

## COMPARATIVO ENTRE OS MÉTODOS PERT, FUZZY-PERT E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL PARA O PLANEJAMENTO DE OBRAS

ARAUJO, A.V.<sup>1</sup>

VIVAN, A.L.<sup>2</sup>

PALIARI, J.C.<sup>3</sup>

### RESUMO

Embora existam diversas técnicas e conceitos inovadores com maior potencial para serem aplicados no planejamento e controle da construção, ainda há uma preferência, no setor, pelo uso de técnicas já ultrapassadas e quase sempre com baixa relação com o comportamento de uma empresa. Nesse sentido, o presente artigo propõe o uso e a comparação de cinco técnicas para o cálculo da duração de um projeto. Para isso, um projeto genérico foi tomado como exemplo e as durações probabilísticas foram calculadas a partir do uso do PERT com as Distribuições Beta e Gama, a partir da simulação computacional com as Distribuições Beta e Gama, e com o PERT desenvolvido com os números Fuzzy. Os resultados mostraram diferenças significativas entre as técnicas, principalmente em termos de durações e desvios padrão. Este artigo pode ser considerado relevante, pois incentiva o uso de técnicas de planejamento incomuns na indústria da construção.

**Palavras-chave:** Planejamento da construção. Controle do planejamento. Simulação

### ABSTRACT

*Although there are several innovative techniques and concepts with greater potential to be applied in the construction planning and control, there is still a preference, in the sector, for the use of techniques already outdated and almost always with a low relation with the behavior of a building site. In this sense, the present article proposes the use and comparison of five techniques for calculating the duration of a project. For this, a generic project was taken as an example and the probabilistic durations were calculated from the use of PERT with the Beta and Gamma Distributions, from the computational simulation with the Beta and Gamma Distributions, and with the PERT developed with Fuzzy numbers. The results showed significant differences between the techniques, mainly in terms of durations and standard deviations. This article can be considered relevant, as it encourages the use of unusual planning techniques in construction industry.*

**Keywords:** Planning Construction. Planning Control. Simulation.

---

<sup>1</sup> (1) Titulação: Mestre, vinculação profissional: pesquisador

(2) Titulação: Doutor, vinculação profissional: professor,

(3) Titulação: Doutor, vinculação profissional: professor.

**Recebido em: 16/11/2018 - Aceito para publicação em: 29/12/2018**

## 1 INTRODUÇÃO

É fato que a grande maioria dos profissionais da construção civil utiliza as chamadas técnicas tradicionais de planejamento que podem ser representadas, basicamente, pelo cronograma de Gantt vinculado às redes geradas pelas técnicas *Program Evaluation and Review Technique / Critical Path Method* (PERT/CPM) que estimam prazos de entrega e identificam os chamados caminhos críticos dos empreendimentos.

Nesse sentido, apesar de haver várias publicações e aplicações, outras técnicas de planejamento que podem oferecer resultados mais precisos, ou ainda, outros tipos de resultados, continuam sendo uma incógnita para muitos profissionais, tendo em vista o relativo comodismo testemunhado no setor que, de fato, é resistente às mudanças e inovações.

Entende-se que no setor ainda não há um entendimento comum ou formalizado por parte das empresas e profissionais do que vem a ser, em termos científicos, o gerenciamento do processo de produção em um canteiro de obras. Nesse sentido, já afirmava Taylor (1991) que a causa fundamental para questões relativas ao desperdício de esforço operário é, efetivamente, o gerenciamento não científico, pois os gerentes estão, na maioria das vezes, mais focados nos resultados finais, e não o suficiente nos processos pelos quais os trabalhos são realizados.

Dessa forma, o entendimento e aplicação de outras técnicas de planejamento podem contribuir para um melhor entendimento da dinâmica de um canteiro de obras, possibilitando melhor precisão do planejamento e, conseqüentemente, um controle mais efetivo no canteiro de obras.

Assim, o presente artigo apresenta um estudo comparativo entre uma técnica considerada tradicional e de domínio na construção civil que é o PERT probabilístico e duas outras que não são amplamente utilizadas ou conhecidas, que é o Fuzzy-PERT e a simulação computacional.

