilizados em simulação além de classificados como discretos ou contínuos, também podem ser classificados como sendo estáticos ou dinâmicos, e determinístico ou estocástico. Um modelo de simulação estático, muitas vezes chamado de simulação de Monte Carlo, representa o sistema em certo instante no tempo, já os modelos de simulação dinâmica representam o sistema ao longo do tempo.

Os modelos de simulação que não contem variáveis aleatórias são classificados como determinísticos. Esses modelos possuem um conjunto conhecido de entradas as quais resultarão num conjunto único de saída. O modelo de

simulação estocástico possui como entrada uma mais variáveis aleatórias. Essas variáveis aleatórias de entradas garantem que existam saídas aleatórias. Uma vez que as saídas são aleatórias, elas podem ser consideradas como estimativas das verdadeiras características do modelo.

Na simulação de eventos discretos os modelos são analisados numericamente, ao invés de se utilizar uma abordagem analítica. Os métodos analíticos procuram resolver matematicamente o problema, já os métodos numéricos utilizam de métodos computacionais para solucionar o problema.

A simulação de eventos discretos é um tipo de simulação se baseia na repetição de amostragens aleatórias e análises estatísticas dos resultados. (RAYCHAUDHURI, 2008). Esse método simula o sistema todo várias vezes, centenas ou até milhares de vezes, cada vez escolhendo aleatoriamente o valor de cada variável através de uma distribuição de probabilidade. O resultado disso é uma distribuição de probabilidade do valor total do sistema, calculado através das iterações do modelo. (KWAK E INGALL, 2007)

Simulação por eventos discretos é uma técnica matemática muito útil para analisar cenários incertos e proporciona uma análise estatística das diferentes situações. O princípio básico para aplicação dá análise no Monte Carlo é simples e fácil de compreender. Diversos *softwares* tem acelerado a adoção da simulação por Monte Carlo em diferentes áreas incluindo matemática, engenharia, finanças etc. (RAYCHAUDHURI, 2008)

2.3.1 Testes de aderência

Nessa seção descreveremos alguns procedimentos para identificação das distribuição de entrada de um modelo de simulação, também chamado de testes de aderência. Quando existe um histórico dos dados para um particular parâmetro de entrada, usa-se métodos numéricos para testar a adequabilidade dos dados a uma distribuição teórica, seja ela discreta ou contínua.

Cada distribuição de probabilidade pode ser identificada por um conjunto único de parâmetros, então a essência dos testes de aderência é encontrar os parâmetros da distribuição que podem gerar os dados em questão. Dessa

perspectiva, os métodos utilizados não passam de problemas de otimização não-lineares, onde as variáveis são os parâmetros das distribuições. A seguir encontra-se a descrição de alguns desses procedimentos:

Método da Máxima Verossimilhança**:**

É um método estatístico popular que assume que os dados extraídos de um distribuição específica são independentes e identicamente distribuídos, então esse método pode ser utilizado para encontrar os parâmetros da distribuição que melhor se encaixa nos dados.

Sendo θ o vetor que é parâmetro de f , que pode ser a função massa de probabilidade (f.m.p.) ,para distribuições discretas, ou a função de densidade de probabilidade (f.d.p.) , para distribuições contínuas. Denotaremos a f.m.p ou a f.d.p. como f_θ.

Adotaremos a amostra extraída da distribuição como sendo $x_1, x_2, \ldots, x_n$. Então a verossimilhança de termos uma amostra dessa distribuição é dada pela equação:

$$L(\theta) = f_\theta(x_1, x_2, \ldots, x_n | \theta)$$

Isso pode ser entendido como uma função de probabilidade conjunta dos dados, dada pelos parâmetros da distribuição. Tendo em vista a independência de cada dado, a equação acima pode ser expandida para:

$$L(\theta) = \prod_{t=1}^{n} f_\theta(x_i|\theta)$$

No método da máxima verossimilhança tenta-se encontrar o valor de θ que maximiza o valor de $L(\theta)$. Como isso é um produto de probabilidades, podemos por conveniência considerar o logaritmo dessa função para maximização, daí o termo log-verossimilhança. Então o método da máxima verossimilhança pode ser entendido como um problema de otimização sem restrições, como mostrado abaixo:

$$\max LL(\theta) = \sum_{t=1}^{n} \ln f_\theta(x_i|\theta) \quad , \theta \in \Theta$$

Onde Θ representa o domínio de cada parâmetro da distribuição. Para algumas distribuições, esse problema de otimização pode ser resolvido teoricamente

utilizando equações diferenciais (diferenciais parciais, caso exista mais de um parâmetro).

Método dos Momentos:

É um método para estimar parâmetros populacionais como média, variância, mediana dentre outros (que não necessariamente precisam ser momentos) igualando os momentos da amostra com o momento da população que se quer observar (para isso utiliza-se equações teóricas) e então resolvem-se essas equações para as grandezas que se deseja estimar.

Teste Qui Quadrado:

Pode ser visto como uma comparação formal de um histograma dos dados com a f.d.p ou f.m.p da distribuição a ser ajustada. Para realizar esse teste em qualquer caso (contínuo ou discreto), precisamos dividir o intervalo da distribuição a ser ajustada em k subintervalos $[a_0, a_1)$, $[a_1, a_2)$, ... , $[a_{k-1}, a_k)$. É possível que $a_0 = -\infty$ ou $a_k = +\infty$, ou ambos. Definindo então N_j como o número de X_i s no j-ésimo intervalo $[a_{j-1}, a_j)$, para $j = 1,...,k$. Note que $\sum_{j=1}^{k} N_j = n$

Em seguida, calcula-se a proporção p_j de X_i s que podem cair no j-ésimo intervalo, ao fazer amostragens da distribuição a ser ajustada. Ou seja:

$$p_j \begin{cases} \int_{a_{j-1}}^{a_j} \hat{f}(x)dx & onde,\ \hat{f} \text{ é } a\ f.d.p \\ \sum_{a_{j-1} \leq x_i \leq a_j} \hat{p}(x_i) & onde, \hat{p} \text{ é } a\ f.m.p \end{cases}$$

O teste estatístico é dado pela equação a seguir:

$$\hat{\chi}^2 = \sum_{J=1}^{K} \frac{(N_J - np_j)^2}{np_j}$$

Teste de Kolmogorov-Smirnov**:**

Dada uma amostra aleatória ordenada, correspondente aos dados da variável de entrada no modelo de simulação a ser ajustado, $X_{(1)} < X_{(2)} < ... < X_{(n)}$, a função de distribuição cumulativa empírica é dada por:

$$F_n(x) \begin{cases} 0 \quad para\ x < X_{(1)} \\ \dfrac{i}{n} \quad para\ X_{(1)} \leq x \ \leq \ X_{(i+1)} \\ 1 \quad para\ x \ \geq \ X_{(n)} \end{cases}$$

Essa é uma função degrau contínua. Se F(x) é a função acumulada da distribuição (f.a.d.), o método de Kolmogorov-Smirnov compara a f.a.d. com a distribuição a ser ajustada. Definindo então $D^+ = sup_x\{\, F_n(x) - F(x)\,\}$ e $D^- = sup_x\{\, F(x) - F_n(x)\,\}$, então a estatística *D* de Kolmogorov-Smirnov é definida como:

$$D = \ sup_x|F_n(x) - \ F(x)| = \max(D^+, D^-)$$

Para concluir o teste é necessário comparar o valor de D obtido com um valor de $D_{crítico}$ que pode ser encontrado utilizando a tabela abaixo.

N	α			
	0,20	0,10	0,05	0,01
5	0,45	0,51	0,56	0,67
10	0,32	0,37	0,41	0,49
15	0,27	0,30	0,34	0,40
20	0,23	0,26	0,29	0,36
25	0,21	0,24	0,27	0,32
30	0,19	0,22	0,24	0,29
35	0,18	0,20	0,23	0,27
40	0,17	0,19	0,21	0,25
45	0,16	0,18	0,20	0,24
50	0,15	0,17	0,19	0,23
N>50	$1{,}07/\sqrt{N}$	$1{,}22/\sqrt{N}$	$1{,}36/\sqrt{N}$	$1{,}63/\sqrt{N}$

Tabela 5: Valores de $D_{crítico}$ do teste Kolmogorov-Smirnov. Fonte: Pinto *et. al* (2011)

Testes quadráticos**:**

As estatísticas quadráticas são dadas segundo a forma padrão:

$$Q = n \int_{-\infty}^{+\infty} \{F_n(x) - F(x)\}^2 \psi(x) dF(x)$$

Quando $\psi(x) = 1$ na equação acima, ela se transforma no método de Cramer-von Mises, e frequentemente representado por W^2. Quando $\psi(x) = [\{F(x)\}\{1 - F(x)\}]^{-1}$, temos o método chamado de Anderson-Darling, e usualmente representado por A^2

2.3.2 Geração de Números Aleatórios

Segundo Hillier e Lieberman (1988), implementar um modelo de simulação requer números aleatórios para se obter observações aleatórias a partir das distribuições de probabilidades. O procedimento usado por um computador para obter números aleatórios é chamado de gerador de números aleatórios.

Um gerador de números aleatórios é um algoritmo que produz sequências de números que seguem uma distribuição de probabilidades especificada e possui o aspecto da aleatoriedade (HILLIER e LIEBERMAN, 1988)

Para Hillier e Lieberman (1988) os números aleatórios podem ser divididos em duas categorias principais, números aleatórios inteiros e números aleatórios uniformes:

- Um **número aleatório inteiro**: é uma observação aleatória de uma distribuição uniforme discretizada ao longo de um intervalo $\underline{n}$, $\underline{n}$ + 1 , ..., $\bar{n}$. As probabilidades para essa distribuição são:

$$P(\underline{n}) = P(\underline{n} + 1) = \cdots = P(\bar{n}) = \frac{1}{\bar{n} - \underline{n} + 1}$$

Para a maioria das aplicações normalmente utiliza-se $\underline{n}$ = 0 ou 1.

- Um **número aleatório uniforme**: é uma observação aleatória de uma distribuição uniforme (contínua) ao longo de algum intervalo [*a,b*]. A f.d.p. dessa distribuição uniforme é:

$$f(x) = \begin{cases} \dfrac{1}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 0, & caso\ contrário \end{cases}$$

,

A rigor, os números gerados por um computador não deveriam ser designados números aleatórios, pois eles são previsíveis e reproduzíveis (o que, algumas vezes, é vantajoso), dado o gerador de números aleatórios empregado. Portanto, às vezes, eles recebem a denominação de números pseudo-aleatórios. Entretanto, o ponto importante é que eles desempenham satisfatoriamente o papel de números aleatórios na simulação se o método usada para gerá-los for válido.

Foram propostos vários procedimentos estatísticos relativamente sofisticados para testar se uma sequência gerada tem um aspecto aceitável de aleatoriedade. Basicamente, as exigências são que cada número sucessivo da sequência tenha uma probabilidade igual de assumir qualquer um dos valores possíveis e que ele seja estatisticamente independente dos demais números da sequência.

<u>Métodos Congruentes para Geração de Números Aleatórios</u>**:**

Há uma série de geradores de números aleatórios disponível, dos quais os mais populares são os métodos congruentes (aditivos, multiplicativos e mistos). O método congruente misto inclui recursos dos outros dois e, portanto, iremos apresentá-lo abaixo:

O método congruente misto gera uma sequência de números aleatórios inteiros ao longo do intervalo que vai de 0 a m - 1. O método sempre calcula o número aleatório seguinte a partir do último obtido, dado um número aleatório inicial x_0, chamado semente. Particularmente, ele calcula o (n + 1)-ésimo número aleatório x_{n+1} a partir do n-ésimo número aleatório x_n usando a relação de recorrência:

$$x_{n+1} = (ax_n + c)(módulo\ m)$$

Métodos Congruentes para Geração de Números Aleatórios**:**

Há uma série de geradores de números aleatórios disponível, dos quais os mais populares são os métodos congruentes (aditivos, multiplicativos e mistos). O método congruente misto inclui recursos dos outros dois e, portanto, iremos apresentá-lo abaixo:

O método congruente misto gera uma sequência de números aleatórios inteiros ao longo do intervalo que vai de 0 a m - 1. O método sempre calcula o número aleatório seguinte a partir do último obtido, dado um número aleatório inicial x_0, chamado semente. Particularmente, ele calcula o (n + 1)-ésimo número aleatório x_{n+1} a partir do n-ésimo número aleatório x_n usando a relação de recorrência:

$$x_{n+1} = (ax_n + c)(módulo\ m)$$

Onde a, c e m são inteiros positivos ($a < m$, $c < m$). Essa notação matemática significa que x_{n+1} é o resto quando $ax_n + c$ for dividido por m. Logo, os possíveis valores de x_{n+1} são 0,1, ... , m -1, de modo que m represente o número desejado de valores diferentes que poderiam ser gerados para os números aleatórios.

A tabela 6 apresenta de números aleatórios quando fazemos $m = 8$, $a = 5$, $c = 7$ e $x_0 = 4$. A sequência não pode ser continuada além, pois ela simplesmente começará a repetir os números na mesma ordem. A quantidade de números consecutivos em uma sequência antes de ela começar a repetir se é conhecida como duração do ciclo. Logo a duração do ciclo no exemplo é 8.

n	X_n	$5X_n+7$	$(5X_n+7)/8$	X_{n+1}
0	4	27	3+3/8	3
1	3	22	2+6/8	6
2	6	37	4+5/8	5
3	5	32	4+0/8	0
4	0	7	0+7/8	7
5	7	42	5+2/8	2
6	2	17	2+1/8	1
7	1	12	1+4/8	4

Tabela 6: Ilustração do método congruente misto. Fonte: Hillier e Lieberman (1988)

A tabela 7, ilustra a conversão dos números aleatórios inteiros obtidos na tabela 6 em números aleatórios uniformes a partir da fórmula:

$$\text{Número aleatório uniforme} = \frac{\text{número aleatório inteiro} + \frac{1}{2}}{m}$$

Número Aleatório Inteiro	Número Aleatório Inteiro
3	0,4375
6	0,8125
5	0,6875
0	0,0625
7	0,9375
2	0,3125
1	0,1875
4	0,5625

Tabela 7: Convertendo números aleatórios inteiros em números aleatórios uniformes. Fonte: Hillier e Lieberman (1988)

<u>Geração de Observações Aleatórias de uma Distribuição de Probabilidades:</u>

Segundo Raychaudhuri (2008), depois de termos identificados a distribuição que descreve os parâmetros de entrada do modelo de simulação, é feito a geração de números aleatórios que correspondem a essa distribuição.

O método mais comum para fazer isso, tanto para distribuições discretas como contínuas, é o da transformação inversa. O método da transformação inversa

proporciona um bom caminho para gerar amostras aleatórias de uma distribuição. O método utiliza a inversa da função densidade de probabilidade, para distribuições contínuas, ou da função massa de probabilidade, para distribuições discretas, e converte um número aleatório entre 0 e 1 para um valor aleatório da distribuição de entrada.

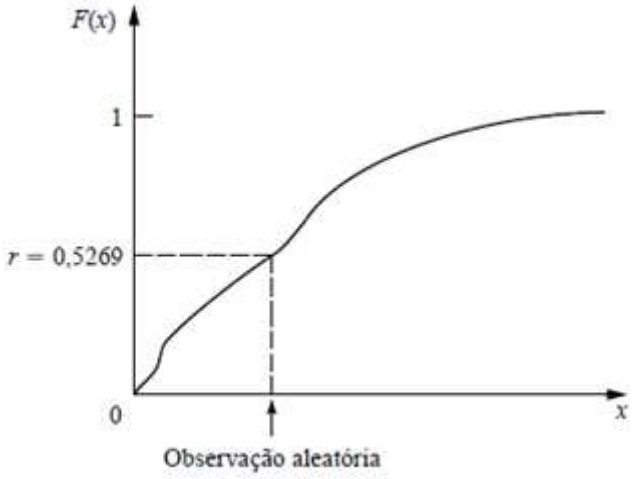

Figura 12: Ilustração do método da transformação inversa para se obter a observação aleatória de dada distribuição de probabilidades. Fonte: Hillier e Lieberman (1988)

Hillier e Lieberman (1988) descrevem o processo matematicamente, como mostrado a seguir:

Fazendo *X* como uma variável aleatória contínua (a qual queremos gerar) que segue uma certa distribuição, representaremos a função de distribuição cumulativa por:

$$F(x) = P(X \leq x)$$

Gerar cada observação requer então as duas etapas a seguir:

1 - Gerar um número aleatório uniforme *r* entre 0 e 1;

2 - Fazer $F(x) = r$ e resolver em termos de *x*, que então é a observação aleatória desejada da distribuição de probabilidades.

. Raychaudhuri (2008) ressalta que uma vantagem importante do método da transformação inversa é que ele pode ser usado por qualquer tipo distribuição, incluindo funções que são misturas de distribuições discretas e contínuas. Já sua desvantagem surge do fato de que o método se torna difícil de se implementar se não existir uma forma aproximada da função de distribuição cumulativa para a

distribuição. Nesses casos um método numérico, como o da bisseção ou de Newton-Raphson podem ser utilizados.

2.3.3 A Simulação na Construção

Schramm e Formoso (2007) apontam que a simulação tem sido usada no gerenciamento da construção como uma ferramenta desde 1973 quando Halpin desenvolveu o CYCLONE. Baseado nesse sistema, muitos outros simuladores foram propostos buscando o desenvolvimento dos modelos de simulação para dar suporte a tomada de decisão no gerenciamento da construção. Mais recentemente o STROBOSCOPE tem sido uma das linguagens de simulação mais utilizadas no setor da construção. Muito estudos tem sido desenvolvidos usando essa linguagem, inclusive aplicando os princípios da produção enxuta no gerenciamento da construção.

Tommelein (1998) utilizou o STROBOSCOPE ao realizar uma simulação de eventos discretos para estudar várias características do processo construtivo relevantes para a *lean production*. Draper e Marinez (2002) utilizam o EZStrobe para comparar um arranjo em série de atividades com um em paralelo, fazendo uso três parâmetros (*a, m* e *b*) do PERT para cada atividade. Azevedo (2010) elaborou uma planilha eletrônica (Microsoft EXCEL), para simular o tempo de execução das atividades, a saber *Steel Deck*, Armação e Concretagem, utilizando em sua análise os principais conceitos da construção enxuta como, por exemplo, o fluxo contínuo e redução de desperdício.

A construção pode ser pensada como um sistema de produção, mas é diferente da manufatura porque as condições gerais podem mudar com o tempo. Além disso a construção representa um processo produtivo altamente dinâmico, que deve reagir a mudanças endógenas e exógenas, e por fazer isso, os engenheiros de planejamento devem tentar manter o fluxo contínuo do trabalho. (GEHBAUER *et al* 2007)

Sendo a ocorrência de somente um problema numa operação da construção, considerando o processo todo ou durante uma operação típica da construção (como colocar concreto na parede), muito improvável, cenários mais complexos devem ser considerados. Além disso, a utilização de uma ferramenta de planejamento baseada

na simulação deve dar a oportunidade de se criar vários cenários, como por exemplo, mudando o tipo de problema ou sua frequência de acontecimento. (GEHBAUER *et al* 2007)

Kwak e Ingall (2007) apontam que a simulação de eventos discretos pode ser aplicada no gerenciamento de tempo as atividades de um projeto para quantificar a confiança que um gerente de projeto deve ter na data de finalização do projeto almejada ou na duração total do projeto. Uma vez que a simulação termina, o gerente de projetos está habilitado para apresentar a probabilidade de se completar o projeto em uma determinada data, o que lhe permite configurar um cronograma reserva para o projeto. Isso pode ser facilmente implementado utilizando *softwares* tradicionais de gerenciamento de projetos, como o Microsoft Project ou Primavera, juntamente com suplementos (*add-ins*) para simulação com Monte Carlo, como o @Risk ou Risk+.

A simulação de eventos discretos também tem sida utilizada em projetos de construção para melhorar o entendimento de certos riscos do projeto, como também no gerenciamento de custos para entender melhor o orçamento do projeto e estimar seu orçamento final, quando terminado. (KWAK e INGALL, 2007).

Os autores Kwak e Ingall (2007) apontam que o PERT seria o primeiro método a ser escolhido, depois do Monte Carlo, para avaliar o cronograma da rede do projeto, mas esse método não descreve estatisticamente a convergência dos caminhos, e ainda normalmente tende a subestimar a duração do projeto. Já a simulação de Monte Carlo que é rodada centenas ou milhares de vezes consegue lidar com bem com esse tipo de situação.

O quadro a seguir apresenta as vantagens e as limitações expostas por Kwak e Ingall (2007) ao se aplicar a simulação de eventos discretos na gestão de projetos.

Vantagens	Limitações
É uma ferramenta poderosa quando se tenta entender e quantificar o potencial efeito das incertezas no projeto	A simulação será tão boa quanto o modelo que está sendo simulado e a informação que o alimenta
Auxilia o gestor do projeto quantificando e justificando projeto reservas para lidar com o risco de eventos que irão ocorrer durante a vida do projeto	A estimativa das durações das atividades do projeto normalmente requerem o conhecimento de especialistas, e mesmo quando as três estimativas do tempo de uma atividade (*a*, *m* e *b*) são dadas para incorporar a incerteza do modelo, existe ainda alguma incerteza latente nessa
O método trabalha com distribuições de probabilidade para a duração do projeto as quais são muito mais úteis para responder questões sobre o nível de confiança da data de término de um projeto	Com o avanço da tecnologia, cada vez menos se encontra o problema de se gastar tempo e recursos para completar uma simulação que requeira um certo poderio computacional, como também a falta de *softwares* fáceis de usar para rodar simulações complexas

Quadro 7: Vantagens e Limitações da Simulação de Eventos Discretos na Gestão de Projetos.

Fonte: Adaptado de Kwak e Ingall (2007)

3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este capítulo tem foco em explicar os procedimentos metodológicos que foram utilizados para desenvolver todo o trabalho. Realizamos abaixo uma breve descrição de todas as etapas que serão seguidas neste estudo.

3.1 Definição do Escopo do Estudo

Esta é uma etapa inicial do trabalho, onde será delimitado o que será feito nas etapas seguintes, abaixo podemos ver um fluxograma que representa uma visão geral da metodologia utilizada:

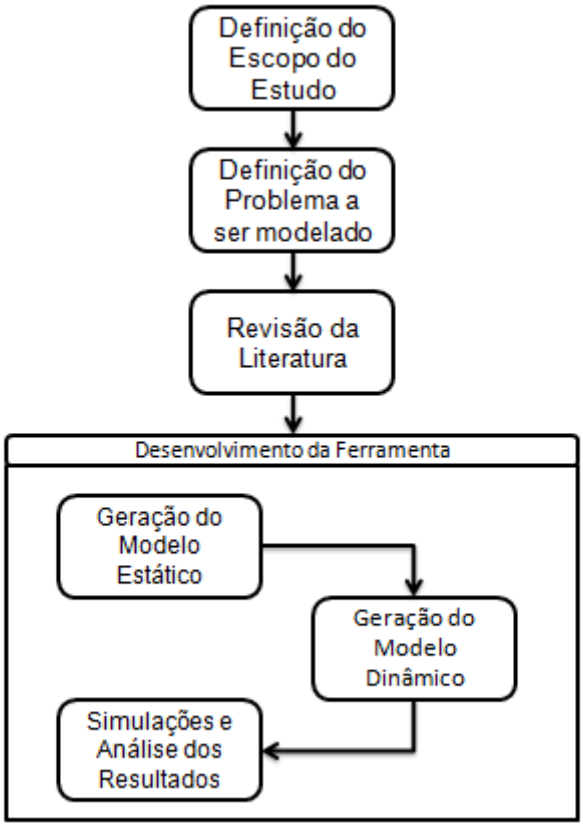

Figura 13: Metodologia utilizada.

Para definir o escopo do estudo foi necessário responder a algumas perguntas como:

- Qual problema será analisado?
- Como o estudo vai ser desenvolvido? O que será feito e o que não será?
- Quais os objetivos do estudo? Como alcançá-los?
- Qual é a importância desse estudo?
- Quais as limitações do estudo?
- Como podemos associar este trabalho com a prática?

