

Análise de risco em projetos de engenharia: uso do PERT/CPM com simulação

Risk analysis in engineering projects: using PERT/CPM with simulations

Walter Roberto Hernández Vergara¹

Renata Tais Teixeira²

Juliana Suemi Yamanari³

¹Graduado em Engenharia Industrial pela
Universidad Nacional de Ingeniería – UNI-PERU,
Lima, [Peru]. waltervergara@ufgd.edu.br

²Graduada em Engenharia de Produção pela Universidade
Federal da Grande Dourados – UFGD. Dourados, MS [Brasil]

³Graduada em Engenharia de Produção pela Universidade
Federal da Grande Dourados – UFGD. Dourados, MS [Brasil]

Resumo

O PERT/CPM é uma ferramenta utilizada na gestão de projetos que permite planejamento, programação e coordenação de atividades para o controle de tempo e custo. A simulação de Monte Carlo é um processo baseado na amostragem de números aleatórios que auxilia no processo de tomada de decisão sob condições de risco e incerteza. Nesta pesquisa, analisam-se as restrições existentes no setor da construção civil, tais como orçamento financeiro e tempo. Mediante esta análise, o caminho crítico foi determinado pela ferramenta do PERT/CPM, possibilitando acelerar as atividades do projeto sem exceder o investimento inicial. A simulação de Monte Carlo permitiu realizar uma análise probabilística para quantificar a sensibilidade inerente na conclusão do projeto e ter uma visão mais real do cenário futuro. O estudo foi realizado em uma empresa da construção civil que forneceu os dados para sua análise e aplicação.

Palavras-chave: Monte Carlo. Gestão de projetos. PERT/CPM. Risco e incerteza.

Abstract

PERT/CPM is a tool used in project management that allows the planning, scheduling, and coordination of activities for controlling time and cost. Monte Carlo simulation is a process based on samples of random numbers that assists in decision-making under conditions of risk and uncertainty. This study aims to analyze the restrictions in the construction sector, such as financial budgets and time. Through this analysis, the critical path is determined by the PERT/CPM tool, allowing the acceleration of project activities without exceeding the initial investment. The Monte Carlo simulation allowed carrying out a probabilistic analysis to quantify the inherent sensitivity in project completion and to have a more realistic view of future scenarios. The study was carried out at a construction company that furnished the data for its analysis and application.

Keywords: Monte Carlo. PERT / CPM. Project management. Risk and uncertainty.

1 Introdução

Um projeto na construção civil é um sistema composto por atividades sequenciais e interdependentes, ou seja, a realização de determinadas atividades dependem de etapas anteriores (Silva, 2015). O projeto é observado e analisado como uma fonte de trabalho que requer recursos e tempo para sua execução e conclusão. A gestão do projeto permite o uso de ferramentas para executar e controlar as atividades que o compõem e as melhores formas de utilização de tempo, pessoas e recursos. Este processo garante o cumprimento de todas as atividades na sua execução, desde o início até a sua finalização, dentro de prazos e metas estabelecidos no cronograma.

O gerenciamento de projetos pode ser realizado utilizando as ferramentas Program Evaluation and Review Technique – PERT/Critical Path Method – CPM, ou Método do Caminho Crítico, que são úteis para o planejamento, programação e controle das atividades envolvidas em relação aos custos e recursos utilizados, bem como a sequência de realização, determinação de caminhos críticos e análise de risco. Elas representam as atividades do projeto em uma rede, podendo ainda ser representada como um modelo em uma árvore (Humphreys, 2014). Na representação, o projeto é decomposto em atividades e subatividades. Também, são alocados os recursos humanos, materiais, estimativas para a duração total do projeto e seu orçamento e são monitorados durante a execução do projeto.

O setor da construção civil carece de um sólido entendimento sobre a importância de uma boa gestão de projetos. A maioria das empresas executa suas obras a partir do conhecimento e experiência dos seus próprios engenheiros, não utilizando, na maior parte das vezes, índices, ferramentas de gestão e normas para um melhor planejamento e controle (Borges, 2013).

A gestão de risco é realizada por meio da adoção de políticas e metodologias que permitem um melhor gerenciamento dos riscos que se apresentam no uso dos recursos materiais e humanos, de capital e tempo. Isto é, gerenciar as incertezas em relação a uma determinada atividade ou às possíveis perdas que a empresa pode sofrer devido a acidentes ou eventos e orçamentos não previstos. O risco de um processo é determinado pela incerteza de suas atividades que se traduzem em perdas ou ganhos.

Peleskei, Dorca, Munteanu e Munteanu (2015) afirmam que os processos qualitativos e quantitativos aplicados na gestão de riscos abrangem a análise e o conhecimento do sistema em estudo para a tomada de decisão com o objetivo de planejar e programar o sucesso do projeto.

Vilcapoma, Magalhaes e Dantas (2014), por sua vez, acrescentam que a gestão de risco auxilia uma boa tomada de decisão entre as alternativas apresentadas com seus riscos associados de forma a evitar mudanças no projeto final, que podem ser fatores-chave de risco, como custos excessivos, atrasos no cronograma e até cancelamento do projeto.

As ferramentas PERT/CPM permitem gerenciar um projeto como um todo. Um diagrama de redes é proposto como um modelo para ser analisado e melhorado com o objetivo de aumentar sua eficiência. O método de Monte Carlo é aplicado para determinar as incertezas que se apresentam na execução do projeto. Três cenários são identificados e analisados no projeto: o mais provável, otimista e pessimista. A análise deles demanda o conhecimento da interdependência entre as atividades e o tempo do processo que muitas vezes são difíceis de serem identificados. As informações mais confiáveis sobre a duração das atividades são condicionadas a uma função de distribuição de probabilidades, levando em conta os riscos inerentes. Como resultado, tem-se que os atrasos devem

ser reduzidos, propiciando uma melhor utilização do tempo e preservando o custo orçado.

O objetivo nesta pesquisa consiste em utilizar as ferramentas PERT/CPM a fim de otimizar a relação tempo-custo numa obra de construção civil, bem como realizar a simulação para analisar os riscos inerentes ao projeto. Como objetivo específico está a realização de uma revisão bibliográfica acerca do uso das ferramentas PERT/CPM na gestão de projetos e da simulação de Monte Carlo para analisar as incertezas do projeto, os resultados e benefícios.