O objetivo desta comparação é mostrar as diferenças entre os resultados das diferentes técnicas e fomentar a discussão acerca do uso destas técnicas sob a ótica da precisão e qualidade das informações. Trata-se de um estudo experimental cujos resultados mostraram notável diferença entre as diferentes técnicas, especialmente

com relação ao aumento ou redução das diferentes durações das atividades que formaram o projeto utilizado.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 PERT Probabilístico

O método PERT considera uma faixa de produtividade variável para o cálculo das durações de um projeto, conferindo ao planejamento deste projeto um atributo probabilístico. Tal variação de tempo recorre à noção de três durações para cada serviço que irá formar o empreendimento: a otimista (O), a pessimista (P) e a mais provável (M). Esta variação de durações é modelada estatisticamente no PERT pela Distribuição Beta de maneira que outras distribuições de probabilidade podem ser usadas, desde que sejam aderentes aos dados.

Um dos principais parâmetros a ser calculado para o PERT é a duração esperada de cada serviço, que engloba as três durações anteriormente mencionadas. A duração esperada (E) nada mais é do que a média definida pela Distribuição Beta, sendo definida pela amplamente conhecida relação identificada na Equação 1.

$$E = \frac{O + 4xM + P}{6} \quad (1)$$

A variância das durações também é definida pela Distribuição Beta, sendo calculada pela expressão da Equação 2, sendo o desvio padrão ( $\sigma$ ) a raiz quadrada da variância:

$$\sigma^2 = \frac{(P - O)^2}{36} \quad (2)$$

De acordo com Fernandes e Godinho Filho (2009), caso as durações otimista e pessimista não tenham a mesma probabilidade de ocorrência (o que é mais provável num canteiro de obras), então é possível utilizar outras distribuições como a Triangular. Lootsma (1997) sugere o uso da distribuição Gama. Nesse caso, o autor mostra que E e  $\sigma^2$  são calculados de acordo com as Equações 3 e 4 respectivamente.

$$E = \frac{P + 5xM}{6} \quad (3)$$

$$\sigma^2 = (E - O)x(E - M) \quad (4)$$

## 2.2 Fuzzy-PERT

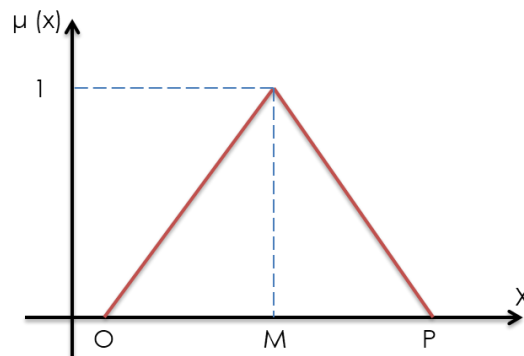
Com o desenvolvimento e aplicação da teoria dos conjuntos-fuzzy, tornou-se questionável se a modelagem oferecida pelo PERT probabilístico proporciona uma representação adequada da incerteza associada aos projetos. Nesse fato reside o agravante de que a duração das atividades é estimada por profissionais que, muitas vezes, estão sob condições muito particulares (diferente daquelas onde se desenvolveram as atividades), de maneira que o projeto fica confrontado com a relativa imprecisão das durações atribuídas por tais profissionais (LOOTSMA, 1997). Dessa forma, de acordo com o referido autor, a combinação fuzzy-PERT pode resultar num planejamento mais preciso, tendo em vista o conceito por trás da lógica fuzzy.

Assim, para a versão “fuzzy” das durações das atividades, Lootsma (1997) sugere que as durações O, M e P sejam consideradas como números fuzzy com distribuição Triangular, com a base do número definida pelo intervalo [O, P] e o valor máximo de 1 associado à M, como ilustrado na Figura 1. Para isso, o intervalo fuzzy é expresso pela chamada função de pertinência  $\mu(x)$ , como descrito na Equação 5, onde o número mais possível assume o valor de 1 em tal função. Dessa maneira, a duração E de um serviço passa a ser:  $E = (O, M, P)$  e não somente um número real.

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x < O \\ 1, & O \leq x \leq P \\ 0, & x > P \end{cases} \quad (5)$$

De acordo com Rentería (2006), número fuzzy é um caso especial de conjunto fuzzy sendo definido nos números reais. Assim, para o referido autor, um número real cujo valor preciso não é conhecido com exatidão (quando há incertezas associadas), tal número pode ser definido através de um intervalo fuzzy. Um intervalo fuzzy é geralmente representado por dois pontos extremos (um valor mínimo e um valor máximo) e um ponto médio (o valor mais possível). Dessa maneira, os valores inferiores, o mais provável e os superiores podem ser calculados separadamente, através de uma rotina baseada no caminho mais longo (crítico) podendo obedecer, assim, ao procedimento do PERT.