3.2 Definição do problema a ser modelado

Quando se aplica o conceito de fluxo, que vem do pensamento enxuto, na construção civil percebe-se que são necessárias ferramentas para ajudar tanto no controle, como também no planejamento das atividades de um projeto de construção civil. Podemos dizer que é essencial na construção enxuta se ter conhecimento do comportamento do fluxo de atividades de projeto.

As várias atividades que compõem um projeto possuem relações de dependência, o que torna complexo o gerenciamento do fluxo. Este estudo realizado sobre o gerenciamento do tempo das atividades na construção enxuta pretende desenvolver uma ferramenta para um gestor de projetos ter visão e confiança do que deve fazer para manter o fluxo bem balanceado de forma a buscar a otimização de tempo e de recursos.

Com base nas simulações em conjunto com uma análise de sensibilidade poderemos responder questões do tipo:

- Qual a data de término prevista para o projeto?
- Qual a probabilidade de o projeto terminar até o dia X ?
- Quais atividades são críticas para o projeto?
- O que acontece se houver um atraso em determinada atividade?
- Quanto podemos ganhar no prazo do projeto ao se terminar uma atividade crítica mais X% mais rápido?
- Essa atividade está com recursos sobrando?
- Devemos aumentar os recursos necessários para realizar essa atividade?
- Qual é o melhor e o pior cenário possível?

3.3 Revisão da Literatura

Para desenvolver o estudo foi necessária uma revisão detalhada da literatura sobre os temas: Construção Enxuta, PERT e Simulação de Eventos Discretos. Com relação ao tema Construção Enxuta, a cada ano que passa muita pesquisa tem sido desenvolvida sobre o assunto e um dos principais meios de divulgação desses trabalhos é o IGLC (*International Group of Lean Construction*).

A revisão da literatura do PERT teve como objetivo a procura por explicações sobre as aproximações envolvidas em toda sua estrutura como também procurar por alternativas para implementação do PERT. Essas alternativas visam ajudar na modelagem durante a simulação de uma rede de atividades.

A revisão sobre Simulação possui o objetivo de explorar as características principais do tema como também o relacionamento da simulação com os outros temas abordados na revisão da literatura.

3.4 Desenvolvimento da Ferramenta

O desenvolvimento da ferramenta para simulação de redes de atividade em uma planilha eletrônica seguirá algumas etapas como veremos a baixo. Alguns desses procedimentos como, por exemplo, a geração de um modelo estático, a identificação da distribuição de entrada, a geração das variáveis aleatórias e a análise dos resultados são encontrados comumente, como afirma Raychaudhuri (2008), durante a realização de uma simulação por eventos discretos.

3.4.1 A geração do modelo estático

Segundo Raychaudhuri (2008) a simulação de eventos discretos começa com o desenvolvimento de um modelo determinístico o qual se assemelha com a realidade. Nesse modelo determinístico, utiliza-se normalmente o valor mais provável (ou a situação base) como parâmetro de entrada. Aplicam-se então as relações matemáticas que utilizam os valores das variáveis de entradas, transformando-as na saída.

Com base na revisão bibliográfica sobre PERT poderemos então implementar um modelo que simule redes de atividades. Inicialmente para modelar uma rede de atividades de um projeto será criada uma planilha eletrônica inicial que reproduza o CPM. Com essa planilha temos um modelo estático inicial, pois não há presença de variáveis aleatórias, e que reproduz a interdependência das atividades. Aperfeiçoando o modelo estático inicial, introduziremos no cálculo da duração de cada atividade, as variáveis *a*, *m* e *b* transformando o CPM em um PERT.

3.4.2 A geração do modelo dinâmico

Uma vez gerado o modelo estático, adicionamos então componentes de risco ao modelo. Esses riscos se originam da natureza estocástica das variáveis de entrada. Ou seja, devemos identificar a distribuição que representa da melhor forma às variáveis de entrada do modelo. Segundo Raychaudhuri (2008), um histórico de dos dados dessas variáveis pode ser necessário nessa etapa, como também, a utilização de alguns procedimentos estatísticos básicos para se identificar essas distribuições como, por exemplo, o teste qui-quadrado, teste de Kolmogorov-Smirnov etc.

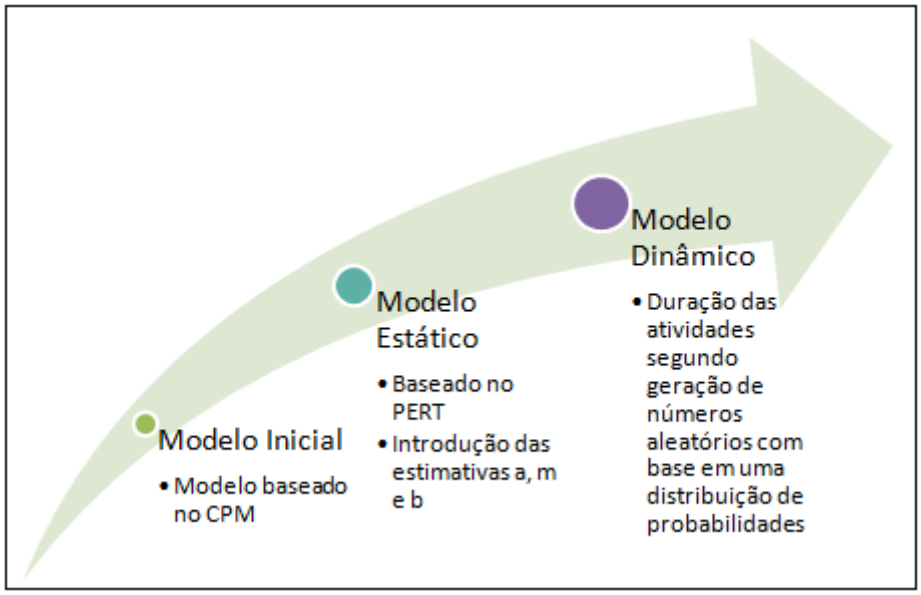

Figura 14: Etapas de Desenvolvimento do Modelo.

Após ter as distribuições de probabilidade das variáveis de entradas identificadas, podemos gerar um conjunto de números aleatórios dessas distribuições. Um conjunto desses números aleatórios consiste de um valor pra cada variável de entrada, que será usado no modelo determinístico para obtermos um conjunto de valores de saída. Para Raychaudhuri (2008), essa parte é o coração da simulação de eventos discretos

A incorporação das variáveis aleatórias no modelo faz com que o mesmo passe de um estado estático para um dinâmico, possibilitando assim a utilização da simulação. Sendo assim podemos simular a duração de um projeto como também calcular facilmente a probabilidade de um projeto terminar em até X dias. Essa probabilidade é calculada da seguinte forma:

$$P(X) = \frac{Q(X)}{Q_{total}}$$

Onde:

P(*X*) - Probabilidade de um projeto terminar em até X dias

Q(*X*) - Quantidade de vezes que o projeto terminou em até X dias

Q_{total} - Tamanho da corrida realizada na simulação

Outra etapa essencial do modelo que irá gerar dados necessários para análise, é a determinação do caminho crítico. Um detalhe especial é que como a duração de cada atividade do projeto é variável, então teremos variação das atividades que compõem o caminho crítico, fazendo com que existam inúmeras combinações de atividades críticas gerando assim vários caminhos críticos, principalmente para redes complexas. Portanto teremos para cada rede uma gama de caminhos críticos e consequentemente poderemos determinar uma probabilidade associada a cada caminho e a cada atividade com relação a sua criticidade.

Determinação da probabilidade de um caminho ser um caminho crítico:

$$P_{cc} = \frac{Q_{cc}}{Q_{total}}$$

Onde:

P_{cc} - Probabilidade do caminho ser um caminho crítico

Q_{cc} - Quantidade de vezes que o caminho foi um caminho crítico

Q_{total} - Tamanho da corrida realizada na simulação

Determinação da probabilidade de uma atividade ser uma atividade crítica:

$$P_{ac} = \frac{Q_{ac}}{Q_{total}}$$

Onde:

P_{ac} - Probabilidade da atividade ser uma atividade crítica

Q_{ac} - Quantidade de vezes que a atividade foi uma atividade crítica

Q_{total} - Tamanho da corrida realizada na simulação

3.4.3 Análise de dados e tomada de decisão

Nesta etapa os dados obtidos durante as diversas simulações realizadas são analisados estatisticamente para identificação de algumas propriedades específicas das redes atividades, como por exemplo, a identificação da distribuição do tempo de execução de um projeto, a comparação do resultado obtido pelo PERT clássico e a simulação e também algumas informações relevantes para a conclusão deste trabalho. Esse respaldo estatístico garante a confiança das decisões que serão tomadas depois de rodar a simulação.

4. DESENVOLVIMENTO DA FERRAMENTA PARA GERENCIAMENTO DO FLUXO DE ATIVIDADES

4.1 Modelagem Prévia

A seguir serão apresentados alguns tópicos de caráter introdutório, de forma a facilitar o entendimento do leitor sobre alguns aspectos importantes do desenvolvimento da ferramenta.

4.1.1 Caminho Crítico e Atividades Críticas

Um dos principais impactos da aleatoriedade presente no modelo de simulação está relacionado à duração das atividades e ao caminho crítico. Como as durações das atividades irão variar, elas podem acabar entrando, saindo ou se mantendo no caminho crítico. Com isso, podemos ter para uma rede de atividades uma grande quantidade de caminhos críticos.

Portanto, neste tópico será mostrado o procedimento para o cálculo da probabilidade de um determinado caminho ser crítico e o cálculo da probabilidade de uma atividade fazer parte do caminho crítico. Para melhor compreensão utilizaremos a rede abaixo como exemplo.

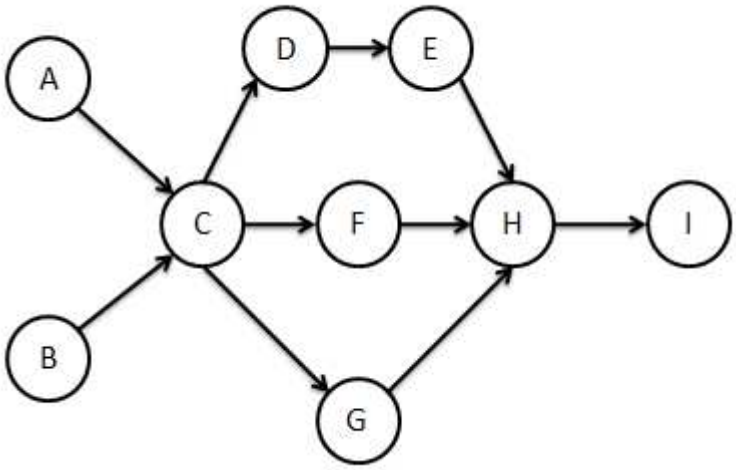

Figura 15: Rede de Atividades.

Atividade	Predecessores	a	m	b
A	-	4	7	14
B	-	4,5	8	13
C	A , B	3	5	8
D	C	3	4	7
E	D	5	6	13
F	C	8	10	12
G	C	5	10	20
H	E , F , G	1	2	6
I	H	3	4	8

Tabela 8: Dados da rede.

Depois de inserir os dados na planilha podemos simular quais atividades compõem o caminho crítico criando uma nova tabela onde se coloca o valor da folga de cada atividade, como mostra a figura abaixo.

N	Duração	Folga das atividades								
		A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	50,8	0,00	0,11	0,00	0,00	0,00	1,24	0,53	0,00	0,00
2										
3										
4										
5										

Figura 16: Tabela de exemplo.

Ao gerar uma tabela de dados no Excel, pode-se simular várias vezes o projeto e completar a tabela como mostrado na figura abaixo. Neste caso, foi utilizada uma corrida de tamanho 5000.

N	Duração	Folga das atividades								
		A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	50,8	0,00	0,11	0,00	0,00	0,00	1,24	0,53	0,00	0,00
2	46,4	0,74	0,00	0,00	0,93	0,93	0,00	1,59	0,00	0,00
3	46,7	0,00	1,74	0,00	4,93	4,93	4,70	0,00	0,00	0,00
4	45,3	1,05	0,00	0,00	1,92	1,92	3,08	0,00	0,00	0,00
5	45,1	0,00	4,51	0,00	0,00	0,00	2,04	0,27	0,00	0,00
6	45,3	0,00	1,35	0,00	1,60	1,60	3,35	0,00	0,00	0,00
7	45,3	0,93	0,00	0,00	5,25	5,25	4,29	0,00	0,00	0,00
8	42,8	3,57	0,00	0,00	0,00	0,00	1,36	3,89	0,00	0,00
9	44,5	0,23	0,00	0,00	0,00	0,00	3,26	2,88	0,00	0,00
10	43,7	1,16	0,00	0,00	0,00	0,00	1,85	0,64	0,00	0,00

Figura 17: Simulando as folgas.

Para determinar se uma atividade faz parte do caminho crítico, é necessário olhar o valor de sua folga, e caso a folga seja igual a zero então a atividade é crítica. Nota-se que, nesse caso, as atividades C, H e I, por causa do desenho da rede, com certeza deverão fazer parte do caminho crítico, logo suas folgas são sempre zero em todas as simulações realizadas.

Cria-se então uma tabela auxiliar para fazer o teste lógico que identificará se a atividade é ou não é crítica. O passo a passo e as fórmulas são mostrados nas figuras abaixo.

N9 =SE(D9=0;N$8;"")

N	Duração	Folga das atividades A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	50,8	0,00	0,11	0,00	0,00	0,00	1,24	0,53	0,00	0,00
2	46,4	0,74	0,00	0,00	0,93	0,93	0,00	1,59	0,00	0,00
3	46,7	0,00	1,74	0,00	4,93	4,93	4,70	0,00	0,00	0,00
4	45,3	1,05	0,00	0,00	1,92	1,92	3,08	0,00	0,00	0,00
5	45,1	0,00	4,51	0,00	0,00	0,00	2,04	0,27	0,00	0,00
6	45,3	0,00	1,35	0,00	1,60	1,60	3,35	0,00	0,00	0,00

Atividades A	B	C	D	E	F	G
A						

O9 =N9&SE(E9=0;O$8;"")

N	Duração	Folga das atividades A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	50,8	0,00	0,11	0,00	0,00	0,00	1,24	0,53	0,00	0,00
2	46,4	0,74	0,00	0,00	0,93	0,93	0,00	1,59	0,00	0,00
3	46,7	0,00	1,74	0,00	4,93	4,93	4,70	0,00	0,00	0,00
4	45,3	1,05	0,00	0,00	1,92	1,92	3,08	0,00	0,00	0,00
5	45,1	0,00	4,51	0,00	0,00	0,00	2,04	0,27	0,00	0,00
6	45,3	0,00	1,35	0,00	1,60	1,60	3,35	0,00	0,00	0,00

Atividades A	B	C	D	E	F	G	H	I
A	A	AC	ACD	ACDE	ACDE	ACDE	ACDEH	ACDEHI

V9 =U9&SE(L9=0;V$8;"")

N	Duração	Folga das atividades A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	50,8	0,00	0,11	0,00	0,00	0,00	1,24	0,53	0,00	0,00
2	46,4	0,74	0,00	0,00	0,93	0,93	0,00	1,59	0,00	0,00
3	46,7	0,00	1,74	0,00	4,93	4,93	4,70	0,00	0,00	0,00
4	45,3	1,05	0,00	0,00	1,92	1,92	3,08	0,00	0,00	0,00
5	45,1	0,00	4,51	0,00	0,00	0,00	2,04	0,27	0,00	0,00
6	45,3	0,00	1,35	0,00	1,60	1,60	3,35	0,00	0,00	0,00

Atividades A	B	C	D	E	F	G	H	I
A	A	AC	ACD	ACDE	ACDE	ACDE	ACDEH	ACDEHI

W9 =V9

N	Duração	Folga das atividades A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	50,8	0,00	0,11	0,00	0,00	0,00	1,24	0,53	0,00	0,00
2	46,4	0,74	0,00	0,00	0,93	0,93	0,00	1,59	0,00	0,00
3	46,7	0,00	1,74	0,00	4,93	4,93	4,70	0,00	0,00	0,00
4	45,3	1,05	0,00	0,00	1,92	1,92	3,08	0,00	0,00	0,00
5	45,1	0,00	4,51	0,00	0,00	0,00	2,04	0,27	0,00	0,00
6	45,3	0,00	1,35	0,00	1,60	1,60	3,35	0,00	0,00	0,00

Atividades A	B	C	D	E	F	G	H	I	Caminho Crítico
A	A	AC	ACD	ACDE	ACDE	ACDE	ACDEH	ACDEHI	ACDEHI
	B	BC	BC	BC	BCF	BCF	BCFH	BCFHI	BCFHI
A	A	AC	AC	AC	AC	ACG	ACGH	ACGHI	ACGHI
	B	BC	BC	BC	BC	BCG	BCGH	BCGHI	BCGHI
A	A	AC	ACD	ACDE	ACDE	ACDE	ACDEH	ACDEHI	ACDEHI
A	A	AC	AC	AC	AC	ACG	ACGH	ACGHI	ACGHI

Figura 18: Etapas para encontrar o caminho crítico.

Assim, obtemos para cada corrida seu respectivo caminho crítico. Pode-se facilmente agora construir uma tabela que mostra todos os caminhos críticos obtidos e quantas vezes cada caminho foi um caminho crítico.

Caminho Crítico	Número de vezes que foi crítico	Probabilidade
ACGHI	796	15,9%
BCDEHI	1508	30,2%
BCGHI	1232	24,6%
ACDEHI	926	18,5%
BCFHI	324	6,5%
ACFHI	214	4,3%
Total	5000	1

Tabela 9: Cálculo do caminho crítico mais provável.

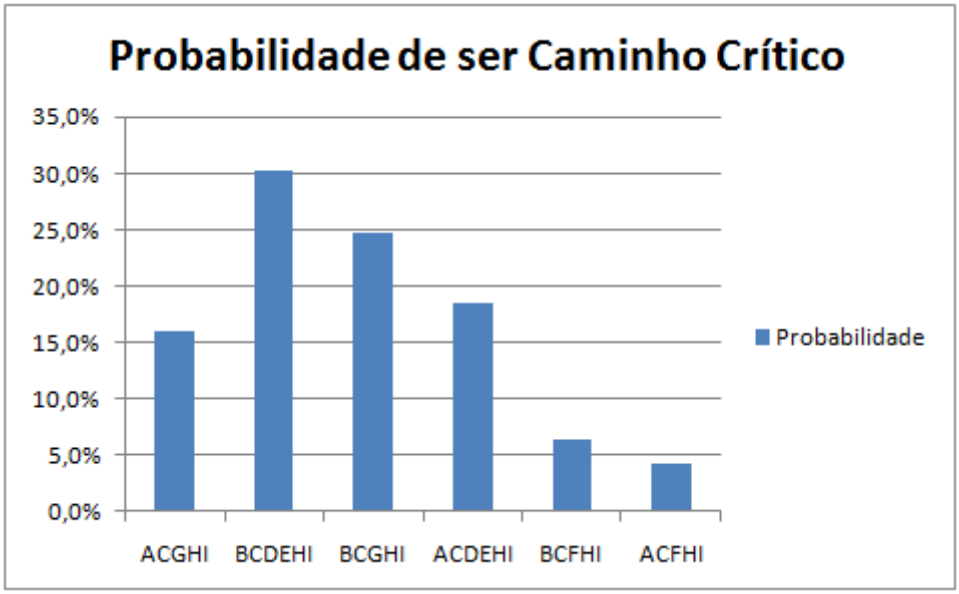

Figura 19: Probabilidade de um do caminho ser o caminho crítico.

De forma similar podemos encontrar a probabilidade de uma atividade fazer parte do caminho crítico, ou seja, a probabilidade de uma atividade ser uma atividade crítica. Para isso verificamos quantas vezes sua folga foi zero como mostra a figura abaixo.

D5 =CONT.SE(D9:D5008;"="&0)

Atividades Crítica								
A	B	C	D	E	F	G	H	I
1936	3064	5000	2434	2434	538	2028	5000	5000

N	Duração	Folga das atividades								
		A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	50,8	0,00	0,11	0,00	0,00	0,00	1,24	0,53	0,00	0,00
2	46,4	0,74	0,00	0,00	0,93	0,93	0,00	1,59	0,00	0,00
3	46,7	0,00	1,74	0,00	4,93	4,93	4,70	0,00	0,00	0,00
4	45,3	1,05	0,00	0,00	1,92	1,92	3,08	0,00	0,00	0,00
5	45,1	0,00	4,51	0,00	0,00	0,00	2,04	0,27	0,00	0,00

Tabela 10: Contando o número de folgas iguais a zero.

Dividindo-se a quantidade de vezes que a atividade teve folga zero pelo tamanho da corrida da simulação encontramos a probabilidade de uma determinada atividade ser uma atividade crítica.

Atividade	Número de vezes que foi crítica	Probabilidade
A	1936	38,7%
B	3064	61,3%
C	5000	100,0%
D	2434	48,7%
E	2434	48,7%
F	538	10,8%
G	2028	40,6%
H	5000	100,0%
I	5000	100,0%

Tabela 11: Calculando a probabilidade de uma atividade estar no caminho crítico

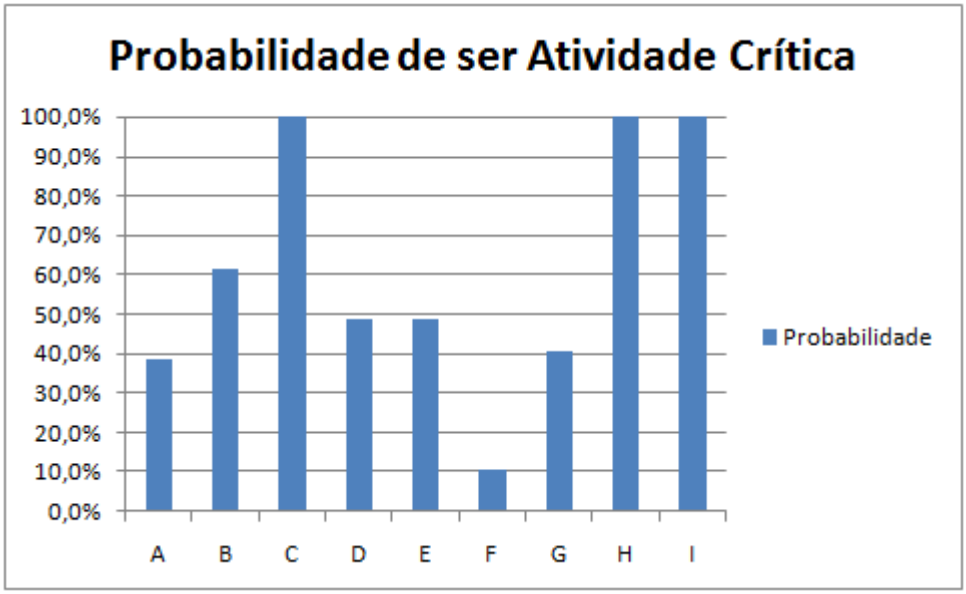

Figura 20: Probabilidade de uma atividade ser crítica

4.1.2 Limitações do PERT tradicional

Neste item analisaremos uma proposição do PERT, com relação à distribuição de saída, e para isso precisamos recorrer a conceitos relacionados com o Teorema do Limite Central (TLC), cujo enunciado sintetizamos a seguir:

Teorema do Limite Central (TLC)

Sejam X_1, X_2, ... , X_n variáveis aleatórias independentes com a mesma distribuição, que se admite ter variância finita, qualquer que seja a forma da distribuição destas variáveis, se o valor de *N* for suficientemente grande, a variável soma $S = \sum_{n=1}^{N} X_n$ segue aproximadamente uma distribuição Normal. Esta distribuição é inteiramente especificada através do valor esperado e da variância de *S*, que são dados por $\mu_S = N\mu_X$ e $\sigma_S^2 = N\sigma_X^2$, onde μ_X e σ_X^2, representam o valor esperado e a variância das variáveis X_n.