2 Referencial teórico

A fundamentação desta pesquisa abrange o estudo de um projeto na construção civil, planejamento e programação, ferramentas para gestão de projetos, com ênfase na ferramenta PERT/CPM e, análise de risco, recebendo destaque o método de simulação de Monte Carlo.

De acordo com Monteiro e Santos (2010), o planejamento é definido como um conjunto de planos de ação elaborados para antecipar um objetivo almejado, usando meios eficazes para materializá-lo. A ideia é reduzir tanto os custos como os tempos de execução e as incertezas relacionadas ao escopo. Cretu, Stewart e Berends (2011) argumentam que no planejamento as previsões devem ser realizadas sobre as possíveis situações desfavoráveis e de não conformidades que possam abalar o bom andamento do projeto. Nesse sentido, a partir da identificação de atividades, podem-se propor medidas preventivas e corretivas que possam ser adotadas para minimizar os impactos nos custos e nos prazos.

Em um projeto de construção civil, o planejamento deve ser feito a partir de um levantamento dos recursos materiais e humanos necessários para a execução da obra, de modo a evitar desper-

dícios ou escassez. Além disso, deve-se elaborar o cronograma de realização das atividades, bem como seu orçamento com o objetivo de viabilizar economicamente o projeto (Taves, 2014).

O cronograma contempla o sequenciamento de todas as atividades de um projeto com as funções, ordens de execução, prazos e custos envolvidos. Assim, essas informações permitem o controle da obra e o andamento das atividades do início ao fim. Já o orçamento consiste basicamente em um exercício de previsão, em que é registrado um conjunto de serviços planejados e previstos necessários para executar uma obra, os quais influenciam no custo do empreendimento.

Nesse contexto, a utilização de ferramentas na gestão de um projeto permite aumentar a confiabilidade nos resultados obtidos. Como exemplo, o CPM e o PERT são ferramentas que identificam e caracterizam o caminho crítico que consome mais tempo, através de uma rede de atividades. Elas foram desenvolvidas por dois grupos distintos simultaneamente (1956-1958) – o CPM foi desenvolvido para projetos de construção; e o PERT foi criado por uma consultoria para projetos da Marinha dos Estados Unidos com o intuito de programar as atividades de pesquisa e desenvolvimento de um programa de mísseis chamado Polaris.

Para Humphreys (2014), dentre os principais objetivos da ferramenta PERT/CPM estão: (1) minimizar os problemas localizados de projetos (atrasos, estrangulamentos no processo e interrupções de serviços); (2) obter conhecimento antes das atividades críticas, as quais o cumprimento influencia na duração total do programa; (3) manter informada a administração quanto ao desenvolvimento de cada etapa ou atividade do projeto, possibilitando a constatação antecipada acerca dos fatores críticos que possam atrapalhar o desempenho, bem como permitir uma adequada tomada de decisão; (4) estabelecer a data em que

cada evento envolvido deverá iniciar ou concluir suas atribuições; (5) e ser um forte instrumento de planejamento, coordenação e controle.

A grande diferença entre as técnicas está na forma como o tempo é tratado. O CPM é uma ferramenta de gestão que otimiza uma sequência de atividades, concebidas para garantir a conclusão de um projeto no tempo previsto. Ela assume que as estimativas de tempo são determinísticas e podem ser utilizadas para atender cenários complexos (Luiz, 2011). Por outro lado, em um projeto existem os fatores imprevisíveis como intempéries climáticas, mão de obra, acidentes e atrasos na entrega dos materiais que podem alterar o cronograma da obra em vista das incertezas que o projeto oferece.

A ferramenta PERT considera a duração de cada atividade como uma variável aleatória relacionada com alguma distribuição de probabilidade (Luiz, 2011). O objetivo é tornar o prazo previsto para a execução das atividades mais viável, de forma que o cronograma não seja prejudicado. Ela é representada como um diagrama de rede. No diagrama é possível identificar quando uma atividade é iniciada, o tempo para a execução de cada uma, quais atividades estão sendo executadas ao mesmo tempo e a interdependência entre elas. O tempo de cada atividade é uma variável aleatória com função de distribuição de probabilidade *beta* que permite estimar o tempo de uma atividade utilizando três estimativas caracterizadas pelos tempos mais provável (o), otimista (p) e pessimista (m). Também, elas servem para calcular a probabilidade do tempo de conclusão do projeto (NASA, 2013).

Danielson e Khan (2015) destacam que a aplicação da técnica PERT fornece as seguintes informações: (1) a duração esperada do projeto e seu caminho crítico; (2) a probabilidade de concluir o projeto dentro de um prazo especificado;

e (3) a probabilidade de ser concluído a partir de uma data limite.

Na análise de risco na construção, considera-se que os fatores tempo e custo são utilizados para compreender as incertezas do projeto de forma a garantir que os recursos e os planos de ação sejam adequados para sua finalização no prazo e dentro do orçamento estabelecido. O objetivo consiste em determinar o impacto provável da incerteza inserida na execução do projeto. O risco no custo contempla a estimativa dos gastos, a análise e avaliação do risco nos componentes de custo identificados e estimados. A gestão de risco contempla duas etapas: (1) quantificação dos riscos nas variáveis identificadas (tempo e custo) e (2) gestão do projeto utilizando os dados das variáveis identificadas para sua estimação.

O risco é a possibilidade de um evento desfavorável acontecer ou a probabilidade do não cumprimento de uma expectativa colocando em dúvida a finalização de um projeto. A incerteza é a indefinição do resultado de uma situação, tendo em vista que eventos e fatores do processo em estudo não são reconhecidos e quantificáveis. Em um modelo, a incerteza é avaliada como a estimativa de custo ou probabilidade que a quantidade orçada não será ultrapassada (NASA, 2010). A diferença entre esses dois conceitos é que, ao contrário da incerteza, o risco é reconhecido e controlado.

Em consonância com as definições supra-mencionadas e para os fins desta pesquisa, estabeleceu-se um consenso sobre risco e incerteza: o risco é quando uma atividade é caracterizada com sua probabilidade de ocorrência ou o impacto esperado quando uma atividade acontece; a incerteza está relacionada com a indefinição de um plano de ação do projeto – representa a incapacidade de prever o resultado futuro de uma atividade e é caracterizada por uma distribuição de probabilidade na qual se baseia na experiência do analista e de dados históricos.

