



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

PAULO ESTÊVÃO COSTA DELFINO DOS SANTOS

**METODOLOGIA PARA GERENCIAMENTO DAS INCERTEZAS
DO CRONOGRAMA DO PROJETO POR INDICADORES DE
SENSIBILIDADE**

Recife
2023

PAULO ESTÊVÃO COSTA DELFINO DOS SANTOS

**METODOLOGIA PARA GERENCIAMENTO DAS
INCERTEZAS DO CRONOGRAMA DO PROJETO POR
INDICADORES DE SENSIBILIDADE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Produção da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Produção.

Orientador (a): Luciana Hazin Alencar

Recife
2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Santos, Paulo Estêvão Costa Delfino dos.

Metodologia para gerenciamento das incertezas do cronograma do projeto por indicadores de sensibilidade / Paulo Estêvão Costa Delfino dos Santos. - Recife, 2023.

68 p. : il., tab.

Orientador(a): Luciana Hazin Alencar

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia de Produção - Bacharelado, 2023.

Inclui referências, apêndices.

1. indicadores de sensibilidade. 2. simulação Monte Carlo. 3. tomada de decisão. 4. gerenciamento do cronograma em projetos. 5. incertezas. I. Alencar, Luciana Hazin. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

PAULO ESTÊVÃO COSTA DELFINO DOS SANTOS

**METODOLOGIA PARA GERENCIAMENTO DAS INCERTEZAS DO
CRONOGRAMA DO PROJETO POR INDICADORES DE
SENSIBILIDADE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Produção da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Produção.

Aprovado em: 26/09/2023

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Luciana Hazin Alencar (Orientador)

Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Raphael Harry Frederico Ribeiro Kramer (Examinador Interno)

Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Simone Maria Da Silva Lima (Examinador Interno)

Universidade Federal de Pernambuco

RESUMO

Incrementar uma modelagem para o tratamento das incertezas na duração das atividades é um fator de sucesso para as etapas de planejamento e gerenciamento do cronograma em projetos. Este estudo tem como objetivo propor uma metodologia para Gerenciamento das Incertezas do Cronograma do Projeto por Indicadores de Sensibilidade por meio de um algoritmo de busca em profundidade para realização da transformação dos dados gerados pela aplicação da simulação de Monte Carlo em insights direcionados que auxiliarão no processo de tomada de decisão na etapa do controle do cronograma. Como exemplificação, a metodologia proposta foi aplicada a uma rede de projetos com e sem mapeamento dos riscos associados às atividades, se mostrando eficiente no fornecimento de informações para estabelecimento de um plano de ação contra impactos que possam gerar atrasos na duração total do projeto. Como ferramenta auxiliar foi utilizado a linguagem de programação Python como forma de garantir a viabilidade econômica da aplicação.

Palavras-chave: indicadores de sensibilidade; simulação Monte Carlo; tomada de decisão; gerenciamento do cronograma em projetos; incertezas.

ABSTRACT

Improve modeling to handling uncertainties in activities duration is a successful factor for the planning and schedule management stages on projects. This study proposes an approach for Schedule Project Uncertainty Management through Sensitivity Index through a depth-first search algorithm to transform data generated by Monte Carlo simulation into analytics-driven insights that will assist in the decision-making process during schedule control. As an illustration, the proposed approach was applied to a project network with and without risk mapping associated with activities, demonstrating its effectiveness in providing information for establishing an action plan against impacts that could lead to delays in the overall project duration. Python programming language was used as an auxiliary tool to ensure the economic feasibility of the application.

Keywords: sensitivity index; Monte Carlo simulation; decision-making process; project schedule management; uncertainties.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01	Mapa de processos para desenvolvimento e planejamento do cronograma	18
Figura 02	Passos para uma análise de riscos do cronograma do projeto	23
Figura 03	Fluxograma para aplicação da metodologia proposta	36
Figura 04	Diagrama de redes do projeto	43
Figura 05	Histograma edt para estimação da duração total do projeto	49
Figura 06	Criticidade das atividades do projeto	51
Figura 07	Significância das atividades do projeto	52
Figura 08	Sensibilidade das atividades do projeto	52
Figura 09	Crucialidade das atividades do projeto	53
Figura 10	Diagrama de redes do projeto com riscos integrados	55
Figura 11	Histograma edt para estimação da duração total do projeto com riscos	55
Figura 12	Criticidade das atividades com riscos associados	56
Figura 13	Significância das atividades com riscos associados	57
Figura 14	Sensibilidade das atividades com riscos associados	58
Figura 15	Crucialidade das atividades com riscos associados	58