Fonte: GUIMARÃES e CABRAL, 1997.

O PERT faz uso do TLC ao assumir que a distribuição de saída de uma rede de atividades é dada por uma distribuição Normal, mas para aplicação desse teorema em uma rede de atividades deveríamos submeter-nos a duas restrições:

- Uma correspondente ao tamanho da rede que no caso deve possuir um número bastante elevado de atividades para que o teorema seja válido.
- E a outra com relação à forma das distribuições das atividades da rede, que precisam ser variáveis aleatórias independentes e identicamente distribuídas, ou seja, devem possuir mesmas estimativas de duração de atividade pessimista (a), mais provável (m) e pessimista (b).

Com relação à primeira restrição, isso implica que a rede deverá possuir não somente um grande número de atividades, mas sim um grande número de atividades na composição do caminho crítico, pois a duração do caminho crítico que definirá a duração total da rede, o que se torna um problema para aplicação do PERT em redes pequenas. Porém, a segunda restrição refere-se ao fato de que a duração todas as atividades que compuserem o caminho crítico precisam ser variáveis aleatórias identicamente distribuídas. Isso representa um grande problema, pois isso não é comum ao modelarmos um projeto, que é composto por diferentes atividades, cada qual com suas próprias características e por sua vez diferentes estimativas de duração.

Essas restrições tornam a aproximação utilizada pelo PERT de difícil aplicação, pois quando as restrições são quebradas, o que acontece facilmente quando tratamos de projetos reais, a distribuição do tempo de realização de um projeto não será a distribuição normal proposta pelo PERT.

4.1.3 Estudo sobre o comportamento da distribuição de saída

Ao realizar uma simulação a eventos discretos podemos descobrir com muita precisão a distribuição dos tempos que realmente descreve certa rede de atividades. Mas antes de iniciarmos a simulação do problema principal iremos realizar a simulação de alguns exemplos para melhor compreensão do que foi falado no tópico referente às limitações do Pert tradicional.

❖ Exemplo 1: Consiste em uma rede de atividades com formato em série, ou seja, só existe um caminho para realização da rede e esse caminho é o crítico. Aqui o número de atividades da rede será variado, assumindo os valores de referência para a distribuição PERT Beta, entre 15, 50 e 90 e as atividades serão identicamente distribuídas.

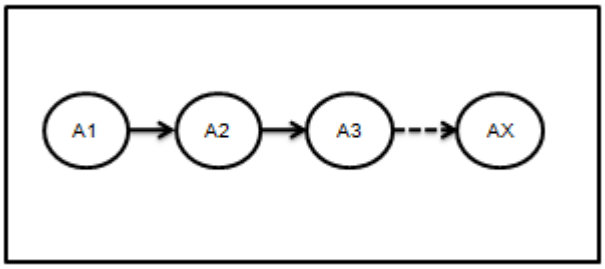

Figura 21: Rede de atividades do exemplo 1.

Atividade	Predecessores	*a*	*m*	*b*
A1	-	10	15	30
A2	A1	10	15	30
A3	A2	10	15	30
AX-1	AX-2	10	15	30
AX	AX-1	10	15	30

Tabela 12: Tabela de predecessores do exemplo 1.

a) Rede com 15 atividades (X= 15):

Resolvendo para o método PERT encontraremos que a distribuição de saída será uma distribuição normal com média 250 e desvio-padrão igual a 12,9. A figura abaixo mostra a sobreposição da distribuição encontrada pela simulação e pelo PERT.

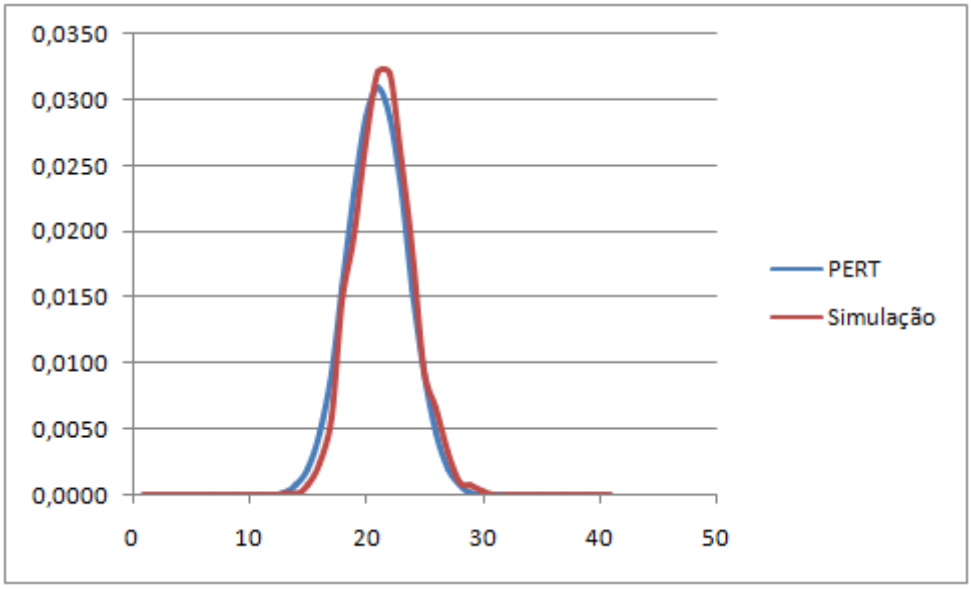

Figura 22: Comparação da função densidade de probabilidade exemplo 1a.

b) Rede com 50 atividades (X= 50):

Resolvendo o problema pelo método PERT, encontraremos que a distribuição de saída será uma distribuição normal com média 833 e desvio-padrão igual a 23,57. A figura abaixo mostra a sobreposição da distribuição encontrada pela simulação e pelo PERT.

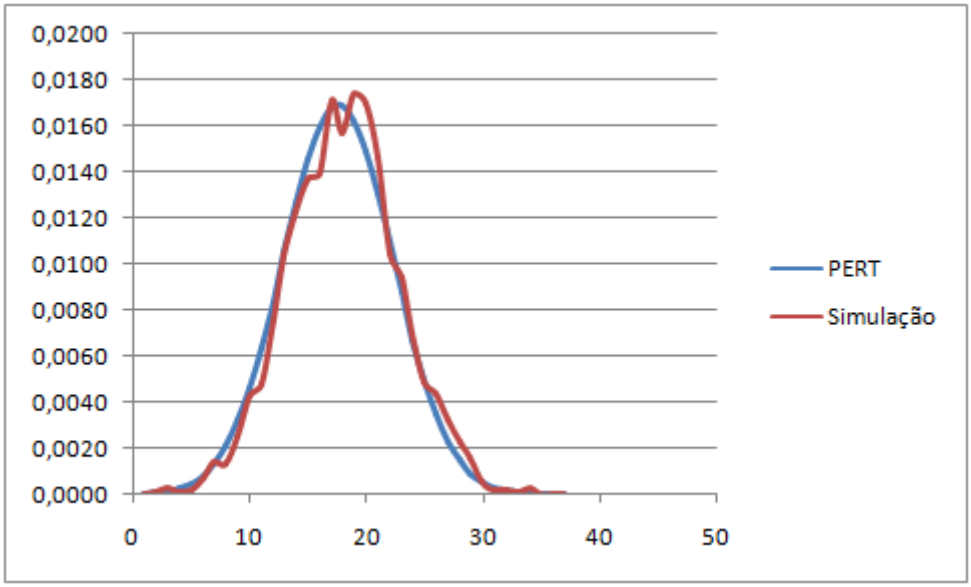

Figura 23: Comparação da função densidade de probabilidade exemplo 1b.

c) Rede com 90 atividades (X=90):

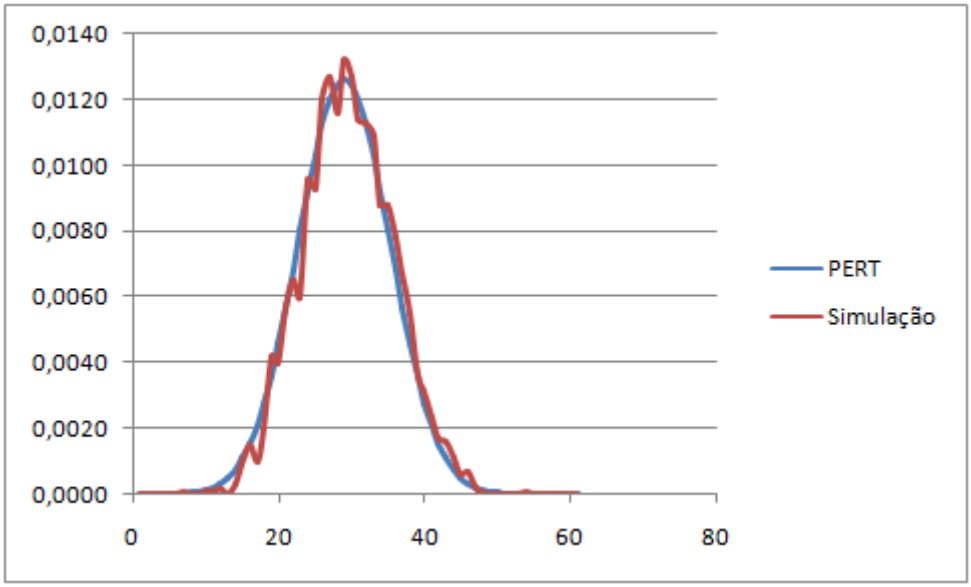

Figura 24: Comparação da função densidade de probabilidade exemplo 1c.

d) Rede com 15 atividades distintas

Agora se pegarmos essa mesma rede, mas com 15 atividades que não sejam identicamente distribuídas veremos uma grande diferença no resultado como indicam as figuras abaixo.

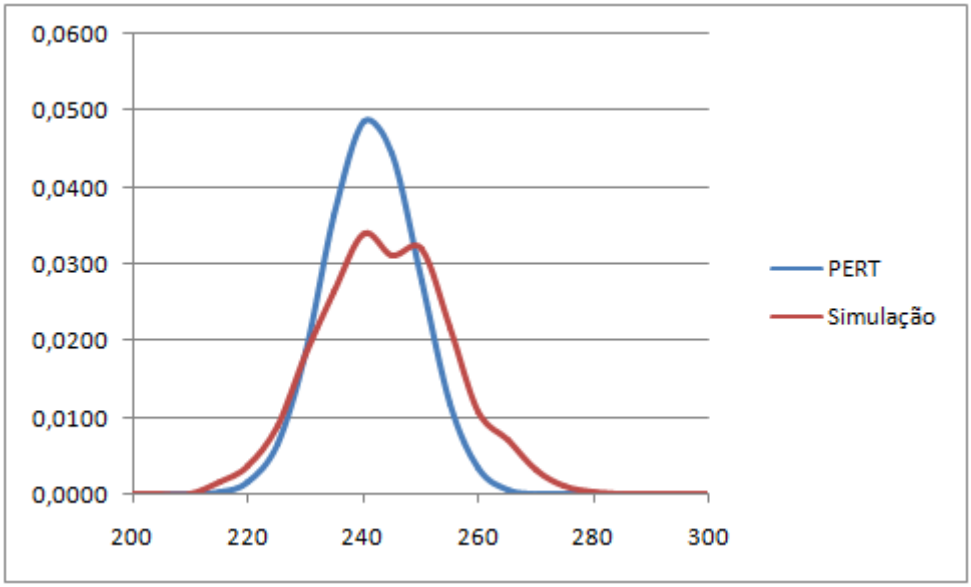

Figura 25: Comparação da função densidade de probabilidade exemplo 1d.

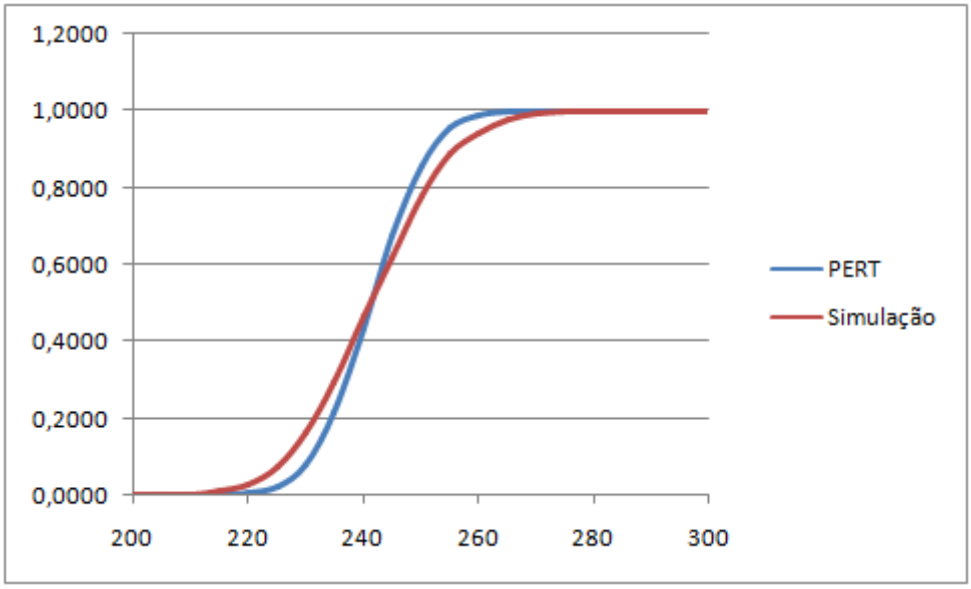

Figura 26: Comparação da função de probabilidade acumulada exemplo 1d.

A tabela abaixo mostra os valores utilizados nas estimativas de cada atividade:

Atividade	Predecessores	*a*	*m*	*b*
A1	-	10	15	30
A2	A1	12	14	18
A3	A2	8	11	27
A4	A3	5	10	15
A5	A4	15	18	26
A6	A5	9	14	27
A7	A6	11	17	28
A8	A7	7	15	30
A9	A8	11	13	26
A10	A9	13	15	24
A11	A10	14	18	27
A12	A11	15	19	35
A13	A12	7	14	31
A14	A13	8	13	32
A15	A14	9	16	30

Tabela 13: Estimativas utilizadas no exemplo 1d.

É facilmente perceptível pelos gráficos que houve uma aproximação entre a distribuição fornecida pelo PERT e a distribuição encontrada na simulação quando aumentamos o número de atividades identicamente distribuídas (itens a), b) e c)).

Já o caso d) onde as atividades não são identicamente distribuídas a distribuição de saída encontrada pela simulação é extremamente divergente da distribuição do PERT. A tabela a seguir mostra o teste de Kolmogorov-Smirnov realizado durante as simulações, onde podemos comparar o valor *D* com o valor $D_{crítico}$. O valor de $D_{crítico}$, para um nível de significância de 5%, é obtido utilizando a expressão $D_{crítico} = \frac{1,36}{\sqrt{n}}$, onde n é o tamanho da corrida. Como foi utilizado o mesmo tamanho de corrida para todos os casos, à saber n = 2000, o valor de $D_{crítico}$ encontrado foi o mesmo.

Nos casos em que *D* foi menor que $D_{crítico}$ então a distribuição PERT se mostrou muito boa em representar o conjunto de dados obtidos pela simulação e quando *D* foi maior que $D_{crítico}$ a distribuição não é aceitável para representar a distribuição em questão.

Teste de Kolmogorov-Smirnov		
Exemplo 1	*D crítico*	*D*
a)	0,030	0,022
b)	0,030	0,012
c)	0,030	0,010
d)	0,030	0,081

Tabela 14: Resultado do teste KS.

A tabela acima pode nos mostrar numericamente como ao aumentar o número de atividades identicamente distribuídas as distribuições do PERT e da simulação vão ficando cada vez mais próximas, pois o valor de *D* vai diminuindo cada vez mais. Já no caso d) onde temos atividades que não são identicamente distribuídas o valor de *D* foi muito superior indicando uma péssima aderência.

❖ Exemplo 2: Consiste em uma pequena rede de 15 atividades com formatos díspares (não idênticos)

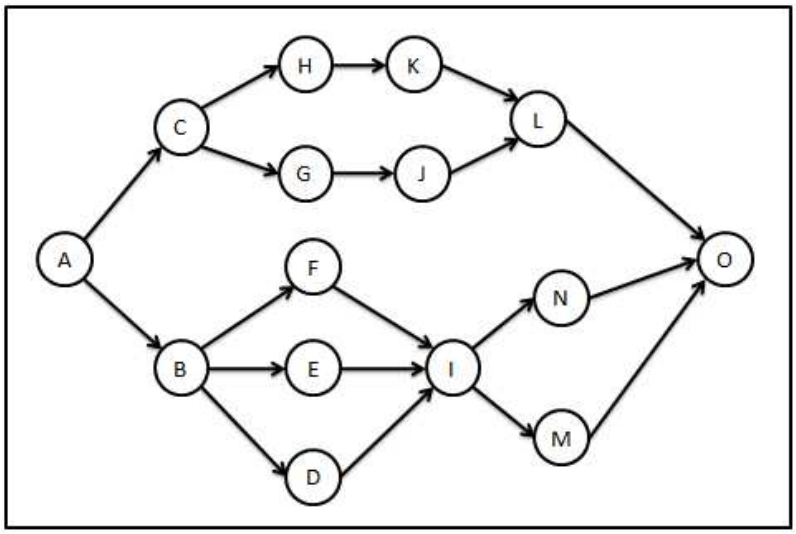

Figura 27: Rede do Exemplo 2.

Atividade	Predecessores	*a*	*m*	*b*
A	-	3	5	8
B	A	9	10	15
C	A	6	8	10
D	B	5	12	18
E	B	5	7	16
F	B	4	6,5	11
G	C	7	8	13
H	C	6	10	17
I	D , E , F	3,4	5	9
J	G	4	9	15
K	H	7,5	11	19
L	J , K	3	4	9
M	I	7	15	23
N	I	9	13	21
O	L , M , N	2	4	6

Tabela 15: Tabela de predecessores do exemplo 2.

Resolvendo a rede pelo método do PERT tradicional pode-se encontrar que o projeto terá uma duração média de 52,07 e o caminho crítico é composto pelas atividades A, B, D, I, M e O. A variância do caminho crítico pode então ser facilmente encontrada como mostra a tabela abaixo.

Atividade	Duração	Variância
A	5,17	0,69
B	10,67	1,00
D	11,83	4,69
I	5.40	0,87
M	15,00	5,00
O	4,00	1,33
Variância do Caminho Crítico		13,58

Tabela 16: Variância do caminho crítico.

Podemos encontrar o desvio padrão do caminho crítico ao extrair a raiz quadrada de 13,58 e assim determinar a distribuição normal que o PERT sugere para essa rede: N(μ;σ) = N(52,07 ; 3,68)

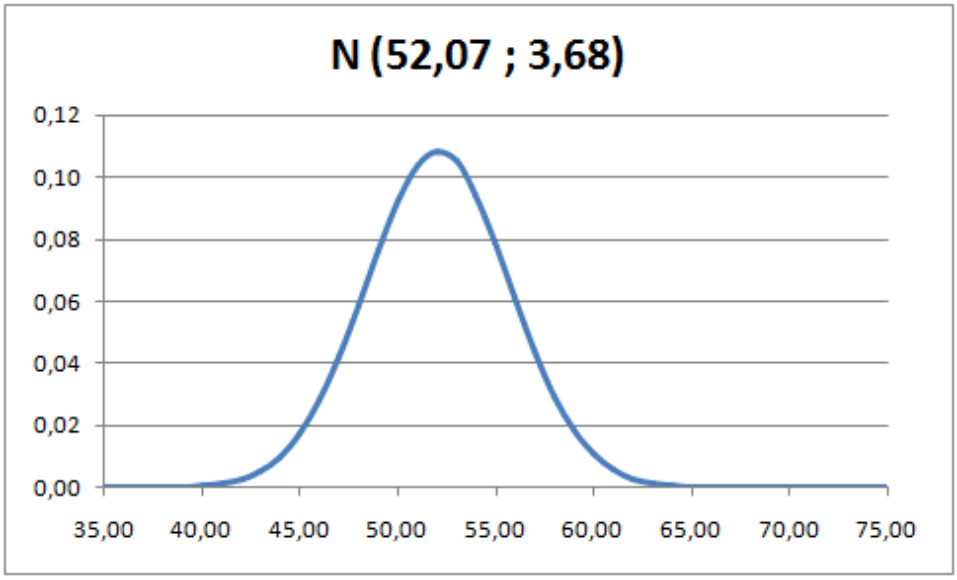

Figura 28: Distribuição sugerida pelo PERT para o exemplo 2.

Podemos encontrar o maior prazo para realização dessa rede utilizando no lugar da duração de cada atividade a estimativa pessimista (b) e para encontrar o menor prazo de realização utiliza-se a estimativa otimista (a) como duração de cada atividade:

- Maior duração da rede: 79,00
- Menor duração da rede: 31,40

Utilizando agora a simulação com tamanho de corrida de 2000 podemos construir a distribuição de saída desta rede como mostrado na figura abaixo:

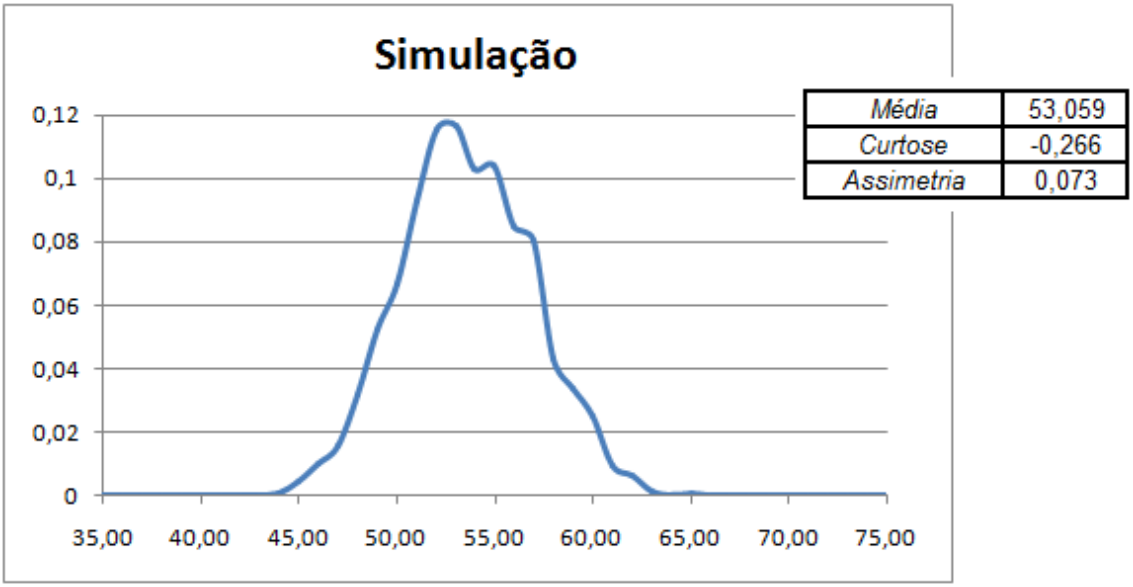

Figura 29: Distribuição obtida na simulação.

É bem perceptível nas imagens mostradas a seguir que existe uma defasagem com relação a distribuição de saída.