O fator risco foi avaliado quantitativamente e apresentado na estimativa do fator tempo e custo, já que em primeiro lugar, quando a estimativa do custo esperado de um projeto é realizada, pode incorrer em um erro na determinação do custo real. Em segundo lugar, a estimativa de custo deve incluir um apropriado nível de alocação de gastos futuros com o intuito de obter certo grau de confiabilidade. O objetivo é obter uma função de custo viável do projeto que represente uma função de distribuição acumulada para todas as faixas de custo do projeto.

Para Hojjati e Noudehi (2015), a modelagem é um processo que consiste em descrever e representar, com certo grau de abstração que, na maioria das vezes, acarreta uma série de simplificações sobre a organização e o funcionamento de um sistema real. Usualmente, esta descrição toma a forma de relações matemáticas ou lógicas.

Um sistema é definido como uma entidade que contém um ou mais eventos para realizar uma função, produzindo novos eventos. Segundo a NASA (2015), o modelo gerado pelo processo de modelagem é uma representação simplificada de um sistema e é elaborado para compreender, prever, bem como controlar o comportamento do sistema em determinadas condições, de forma que possa ser estudado e entendido. Assim, o modelo procura satisfazer as necessidades de mudança no ambiente no qual está inserido. Cada estado do modelo proposto pode ser modificado, e novas necessidades criadas.

Em relação à simulação, Rui-Mei (2015) define a simulação como uma ferramenta flexível e poderosa, uma vez que permite a criação de um perfil com resultados prováveis. Além disso, a partir da simulação é possível realizar a análise acerca do comportamento do sistema em situações imprevistas, não necessitando de ocorrência na prática. A simulação demanda a modelagem de um processo ou sistema.

3 Procedimentos metodológicos

A pesquisa pode ser considerada experimental, já que as variáveis relacionadas com o objeto de estudo foram manipuladas diretamente, interferindo em um problema real. É também descritiva, porque objetiva descobrir e observar fenômenos existentes, situações presentes e eventos, procurando descrevê-los, compará-los, interpretá-los e avaliá-los, com o objetivo de esclarecer situações para idealizar futuros planos e decisões (GIL, 2008).

A investigação foi desenvolvida em uma empresa do setor da construção de nome fictício “Empresa Sigma”. O problema que a organização enfrenta está relacionado ao planejamento e à visualização na coordenação e execução das atividades de um projeto. Os dados e as informações utilizados foram os da construção de uma residência do tipo sobrado.

A partir dos dados coletados, pesquisaram-se quais fases da obra poderiam ser aprimoradas, isto é, aceleradas, mensurando tempo e custo dessa aceleração. Desse modo, elaborou-se uma rede do projeto com seus respectivos eventos, considerando tempos e custos para análise e determinação de caminhos prováveis para a tomada de decisão. Após a elaboração dessa representação, realizou-se a simulação por meio do método de Monte Carlo utilizando o *software* Microsoft Excel. Assim, o tratamento dos eventos com suas respectivas funções de distribuição de probabilidade permitiu determinar os caminhos críticos, bem como a probabilidade de o cronograma atender os prazos fixados (NASA, 2015).

O procedimento adotado abrangeu sete passos associados com a avaliação do risco no tempo-custo para se obter um nível de confiabilidade na execução do projeto. A estrutura da análise da incerteza foi decomposta nas seguintes etapas ba-

seadas na teoria de análise de risco e na estimativa do custo de um projeto (NASA, 2015):

- 1) Discutir e determinar com especialistas da organização os parâmetros e níveis de tempo-custos, cronograma e riscos técnicos associados a cada uma das atividades.
- 2) Analisar cada atividade de risco.
- 3) Encontrar os valores mais prováveis, otimistas e pessimistas de cada atividade de risco e estimar a esperança que aconteça.
- 4 Determinar o tipo de função de distribuição de probabilidade e o motivo de sua utilização.
5. Estabelecer uma correlação entre os riscos identificados.
6. Utilizar um método de análise estatística confiável, por exemplo, o método de simulação de Monte Carlo, para estimar um intervalo de confiança para a estimativa de tempo-custo.
7. Desenvolver planos de ação na gestão de risco para seu controle e variabilidade no futuro.

Posteriormente, foram mensurados e quantificados os indicadores de produtividade que permitiram determinar se o desempenho avaliado foi ótimo ou indesejável na gestão do projeto. Esses indicadores apontaram a necessidade de realizar novas pesquisas em relação ao ajuste dos custos que permitiram superar as incertezas das fontes.

Normalmente, um projeto é composto por inúmeras atividades que envolvem muitas pessoas e recursos e, dificilmente um gerente de projeto pode manter o controle sobre todas as operações da obra. Atividades esquecidas e erros no planejamento podem afetar o cronograma de execução do projeto, provocando um projeto de alto custo operacional, além de clientes e gerentes insatisfeitos. O método do caminho crítico ajuda os gestores a controlar dois fatores: o tempo que demora um projeto para sua conclusão e quais são as ati-

vidades críticas ou importantes que devem ser concluídas antes do início de outras atividades dependentes. Assim, depois que uma rede é construída, uma análise sistemática classifica as atividades em críticas e não críticas. Os seguintes passos foram seguidos para construir o modelo do projeto:

- 1) Realização de uma lista de todas as atividades do projeto.
- 2) Determinação do tempo de duração de cada atividade desde o início até a sua conclusão.
- 3) Determinação das relações de precedência das atividades.

Na gestão de projetos, o caminho mais crítico é uma sequência de atividades “críticas” que determina o menor tempo possível para completar o projeto. Qualquer atraso de uma atividade no caminho crítico impacta diretamente na data de conclusão do projeto planejado. Um projeto pode ter vários caminhos paralelos ou críticos.

Para determinar o caminho crítico de um projeto, deve-se definir a primeira data que uma atividade pode ser iniciada (PDI), considerando as atividades precedentes, e a última data que uma atividade pode ser finalizada sem comprometer as demais (UDI), isto é, o tempo limite para realização de um evento sem atrasar o projeto. Ambas são calculadas por meio das equações 1 e 2 (Cukierman, 2009):

$$PDI = \max \{Tarde_posterior + Duração\} \quad (1)$$

$$UDI = \min \{cedo_posterior - Duração\} \quad (2)$$

As folgas representam o tempo que uma atividade pode atrasar sem comprometer a duração total do projeto. Elas resultam da diferença entre o tempo mais tarde e o mais cedo de uma atividade.