LISTA DE TABELAS

	Estimativa para duração das atividades do projeto seguindo uma distribuição	41
Tabela 1	triangular	
Tabela 2	N estimativas para a duração das atividades da rede do projeto	47
Tabela 3	N estimativas para a duração total do projeto pelo cálculo do caminho crítico	48
Tabela 4	Índice de criticidade para o caminho crítico	48
Tabela 5	Índices de sensibilidade para as atividades do projeto	50
Tabela 6	Mapeamento de riscos para o projeto	54
Tabela 7	Índice de criticidade para o caminho crítico com mapeamento de riscos	56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AACE	Association For the Advancement of Cost Engineering
ADM	Arow Diagramming Method
APM	Association for Project Management
CC/BM	Critical Chain Scheduling and Buffer Management
CDM	Conditional Diagramming Method
CI	Criticality Index
CPM	Critical Path Method
CRI	Cruciality Index
EDM	Earned Duration Management
ESM	Earned Schedule Management
EVM	Earned Value Management
GAO	Government Accountability Office
GRASP	Greedy Randomized Adaptive Search Procedure
IPMA	International Project Management Associate
MILP	Mixed Integer Linear Programing
NEH	Nawaz-Enscore-Ham
PDM	Precedence Diagramming Method
PERT	Program Evaluation and Review Technique
PMBOK	Project Management Body of Knowledge
PMI	Project Management Institute
PRINCE2	Projects in Controlled Environment
SI	Significance Index
SSI	Schedule Sensitivity Index

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	11
1.1.	JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA.....	12
1.2.	OBJETIVOS	13
1.3.	METODOLOGIA	14
1.4.	ESTRUTURA DO TRABALHO	15
2.	REFERENCIAL TEÓRICO.....	16
2.1.	PLANEJAMENTO DO CRONOGRAMA DO PROJETO	17
2.2.	DESENVOLVIMENTO DO CRONOGRAMA DO PROJETO	18
2.2.1.	TÉCNICA CLÁSSICA PERT/CPM E SUAS LIMITAÇÕES	19
2.3.	GERENCIAMENTO E CONTROLE DO CRONOGRAMA EM PROJETOS	21
3.	REVISÃO DA LITERATURA	23
3.1.	TÉCNICAS E FERRAMENTAS PARA GERENCIAMENTO DO CRONOGRAMA DO PROJETO	24
3.1.1.	SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO	24
3.1.2.	ALGORITMOS E MÉTODOS HEURÍSTICOS.....	25
3.1.3.	PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA.....	27
3.2.	INTEGRAÇÃO DAS INCERTEZAS DAS ATIVIDADES PARA O CAMINHO CRÍTICO DO PROJETO	28
3.3.	INDICADORES DE DESEMPENHO PARA MONITORAMENTO DO CRONOGRAMA.....	29
3.3.1.	GERENCIAMENTO DE RISCOS E INDICADORES DE REDES.....	30
3.3.2.	INDICADORES DE SENSIBILIDADE DO CRONOGRAMA DE PROJETOS	31
4.	METODOLOGIA PARA GERENCIAMENTO DAS INCERTEZAS DO CRONOGRAMA DO PROJETO POR INDICADORES DE SENSIBILIDADE	36
4.1.	LEVANTAMENTO, TRATAMENTO E TRANSFORMAÇÃO DOS DADOS / ANÁLISE DE DISTRIBUIÇÃO.....	37
4.2.	SEQUENCIAMENTO LÓGICO DAS ATIVIDADES E ESTRUTURAÇÃO DA REDE DO PROJETO.....	37
4.3.	APLICAÇÃO DA SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO.....	38
4.4.	IDENTIFICAÇÃO DO CAMINHO CRÍTICO E CÁLCULO DO MAKESPAN DO PROJETO.....	39
4.5.	INDICADORES DE SENSIBILIDADE PARA MONITORAMENTO DOS	