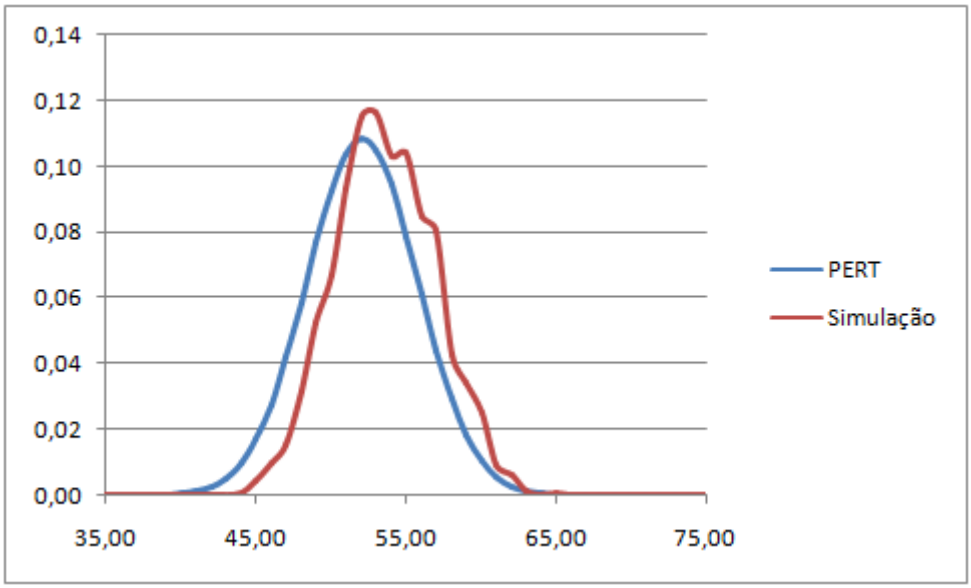

Figura 30: Exemplo 2 PERT x Simulação.

A tabela abaixo mostra, para algumas datas, a probabilidade de o projeto terminar em até determinada data segundo o PERT e a simulação.

Data	PERT	Simulação	|Erro|
44	1,42%	0,10%	1,32%
46	4,95%	1,55%	3,40%
48	13,44%	6,30%	7,14%
50	28,69%	18,25%	10,44%
52	49,24%	39,10%	10,14%
54	70,00%	61,05%	8,95%
56	85,72%	79,95%	5,77%
58	94,65%	92,30%	2,35%
60	98,44%	98,20%	0,24%
62	99,65%	99,80%	0,15%
64	99,94%	99,95%	0,01%

Tabela 17: Probabilidades PERT x Simulação

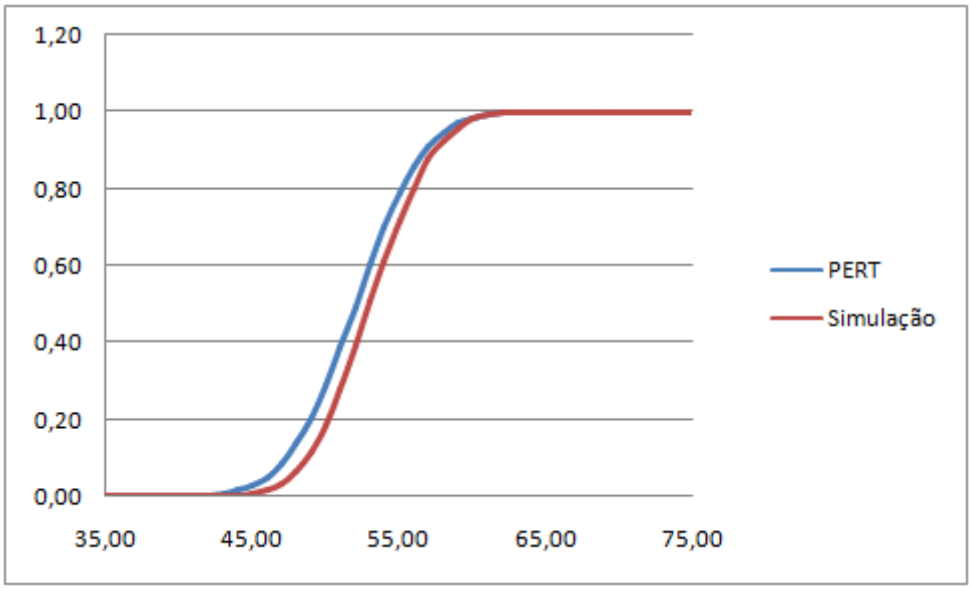

Figura 31: Comparação das curvas em S.

Ao realizar o Teste de Kolmogorov-Smirnov nesse exemplo foi encontrado o valor D = 0,110 que é muito maior que o $D_{crítico}$ = 0,030 o que nos mostra numericamente a defasagem entre as distribuições em questão.

Esse exemplo consegue mostrar bem como o PERT possui uma visão demasiadamente otimista da duração total do projeto, podendo induzir os gestores a cometerem erros no gerenciamento do tempo de um projeto.

Para finalizar esse exemplo faremos também um teste de aderência para verificar se alguma distribuição Beta conseguirá representar a distribuição do tempo de realização dessa rede de atividades.

Como a distribuição Beta possui quatro parâmetros (Alfa, Beta, A e B) encontramos o primeiro problema para realizar o teste de aderência, pois deveremos procurar na base da tentativa (e no histograma gerado pela simulação) os quatro parâmetros da distribuição Beta que melhor se ajuste aos dados em questão visto que não existe uma forma analítica para descobrir esses quatro parâmetros com base nos dados de entrada do problema.

Sendo assim a “melhor” distribuição Beta encontrada para representar os dados em questão possui os seguintes parâmetros:

- Alfa = 3,3
- Beta = 3,9
- A = 43
- B = 65

As figuras abaixo mostram o resultado obtido na comparação da distribuição Beta sugerida com a distribuição obtida na simulação.

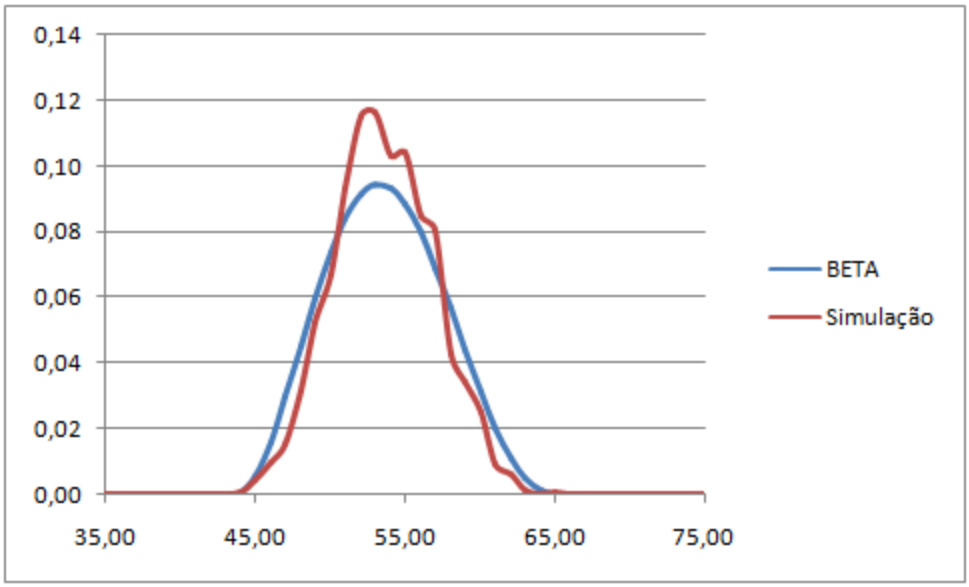

Figura 32: Exemplo 2 Beta x Simulação

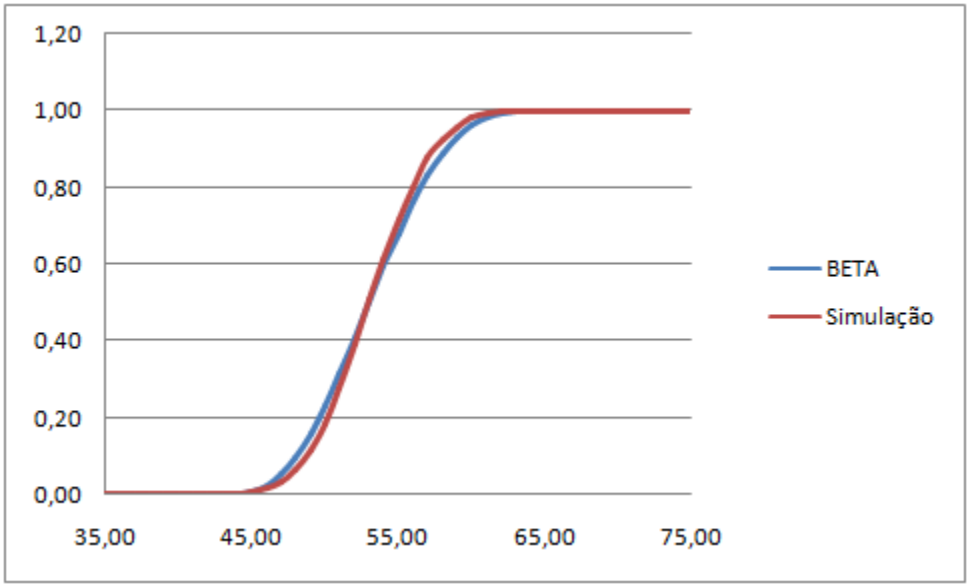

Figura 33: Comparação das curvas em S Beta x Simulação

O valor obtido de D para o teste de Kolmogorov-Smirnov no caso da distribuição Beta foi de 0,049 o que é bem próximo ao valor de $D_{crítico}$ = 0,030 mostrando uma melhor aderência em relação a distribuição Normal sugerida pelo PERT que apresentou um valor de D = 0,110. A figura a seguir mostra a sobreposição das três distribuições.

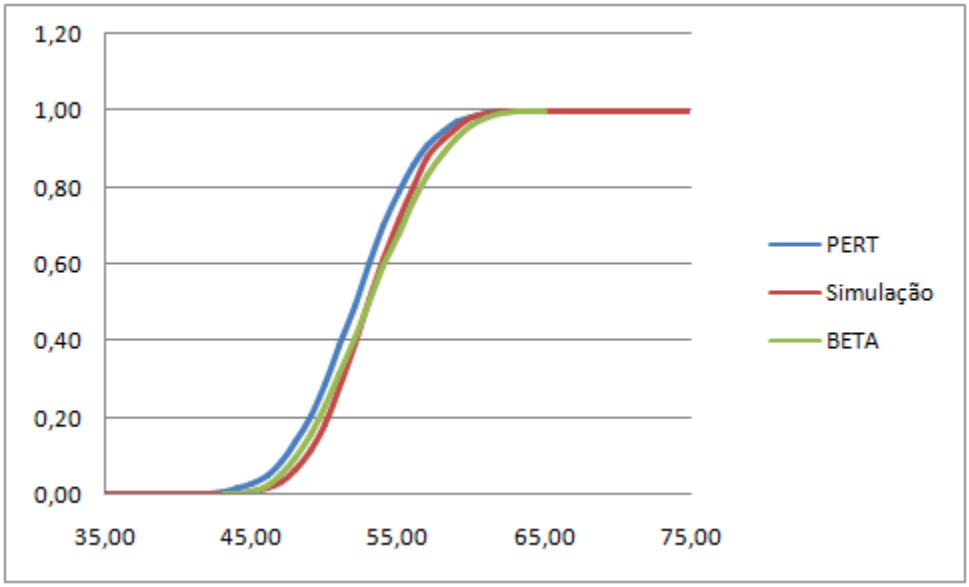

Figura 34: Comparação das curvas em S PERT x Beta x Simulação

Uma vez terminada a simulação desses exemplos introdutórios iniciaremos o estudo do problema “Execução de Lajes” onde será mostrado as principais etapas do desenvolvimento da ferramenta como também a realização de uma análise de sensibilidade onde estaremos analisando alguns cenários diferentes.

4.2 Descrição do Problema

Azevedo (2010) ao concluir seu trabalho sugere como possíveis trabalhos futuros a aplicação da simulação como uma ferramenta para análise do comportamento de atividades, verificando sua extensão a atividades simultâneas, assim como um maior número de atividades, verificando a extensão ou potencialidade desta ferramenta. Deste modo seria possível analisar o processo construtivo sob uma ótica menos pontual e verificar se este modelo é melhor aplicado a pequenos grupos de atividades, ou se encaixa de modo a analisar o processo construtivo de forma global.

Portanto neste item pretende-se mostrar como a ferramenta para gerenciamento do fluxo de tempo de atividades foi desenvolvida através da aplicação da mesma no caso "Execução de Lajes" estudado por Azevedo (2010) e Oliveira (2007). É importante ressaltar que o trabalho realizado por Azevedo (2010) é um desdobramento do trabalho de Oliveira (2007).

Serão utilizadas neste trabalho algumas premissas, que foram utilizadas tanto por Oliveira (2007) como por Azevedo (2010):

- A edificação é predial e comercial;
- A estrutura da edificação é metálica;
- A área da plataforma de trabalho possui 1000 m²;
- O gabarito é de 140 m ou 40 pavimentos, sendo 36 pavimentos tipo;
- Não será utilizado escoramento para execução das lajes.

Consideramos também que a montagem da estrutura metálica (pilares e vigas) será executada na frente das lajes com tantos andares de vantagem quantos sejam necessários a garantir o perfeito fluxo da tarefa concretagem das lajes. Isto é só haverá atraso nessa tarefa a partir de alguma descontinuidade dentro da própria. (Oliveira, 2007)

Figura 35: Foto do esqueleto metálico do Ed. Alfacon, São Paulo. Fonte: Oliveira (2007)

Oliveira (2007) identifica, através de um Mapeamento do Fluxo de Valor, as principais atividades que compõem o processo de concretagem de lajes:

- Montagem do *Steel Deck* - Atividade A
- Cortes e fechamento das laterais do *Steel Deck* - Atividade B
- Soldagem do *Steel Deck* - Atividade C
- Montagem da Armação - Atividade D
- Colocação dos espaçadores - Atividade E
- Fixação da Armação - Atividade F
- Montagem da tubulação - Atividade G
- Concretagem e transferência da tubulação do concreto - Atividade H

A seguir podemos ver uma tabela que indica a duração de cada atividade e suas interdependências, como também uma figura ilustrando a rede de atividades.

Código	Atividade	Predecessora	Tempo (h)
A	Montagem do Steel Deck	-	8
B	Execução dos cortes e fechamentos	A	5
C	Execução dos pontos de solda	A	8
D	Montagem da armação	A ; B ; C	8
E	Colocação dos espaçadores	D	5
F	Fixação da armação (ponteamento)	D	8
G	Montagem da tubulação do concreto	D ; E ; F	1
H	Concretagem (+ transferência da tubulação do concreto	G	6,34

Tabela 18: Atividades, atividades precedentes e duração estimada. Fonte: Oliveira (2007)

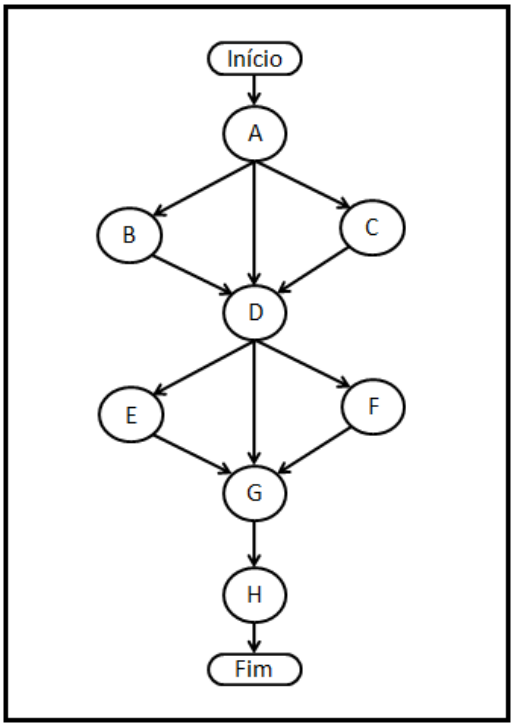

Figura 36: Rede Pert . Fonte: adaptado de Olveira (2007)

Azevedo (2010) por sua vez condensa essas atividades da seguinte forma:

- Corte e montagem do *steel deck* = ***Steel Deck - Atividade A1***
- Corte e montagem de telas soldadas = ***Armação - Atividade A2***
- Concretagem das lajes = ***Concretagem - Atividade A3***

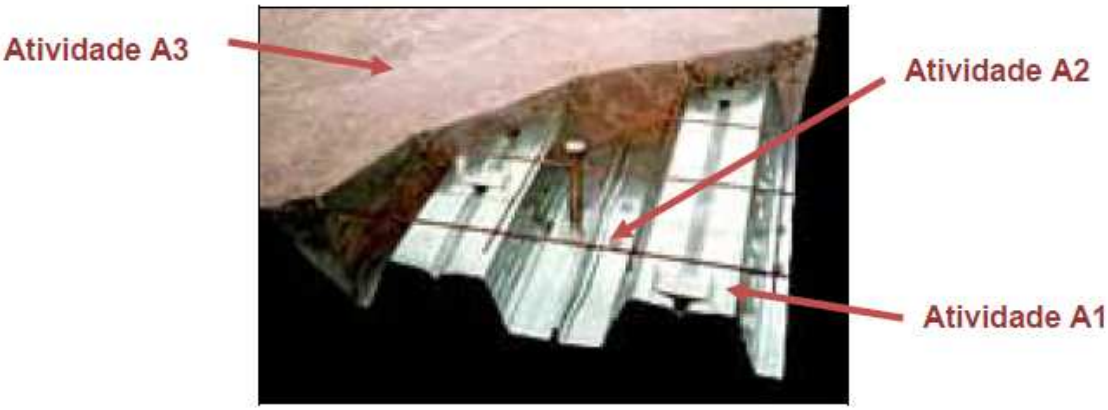

Figura 37: Corte transversal da estrutura utilizada na montagem do *steel deck*. Fonte: Azevedo (2010)

Azevedo (2010) relacionou o comportamento do tempo de execução de cada atividade por pavimento com o tempo de ciclo ideal pré-determinado. Com a construção de uma planilha eletrônica pode-se caracterizar a influência de uma atividade inicial sobre a atividade posterior, visualizando assim a ocorrência de desperdícios, utilizando uma definição do desperdício de tempo caracterizado por Atrasos e Esperas.

O trabalho de Azevedo (2010) teve foco na análise das atividades envolvidas no processo de concretagem das lajes de 36 pavimentos tipo de uma construção predial e comercial que utiliza estrutura metálica, Utilizando um turno de 8 (oito) horas para as atividades *Steel Deck,* Armação e, inclusive, a Concretagem.

Figura 38: Estrutura proposta por Azevedo (2010)

4.3 Geração do modelo estático

Para gerar o modelo estático utilizaremos uma visão sistêmica das atividades semelhante a utilizada por Azevedo (2010), conforme indicado abaixo:

- As atividades A, B e C irão compor a macro atividade ***Steel Deck* (SD)**;
- As atividades D, E e F irão compor a macro atividade **Armação (AR)**;
- As atividades G e H compõem a macro atividade **Concretagem (CC)**.

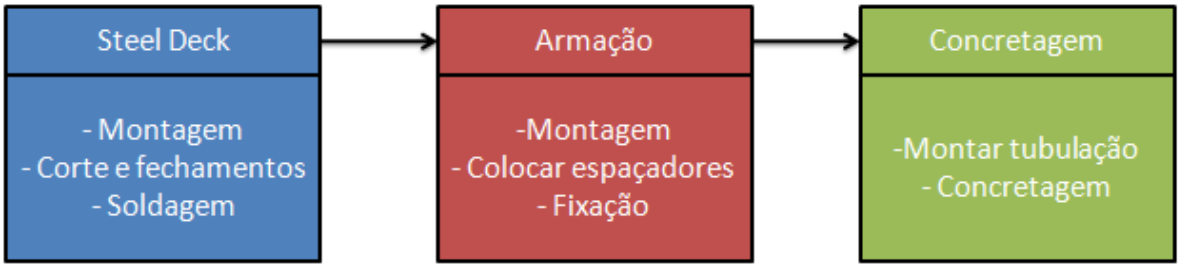

Figura 39: Visão sistêmica dos macro processos.

Dadas as informações que temos até o presente momento podemos então modelar a "macro rede", composta por macro atividades, que define o problema como mostrado na tabela abaixo.

Pavimento	Código	Macro atividade	Predecessora
1	SD1	*Steel Deck*	-
	AR1	*Armação*	SD1
	CC1	*Concretagem*	AR1
2	SD2	*Steel Deck*	SD1
	AR2	*Armação*	SD2 ; AR1
	CC2	*Concretagem*	AR2 ; CC1
3	SD3	*Steel Deck*	SD2
	AR3	*Armação*	SD3 ; AR2
	CC3	*Concretagem*	AR3 ; CC2
X	SDX	*Steel Deck*	SD(X-1)
	ARX	*Armação*	AR(X-1) ; SDX
	CCX	*Concretagem*	CC(X-1) ; ARX

Tabela 19: Lista de precedência das macro atividades.

Com base na tabela acima e excluindo o primeiro pavimento podemos perceber que:

- a atividade *Steel Deck* de um determinado pavimento X só começará quando a atividade *Steel Deck* do pavimento X-1 terminar;
- a Armação de um pavimento X só começará quando a atividade *Steel Deck* do pavimento X e a Armação do pavimento X-1 terminarem;
- a Concretagem de um pavimento X só começará quando a Armação do pavimento X e a Concretagem do pavimento X-1 terminarem.

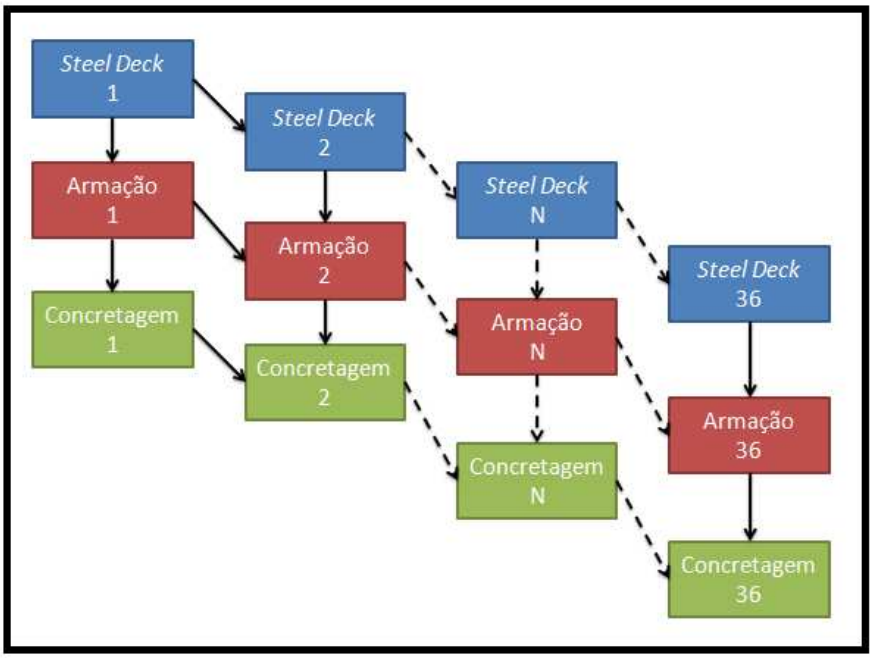

Figura 40: Modelagem da rede PERT baseada nas macro atividades.

Pavimento	Código	Atividade	Predecessores
1	SDM1	Montagem do SD	-
	SDC1	Corte e fechamentos	SDM1
	SDS1	Soldagem	SDM1
	ARM1	Montagem da AR	SDM1 ; SDC1 ; SDS1
	ARC1	Colocar espaçadores	ARM1
	ARF1	Fixar Armação	ARM1
	CCM1	Montagem da tubulação	ARM1; ARC1 ; ARF1
	CCC1	Concretagem	CCM1
2	SDM2	Montagem do SD	SDM1 ; SDC1 ; SDS1
	SDC2	Corte e fechamentos	SDM2
	SDS2	Soldagem	SDM2
	ARM2	Montagem da AR	ARM1 ; ARC1 ; ARF1 ; SDM2 ; SDC2 ; SDS2
	ARC2	Colocar espaçadores	ARM2
	ARF2	Fixar Armação	ARM2
	CCM2	Montagem da tubulação	CCC1 ; ARM2; ARC2 ; ARF2
	CCC2	Concretagem	CCM2
X	SDMX	Montagem do SD	SDM(X-1) ; SDC(X-1) ; SDS(X-1)
	SDCX	Corte e fechamentos	SDMX
	SDSX	Soldagem	SDMX
	ARMX	Montagem da AR	ARM(X-1) ; ARC(X-1) ; ARF(X-1) ; SDMX ; SDCX ; SDSX
	ARCX	Colocar espaçadores	ARMX
	ARFX	Fixar Armação	ARMX
	CCMX	Montagem da tubulação	CCC(X-1) ; ARMX; ARCX ; ARFX
	CCCX	Concretagem	CCMX

Tabela 20: Inter-relações das atividades.