A ferramenta PERT é uma abordagem que adiciona o fator incerteza no tempo e o custo da atividade. As estimativas necessárias para sua aplicação são:

- (m) estimativa mais provável para duração de uma atividade, em que se assume que a atividade pode ser concluída em circunstâncias normais;
- (o) estimativa otimista sobre a duração de uma atividade, na qual se assume que na realização da atividade tudo é perfeito;
- (p) estimativa pessimista acerca da duração de uma atividade, nesta assume-se o pior cenário.

Na abordagem da técnica PERT, considera-se que as estimativas de duração das atividades são determinadas por um especialista que tem um amplo conhecimento de suas características. Também, leva-se em conta que a duração de cada estimativa segue uma distribuição aleatória que varia entre os valores extremos, isto é, entre o e p, e eles seguem uma distribuição de probabilidade beta. Uma função de distribuição típica beta e a sua aproximação triangular é mostrado na Figura 1. Observa-se que não necessariamente deve existir uma simetria entre a diferença entre m e p e, o e m.

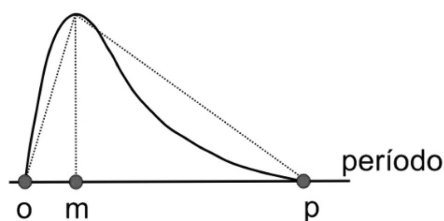


Figura 1: Função de distribuição triangular aproximada da função de distribuição beta

Fonte: Os autores.

O tempo de espera DE segue uma distribuição beta e pode ser aproximado pela média ponderada, como mostra a fórmula a seguir:

$$DE = \frac{o + 4m + p}{6} \quad (3)$$

O desvio-padrão da duração de uma atividade serve como medida de risco e pode ser calculado utilizando a filosofia de um intervalo de três desvios-padrão.

$$\sigma^2 = \left(\frac{p - o}{6}\right)^2 \quad (4)$$

Esse cálculo é inspirado no intervalo três sigmas que se encontra numa distribuição normal. A distribuição três sigmas para a distribuição normal é um intervalo entre a média mais ou menos e três desvios-padrão, afirmando que 99,73% das observações se encontram nesse intervalo. Assim, o cálculo do desvio-padrão com base no intervalo da distribuição normal, apresentado na Equação 4, indica que a técnica PERT assume que todas as observações relacionadas com o tempo de duração das atividades ficam dentro do intervalo [o, p].

Determinado o caminho crítico da rede, é possível obter a variância dos tempos de cada atividade que devem ser somadas ao longo do caminho crítico (Hopkinson, 2011).

Alguns especialistas não aceitam o uso da curva de distribuição normal para estimar os erros. Em todo caso, vale ressaltar que as estimativas são muitas vezes mais otimistas que pessimistas. Essa tendência pode ser compensada pela utilização de uma curva de distribuição assimétrica (Lepadatu, 2009). Tal distribuição pode ser derivada do teorema central do limite que considera que, dada uma função de distribuição com uma média e variância, a função da distribuição amostral da média se aproxima de uma função de distribuição normal quando o tamanho da amostra é grande.

Depois de descobertos os tempos esperados das atividades e suas respectivas variâncias, as-

sume-se que a modelagem do sistema segue uma distribuição normal pelas interações que foram realizadas. Assim, pode-se calcular a probabilidade de completar o projeto na data fixada (Hulett, 2011). Essa probabilidade pode ser calculada pela Equação 5 (Hopkinson, 2011):

$$Z = \frac{F - T}{\sqrt{\sum \sigma^2_{cc}}} \quad (5)$$

Em que,

$\sum \sigma^2_{cc}$: soma das variâncias ao longo do caminho crítico.

O valor da probabilidade de terminar o projeto em uma data determinada (F) considera a magnitude do tempo esperado, o valor Z que é encontrado na tabela de distribuição normal e a soma das variâncias dos tempos das atividades que compõem o caminho crítico.

A simulação de Monte Carlo é uma ferramenta estatística baseada na teoria amostral que permite visualizar um conjunto de resultados possíveis no planejamento e execução de um projeto e avaliar o impacto do risco de forma a realizar a melhor tomada de decisão. Ela foi aplicada ao modelo de controle de tempos e custos do projeto na construção. A geração de números aleatórios foi condicionada para a função de distribuição triangular.

A simulação de Monte Carlo realiza a análise de risco a partir dos seguintes procedimentos: (1) identificar as variáveis de risco e configurar um modelo; (2) especificar a função de distribuição de probabilidade adequada para cada variável de risco selecionada; (3) realizar simulações, isto é, atribuir um valor aleatório para cada função de distribuição de probabilidade por um método de amostragem; (4) para cada iteração uma taxa de aproveitamento ou de benefício é calculada; e (5)

repetir o processo (Passo 2-4) para uma quantidade relativamente grande de iterações. Durante a simulação são gerados números aleatórios para cada variável de risco segundo a distribuição de probabilidade especificada.

Dependendo do número de incertezas e limites especificados, a simulação de Monte Carlo pode envolver a geração de uma grande quantidade de amostras de números aleatórios com o objetivo de aproximar os cálculos aos dados reais.

4 Resultados e discussão

Um projeto de construção civil envolve riscos e incertezas e por meio da simulação é possível avaliar os riscos no plano de execução, de forma que os benefícios e recursos sejam aprimorados e a obra seja terminada dentro do prazo estabelecido.

O cronograma físico-financeiro disponibilizado pela Empresa Sigma trata-se de um projeto que foi iniciado no ano de 2016. As informações obtidas possibilitaram identificar o caminho crítico, realizar projeções sobre a duração das atividades, mensurar custos, bem como simular resultados prováveis.

A etapa inicial foi identificar as variáveis envolvidas no processo, sendo estas representadas no cronograma de execução. As atividades dependentes também foram estabelecidas no cronograma permitindo que o tempo estimado para cada atividade fosse determinado. As informações são apresentadas no Quadro 1.