Figura 1: Representação gráfica de um número fuzzy



Fonte: Autores

### 2.3 Simulação Computacional

Outra técnica potente de planejamento e controle e pouco conhecida ou utilizada na construção civil é a simulação computacional. Tal técnica também fornece os prazos de conclusão dos projetos, atividades críticas, etc., mas com uma dinâmica diferente e com algumas vantagens. White Jr. e Ingalls (2009) consideram que a simulação é uma ferramenta para o estudo de modelos projetados, tendo em vista que se assemelha muito a pesquisas de campo, exceto pelo fato de que o sistema em observação é substituído por um modelo que pode ser tanto físico quanto computacional. Assim, a simulação envolve a criação de um modelo que imita o comportamento ou situação que está sendo estudada, possibilitando a observação e entendimentos dos resultados (WHITE JR.; INGALLS, 2009).

Nesse sentido, o modelo irá imitar a dinâmica de um canteiro de obras. Segundo Banks (1999), a simulação pode ser conceituada como sendo a imitação de uma operação de um determinado processo do mundo real. Ela envolve a geração de eventos dentro do processo que está sendo estudado e a observação de tais eventos, para que seja possível a determinação de deduções e eventuais modificações no sistema real, considerando as características operacionais do processo que está sendo estudado e representado (BANKS, 1999).

Assim, as análises de um sistema de produção podem ser desenvolvidas com base na simulação computacional de eventos discretos, como um método científico de experimentação, no qual o pesquisador desenvolve um modelo para observar as operações de um sistema como um todo, conduzindo experimentos do tipo “E se?”, gerando diferentes cenários (Long e Zhang 2014). Dessa maneira, a modelagem e a

análise da simulação computacional são realizadas para se observar o comportamento de sistemas complexos, para o desenvolvimento e experimentação de novas operações, conceitos ou sistemas antes de programa-los em situações reais (Mourtzis et al., 2014).

Destaca-se que existem diversos softwares que podem ser utilizados para esse fim. Alguns dos mais comuns desenvolvem a tal simulação de eventos discretos, onde cada evento ocorre em determinados instantes da linha do tempo, assumindo que o sistema em simulação não está sofrendo mudanças, ou seja, apenas estão ocorrendo eventos ao longo do tempo. Apesar de um canteiro de obras sofrer mudanças de layout ao longo do desenvolvimento da obra, a simulação discreta contribui com os engenheiros pelo fato de possibilitar aos profissionais a visualização do comportamento do canteiro frente às prováveis mudanças. Nesse caso os profissionais podem fazer diversos testes, sem custo ao canteiro, escolhendo qual a melhor configuração de recursos e variáveis que irá atender aos objetivos da empresa.

### 3 COMPARATIVOS

Para o estudo comparativo fez-se uso de um exemplo genérico descrito na obra de Mattos (2010). Tal exemplo é composto por oito serviços cujas durações (em dias) variam de acordo com as durações O, M e P, bem como a variância de cada atividade, como descrito na Tabela 1.

Tabela 1: Atividades, precedências, durações e variâncias do projeto exemplo

<b>Serviço</b>	<b>Precedência</b>	<b>O</b>	<b>M</b>	<b>P</b>	<b><math>\sigma^2</math></b>
<b>A</b>	-	2	6	10	1,78
<b>B</b>	A	1	3	4	0,25
<b>C</b>	B	4	8	9	0,69
<b>D</b>	-	3	3	3	0
<b>E</b>	D	5	6	8	0,25
<b>F</b>	C;E	3	7	11	1,78
<b>G</b>	-	6	11	14	1,78
<b>H</b>	F;G	3	4	9	1

Fonte: Adaptado de Mattos (2010)

Com os dados da Tabela 1 foram calculadas as durações do projeto em questão fazendo uso de cinco procedimentos diferentes: PERT com Distribuição Beta; PERT com Distribuição Gama; Fuzzy-PERT; Simulação computacional com Distribuição Beta; Simulação computacional com Distribuição Gama.

Nos procedimentos que envolveram diferentes distribuições estatísticas para o PERT e nas simulações computacionais, os resultados analisados ficaram restritos a  $E \pm 2\sigma$  com o intuito de se garantir que 95% das observações estão dentro deste intervalo, de acordo com a Distribuição Normal.