De posse de todos os dados que possuímos podemos construir uma tabela que associa cada atividade com sua respectiva atividade predecessora, como também a rede PERT do problema, seguindo o estilo de modelagem europeu, onde cada nó representa uma atividade.

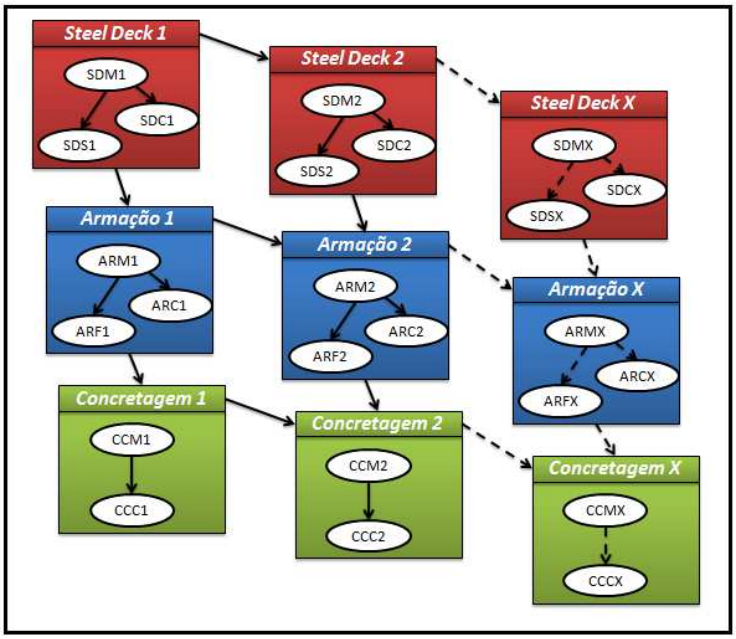

Figura 41: Visão sistêmica do problema (rede explodida) .

Cada pavimento possui 8 atividades (3 do *Steel Deck*, 3 da Armação e 2 da Concretagem) e como possuímos 36 pavimentos tipo logo a rede terá o total de 288 atividades.

A figura abaixo mostra como pode ser inserido os dados de entrada da rede na ferramenta. Para as atividades que iniciam a rede deve ser atribuído o predecessor 1 e as atividades que finalizam a rede devem ser colocadas em uma célula apropriada.

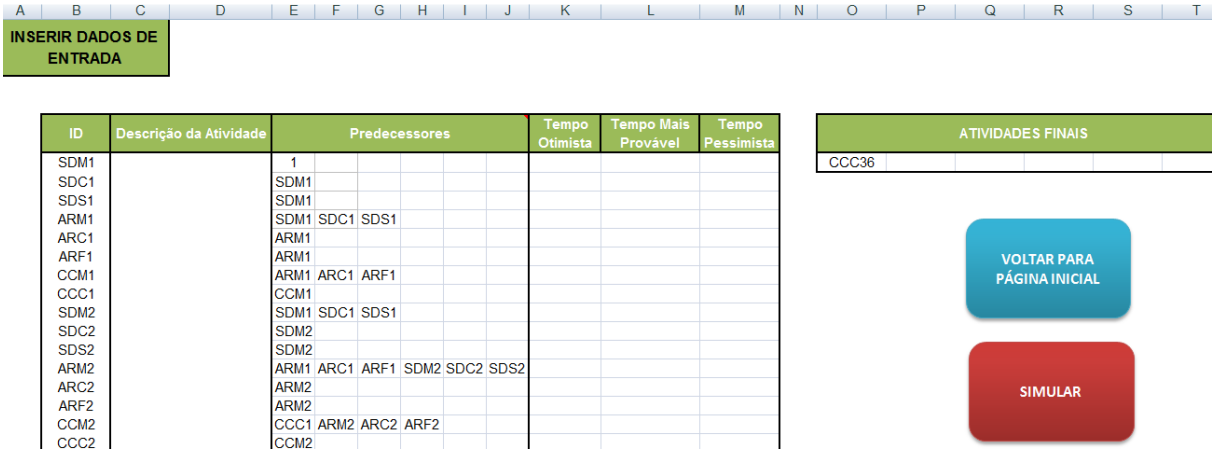

Figura 42: Modelando a rede na ferramenta

Uma vez de posse do modelo estático é necessário inserir a aleatoriedade no modelo como veremos no próximo item.

4.4 Geração do modelo dinâmico

O primeiro passo para a geração do modelo dinâmico consiste na introdução da aleatoriedade no modelo estático, através de uma distribuição de entrada, fazendo com que seja possível a realização da simulação. Em seguida veremos com mais detalhes alguns passos importantes para a execução do modelo como, por exemplo, sua parametrização e inclusive a simulação propriamente dita.

4.4.1 Identificação da distribuição de entrada

Oliveira (2007) empregou em seu estudo conceitos estabelecidos pela metodologia PERT/CPM avalia o tempo de ciclo das atividades da seguinte forma:

- **Estimativa Otimista (a)**: estimativa de tempo mínimo que uma atividade pode tomar, obtida suponde-se condições totalmente favoráveis na execução da atividade.
- **Estimativa Mais Provável (m):** estimativa de tempo normal que uma atividade deve tomar, onde o resultado ocorreria mais frequentemente se a atividade fosse repetida um grande número de vezes.
- **Estimativa Pessimista (b)**: estimativa de tempo máximo que uma atividade pode durar, ocorrendo apenas em condições totalmente adversas. As possibilidades de eventos drásticos e catastróficas não são consideradas, a menos que eles sejam claramente associados ao projeto.

Baseada nesses conceitos Azevedo (2010) considera que o tempo de ciclo ideal (8h) é o que mais se aproxima da descrição do termo estimativa mais provável. Estabelecido a estimativa mais provável fez-se necessário estabelecer os limites mínimo e máximo ao qual está sujeita a produtividade das atividades, uma vez que o tempo de realização de uma atividade não pode ser tão pequeno que tenda a ser nulo, ou tão grande que caracterize uma parada na obra.

O limite mínimo representa a ocorrência contínua da produtividade mais elevada, que é o caso onde a equipe de trabalho está superdimensionada, ou seja, há membros em excesso na equipe de trabalho, fazendo com que a atividade termine mais rapidamente. Já o limite máximo representa a ocorrência contínua da produtividade mais baixa, que é o caso onde a equipe de trabalho está sub-dimensionada.

Azevedo (2010) ainda ressalta que o primeiro caso caracteriza o desperdício através de custo de desnecessário e mão de obra superdimensionada, o que impacta diretamente no custo final da obra. Já o segundo caso faz com que haja atraso na conclusão da atividade, impactando na duração final do projeto.

Para os limites inferior e superior Azevedo (2010) utilizou os seguintes critérios e justificativas:

- **Estimativa Otimista -** Redução de 25% no tempo mais provável. É aceitável que o tempo de ciclo ideal possa se apresentar mais baixo em determinadas situações em que a produtividade aumenta. No entanto, a recorrência frequente desta produtividade mais baixa indica que a equipe de frente de trabalho foi, por algum equívoco, superdimensionada. Tempos inferiores ao estabelecido como tempo mínimo não são aceitáveis, pois não são dados factíveis. Ocorrências dessas espécies são caracterizadas como falhas de planejamento.
- **Estimativa Pessimista -** Aumento de 100% no tempo mais provável. É aceitável que o tempo possa se apresentar mais alto em determinadas situações em que a produtividade diminui. No entanto, a recorrência frequente desta produtividade mais alta indica que a equipe de frente de trabalho foi, por algum equívoco, sub-dimensionada. Tempos superiores ao estabelecido como tempo máximo não são aceitáveis, pois indicam que a atividade está paralisada. Ocorrências dessas espécies são caracterizadas como falhas de planejamento.

Atividade	Estimativa Otimista (a)	Estimativa Mais Provável (m)	Estimativa Pessimista (b)
Steel Deck	6	8	16
Armação	6	8	16
Concretagem	6	8	16

Tabela 21: Estimativas utilizadas por Azevedo (2010)

Azevedo (2010) utilizou como distribuição de entrada uma função qui-quadrado com grau de liberdade *k* igual a 3. A autora comenta que esse parâmetro foi escolhido, pois se percebeu uma concentração mais equilibrada de valores nas proximidades do tempo de ciclo (8h).

Porém podemos perceber como mostrado na figura abaixo que a distribuição qui-quadrado não possui um limite superior e, além disso, o valor do parâmetro *k* não foi encontrado analiticamente através dos parâmetros a, m e b. Esses fatos fortalecem a idéia da adoção de uma distribuição de entrada diferente da distribuição qui-quadrado como mostraremos no item a seguir.

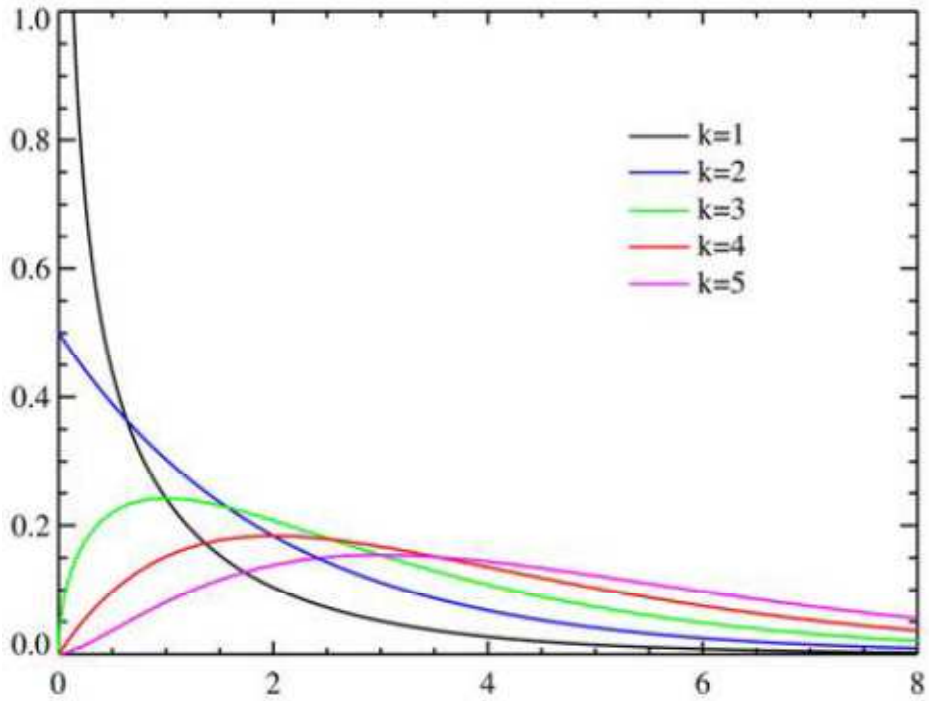

Figura 43: Distribuição qui-quadrado. Fonte: Azevedo (2010)

4.4.1.1 Utilização da distribuição Pert Beta

A estimativa de tempo é fundamental para a tomada de decisões no gerenciamento de projetos. Sem uma idéia de quanto durará cada parte de um projeto e de quantos recursos ela vai precisar é impossível definir o que deveria estar acontecendo em qualquer momento durante a execução do projeto. As estimativas não podem nunca ser perfeitas, mas elas devem ser feitas tendo alguma ideia de acuidade. Quanto mais esforço é dedicado a fazer a estimativa, melhor ela será. (SLACK *et al,* 1999)

Existem várias distribuições de probabilidade que podem ser utilizadas para estimar a duração das atividades de um projeto: Uniforme, Triangular, Beta, Normal, qui-quadrado etc. Porém, muitas dessas distribuições não se encaixam nas características desejadas, recomendadas pelos principais autores da literatura especializada:

- A f.d.p. dos tempos das atividades deveria ser representada por uma curva contínua;

- A f.d.p. dos tempos das atividades deveria possuir uma única moda;

- Os dois pontos de interseção da f.d.p dos tempos das atividades com o eixo das abscissas deveriam ambos ter valores positivos, pois não teria sentido assumir valores negativos de duração de atividade.

- A f.d.p. dos tempos das atividades deve ser assimétrica em relação ao ponto médio, pois as probabilidades de atraso e de adiantamento costumam ser distinto em atividades reais de projeto. Além disso, as distribuições não deveriam assumir valores infinitos à direita e à esquerda, possuindo limites superiores e inferiores.

Como mencionado no capítulo 2, a distribuição *beta* é a distribuição uma distribuição simples que consegue atender todos esses requisitos e que consegue modelar com uma boa precisão o comportamento de atividades de um projeto. Portanto será utilizada em nossas simulações. E dentro das várias formas possíveis de utilizar a distribuição Beta, optou-se por um tipo específico denominado *PERT Beta* proposta por Davis (2008).

4.4.2 Parametrização do modelo de simulação

A primeira etapa deste tópico consiste na determinação dos limites inferiores e superiores de duração de cada atividade, e para isso utilizaremos o mesmo critério adotado por Azevedo (2010), onde *m* representa a estimativa mais provável:

- Estimativa Otimista (a): $a = 0,75 \times m$
- Estimativa Pessimista (b): $b = 2 \times m$

Fazendo uso desses critérios e dos tempos mais prováveis indicados por Oliveira (2007) podemos construir a tabela abaixo.

Macro atividade	*Atividade*	Estimativa Otimista (horas)	Estimativa Mais Provável (horas)	Estimativa Pessimista (horas)
Steel Deck	Montagem	6	8	16
	Corte e fechamentos	3,75	5	10
	Soldagem	6	8	16
Armação	Montagem	6	8	16
	Colocar espaçadores	3,75	5	10
	Fixar armação	6	8	16
Concretagem	Montagem da tubulação	0,75	1	2
	Concretagem	4,755	6,34	12,68

Tabela 22: Estimativas utilizadas no estudo de caso

ID	Descrição da Atividade	Predecessores						Tempo Otimista	Tempo Mais Provável	Tempo Pessimista
SDM1		1						7	8	12
SDC1		SDM1						3	5	10
SDS1		SDM1						5	8	12
ARM1		SDM1	SDC1	SDS1				7	8	12
ARC1		ARM1						3	5	10
ARF1		ARM1						5	8	12
CCM1		ARM1	ARC1	ARF1				0,5	1	2
CCC1		CCM1						5	6,34	12
SDM2		SDM1	SDC1	SDS1				7	8	12
SDC2		SDM2						3	5	10
SDS2		SDM2						5	8	12
ARM2		ARM1	ARC1	ARF1	SDM2	SDC2	SDS2	7	8	12
ARC2		ARM2						3	5	10
ARF2		ARM2						5	8	12
CCM2		CCC1	ARM2	ARC2	ARF2			0,5	1	2
CCC2		CCM2						5	6,34	12
SDM3		SDM2	SDC2	SDS2				7	8	12
SDC3		SDM3						3	5	10

Início | Inserir Dados | Resultados | Simulador | Dados da Simulação | Calculos

Figura 44: Inserindo os parâmetros das atividades na ferramenta

Como mencionado anteriormente utilizaremos a distribuição PERT Beta como distribuição padrão a ser utilizada na ferramenta para todas as atividades, mas nada impede, caso seja adequada, a substituição dessa distribuição de probabilidade por alguma outra que represente com maior fidelidade o comportamento de certa atividade.

Outra etapa a ser definida está relacionada à corrida na simulação, onde utilizaremos durante as simulações corridas de tamanho igual a 500, pois mostraram ser bem mais velozes que corridas com tamanhos maiores e ainda mantiveram as características mais importantes a serem mostradas.

Se analisarmos somente a parte relativa à simulação das folgas, mostrada anteriormente, veremos que o tamanho da matriz gerada para a construção da tabela de dados possui número de linhas igual ao tamanho da corrida e número de colunas igual ao número de atividades da rede. Portanto para nossa rede que contém 288 atividades e utilizando um tamanho de corrida de 500 estaremos gerando nessa parte específica uma matriz com 144000 dados. Se aumentássemos para um tamanho de corrida maior, como por exemplo, 3000 teríamos uma matriz de 864000 dados. Esse fato nos leva a um *trade-off* onde o aumento no tamanho da corrida acarreta normalmente em uma melhora na precisão dos resultados, mas em compensação pode trazer um alto consumo dos recursos computacionais fazendo com que a simulação fique mais lenta.

A rede de atividades que estamos analisando possui uma particularidade que devemos levar em consideração também em nossa análise: as atividades irão se repetir em cada pavimento. Portanto para as análises das atividades críticas que virão a seguir é mais interessante olharmos como a probabilidade de uma atividade ser crítica muda ao longo dos pavimentos do que analisar essa probabilidade individualmente como foi realizado no tópico 4.3.2. Com isso podemos ter uma visão de como as atividades irão compor o caminho crítico ao longo de todos os pavimentos.

4.4.3 Execução do modelo de simulação

De posse de todas as informações que temos até o momento podemos finalmente realizar a simulação do problema “Execução de Lajes”.

A seguir veremos a figura que contem o histograma relativo a distribuição dos tempos de término da rede de atividades.

A função *f(t)* representa a função densidade de probabilidade e *F(t)* representa a distribuição acumulada e possui formato semelhante ao um "S". Podemos perceber que o coeficiente de curtose é bastante alto indicando uma distribuição leptocúrtica, como também um elevado grau de assimetria indicando que essa distribuição não pode ser descrita por uma distribuição normal. Os valores obtidos para a curtose e a assimetria foram obtidos utilizando as funções do *Excel* “=CURT()” e “=DISTORÇÃO()”, respectivamente.

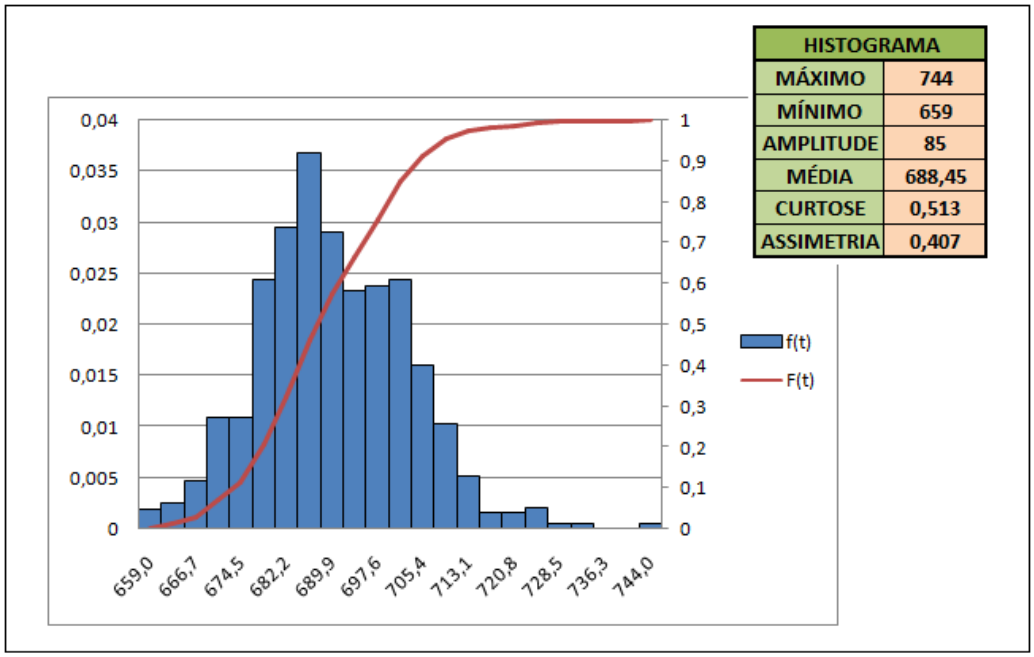

Figura 45: Histograma da data de término do projeto.

Na figura abaixo temos mais um *output* da simulação que corresponde a um resumo contendo algumas datas e a probabilidade de conclusão da rede em até essas referidas datas. Ressalta-se que é possível na ferramenta calcular a probabilidade do término do projeto para qualquer data que o usuário desejar.

DATA	PROBABILIDADE DE TÉRMINO DO PROJETO
680	26,00%
685	44,60%
689	54,20%
693	64,20%
697	74,80%
702	86,20%
710	96,40%
719	98,40%
727	99,60%
736	99,80%

Figura 46: Probabilidade de o projeto terminar até determinadas datas de execução em horas.

A seguir são apresentados três gráficos que mostram como varia a probabilidade de cada tipo de atividade ao longo dos 36 pavimentos. O primeiro indica como varia a probabilidade das atividades que compõem a macro-atividade *Steel Deck* , o segundo, em relação as atividades que compõem a macro-atividade Armação e o terceiro com relação a marco-atividade Concretagem.

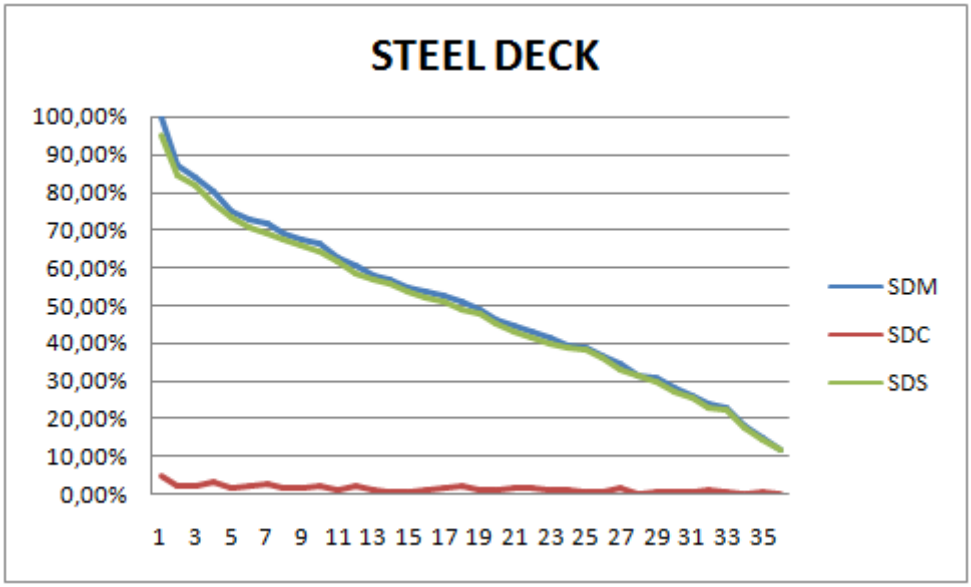

Figura 47: Probabilidade das atividades que compõem o Steel Deck serem críticas em função do pavimento executado.

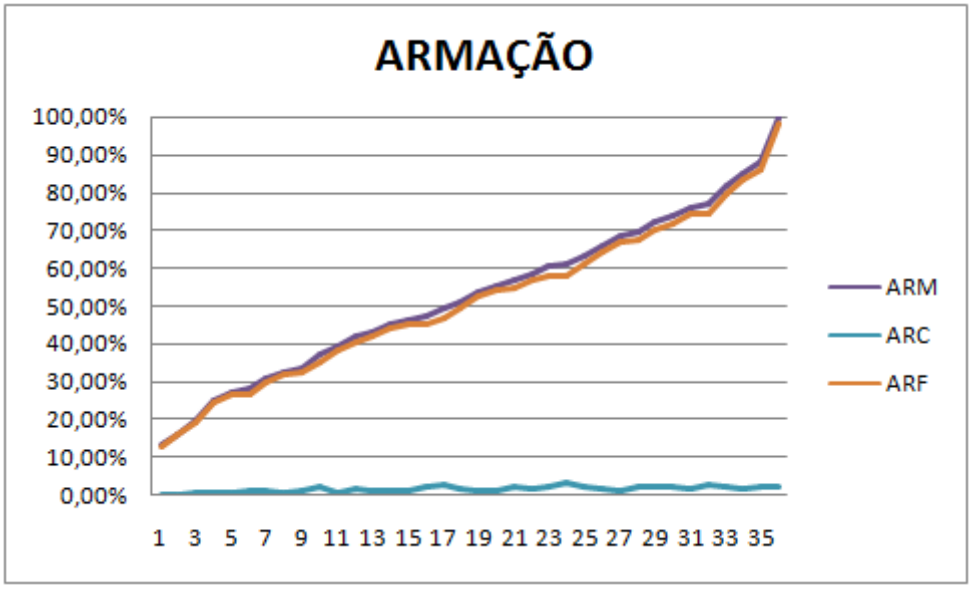

Figura 48: Probabilidade das atividades que compõem a Armação serem críticas em função do pavimento executado.