Uma das estratégias utilizadas na execução da obra foi a superposição de atividades com o objetivo de evitar o aumento de tempo e custo da obra. De acordo com a lista de atividades, o tempo para a construção do sobrado será de 66 semanas.

A elaboração do diagrama de redes permitiu a identificação das atividades, dos nós que repre-

| Atividade | Descrição da Atividade | Dependências | Duração |
|-----------|---|--------------|------------|
| A | Canteiro | - | 2 Semanas |
| B | Fundação | A | 4 Semanas |
| C | Estrutura – Pavimento Térreo | B | 4 Semanas |
| D | Alvenaria – Térreo | B | 3 Semanas |
| E | Estrutura – Pavimento Superior | B | 3 Semanas |
| F | Alvenaria – Pavimento Superior | E | 3 Semanas |
| G | Cobertura | E | 4 Semanas |
| H | Instalação Hidráulica/Esgoto e Águas Pluviais | B | 2 Semanas |
| I | Hidráulica/ Água Fria | H | 3 Semanas |
| J | Instalação Elétrica | D | 6 Semanas |
| K | Paredes e Tetos | D,F,G | 12 Semanas |
| L | Pisos | C, E | 3 Semanas |
| M | Acabamento Paredes | K | 3 Semanas |
| N | Acabamento Pisos | L | 2 Semanas |
| O | Louças e Metais | M,N | 2 Semanas |
| P | Pintura | M | 4 Semanas |
| Q | Vidros | D, F | 2 Semanas |
| R | Paisagismo | M | 2 Semanas |
| S | Limpeza | M,N,P,Q | 2 Semanas |

Quadro 1: Lista de atividades do projeto

Fonte: Os autores.

sentam as atividades e os arcos e as relações de dependências. Ao lado de cada nó é informado o tempo (em semanas) para cada etapa. O caminho de execução é interpretado como a distância que existe entre o nó-início e o nó-término. A determinação do comprimento deste caminho corresponde à soma das durações das atividades que pertencem ao caminho.

A Figura 2 ilustra o caminho crítico para a construção do sobrado. O caminho crítico corresponde ao caminho que tem o maior comprimento, logo todos os outros apresentam um tempo de duração inferior. O tempo requerido para a conclusão do projeto é de 34 semanas. Este projeto apresenta somente uma solução:

INÍCIO→A→B→E→G→K→M→P→S→TÉRMINO.

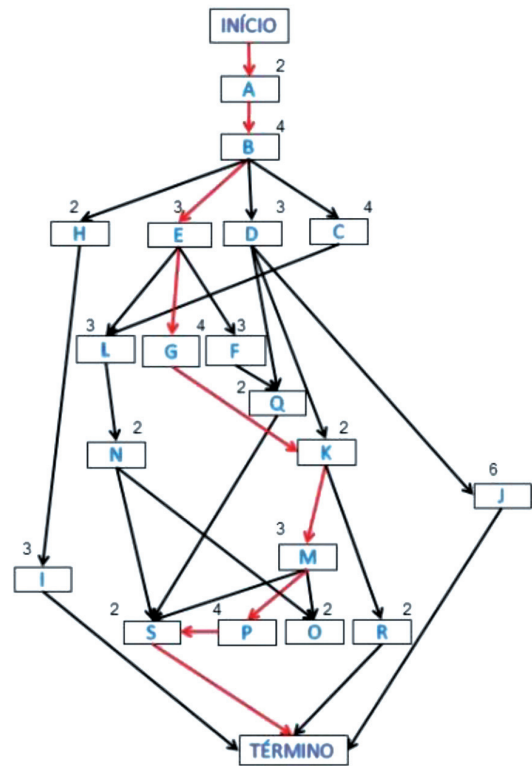


Figura 2: Caminhos críticos

Fonte: Os autores.

Para a programação das atividades no método CPM foi necessário determinar o tempo de início e término das atividades e suas folgas. A PDI (primeira data de início) indica a primeira chance que a atividade tem de iniciar a sua execução e a UDI (última data de início) indica o último momento disponível para iniciar a atividade. Os resultados estão expostos no Quadro 2.

Em um projeto de construção civil, todo o cronograma está sujeito a incertezas sobre o tempo de duração de cada atividade. Assim, a metodologia PERT probabilístico foi utilizada no projeto para determinar a média (μ) e a variância (σ^2) das atividades a partir de três estimativas, conforme ilustradas no Quadro 3.

A média resultante da duração das etapas é o tempo previsto no cronograma. A variância obtida assume que o tempo das atividades no caminho crítico é dependente estatisticamente. Na aplica-

| Atividades | Duração (Semanas) | PDI (Semanas) | UDI (Semanas) | Folgas | Caminho Crítico |
|------------|-------------------|---------------|---------------|--------|-----------------|
| Início | 0 | 0 | 0 | - | - |
| A | 2 | 0 | 0 | 0 | 2 |
| B | 4 | 2 | 2 | 0 | 4 |
| C | 4 | 6 | 23 | 17 | - |
| D | 3 | 6 | 10 | 4 | - |
| E | 3 | 6 | 6 | 0 | 3 |
| F | 3 | 9 | 10 | 1 | - |
| G | 4 | 9 | 9 | 0 | 4 |
| H | 2 | 6 | 29 | 23 | - |
| I | 3 | 8 | 31 | 23 | - |
| J | 6 | 9 | 28 | 19 | - |
| K | 12 | 13 | 13 | 0 | 12 |
| L | 3 | 10 | 27 | 17 | - |
| M | 3 | 25 | 25 | 0 | 3 |
| N | 2 | 13 | 30 | 17 | - |
| O | 2 | 28 | 32 | 4 | - |
| P | 4 | 28 | 28 | 0 | 4 |
| Q | 2 | 12 | 30 | 18 | - |
| R | 2 | 25 | 32 | 7 | - |
| S | 2 | 32 | 32 | 0 | 2 |
| Término | 0 | 34 | 34 | 0 | 34 |

Quadro 2: Tempos de início e término das atividades

Fonte: Os autores.