Assim, a seguir são apresentados os resultados de cada um dos procedimentos elencados e, no tópico seguinte, são feitas algumas discussões sobre os resultados junto com as considerações finais do artigo.

### 3.1 Cálculo da Duração do Projeto com o PERT (Distribuição Beta)

Para o PERT considerando o uso da Distribuição Beta, o procedimento de cálculo das durações esperadas e das variâncias obedeceram as equações 1 e 2 respectivamente, e a rotina de cálculo para se obter a duração esperada do projeto seguiu as equações 6 a 12, que nada mais são do que o procedimento tradicional do PERT/CPM e que estão de acordo com a rede da Figura 2. Os resultados dessas equações estão organizados na Tabela 2.

$$\text{Nó 1} \rightarrow t_1 = 0 \quad (6)$$

$$\text{Nó 2} \rightarrow t_2 = t_1 + E_{1-2} \quad (7)$$

$$\text{Nó 3} \rightarrow t_3 = t_1 + E_{1-3} \quad (8)$$

$$\text{Nó 4} \rightarrow t_4 = t_3 + E_{3-4} \quad (9)$$

$$\text{Nó 5} \rightarrow t_5 = \max(t_4 + E_{4-5}; t_2 + E_{2-5}) \quad (10)$$

$$\text{Nó 6} \rightarrow t_6 = \max(t_5 + E_{5-6}; t_1 + E_{1-6}) \quad (11)$$

$$\text{Nó 7} \rightarrow t_7 = t_6 + E_{6-7} \quad (12)$$

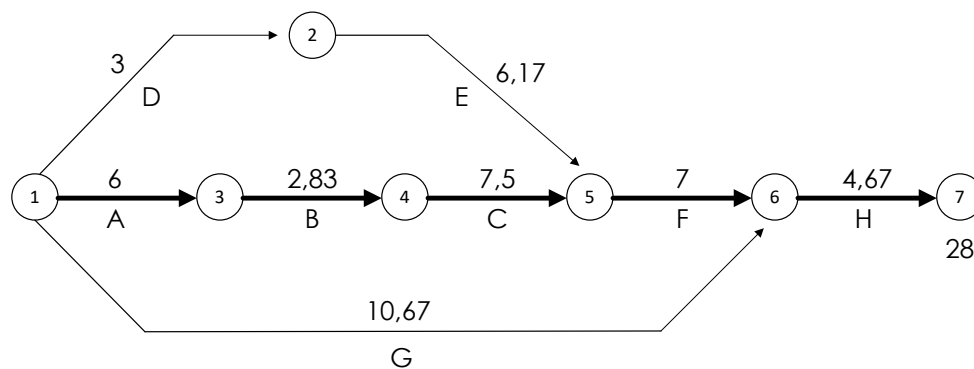
Tabela 2: Resultados do PERT com o uso da Distribuição Beta

Nó	$\sigma$	E - 2 $\sigma$	Esperada (E)	E + 2 $\sigma$
1	0	0	0	0
2	0	3	3	3
3	1,33	3,34	6	8,66
4	1,42	5,99	8,83	11,67
5	1,65	13,03	16,33	19,63
6	2,12	19,09	23,33	27,57
7	2,34	23,32	28	32,68

Fonte: Autores

Assim, de acordo com os resultados da Tabela 2, nota-se que a duração esperada é representada pelo nó 7, que é o último da rede que representa o projeto em questão, como ilustrado na Figura 2. Dessa forma, de acordo com este procedimento, a duração esperada é de 28 dias, com probabilidade de 95% de ser finalizado entre 23,32 e 32,68 dias. Além disso, como ilustrado na Figura 2, o caminho crítico é definido pelas atividades A-B-C-F-H.

Figura 2: Diagrama de rede para o projeto exemplo



Fonte: Autores

### 3.2 Cálculo da Duração do Projeto com o PERT (Distribuição Gama)

Para o PERT considerando o uso da Distribuição Gama, o procedimento de cálculo das durações esperadas e das variâncias obedeceram as equações 3 e 4 respectivamente, e a rotina de cálculo para se obter a duração esperada do projeto seguiu as equações 6 a 12. Os resultados dessas equações estão organizados na Tabela 3.