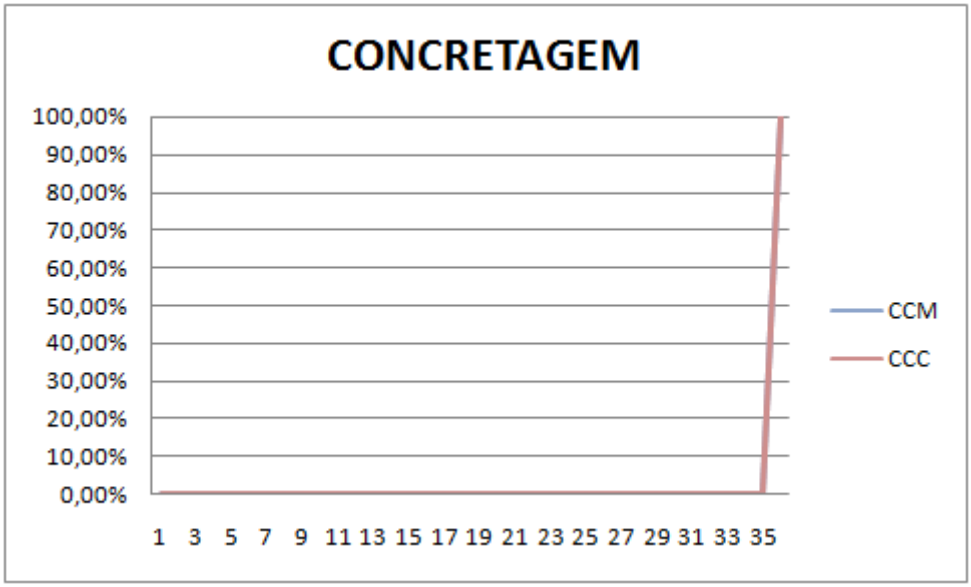

Figura 49: Probabilidade das atividades que compõem a Concretagem serem críticas em função do pavimento executado.

Podemos notar que as atividades SDM e SDS, relativas ao *Steel Deck,* possuem grande chance de fazer parte do caminho crítico durante os primeiros pavimentos e a medida que olhamos os pavimentos superiores essas duas atividades começam a ceder suas posições como críticas para as atividades ARM e ARF, relativas a Armação. Por sua vez as atividades CCM e CCC apresentam idênticas probabilidades de serem parte do caminho crítico e somente fazem parte do caminho crítico durante o último pavimento.

Uma primeira análise a partir dessas informações seria que o gestor do projeto poderia focar seus esforços em diminuir o tempo médio de realização (e sua variabilidade) da atividade *Steel Deck* durante os primeiros 18 pavimentos e nos últimos 18 pavimentos focar seus esforços na atividade Armação. Como a atividade Concretagem só se apresentou como crítica durante o último pavimento pode-se pensar na hipótese de realocar alguns recursos dessa atividade para as outras duas. Esse balanceamento das três macro-atividades pode permitir um melhor fluxo do processo construtivo e para testar essa opção, como também outras faremos uma análise de sensibilidade onde simularemos diversos cenários.

4.4.4 Análise de Sensibilidade

➢ Cenário 1:

Neste cenário veremos o impacto que existe ao aumentarmos o tempo mais provável de duração de cada atividade em 10% da seguinte forma:

- Estimativa Otimista (a): mantida a mesma da situação inicial;
- Estimativa Mais Provável (m): aumento de 10%
- Estimativa Pessimista (b): será igual a duas vezes o valor da estimativa mais provável

No item a) mostraremos os resultados dessas modificações nas atividades que compõem a macro-atividade SD sem modificar os parâmetros das outras macro-atividades . No item b) veremos os resultados dessas modificações nas atividades que compõem a marco-atividade AR sem modificar os parâmetros das outras macro-atividades e por último no item c) repetiremos esse procedimento para a macro-atividade CC.

a) Modificações nas atividades referentes ao *Steel Deck*:

ID	Descrição da Atividade	Predecessores						Tempo Otimista	Tempo Mais Provável	Tempo Pessimista
SDM1		1						6	8,8	17,6
SDC1		SDM1						3,75	5,5	11
SDS1		SDM1						6	8,8	17,6
ARM1		SDM1	SDC1	SDS1				6	8	16
ARC1		ARM1						3,75	5	10
ARF1		ARM1						6	8	16
CCM1		ARM1	ARC1	ARF1				0,75	1	2
CCC1		CCM1						4,755	6,34	12,68
SDM2		SDM1	SDC1	SDS1				6	8,8	17,6
SDC2		SDM2						3,75	5,5	11
SDS2		SDM2						6	8,8	17,6
ARM2		ARM1	ARC1	ARF1	SDM2	SDC2	SDS2	6	8	16
ARC2		ARM2						3,75	5	10
ARF2		ARM2						6	8	16
CCM2		CCC1	ARM2	ARC2	ARF2			0,75	1	2
CCC2		CCM2						4,755	6,34	12,68

Início | Inserir Dados | Resultados | Simulador | Dados da Simulação | Calculos

Figura 50: Modificando as estimativas na ferramenta - cenário 1 a)

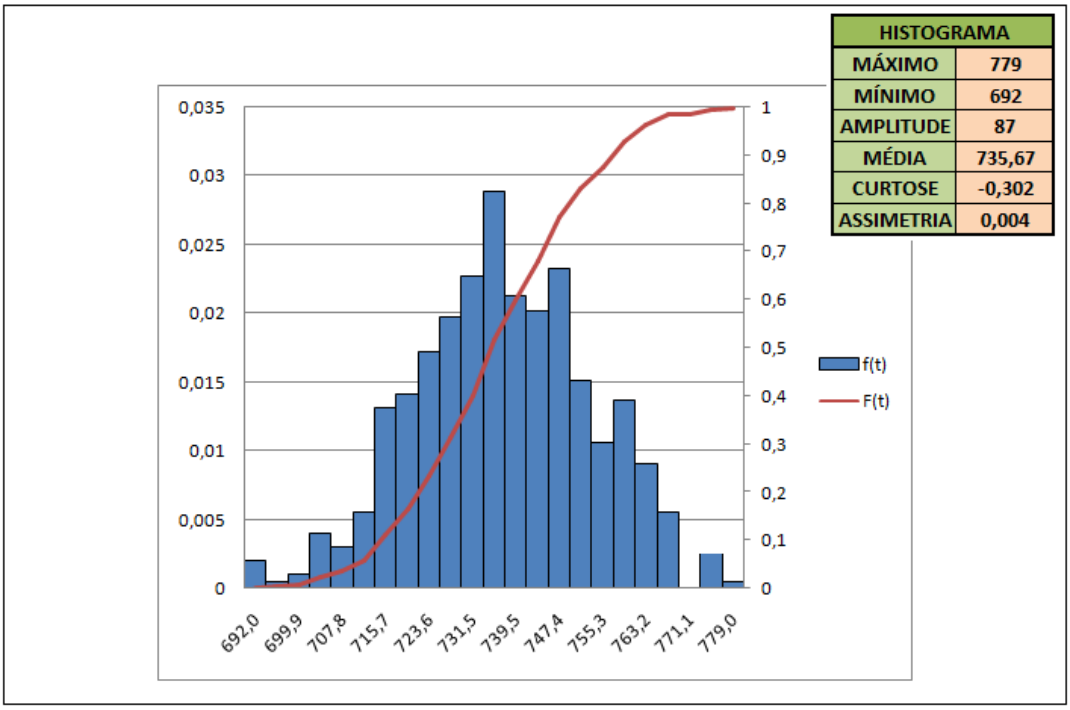

Figura 51: Histograma para o caso a).

Com as modificações realizadas tivemos um aumento no tempo médio de realização da rede que era de 688,45 horas para 735,67 horas, ou seja, um aumento de 47,22 horas. Também houve aumento nos tempo máximo e mínimo de conclusão da rede. O tempo mínimo aumentou de 659 horas para 692 horas (aumento de 33 horas) e o tempo máximo aumentou de 744 horas para 779 horas (aumento 35 horas).

Se pensarmos em termos de turnos de trabalho de 8 horas o aumento de 47,22 horas no tempo médio de conclusão da rede significaria um aumento de 5,9 turnos, aproximadamente 6 turnos de trabalho.

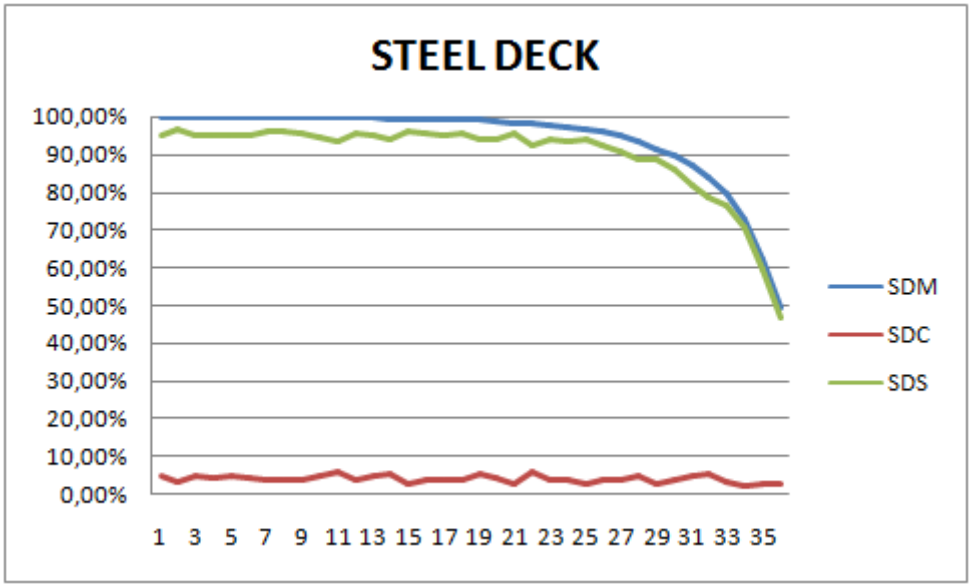

Figura 52: SD cenário 1 item a)

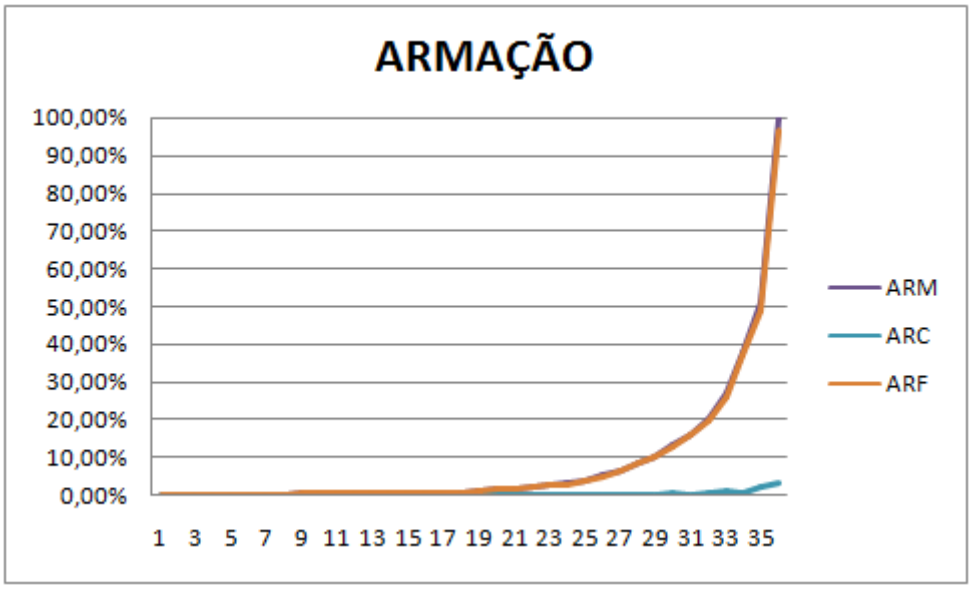

Figura 53: AR cenário 1 item a)

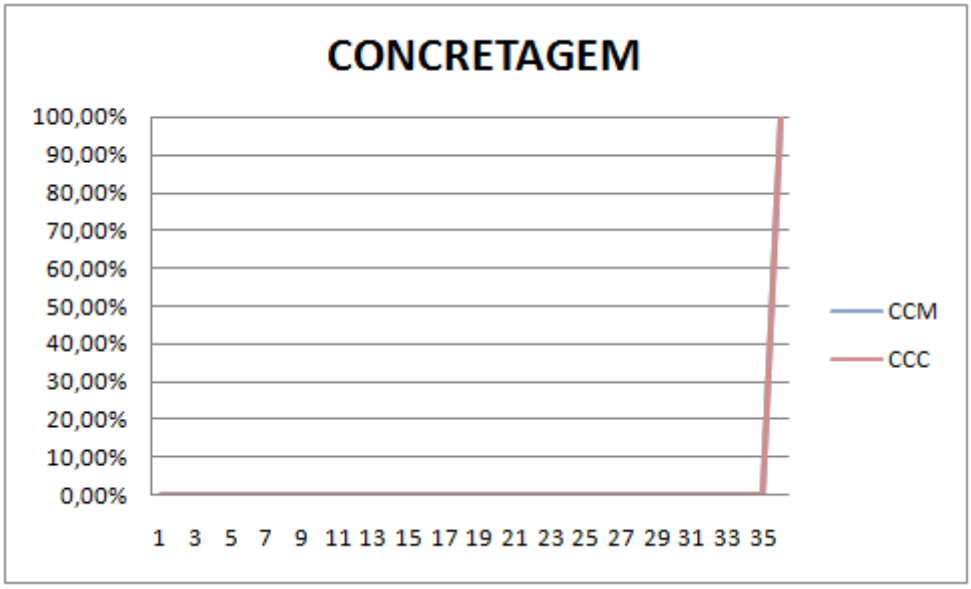

Figura 54: CC cenário 1 item a)

A macro-atividade *Steel Deck* com o aumento em sua duração média passou a se apresentar como atividade crítica durante a maior parte do tempo do projeto, diminuindo sua probabilidade de ser crítica somente a partir da metade da rede. Mesmo com essa diminuição na parte final da rede o SD ainda possui uma probabilidade de 50% de ser uma atividade crítica no último pavimento.

b) Modificações nas atividades referentes a Armação:

ID	Descrição da Atividade	Predecessores						Tempo Otimista	Tempo Mais Provável	Tempo Pessimista
SDM1		1						6	8	16
SDC1		SDM1						3,75	5	10
SDS1		SDM1						6	8	16
ARM1		SDM1	SDC1	SDS1				6	8,8	17,6
ARC1		ARM1						3,75	5,5	11
ARF1		ARM1						6	8,8	17,6
CCM1		ARM1	ARC1	ARF1				0,75	1	2
CCC1		CCM1						4,755	6,34	12,68
SDM2		SDM1	SDC1	SDS1				6	8	16
SDC2		SDM2						3,75	5	10
SDS2		SDM2						6	8	16
ARM2		ARM1	ARC1	ARF1	SDM2	SDC2	SDS2	6	8,8	17,6
ARC2		ARM2						3,75	5,5	11
ARF2		ARM2						6	8,8	17,6
CCM2		CCC1	ARM2	ARC2	ARF2			0,75	1	2
CCC2		CCM2						4,755	6,34	12,68

Início | Inserir Dados | Resultados | Simulador | Dados da Simulação | Calculos

Figura 55: Modificando as estimativas na ferramenta - cenário 1 b)

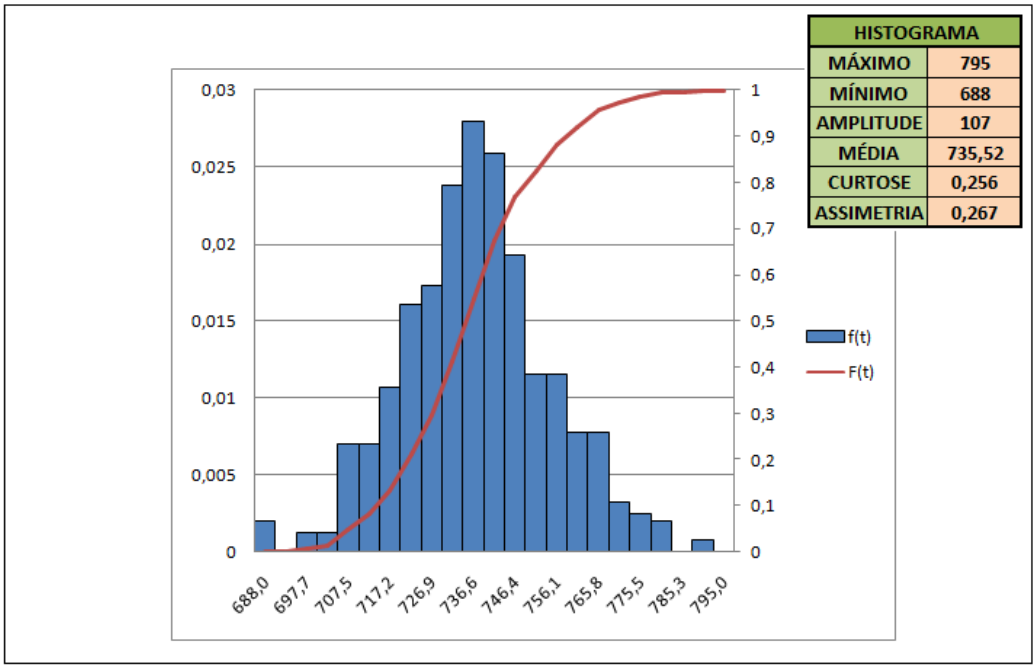

Figura 56: Histograma cenário 1 item b)

Quando modificamos somente a macro-atividade Armação, passamos a ter um aumento no tempo máximo de conclusão da rede de 51 horas e no tempo mínimo de 29 horas. Com relação à duração média para conclusão da rede tivemos um aumento de 688,45 horas para 735,52 horas (aumento de 47,07 horas). Esse aumento corresponderia a um aumento de 5,8 turnos, ou seja, aproximadamente 6 turnos de trabalho. Se comparamos esses valores com os valores obtidos no item a) vemos que atividade Armação possui um impacto muito maior na duração máximo da rede do que a atividade *Steel Deck*, mas praticamente não houve muita diferença em relação a duração média nas duas situações. Com isso percebemos que um aumento na duração das atividades da armação possui grande impacto na variabilidade do tempo de conclusão da rede.

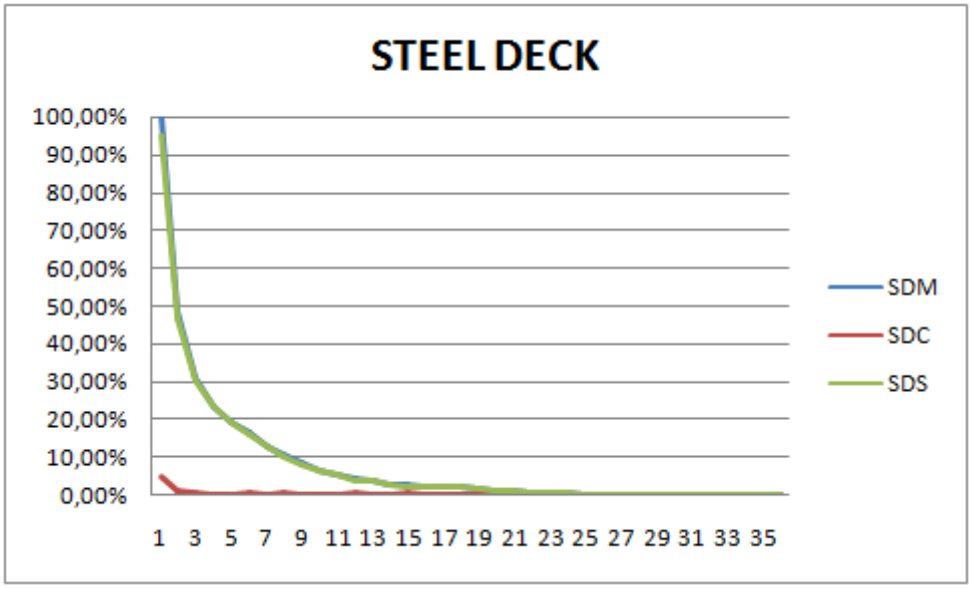

Figura 57: SD cenário 1 item b)

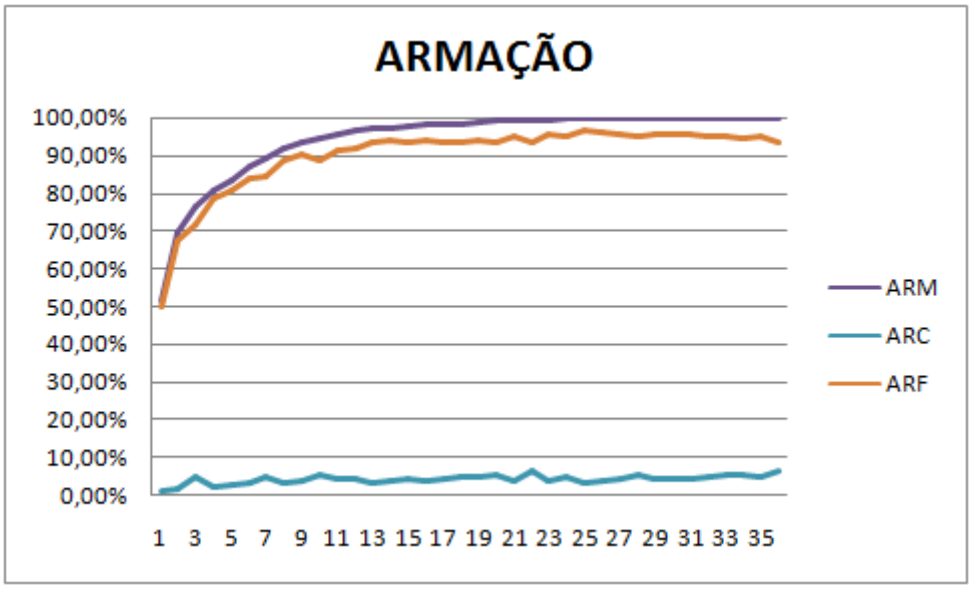

Figura 58: AR cenário 1 item b)