| Atividade | Tempos (semanas) | | | Média $\mu = \frac{o + 4m + p}{6}$ | Variância $\sigma^2 = \left(\frac{p - o}{6}\right)^2$ |
|-----------|------------------|--------------|---------------|---------------------------------------|--|
| | Pessimistas (p) | Provável (m) | Otimistas (o) | | |
| A | 2,1 | 2 | 1,7 | 1,89 | 0,0040 |
| B | 4,2 | 4 | 3,5 | 3,85 | 0,0165 |
| C | 4,2 | 4 | 3,5 | 3,9 | 0,0165 |
| D | 3,2 | 3 | 2,6 | 2,90 | 0,0093 |
| E | 3,1 | 3 | 2,6 | 2,85 | 0,0090 |
| F | 3,2 | 3 | 2,6 | 2,88 | 0,0092 |
| G | 4,3 | 4 | 3,5 | 3,90 | 0,0169 |
| H | 2,1 | 2 | 1,7 | 1,93 | 0,0041 |
| I | 3,2 | 3 | 2,6 | 2,9 | 0,0093 |
| J | 6,5 | 6 | 5,3 | 5,9 | 0,0385 |
| K | 12,9 | 12 | 10,6 | 11,75 | 0,1534 |
| L | 3,2 | 3 | 2,6 | 2,94 | 0,0096 |
| M | 3,2 | 3 | 2,6 | 2,92 | 0,0095 |
| N | 2,1 | 2 | 1,7 | 1,94 | 0,0042 |
| O | 2,1 | 2 | 1,7 | 1,89 | 0,0040 |
| P | 4,3 | 4 | 3,6 | 3,95 | 0,0173 |
| Q | 2,1 | 2 | 1,7 | 1,89 | 0,0040 |
| R | 2,2 | 2 | 1,8 | 1,96 | 0,0043 |
| S | 2,0 | 2 | 1,7 | 1,9 | 0,0038 |

Quadro 3: Valores esperados e variância das atividades

Fonte: Os autores.

ção da ferramenta PERT, uma atividade acelerada está relacionada com a adoção de políticas para reduzir o tempo de atividade programado, acarretando custos adicionais fora do orçamento.

O *trade-off* tempo-custo abordado pelo método CPM permite calcular quanto custa acelerar cada atividade para que o tempo do projeto seja menor. Esse *trade-off* acelera um projeto que está diretamente associado a um custo elevado (horas extras, adicional de maquinários, dentre outros).

A fim de identificar qual seria o impacto no custo do projeto ao acelerar atividades, elaborou-se o Quadro 4. No tratamento de dados, o período de conclusão da obra e o custo adicional desta semana foram reduzidos.

O Quadro 5 mostra que uma redução de 15 semanas ocasiona um aumento de R\$ 11.558,94 ao custo inicial de R\$ 133.243,88. Aumento que pode ser considerado um prejuízo momentâneo,

pois a entrega antecipada de uma obra num cenário de inúmeros atrasos como ocorre na construção civil, possibilita à empresa construir uma imagem sólida no mercado, gerando um número maior de clientes e, conseqüentemente, aumento nos lucros a longo prazo.

Na simulação de Monte Carlo foram utilizadas as distribuições de probabilidades que geram eventos aleatórios a partir do desempenho real do sistema. Segundo o cronograma, o prazo previsto para o término das obras é 66 semanas; porém, as

| Atividade | Tempo (Semana) | | Custo (R\$) | | Redução máxima de tempo (semanas) | Custo extra por semana Acelerada (R\$) |
|-----------|----------------|-----------|-------------|------------|-----------------------------------|--|
| | Normal | Acelerado | Normal | Acelerado | | |
| A | 2 | 2 | 5.153,03 | 5.153,03 | 0 | - |
| B | 4 | 3 | 15.459,09 | 17.005,00 | 1,5 | 1.545,91 |
| C | 4 | 3,5 | 14.946,11 | 16.440,72 | 0,5 | 1.494,61 |
| D | 3 | 3 | 5.030,38 | 5.030,38 | 0 | |
| E | 3 | 3,5 | 9.041,80 | 10.398,07 | 0,5 | 1.356,27 |
| F | 3 | 3 | 3.071,30 | 3.071,30 | 0 | |
| G | 4 | 2 | 14.297,43 | 15.441,22 | 2 | 1.143,79 |
| H | 2 | 1,5 | 4.633,42 | 4.957,76 | 0,5 | 324,34 |
| I | 3 | 1,5 | 3.163,97 | 3.353,81 | 1,5 | 189,84 |
| J | 6 | 4 | 13.688,46 | 15.057,31 | 2 | 1.368,85 |
| K | 12 | 10 | 11.100,36 | 11.988,39 | 2 | 888,03 |
| L | 3 | 2,5 | 5.977,12 | 6.395,52 | 0,5 | 418,40 |
| M | 3 | 2 | 5.909,60 | 6.677,85 | 1 | 768,25 |
| N | 2 | 2 | 3.939,74 | 4.254,91 | 0 | 315,18 |
| O | 2 | 2 | 7.029,57 | 7.802,82 | 0 | 773,25 |
| P | 4 | 3 | 6.500,03 | 7.085,04 | 1 | 585,00 |
| Q | 2 | 1,5 | 1.720,99 | 1.927,50 | 0,5 | 206,52 |
| R | 2 | 1 | 1.548,89 | 1.657,31 | 1 | 108,42 |
| S | 2 | 1 | 1.032,59 | 1.104,87 | 1 | 72,28 |
| Total | | | 133.243,88 | 144.802,82 | 15 | |

Quadro 4: Trade-off da relação tempo x custo

Fonte: Os autores.

análises revelaram que o projeto pode ser concluído em 34 semanas, isto é, houve uma redução de 32 semanas.

A simulação foi realizada de duas maneiras: na primeira simulação, foram executadas 5.000 iterações e foram consideradas as médias dos tempos das atividades que pertencem ao caminho crítico; na segunda, foram utilizados 1.000 números aleatórios, depois 5.000 e 10.000 e foram considerados a soma das médias e o total do desvio-padrão de todas as atividades que compõem o caminho crítico. O objetivo foi avaliar o erro tanto na média do tempo utilizado como no desvio na execução da obra. Os resultados mostraram que não existe diferença entre ambas as alternativas e que conforme aumenta o número de iterações o erro na média e no desvio-padrão diminui. Assim, com 10.000 iterações o erro na média e no desvio-

padrão em relação à primeira forma de avaliação foi 0,0167% e 0,5071%, respectivamente.