Tabela 3: Resultados do PERT com o uso da Distribuição Gama

<b>Nó</b>	<b><math>\sigma</math></b>	<b>E - 2 <math>\sigma</math></b>	<b>Esperada (E)</b>	<b>E + 2 <math>\sigma</math></b>
<b>1</b>	0	0	0	0
<b>2</b>	0	3	3	3
<b>3</b>	1,77	3,13	6,67	10,21
<b>4</b>	1,87	6,10	9,84	13,58
<b>5</b>	2,05	13,91	18,01	22,11
<b>6</b>	2,71	20,26	25,68	31,10
<b>7</b>	2,97	24,57	30,51	36,45

Fonte: Autores

Conforme os resultados da Tabela 3, a duração esperada do projeto passa a ser de 30,51 dias com probabilidade de 95% de ser finalizado entre 24,57 e 36,45 dias.

### 3.3 Cálculo da Duração do Projeto com o Fuzzy-PERT

Para o Fuzzy-PERT o procedimento de cálculo das durações também seguiu as equações 6 a 12, porém deve-se destacar que neste procedimento, para cada nó, obteve-se o chamado número ou intervalo Fuzzy, como descrito no referencial teórico.

Tabela 4: Resultados referentes ao Fuzzy-PERT

<b>Nó</b>	<b>Intervalo Fuzzy</b>		
	<b>Mínimo</b>	<b>Médio</b>	<b>Máximo</b>
<b>1</b>	0	0	0
<b>2</b>	3	3	3
<b>3</b>	2	6	10
<b>4</b>	3	9	14
<b>5</b>	8	17	23
<b>6</b>	11	24	34
<b>7</b>	14	28	43

Fonte: Autores

Conforme os resultados da Tabela 4, a duração esperada do projeto passa a ser representada pelo número fuzzy  $E = (14, 28, 43)$ .

### 3.4 Cálculo da Duração do Projeto com a Simulação (Distribuição Beta)

Para a simulação computacional, foi utilizado o software ProModel®, em cuja interface foi programado um modelo com as características e restrições descritas na Tabela 1. No entanto, para o modelo programado, para cada atividade foi atribuída uma duração estocástica que variava de acordo com a Distribuição Beta, com as variâncias e desvios padrão estabelecidos no exemplo em uso. Para os resultados desta simulação descritos na Tabela 5, foram realizadas 500 replicações, sendo que os resultados representam a média simples destas replicações.

Tabela 5: Resultados simulação com a Distribuição Beta

Nó	$\sigma$	$E - 2 \sigma$	Esperada (E)	$E + 2 \sigma$
1	0	0	0	0
2	0,15	1,74	2,04	2,34
3	1,29	3,37	5,95	8,53
4	1,37	6,27	9,01	11,75
5	1,60	14,05	17,25	20,45
6	2,10	20,22	24,42	28,62
7	2,31	23,47	28,09	32,71

Fonte: Autores

Conforme os resultados da Tabela 5, a duração esperada do projeto passa a ser de 28,09 dias com probabilidade de 95% de ser finalizado entre 23,47 e 32,71 dias.

### 3.5 Cálculo da Duração do Projeto com a Simulação (Distribuição Gama)

Para esta simulação foi utilizado o mesmo modelo do tópico anterior, porém substituíram-se as durações baseadas na Distribuição Beta pelas durações estocásticas variadas de acordo com a Distribuição Gama, com os desvios padrão estabelecidos no exemplo em uso. Para os resultados desta simulação descritos na Tabela 5, foram realizadas 500 replicações, sendo que os resultados representam a média simples destas replicações.

Tabela 6: Resultados simulação com a Distribuição Gama

Nó	$\sigma$	E - 2 $\sigma$	Esperada (E)	E + 2 $\sigma$
1	0	0	0	0
2	0,63	1,78	3,04	4,30
3	1,67	3,14	6,48	9,82
4	2,26	5,10	9,62	14,14
5	3,14	11,49	17,77	24,05
6	4,92	15,57	25,41	35,25
7	6,09	18,07	30,25	42,43

Fonte: Autores

Conforme os resultados da Tabela 6, a duração esperada do projeto passa a ser de 30,25 dias com probabilidade de 95% de ser finalizado entre 18,07 e 42,43 dias.

#### 4 DISCUSSÃO E CONSIDERAÇÕES

Neste artigo foram apresentadas cinco possibilidades para se calcular a duração de um projeto a partir do uso de tempos estocásticos. Na Tabela 7 foi feita uma comparação, em termos de porcentagem, dos resultados do PERT desenvolvido com a Distribuição Beta com as demais técnicas utilizadas.