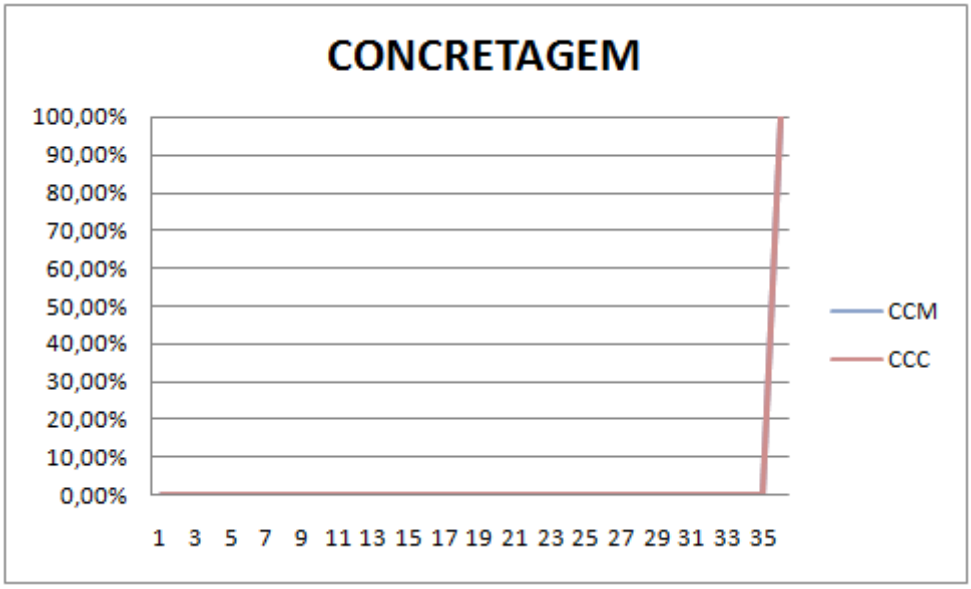

Figura 59: CC cenário 1 item b)

A atividade SD apresentou uma queda muito brusca em sua probabilidade de ser crítica durante os primeiros pavimentos, fazendo com que a atividade Armação assumisse o papel de atividade crítica durante os próximos pavimentos.

c) Modificações nas atividades referentes a Concretagem:

ID	Descrição da Atividade	Predecessores						Tempo Otimista	Tempo Mais Provável	Tempo Pessimista
SDM1		1						6	8	16
SDC1		SDM1						3,75	5	10
SDS1		SDM1						6	8	16
ARM1		SDM1	SDC1	SDS1				6	8	16
ARC1		ARM1						3,75	5	10
ARF1		ARM1						6	8	16
CCM1		ARM1	ARC1	ARF1				0,75	1,1	2,2
CCC1		CCM1						4,755	6,974	13,948
SDM2		SDM1	SDC1	SDS1				6	8	16
SDC2		SDM2						3,75	5	10
SDS2		SDM2						6	8	16
ARM2		ARM1	ARC1	ARF1	SDM2	SDC2	SDS2	6	8	16
ARC2		ARM2						3,75	5	10
ARF2		ARM2						6	8	16
CCM2		CCC1	ARM2	ARC2	ARF2			0,75	1,1	2,2
CCC2		CCM2						4,755	6,974	13,948

nício | Inserir Dados | Resultados | Simulador | Dados da Simulação | Calculos

Figura 60: Modificando as estimativas na ferramenta - cenário 1 c)

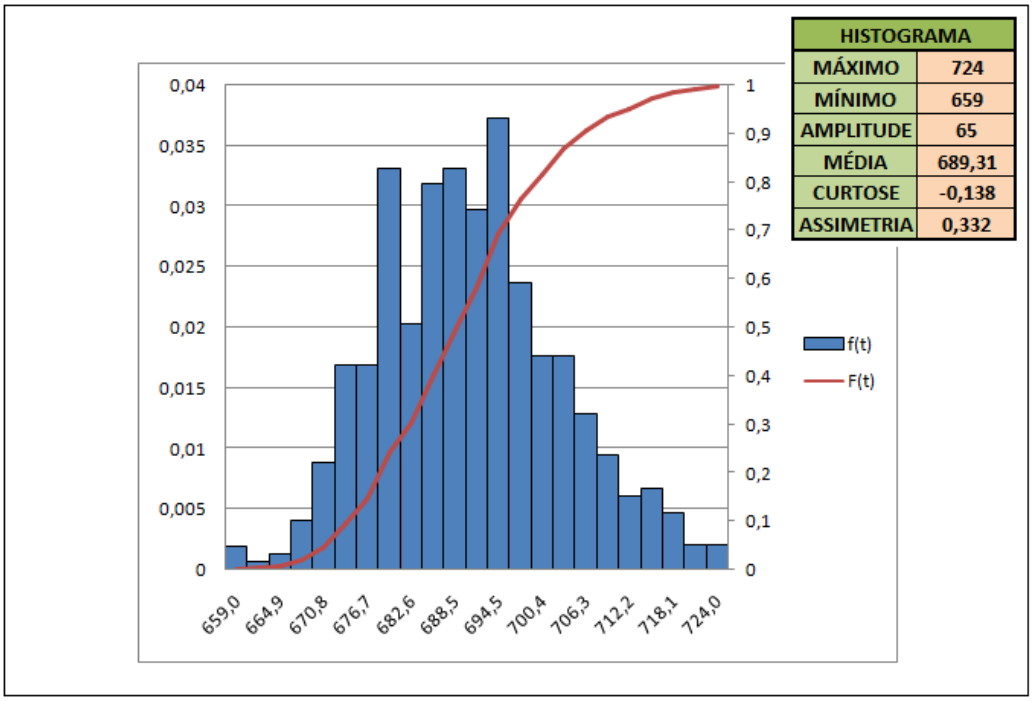

Figura 61: Histograma cenário 1 item c)

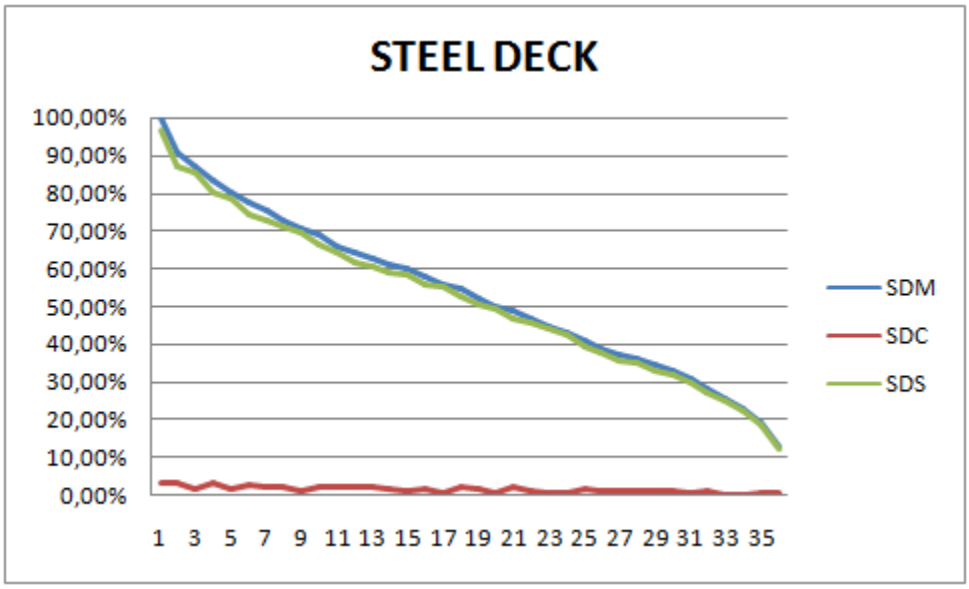

Figura 62: SD cenário 1 item c)

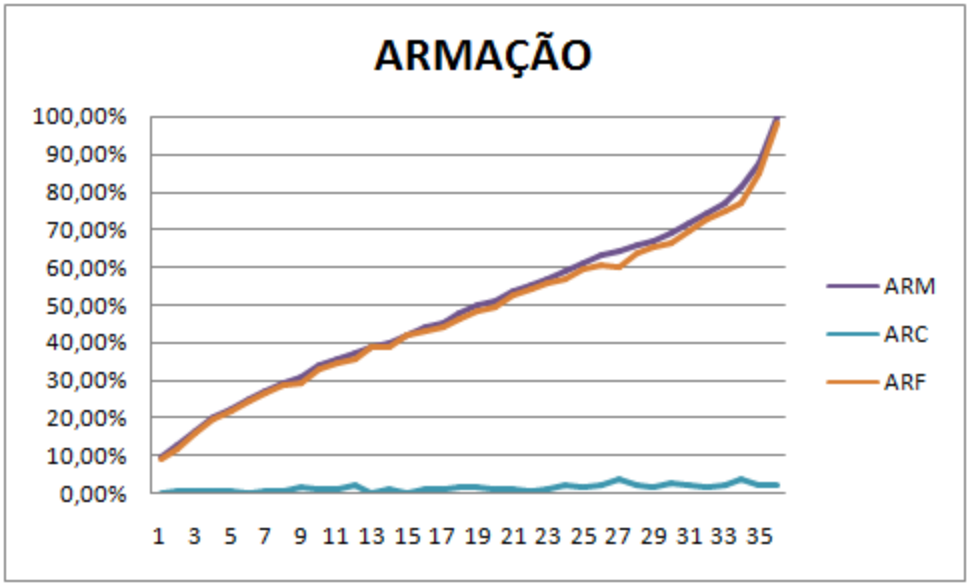

Figura 63: AR cenário 1 item c)

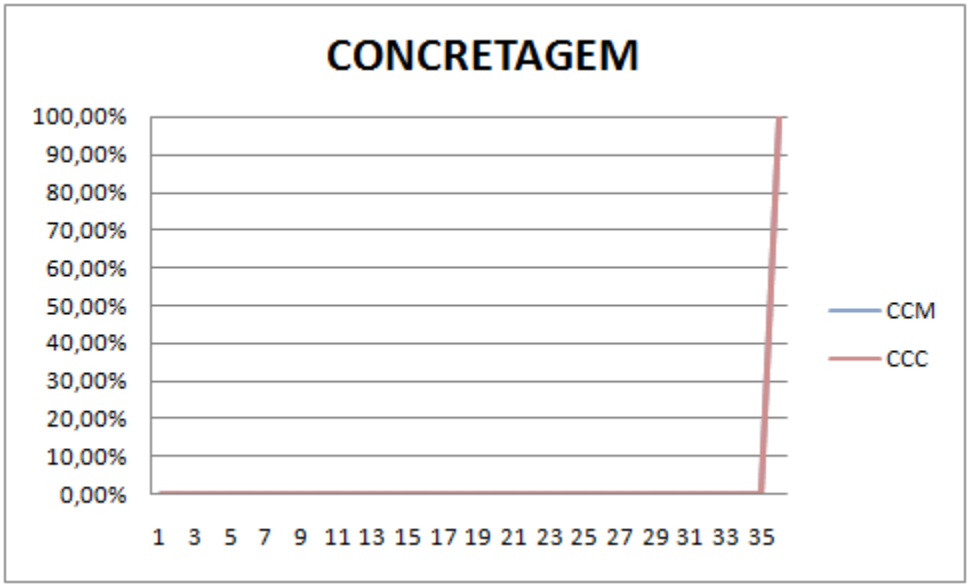

Figura 64: CC cenário 1 item c)

Como era de se esperar ao fazermos uma pequena modificação na duração da macro-atividade Concretagem não tivemos um impacto perceptível na duração do projeto. Isso aconteceu, pois a duração da atividade Concretagem não aumentou o suficiente para que a mesma pudesse fazer parte do caminho crítico durante o projeto e não somente na parte final.

➢ Cenário 2:

Esse cenário procura analisar uma característica da macro-atividade Concretagem. A Concretagem sofre grande influência de fatores climáticos, podendo levar a grandes atrasos na execução dessa atividade. Para simular o impacto de fatores climáticos desfavoráveis faremos as seguintes modificações em relação a situação inicial:

- Estimativa Otimista: não sofrerá modificações
- Estimativa Mais Provável: duas vezes e meia maior que o valor inicial
- Estimativa Pessimista: o dobro da estimativa mais provável

ID	Descrição da Atividade	Predecessores						Tempo Otimista	Tempo Mais Provável	Tempo Pessimista
SDM1		1						6	8	16
SDC1		SDM1						3,75	5	10
SDS1		SDM1						6	8	16
ARM1		SDM1	SDC1	SDS1				6	8	16
ARC1		ARM1						3,75	5	10
ARF1		ARM1						6	8	16
CCM1		ARM1	ARC1	ARF1				0,75	2,5	5
CCC1		CCM1						4,755	15,85	31,7
SDM2		SDM1	SDC1	SDS1				6	8	16
SDC2		SDM2						3,75	5	10
SDS2		SDM2						6	8	16
ARM2		ARM1	ARC1	ARF1	SDM2	SDC2	SDS2	6	8	16
ARC2		ARM2						3,75	5	10
ARF2		ARM2						6	8	16
CCM2		CCC1	ARM2	ARC2	ARF2			0,75	2,5	5
CCC2		CCM2						4,755	15,85	31,7

Início | Inserir Dados | Resultados | Simulador | Dados da Simulação | Calculos

Figura 65: Inserindo as estimativas do cenário 2 na ferramenta

A seguir podemos ver os gráficos obtidos durante essa simulação.

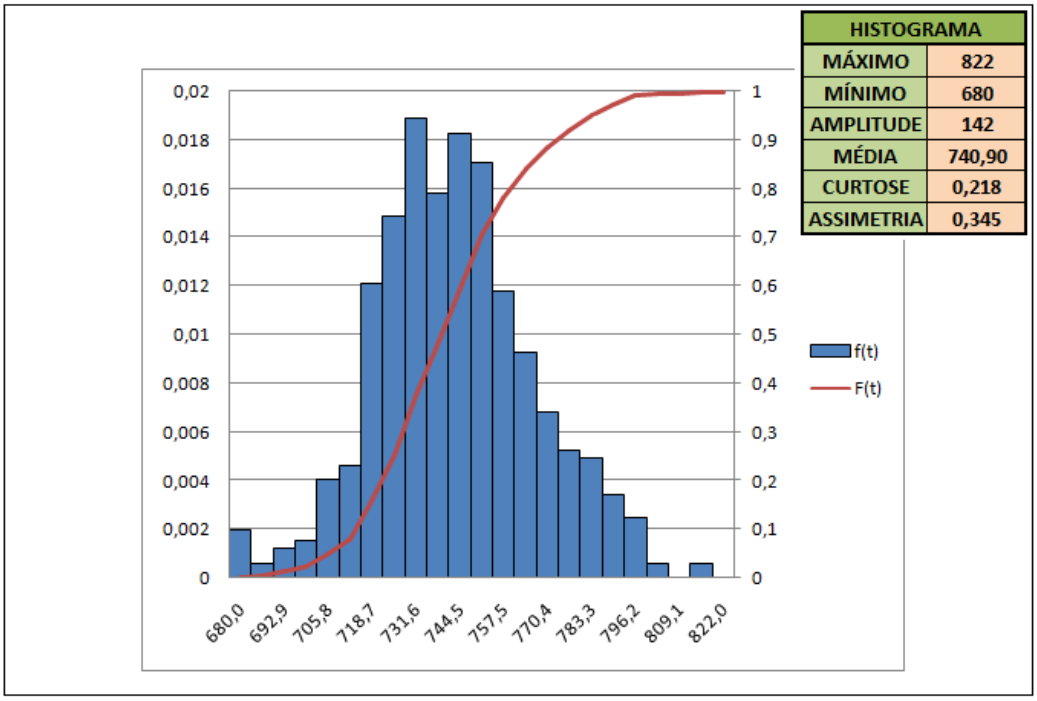

Figura 66: Histograma do cenário 2

Com relação aos dados obtidos no histograma vemos que a duração média para conclusão da rede que era de 688,45 horas foi para 740,90 horas, totalizando um aumento de 52,35 horas. Com relação aos valores máximo e mínimo tivemos um aumento de 78 horas no valor máximo e de 21 horas no valor mínimo.

Pode-se notar que quanto o tempo médio de realização da macro-atividade Concretagem fica mais próximo das macro-atividades *Steel Deck* e Armação ela começa a ter um grande impacto na duração total.

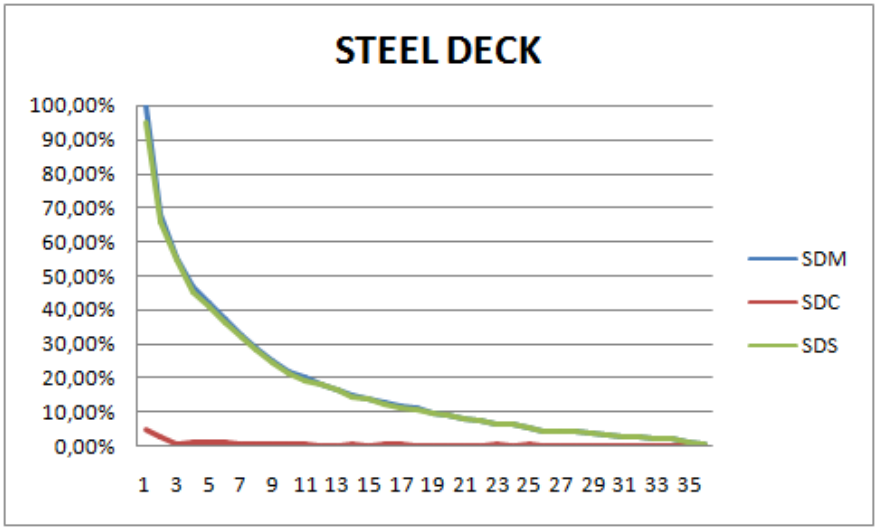

Figura 67; SD no cenário 2

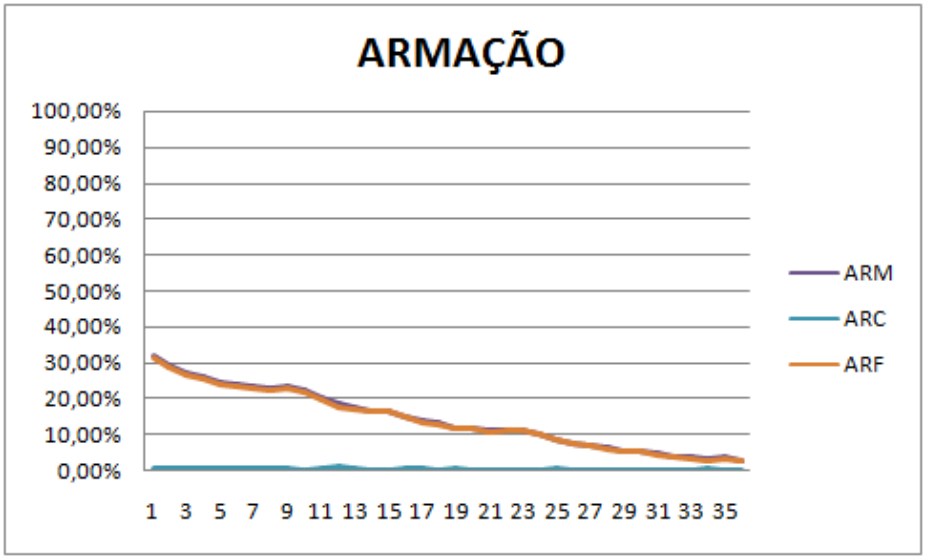

Figura 68: AR no cenário 2

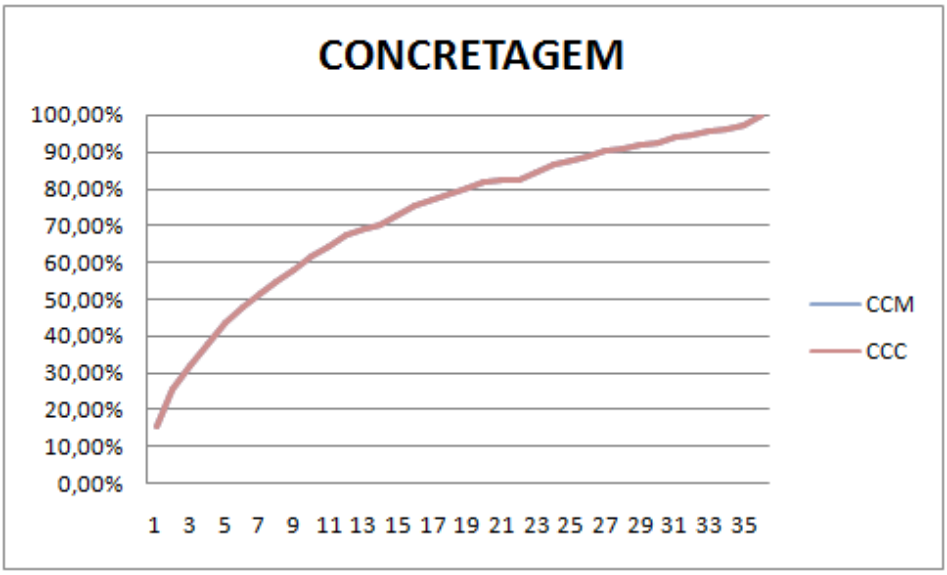

Figura 69; CC no cenário 2

No cenário 1, quando aumentamos muito pouco a duração da atividade concretagem não tivemos mudança no gráfico que mostrava a probabilidade da concretagem ser uma atividade crítica. Agora quando a duração média da concretagem ficou próxima da duração das demais atividades ela teve sua probabilidade de fazer parte do caminho crítico aumentada. Dificilmente existirão problemas que atrasarão a concretagem de todos os pavimentos, mas podemos perceber que caso existam problemas na concretagem em alguns pavimentos isso poderá ter um grande impacto na duração total do projeto.

4.4 Análise dos Resultados da Simulação

O PERT clássico ao assumir que a distribuição do tempo de realização de um projeto é dada por uma distribuição normal não mostrou ser o modelo mais adequado para aplicar em problemas de construção enxuta.

A construção é um ambiente complexo e, portanto cada uma de suas atividades apresenta características próprias e fazem com que facilmente seja quebrada a restrição sobre as características das distribuições das atividades imposta pelo Teorema do Limite Central. Com a quebra dessa restrição não há garantias que a distribuição do tempo de realização de um projeto será uma distribuição normal como é proposto pelo PERT.

Durante as várias simulações feitas durante a realização deste trabalho foi constatado que essa distribuição tende a ser assimétrica fazendo com que haja uma grande defasagem entre o resultado do PERT e o da simulação. Alguns testes de aderência também foram realizados para identificar se a distribuição do tempo de realização de uma rede de atividades seguiria uma distribuição em particular, mas por mais que algumas distribuições até conseguissem algumas vezes aderir bem ao conjunto de dados, como a distribuição beta, é de extrema dificuldade e complexidade estabelecer os parâmetros que essa distribuição deva ter com base nos dados de entrada das atividades que compõem a rede.

Nesse contexto a simulação se apresenta como uma ferramenta de grande ajuda para determinar com precisão as estimativas de término de um projeto. Essa precisão está diretamente relacionada com o tamanho da corrida da simulação, onde quanto maior for o tamanho da corrida melhor será a precisão dos resultados.

É necessário lembrar que o resultado da simulação também depende de uma boa estimação dos parâmetros otimista, mais provável e pessimista das atividades do projeto, portanto é de extrema importância que essas estimativas sejam feitas da melhor forma possível.

Na aplicação da ferramenta no estudo sobre "Execução de Lajes" identificamos que dentre as atividades *Steel Deck*, Armação e Concretagem, a atividade *Steel Deck* possui grande influência nos primeiros pavimentos da construção e a atividade Concretagem nos últimos pavimentos. Durante os pavimentos intermediários a atividade que possuir maior duração média será a que tem mais chance de influenciar no caminho crítico.

Além de proporcionar um resultado preciso sobre a duração do projeto a simulação consegue trabalhar em cima da variabilidade da duração das atividades através de tratamento estatístico dos dados possibilitando ao gestor tomar conhecimento da probabilidade de um determinado caminho ser o caminho crítico e de uma determinada atividade vir a ser uma atividade crítica.

Essa informação permite que seja possível identificar as atividades que precisam de mais esforços para diminuir o seu tempo de realização como também a sua variabilidade. Ao agir diretamente sobre as atividades que possuem maior probabilidade de serem críticas pode-se conseguir um melhor controle fluxo de atividades de um projeto, o que é de extrema relevância para a construção enxuta.

Ao simular uma rede de atividades pela primeira vez é possível, a partir dos primeiros resultados obtidos, propor/realizar os devidos ajustes como, por exemplo, uma melhor distribuição de recursos, otimização dos processos críticos e eliminação dos desperdícios fazendo com que um novo cenário seja criado, ou seja, uma mudança nas estimativas otimista, mais provável e pessimista de algumas ou todas as atividades que compõem o projeto.