Na simulação, obtiveram-se o tempo em que o projeto será executado, os caminhos críticos e o erro da simulação.

A função utilizada para o cálculo da duração das atividades é a INV.NORM do *software* Excel. Ela retorna o inverso da distribuição cumulativa normal. Para as probabilidades foram gerados números aleatórios. Logo, determinou-se o PDI (cedo) a partir da soma da duração da atividade atual e da primeira data de início. O inverso se aplicou ao cálculo do UDI (tarde) que corresponde à subtração da duração da última data posterior e a duração da atividade. O Quadro 5 ilustra parte dos resultados da simulação de Monte Carlo.

Após todas as atividades serem calculadas, a média das iterações é retornada, bastando somen-

| INÍCIO | Cedo | Real | Simulação | Erro | Caminho Crítico |
|--------|-------------|------|-----------|------|-----------------|
| A | Tarde | | | | |
| | Duração | 2 | 1,93 | 7% | 1,93 |
| | Cedo | | 0,00 | | |
| | Tarde | | 0,00 | | |
| | Folga total | | 0,0000 | | |
| B | Duração | 4 | 3,93 | 7% | 3,93 |
| | Cedo | | 1,93 | | |
| | Tarde | | 1,93 | | |
| | Folga total | | 0,00 | | |
| C | Duração | 4 | 3,93 | 7% | |
| | Cedo | | 5,86 | | |
| | Tarde | | 22,77 | | |
| | Folga total | | 16,91 | | |
| D | Duração | 3 | 2,93 | 7% | |
| | Cedo | | 5,86 | | |
| | Tarde | | 9,81 | | |
| | Folga total | | 3,96 | | |

$$\text{Erro} = \text{Real} - \text{Simulação}$$

Duração da atividade Gerada a partir de 1.000 Interações

$$\text{PDI} = \text{Cedo Anterior} + \text{Duração}$$

$$\text{UDI} = \text{Duração da atividade Posterior} - \text{Duração Atual}$$

Quadro 5: Simulação de Monte Carlo

Fonte: Os autores.

te encontrar o erro que corresponde à subtração da duração real pela simulada. As atividades com folgas iguais a zero correspondem ao caminho crítico. O Quadro 6 mostra o resultado obtido da simulação.

A partir dos resultados obtidos com a simulação de Monte Carlo, observou-se que com uma probabilidade de 99% o projeto pode ser concluído na semana 33,97 ou em 34 semanas, conforme o caminho crítico. Com este recurso o gestor é capaz de alterar os dados do problema quantas vezes forem necessárias, executando o método PERT novamente.

5 Considerações finais

Neste trabalho, apresentou-se uma abordagem para a gestão na construção civil. A análise de risco foi aplicada como um processo sistemático que procura associar valores numéricos aos riscos, a partir de uma função de distribuição, em

que o planejamento e a confiabilidade na execução de um processo estão em evidência.

Na pesquisa, questões importantes foram respondidas sobre a natureza e importância nos resultados obtidos. A análise de risco foi fundamental para responder esses questionamentos, já que aumentou a credibilidade do projeto, fornecendo uma representação imparcial das relações entre a incerteza nos resultados da análise.

As atividades de cada processo foram estudadas e a ferramenta PERT/CPM foi aplicada, possibilitando encontrar o caminho crítico da rede, bem como as folgas existentes em cada etapa. Entre as principais vantagens de utilizar a metodologia está o apontamento das interdependências e as sequências lógicas entre as atividades e a apresentação da lógica no planejamento do projeto mediante uma rede, que é valorada em função do tempo, depois otimizada e, finalmente, representada em um calendário. Esta ferramenta incorporou as características das atividades determinantes para a execução do projeto e sua probabilidade estimada.

| INÍCIO | Cedo | Real | Simulação | Erro | Caminho Crítico | INÍCIO | Cedo | Real | Simulação | Erro | Caminho Crítico |
|--------|-------------|------|-----------|------|-----------------|--------|-------------|------|-----------|------|-----------------|
| | Tarde | | | | | | Tarde | | | | |
| A | Duração | 2 | 1,99 | 1% | 1,99 | K | Duração | 12 | 11,99 | 1% | 11,99 |
| | Cedo | | 0,00 | | | | Cedo | | 12,98 | | |
| | Tarde | | 0,00 | | | | Tarde | | 12,99 | | |
| | Folga total | | 0,0000 | | | | Folga total | | 0,00 | | |
| B | Duração | 4 | 3,99 | 1% | 3,99 | L | Duração | 3 | 2,99 | 1% | |
| | Cedo | | 1,99 | | | | Cedo | | 9,97 | | |
| | Tarde | | 1,99 | | | | Tarde | | 26,99 | | |
| | Folga total | | 0,00 | | | | Folga total | | 17,02 | | |
| C | Duração | 4 | 3,99 | 1% | | M | Duração | 3 | 2,99 | 1% | 2,99 |
| | Cedo | | 5,98 | | | | Cedo | | 24,97 | | |
| | Tarde | | 23,00 | | | | Tarde | | 24,98 | | |
| | Folga total | | 17,02 | | | | Folga total | | 0,00 | | |
| D | Duração | 3 | 2,99 | 1% | | N | Duração | 2 | 1,99 | 1% | |
| | Cedo | | 5,98 | | | | Cedo | | 12,97 | | |
| | Tarde | | 9,99 | | | | Tarde | | 29,99 | | |
| | Folga total | | 4,01 | | | | Folga total | | 17,02 | | |
| E | Duração | 3 | 2,99 | 1% | 2,99 | O | Duração | 2 | 1,99 | 1% | |
| | Cedo | | 5,98 | | | | Cedo | | 27,97 | | |
| | Tarde | | 6,00 | | | | Tarde | | 31,98 | | |
| | Folga total | | 0,02 | | | | Folga total | | 4,01 | | |
| F | Duração | 3 | 2,99 | 1% | | P | Duração | 4 | 3,99 | 1% | 3,99 |
| | Cedo | | 8,97 | | | | Cedo | | 27,97 | | |
| | Tarde | | 9,99 | | | | Tarde | | 27,99 | | |
| | Folga total | | 1,02 | | | | Folga total | | 0,02 | | |
| G | Duração | 4 | 3,99 | 1% | 3,99 | Q | Duração | 2 | 1,99 | 1% | |
| | Cedo | | 8,97 | | | | Cedo | | 12,03 | | |
| | Tarde | | 8,99 | | | | Tarde | | 29,99 | | |
| | Folga total | | 0,02 | | | | Folga total | | 17,96 | | |
| H | Duração | 2 | 1,99 | 1% | | R | Duração | 2 | 1,99 | 1% | |
| | Cedo | | 5,98 | | | | Cedo | | 27,97 | | |
| | Tarde | | 28,99 | | | | Tarde | | 31,98 | | |
| | Folga total | | 23,00 | | | | Folga total | | 4,01 | | |
| I | Duração | 3 | 2,99 | 1% | | S | Duração | 2 | 1,99 | 1% | 1,99 |
| | Cedo | | 7,97 | | | | Cedo | | 31,97 | | |
| | Tarde | | 30,98 | | | | Tarde | | 31,98 | | |
| | Folga total | | 23,00 | | | | Folga total | | 0,01 | | |
| J | Duração | 6 | 5,99 | 1% | | FIM | Cedo | | 33,97 | | |
| | Cedo | | 8,97 | | | | Tarde | | 33,97 | | |
| | Tarde | | 27,98 | | | | Folga total | | 0,00 | | |
| | Folga total | | 19,00 | | | | | | | | |