Analisando a Tabela 7, nota-se que não houve redução da duração esperada, sendo igualada pelo Fuzzy-PERT. As demais técnicas apresentaram aumento da duração esperada, sendo que o maior incremento se deu com o PERT desenvolvido com a Distribuição Gama. Com relação às durações mínimas, houve redução significativa considerando o resultado representado pelo valor mais baixo do intervalo fuzzy no Fuzzy-PERT, com redução de 39,96%. No que diz respeito às durações máximas, o maior aumento também se deu com o Fuzzy-PERT, onde o valor mais alto do intervalo fuzzy indicou aumento de 31,58%. Já para os desvios padrão, destaca-se o aumento excessivo deste parâmetro na simulação desenvolvida com a Distribuição Gama, com 160,25% de diferença.

Tabela 7: Comparativo percentual entre os resultados das técnicas

<b>Técnica</b>	<b>Duração mínima</b>	<b>Duração esperada</b>	<b>Duração máxima</b>	<b><math>\sigma</math></b>
<b>PERT – Dist. Beta</b>	<b>23,32</b>	<b>28</b>	<b>32,68</b>	<b>2,34</b>
<b>PERT – Dist. Gama</b>	+5,36%	+8,96%	+11,53%	+26,92%
<b>Fuzzy-PERT</b>	-39,96%	-	+31,58%	-
<b>Simulação – Dist. Beta</b>	+0,64%	+0,32%	+0,09%	-1,28%
<b>Simulação – Dist. Gama</b>	-22,51%	+8,03%	+29,83%	+160,25%

Fonte: Autores

Em termos de potencial e variedade de resultados, facilidade de mudanças e análises, a simulação computacional se configura como a técnica ideal para o profissional de planejamento, apesar de demandar algum tempo para a programação do modelo inicial, especialmente quando se trata de projetos maiores. Com relação à precisão, as técnicas que utilizaram a Distribuição Gama apresentaram maior desvio padrão, sendo a simulação com a Distribuição Beta a mais precisa. Os cálculos com o Fuzzy-PERT também apresentaram resultados interessantes fazendo com que o projeto, de certa forma, assumisse valores de duração mais apertados, especialmente com relação à duração mínima. Apesar disso, esta técnica também indica um aumento no valor que representa a duração máxima. Tal diferença entre valores mínimos e máximos do intervalo fuzzy podem indicar maior nível de incerteza do projeto, o que é bastante comum nos canteiros de obras.

Por fim, apesar do tradicionalismo no setor, é interessante mostrar que o profissional de planejamento tem a seu dispor outras técnicas além daquelas usuais para o planejamento e controle das obras. Cada técnica fornece resultados mais ou menos precisos e que podem variar consideravelmente com relação às durações, aumentando ou reduzindo prazos. Assim, se encoraja a busca e o entendimento de outras técnicas que podem ser aplicadas ao planejamento e controle de obras, com o intuito de inovar e procurar resultados mais precisos e/ou próximos à realidade do canteiro de obras.

## REFERÊNCIAS

BANKS, J. Introduction to simulation. **Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference**. 1999.

FERNANDES, F.C.F.; GODINHO FILHO, M. Planejamento e controle da produção. Editora Atlas. 2009.

LONG, Q.; ZHANG, W. An integrated framework for agent based inventory–production–transportation modeling and distributed simulation of supply chains. **Information Sciences**, v. 277, p. 567-581. 2014. DOI: 10.1016/j.ins.2014.02.147

LOOTSMA, F.A. **Fuzzy logic for planning and decision making**. Springer Science; Business Media Dordrecht. 1997.

MATTOS, A.D. **Planejamento e controle de obras**. Editora Pini. 1ª Edição. 2010.

MOURTZIS, D.; DOUKAS, M.; BERNIDAKI, D. Simulation in manufacturing: review and challenges. **Procedia CIRP**, v. 25, p. 213-229. 2014, DOI: 10.1016/j.procir.2014.10.032

RENTERÍA, A.R. **Estimación de probabilidade fuzzy a partir de dados imprecisos**. Tese. PUC-Rio de Janeiro. 94f. 2006.

TAYLOR, F. W. **Princípios de administração científica**. Editora Atlas. 8ª Edição. 1991.

WHITE JR., K. P.; INGALLS, R.G. Introduction to simulation. **Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference**. 2009.