	RISCOS E ATIVIDADES	39
5.	APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PARA GERENCIAMENTO DAS INCERTEZAS DO CRONOGRAMA DO PROJETO POR INDICADORES DE SENSIBILIDADE	41
5.1.	ETAPA 1: MODELAGEM DOS DADOS.....	41
5.2.	ETAPA 2: DIAGRAMA DE REDES	42
5.3.	ETAPAS 3 E 4:ALGORITMO PARA TRANSFORMAÇÃO DOS DADOS	43
5.3.1.	RESULTADOS OBTIDOS PARA A SIMULAÇÃO.....	46
5.3.2.	INFERÊNCIA SOBRE A DURAÇÃO TOTAL DO PROJETO	48
5.4.	ETAPA 5: ANÁLISE DE SENSIBILIDADE PARA AS ATIVIDADES DO PROJETO	49
5.5.	MODELAGEM PARA INTEGRAÇÃO DOS RISCOS NO CRONOGRAMA	53
6.	CONCLUSÕES.....	59
	REFERÊNCIAS	61
	APÊNDICE A – APLICAÇÃO DO TESTE DE SHAPIRO-WILK EM PYTHON	65
	APÊNDICE B – APLICAÇÃO DO TESTE DE ANDERSON DARLING EM PYTHON	66
	APÊNDICE C – APLICAÇÃO DA SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO E BUSCA EM PROFUNDIDADE PARA GERENCIAMENTO DA REDE DE PROJETOS	67

1. INTRODUÇÃO

Um projeto pode ser definido como um conjunto de atividades interdependentes executadas cronologicamente visando o alcance de resultados únicos e satisfatórios. Trata-se também de um conjunto de características específicas a serem alcançadas por uma disposição inédita das atividades. Os resultados alcançados em um Projeto são consequência dos esforços dos líderes e gerente aplicando práticas, princípios, processos, ferramentas e técnicas relacionadas ao gerenciamento do Projeto durante suas atividades (PMI, 2017).

O gerenciamento de um projeto de grande porte envolve diversas áreas que precisam ser igualmente gerenciadas e monitoradas para garantir o sucesso final do projeto. Tal processo envolve atividades que vão desde o gerenciamento dos *stakeholders* até o gerenciamento do próprio cronograma do projeto, que por sua vez é passível de interferências de diversos fatores, internos e externos, como os próprios *stakeholders*.

O Cronograma do Projeto deve ser flexível de forma a se ajustar ao longo da vida do projeto de acordo com o conhecimento adquirido, uma melhor compreensão do projeto, seus problemas, riscos associados e novas atividades de agregação de valor (PMI, 2017). Um projeto de curto prazo é normalmente o mais bem definido e pode estar sujeito a um cronograma mais rigoroso, ao passo que os grandes projetos são mais sujeitas a mudanças, riscos e incertezas (APM, 2012).

Riscos são eventos incertos que podem gerar impactos de forma direta ou indiretamente ao cronograma do projeto, gerando assim atrasos nas entregas. Adotar medidas para controlar, mitigar ou até mesmo evitar tais riscos se torna, portanto, um dos principais desafios para uma equipe de gerenciamento de projetos e um dos principais meios de aferir a eficiência da equipe. Um cronograma bem planejado permite que a equipe de gerenciamento identifique potenciais riscos associados a prazos específicos. Isso possibilita a implementação de medidas preventivas para mitigar riscos ou ações corretivas caso ocorram atrasos.

Diante de toda essa singularidade é preciso realizar um devido planejamento de forma a garantir que todos os objetivos dos projetos sejam alcançados. A saber, as etapas ligadas aos processos de gerenciamento que visam garantir que o resultado final seja alcançado com a maior eficiência possível.

Segundo a metodologia para gerenciamento de projetos PRINCE2, as atividades desenvolvidas pelo gerente de projetos consistem em estabelecer um plano com sequenciamento das atividades, bem como a delegação dos responsáveis para cada uma, seguido do seu devido monitoramento de forma a garantir que a execução esteja de acordo com

o planejado, buscando controlar toda situação que possa fugir do planejado, e só assim será possível a aplicação de melhorias de desempenho, como a redução de custos e prazos (AXELOS, 2017).

Para Gray e Larson (2010), o processo de gerenciamento de projetos é um conjunto de ações estratégicas que fornece um poderoso conjunto de ferramentas para que os profissionais da área possam desenvolver e aprimorar suas habilidades em planejar, implementar, monitorar e controlar as atividades para atingir objetivos organizacionais específicos.

Atualmente, o gerenciamento de projetos atinge todos os tipos de trabalho e consequentemente as equipes de projetos devem ser capazes de lidar com todo, ou quase todo, tipo de organizações e seus respectivos modelos de negócios.