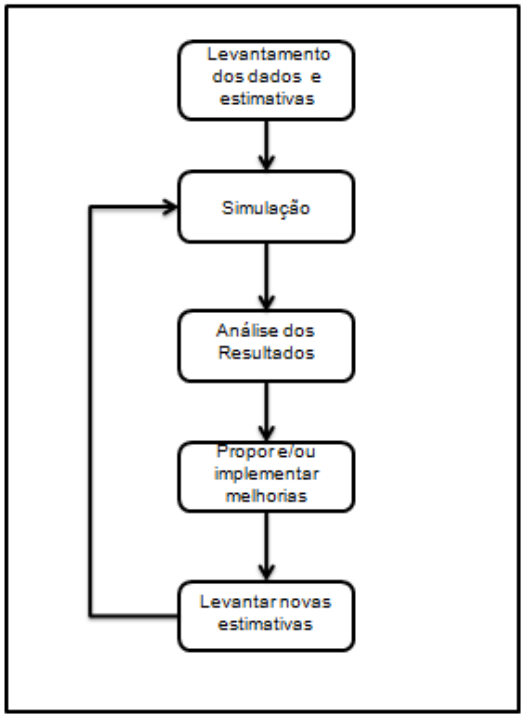

Figura 70: Processo de melhoria contínua com base na simulação.

Realizando a simulação desse novo cenário podemos ver o quão grande foi o impacto dessas mudanças e quais são ganhos obtidos e, além disso, possuiremos novas informações e com base nelas podemos fazer novos ajustes/propostas e assim por diante como se fosse um ciclo de melhoria tendo como meta a perfeição, um dos cinco princípios do pensamento enxuto.

Esse processo cíclico é semelhante ao da otimização dos gargalos realizados pela manufatura na produção enxuta, onde se procuram os gargalos do processo e focam-se os esforços para melhorar a produtividade do gargalo, muitas vezes fazendo com que o gargalo deixe de ser um gargalo e surgindo em algum outro processo um novo gargalo e então o ciclo se repete. A diferença desse pensamento da produção enxuta para a construção enxuta é que ao invés de tratar de gargalos estamos trabalhando em cima de atividades com maior probabilidade de serem críticas.

5. CONCLUSÃO

Neste capítulo apresentaremos a conclusão da pesquisa. Inicialmente recordaremos quais objetivos tinham sido propostos no início do trabalho e apresentamos o modo como os objetivos foram atingidos.

A seguir fazemos considerações finais e proposições de trabalhos futuros que poderiam dar continuidade ao presente estudo:

5.1 Atendimento aos objetivos da Pesquisa

No capítulo de introdução foram descritos os objetivos da pesquisa:

Objetivo 1) Identificar, dentre as várias distribuições de probabilidade, se é possível encontrar uma que descreva melhor o tempo de execução de uma atividade típica de Construção Enxuta;

Objetivo 2) Analisar se a técnica PERT clássica traz resultados precisos para o gerenciamento do tempo de projeto na construção enxuta;

Objetivo 3) Elaborar uma ferramenta de simulação para o gerenciamento do tempo das atividades de projetos construção enxuta.

Objetivo 4) Identificar quais distribuições de probabilidade descrevem melhor o tempo total de duração de uma rede de atividades de construção enxuta

A seguir descreveremos como cada um dos objetivos foi atingido.

Objetivo 1) Identificar, dentre as várias distribuições de probabilidade, se é possível encontrar uma que descreva melhor o tempo de execução de uma atividade típica de Construção Enxuta;

Objetivo atingido? Sim

Devido ao comportamento dos prazos de conclusão de atividades típicas de construção enxuta, defendemos que a distribuição que melhor descreve o fenômeno é a distribuição Beta e para efeitos práticos convém utilizar a distribuição PERT Beta, que possui três parâmetros: duração otimista, duração mais provável e

duração pessimista. Além disso, a distribuição PERT Beta atende aos principais requisitos propostos pela literatura especializada e possui flexibilidade em sua forma para conseguir uma boa representação da distribuição dos tempos de uma atividade ao variar os seus parâmetros.

Objetivo 2) Analisar se a técnica PERT clássica traz resultados precisos para o gerenciamento do tempo de projeto na construção enxuta;

Objetivo atingido? Sim

Como pode ser visto no item 4.1.3 Estudo sobre o comportamento da distribuição de saída, tanto no exemplo ilustrativo quanto no problema de construção enxuta simulado neste estudo, a técnica PERT clássica se mostrou imprecisa no cálculo de probabilidades associadas às conclusões das atividades.

Em geral, a técnica PERT clássica tende a ser excessivamente otimista em comparação com as situações reais, fornecendo prazos mais curtos de execução e prejudicando o tomador de decisões em projetos de construção enxuta.

Uma das possíveis fontes de explicação para esta distorção é apresentada no item 4.1.2 Limitações do PERT tradicional, em que se discute a validade da utilização do Teorema do Limite Central pelo PERT ao propor que a distribuição que melhor representa a duração de um projeto é dada por uma distribuição normal.

Apesar de ter sido um grande avanço a criação do PERT/CPM, atualmente devido a grande dificuldade de atender as condições impostas pelo Teorema do Limite Central em projetos reais de construção enxuta recomendamos a utilização de resultados estatísticos fornecidos pelas técnicas de simulação para tomar decisões no gerenciamento do tempo de atividades dos projetos.

Objetivo 3) Elaborar uma ferramenta de simulação para o gerenciamento do tempo das atividades de projetos construção enxuta.

Objetivo atingido? Sim

A ferramenta foi desenvolvida através da utilização de uma planilha eletrônica onde, ao longo deste trabalho foi mostrada, através de vários exemplos, a lógica de funcionamento da ferramenta.

A elaboração da ferramenta se deu através das etapas abaixo:

1ª - A elaboração de um modelo estático: onde a planilha eletrônica reproduz os principais aspectos do PERT/CPM;

2ª - A elaboração de um modelo dinâmico: onde é introduzido no modelo estático variáveis aleatórias através de distribuições de probabilidade que representem a duração de uma certa atividade, tornando possível a realização da simulação.

3ª - Análise de resultados: onde se introduz na planilha os principais conceitos estatísticos necessários para o tratamento de dados obtidos na simulação. Esse tratamento estatístico torna possível a ferramenta mostrar um painel final com gráficos e informações relevantes para o estudo do tempo pelo usuário como, por exemplo, a probabilidade de uma atividade ser crítica.

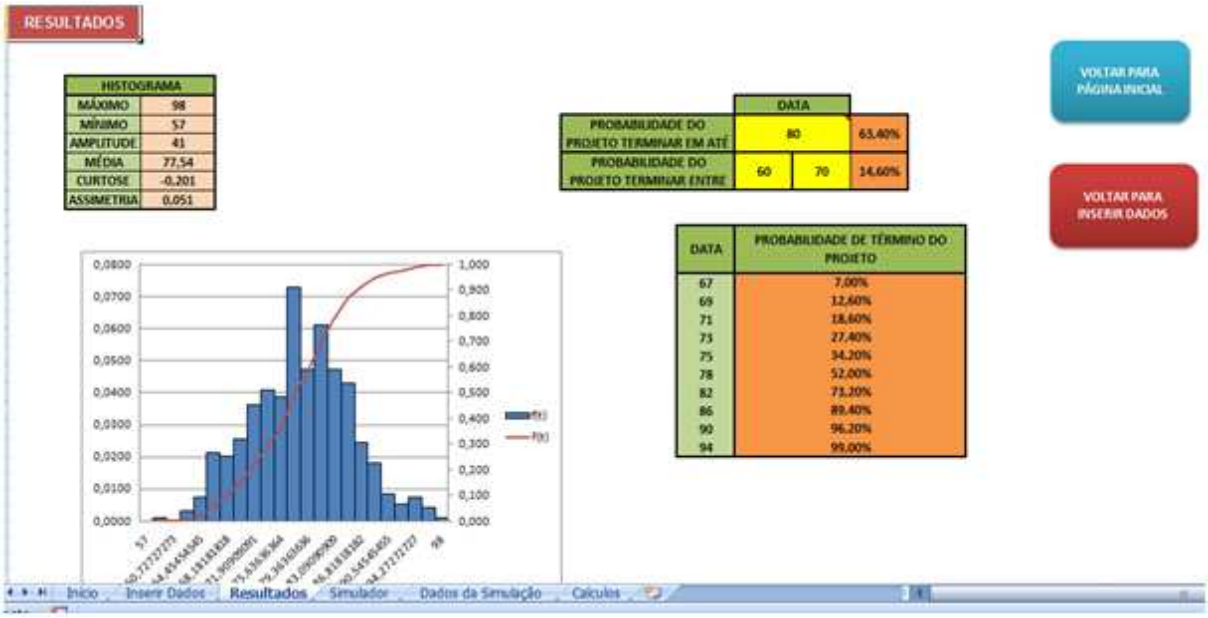

Figura 71: Visão do painel final.

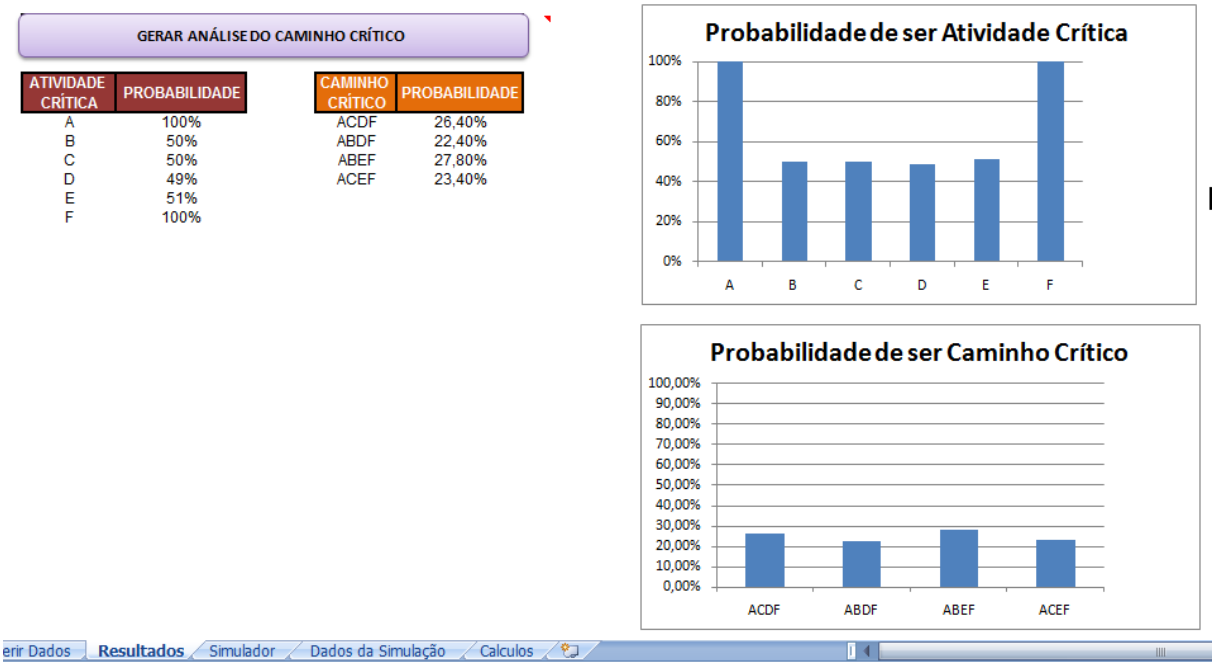

Figura 72: Visão da análise do caminho crítico no painel final

Objetivo 4) Identificar quais distribuições de probabilidade descrevem melhor o tempo total de duração de uma rede de atividades de construção enxuta

Objetivo atingido? Sim

Ao longo do trabalho testamos várias candidatas à distribuição que melhor descreve a duração total da rede de atividades de construção enxuta como, por exemplo, a distribuição normal amplamente utilizada pela metodologia PERT. Como mencionado no objetivo 2, a rede necessita atender algumas condições para que essa distribuição possa ser utilizada com precisão para modelar a distribuição de saída de um projeto de construção enxuta.

Por outro lado a distribuição Beta que é uma forte candidata para descrever o tempo total da duração de um projeto, devido a sua forma possuir algumas variações que podem se adaptar a assimetria dos resultados, se torna de difícil adoção devido a extrema complexidade de se obter uma solução analítica para os parâmetros a, m e b dessa distribuição com base nas informações de entrada do projeto.

Sendo assim, chegamos à conclusão que para efeitos práticos o melhor é trabalhar com a distribuição empírica gerada pela simulação.

5.2 Considerações Finais

Este estudo ressalta a necessidade de se ter disponível cada vez mais ferramentas que auxiliem no planejamento, controle e implementação da construção enxuta.

Juntando o fato das premissas estabelecidas pela metodologia PERT dificilmente poderão ser cumpridas na realização de um projeto de construção enxuta, com a alta complexidade em se obter uma distribuição de probabilidade genérica que represente o tempo de duração para qualquer projeto com base nos parâmetros de entrada do modelo, podemos perceber que um grande caminho se abre para a utilização da simulação nos problemas de construção enxuta, pois ela irá fornecer uma distribuição empírica que representa com grande precisão a distribuição do tempo de realização de um projeto.

Considerando que o arcabouço conceitual para a implementação prática da construção enxuta ainda esteja em fase de desenvolvimento acadêmico por parte dos profissionais da área, a simulação oferece um campo vasto para experimentação e comprovação de sua aplicabilidade e melhor desempenho como modelo de construção e, além disso, oferece um respaldo estatístico para a tomada de decisão.

O instrumento prático desenvolvido neste trabalho mostrou-se uma excelente alternativa para controlar o fluxo de atividades de projeto de construção enxuta, fornecendo ao usuário informações relevantes para o gerenciamento de seu projeto como também a possibilidade de testar cenários e vislumbrar alternativas que resultem em uma menor duração de conclusão do projeto.

A análise da probabilidade de um caminho ser crítico e de uma atividade ser crítica mostrou-se como uma informação de grande relevância para a construção enxuta, pois a partir dela pode-se procurar otimizar a realização das atividades (e eliminar desperdícios nessas atividades) mais críticas fazendo com o que a duração total do projeto seja reduzida. Nesse sentido a busca em eliminar desperdícios e reduzir prazos das atividades, e do projeto, nos leva a um processo de melhoria contínua como mostrado na figura 70.

A ferramenta desenvolvida neste trabalho mostrou-se de grande ajuda na realização da simulação e respectivo tratamento dos dados. Abaixo são listadas as

principais vantagens de utilizarem planilhas eletrônicas como uma ferramenta para auxiliar no gerenciamento de projetos:

- Fornece a distribuição do tempo de realização do projeto com precisão;
- Fornece a probabilidade de um caminho ser crítico;
- Fornece a probabilidade de uma atividade ser crítica;
- Permite o usuário conhecer a probabilidade de um projeto terminar em até determinada data;
- Possui uma interface amigável de fácil utilização;
- Permite que sejam testados diferentes cenários;
- Permite o usuário utilizar os dados gerados pela simulação para fazer análises complementares;
- É possível modificar a distribuição do tempo de cada atividade do projeto caso seja necessário;
- Pode ser utilizada desde a fase de planejamento até a conclusão do projeto.

Já as dificuldades de se utilizar planilhas eletrônicas estão relacionadas com o desempenho computacional onde em determinados casos a simulação pode se apresentar um pouco lenta. Isso ocorre principalmente nos casos em que a rede possua um grande número de atividades ou que a simulação tenha uma corrida muito grande.

Durante a aplicação da ferramenta além de fazer uma análise de sensibilidade da duração do projeto, procurou-se adicionar à literatura um exemplo prático do uso da simulação, pois devido à complexidade dos projetos de construção civil, esta prática tem se mostrado um excelente método para o estudo deste tema.

5.3 Sugestões de trabalhos futuros

Alguns trabalhos podem ser desenvolvidos futuramente a partir dos conhecimentos desenvolvidos nesta dissertação.

O ferramental matemático desenvolvido nesse trabalho pode ser útil para a aplicação no gerenciamento de custos e na análise de riscos de um projeto, pois

diversos fatores como clientes, recursos, fornecedores, mão de obra e requisitos estão associados as incertezas de um projeto. Também é possível adicionar nesse trabalho um ferramental referente ao gerenciamento de recursos para resolver problemas envolvendo limitações de recursos nas atividades de um projeto.

O modelo computacional desenvolvido poderia ser melhorado com a utilização de técnicas mais refinadas para a geração de números aleatórios como também, com a criação de uma ferramenta que tivesse a mesma facilidade de uso do Excel, porém com processamento mais rápido, utilizando, por exemplo, uma linguagem de programação compilável.

Uma abordagem interessante seria relacionar as redes de atividades com os conceitos de atrasos, esperas, e perdas compensadas mencionadas em Azevedo (2010).

REFERÊNCIAS

Abdelhamid, T.S., Jain, S., Mrozowski, T. **Analyzing the Relationship Between Production Constraints and Construction Work Flow Reliability: An Sem Approach**. IGLC-18, Technion, Haifa, Israel, July, 2010.

Abu Hammad, A. **Simulation Modeling of Manufacturing Housing Process.** Dissertação de Mestrado, University of Cincinnati, 2002.

Araújo, P. R. C. **Propostas Logísticas para o Suprimento de Estruturas Metálicas em Construção Predial Lean.** Dissertação de mestrado. UERJ. Rio de Janeiro, 2005.

Azevedo, V. **Planejamento de Atividades da Construção Predial Visando a Redução de Perdas de Processo na Ótica da Construção Enxuta**. Dissertação de Mestrado. UERJ. Rio de Janeiro, 2010.

Banks, J. **Discrete Event Simulation**. Winter Simulation Conference, 1999.

Banks, J. *et al* **Discrete-Event System Simulation**. 4. ed. New Jersey: Prentice Hall, 2004.

Ben-Yair, A. **Upon Implementing the Beta Distribution in Project Management** (Working Paper). Department of Industrial Engineering and Management, Negev Academic College of Engineering, Israel, 2010.

Bertelsen, S. Koskela, L. **Managing the Three Aspects of Production in Construction**. Proceedings IGLC-10, Aug, Brazil, Gramado, 2002.

Bertelsen, S. Koskela, L. Henrich G. Rooke, J. **Construction Physics**. Proceedings IGLC-15, USA, Michigan, July, 2007

Bertelsen, S., Sacks, R. **Towards a New Understanding of the Construction Industry and the Nature of its Production**. Proceedings IGLC-15, USA, Michigan, July, 2007

Clark, C.E. **The PERT Model for the Distribution of an Acitivity Time**. Operations Research, vol 10, 1962

Davis, R. **Teaching Project Simulation in Excel Using PERT-*Beta* Distributions**. Informs - Transactions on Education, vol 8, n-3, pp 139-148, May, 2008.

Di Bello, B.C. **Uma Metodologia de Planejamento Aplicada à Cadeia de Suprimentos de Construções Prediais.** Dissertação de Mestrado. UERJ, Rio de Janeiro, 2007.

Draper J.D., Martinez, J. **The Evaluation of Alternative Production System Designs with Discrete Event Simulation**. Proceedings IGLC-10, Gramado, Brasil,Aug, 2002.

Farrar, J.M. AbouRizk, S. M., Mao, X. **Generic Implementation of Lean Concepts in Simulations Models**. Lean Construction Journal, Vol 1, n 1, October, 2004

García C.B. *et al*. **The Generalized Biparabolic Distribution.** International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based-Systems, vol 17, n-3, 377-396, 2009

García C.B. *et al.* **Proposal of a New Distribution in PERT Methodology**. Annals of Operations Research, Vol 181, N-1, 515-538, 2010.

Gehbauer *et al* **Simulation-Base Analysis of Disturbances in Construction Operations.** IGLC-15, USA, Michigan, July, 2007.

Guimarães, R. C., CABRAL, J.A.S. **Estatística.** Lisboa: McGraw-Hill, 1997.

Grubbs, F.F. **Attempts to Validate Certain PERT Statistics or 'Picking on PERT'**. Operations Research, vol 10, 1962.

Herrerías, R., García, J., & Cruz, S. **A note on the reasonableness of PERT hypotheses**. Operations Research Letters, 31(1), 60–62, 2003.

Hillier, F.S, Lieberman, G.J **Introdução à Pesquisa Operacional**. São Paulo; EDUSP, 1988

Howell, G.A. **What is Lean Construction**. Proceedings Seventh Annual Conference of the International Group for Lean Construction, IGLC-7, Berkeley, CA, 1-10, 1999

Kamburowski, J. **New validations of PERT times**. Omega, The International Journal of Management Science, 25(3), 323–328, 1997.

Koskela, L. **Application of the New Production Philosophy to Construction**. Tech. Report No. 72, CIFE, Stanford Univ., CA, 1992

Koskela, L. **An exploration towards a production theory and its application to construction**. PhD Thesis. University of Thecnology, Espoo-Finland, 2000.

Koskela, L., Rooke, J. Bertelsen, S., Henrich, G. **The FTV Theory of Production: New Developments**. IGLC-15, Michigan, USA, July, 2007.

Kwak, Y.H. Ingall, L. **Exploring Monte Carlo Simulation Applications for Project Management**. Risk Management, vol 9, 44-57, 2007

Malcom, D. G., Rosenbloom, J.H., Clark, C. E. Fazar, W. **Application of a Technique for Research and Development Program Evaluation.** Journal of Operational Research, Vol. 7, No. 5, pp. 646-669, 1959.

Oliveira, D.G.S. **Uma metodologia de avaliação de concretagens de lajes prediais na ótica da construção lean**. Dissertação de Mestrado - Faculdade de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2007.

Pinto, N. L., Holtz, A.C., Martins, J.A., Gomide, F.L. **Hidrologia Básica**. Editora Edgard Blücher, 13ª reimpressão, 2011.

Premachandra, I. M. **An Approximation of the Activity Duration Distribution in PERT.** Computers & Operations Research, vol 28, 443-452, 2001.

Raychaudhuri, S. **Introduction to Monte Carlo Simulation**. Winter Simulation Conference, 2008.

Rocha, M.Q. **Elaboração de indicadores e Uso de Ferramentas de Controle da Qualidade na Execução de Obras Prediais.** Dissertação de Mestrado. UERJ, Rio de Janeiro, 2007.

Rosenblum, A. **Pontes em Estruturas Segmentadas Pré-moldadas.** Dissertação de Mestrado. UERJ, Rio de Janeiro, 2009.

Sasieni, M.W. **A Note on PERT Times**. Management Science, vol 32, 1986

Schramm, F.K, Formoso, C.T. **Using Visual Interactive Simulation to Improve Decision-Making in Production System Design**. IGLC-15, Michigan, USA, July, 2007.

Silva, R. R. L. **Construção predial *Lean*: mapeamento da cadeia de valor das estruturas metálicas.** Dissertação de Mestrado. UERJ. 2005.

Slack, N. *et al*. **Administração da Produção**. Edição compacta. Editora Atlas, São Paulo, 1999.

Srisuwanrat, C., Ioannou, P. G. **The Investigation of Lead-Time Buffering Under Uncertainty Using Simulation and Cost Optimization**. Proceedings IGLC-15, USA, Michigan, July, 2007.

Tommelein, I. D. **Pull-Driven Scheduling for Pipe-spool Installation: Simulation of a Lean Construction Technique.** ASCE Journal of Construction Engineering and Management, July/August, 1998

van Dorp, J.R., Kotz, S. **Generalizations of Two-sized Power Distributions and their Convolution**. Communications in Statistics: Theory and Methods, vol 32, n-9, 1703-1723, 2003.

Velard, G.J., Saloni, D.E., van Dyk, H., Giunta, M. **Process flow improvement proposal using lean manufacturing philosophy and simulation techniques on a modular home manufacturer.** Lean Construction Journal, p77-93, 2009.

Womack, J., Jones, D. **Lean Thinking.** New York, Ed. Simon & Schuster, 1996.

Womack, J., Jones, D., Roos, D. **A máquina que mudou o mundo**. Rio de Janeiro, Ed. Campus, 1997.