Quadro 6: Resultado da simulação do projeto

Fonte: Os autores.

Por intermédio do diagrama de redes foi possível otimizar o tempo de duração do projeto, reduzindo para 34 semanas por meio da realização de etapas independentes simultaneamente, não obstante uma diminuição no cronograma geraria um aumento de R\$ 11.558,94 – valor muito atrativo quando se busca consolidação no mercado. A simulação de Monte Carlo determinou que a probabilidade de terminar a obra em 34 semanas foi de 99%.

Analisando-se os resultados, foi possível observar a sinergia entre essas ferramentas de gestão. A simulação de Monte Carlo que trata com a incerteza também foi extremamente útil para solucionar o problema com grande número de atividades paralelas e interdependentes. A grande vantagem do PERT/CPM verificada foi a possibilidade de compreender as fases do projeto, o sequenciamento das atividades, servindo como guia para verificação e controle das fases.

Como sugestão para trabalhos futuros, indica-se o acompanhamento e controle financeiro de um projeto. Isto é, acompanhar a evolução das atividades, estudando os desvios entre os custos orçados e reais diretos e indiretos dos setores envolvidos, o que permitiria observar, analisar e replanejar o projeto a partir dos desvios entre os custos e os períodos das atividades.

Por fim, conclui-se que os projetos podem ser mais bem-sucedidos quando são tratados com uma metodologia consistente que analisa e representa suas atividades utilizando estimativas de tempo e custo e são gerenciadas pela análise de risco.

Referências

- Borges, J. F. B. (2013). Gestão de projetos na construção civil. *Especialize, Goiânia*, 1(5), 2-8.
- Cretu, O., Stewart, R. & Berends, T. (2011). *Risk management for design and construction*. Haboken: John Wiley & Sons.
- Cukierman, Z. S. (2009). *O Modelo Pert/CPM aplicado a gerenciamento de projetos*, LTC – Livros técnicos científicos.
- Danielson, C. & Khan, H. (2015). *Risk Analysis of project time and cost through Monte Carlo Method*, Tese de doutorado, Stockholm, Sweden.
- Gil, A. C. (2008). *Métodos e técnicas de pesquisa social*. 6a ed. São Paulo: Atlas.
- Hojjati, S. N. & Noudehi, N. R. (2015). The use of Monte Carlo simulation in quantitative risk assessment of IT projects. *International Journal of Advanced Networking and Applications*, 7(1), 2616-2625.
- Hopkinson, M. (2011). Monte Carlo Schedule Risk Analysis: a process for developing rational and realistic risk model. *Risk Management Capability*, 1-13.
- Hulett, D. T. (2011). *Integrated cost and schedule risk analysis*. Los Angeles: Hulett & Associates.
- Humphreys, G. C. (2014). *Project management using earned value* (3a ed.). USA: Humphreys & Associates.
- Lepadatu, L. (2009). Risk determination in projects: the advantages and disadvantages of stochastic methods. *Acta Universitatis Danubius. Economica*, 5(1).
- Luiz, E. L. A. (2011). *Otimização da relação tempo-custo na construção civil: um estudo de caso*. Ribeirão Preto: USP.
- Monteiro, A. S. & Santos, R. C. A. (2010). *Planejamento e controle na construção civil, utilizando alvenaria estrutural*. Belém: UNAMA.
- National Aeronautics and Space Administration. (2010). *Risk-Informed Decision Making Handbook*, Version 1.
- National Aeronautics and Space Administration. (2013). *Analytic Method for Probabilistic Cost and Schedule Risk Analysis*, Final Report.
- National Aeronautics and Space Administration. (2015). *Cost Estimating Handbook*, Version 4.0.
- Peleskei, C. A., Dorca, V., Munteanu, R. A. & Munteanu, A. (2015). Risk consideration and cost estimation in construction projects using Monte Carlo simulation. *Management*, 10(2), 163-176.
- Rui-Mei, L. (2015). Properties of Monte Carlo and its application to risk management. *International Journal of u- and e- Service*, 8(9), 381-390.
- Silva, J. B. V. (2015). *Planejamento e gerenciamento de obras*. Recuperado em 11 de março, 2015, de http://www.ecivilnet.com/artigos/planejamento_e_gerenciamento_de_obras.htm
- Taves, G. G. (2014). *Engenharia de custos aplicada à construção civil*. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Vilcapoma, A. A. I., Magalhaes, M. L. de & Dantas, S. L. M. (2014). Uso da simulação de Monte Carlo em projetos de construção de rodovias no norte fluminense. *XVII Simpósio de Pesquisa Operacional e Logística da Marinha*, 1(1), 872-882.

Recebido em 27 set. 2016 / aprovado em 6 dez. 2016

Para referenciar este texto

VERGARA, W. R. H.; TEIXEIRA, R. T.; YAMANARI, J. S. Análise de risco em projetos de engenharia: uso do PERT/CPM com simulação. *Exacta – EP*, São Paulo, v. 15, n. 1, p. 75-88, 2016.