1.1. JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA

Atualmente, muitas organizações que estabelecem uma estratégia de crescimento buscam inovar em seus negócios, almejando novos resultados. Possuir em sua estrutura uma equipe capacitada para gerenciamento de novos projetos é de grande importância para garantir uma máxima eficiência no processo e que seus resultados alcançados reflitam os objetivos de negócio. Pois o mau gerenciamento dos seus recursos pode resultar em estouros orçamentários, prazos não alcançados, perdas de recursos, má qualidade, entre outros (PMI, 2017).

Muitas empresas então passaram a observar a grande importância de realizar atividades relacionadas ao desenvolvimento de novos projetos, visto que no cenário atual, com empresas cada vez mais lançando novos negócios, métodos, ferramentas, produtos, etc., essas atividades “inteligentes”, ou seja, essas atividades ligadas ao desenvolvimento de projetos, seja na área de P&D (pesquisa e desenvolvimento), projeto de produto e processos, logística, administração de Tecnologia da informação, Construção civil, entre outros, são capazes de agregar mais valor ao modelo de negócios da empresa do que as atividades rotineiras, mesmo que já consolidadas (Carvalho e Rabechini, 2011).

Segundo o Guia PMBOK, o processo de gerenciamento de Projetos consiste em executar um conjunto de atividades de gerenciamento, onde cada uma requer entradas, técnicas e ferramentas apropriadas e geram saídas características. Pode-se entender o gerenciamento do projeto como fator fundamental para o alcance das metas a longo e curto prazo por meio da aplicação das técnicas e ferramentas adequadas (PMI, 2017).

É nesse cenário que o processo de gerenciamento de projeto torna-se cada vez mais profissional, estando incorporado em grandes organizações, e até mesmo no surgimento de empresas focadas em Gestão de projetos, para que cada vez mais as atividades típicas de projeto

sejam administradas eficazmente. Nesse contexto, torna-se necessário a busca pelo desenvolvimento e refinamento de metodologias para lidar com a complexidade dos projetos, e como consequência, viabiliza o desenvolvimento de novos estudos, buscando apresentar novas técnicas, métodos e ferramentas que possibilitem um maior desempenho e alcance de melhores resultados.

O conjunto ferramental adotado também auxiliará o processo de controle e monitoramento, aumentando a capacidade de uma equipe de projetos em reverter situações que possam vir a prejudicar o seu andamento e o cumprimento do cronograma, controlando assim as incertezas de duração do cronograma, garantindo uma maior credibilidade e resultados finais mais satisfatórios. Processo que se torna ainda mais necessário em projetos cujo prazo de conclusão é pré-definido.

Dessa forma, muitos gerentes de projetos perdem a oportunidade de se tornarem cada vez mais efetivos, gerar cada vez mais resultados satisfatórios, identificar oportunidades, pelo fato de negligenciar a identificação dos riscos e incertezas da duração das atividades do cronograma do projeto (Gray e Larson, 2017). Segundo o PMI (2017), controlar o cronograma do projeto é monitorar o seu andamento ao longo de todo o projeto de forma a analisar a necessidade de aplicar mudanças ao cronograma base. Dessa forma temos que a aplicação de mudanças requer conhecimento em tempo real do desempenho do projeto, e elas visam a detecção de fatores que afetam o seu andamento, a aplicação de ações corretivas, garantindo assim que todas as atividades estão progredindo conforme estabelecido no cronograma base.

Dessa forma, empresas do ramo de gestão de projetos vem desempenhando esforços para maximizar cada vez mais seus desempenhos e melhorar sua eficiência nos processos, e tudo isso está ligado a sua capacidade de identificar riscos e eliminar as incertezas que venham a impactar os seus resultados e posteriormente adotar medidas adequadas para que tais impactos possam ser mitigados ou até mesmo eliminados. É nesse contexto que novas técnicas e métodos devem ser constantemente estudados e estruturados para que possam de fato serem implementados de forma a auxiliar a equipe de projeto com o cumprimento de seus objetivos e metas.

1.2. OBJETIVOS

O objetivo do presente estudo é apresentar uma metodologia capaz de atribuir um tratamento de incertezas ao gerenciamento do cronograma em projetos por meio de indicadores de sensibilidade para as atividades, auxiliado por softwares de simulação e gerenciamento, de forma a tornar o processo mais intuitivo e robusto, facilitando assim uma tomada de decisão

direcionada por parte dos gestores de projetos. Como objetivos específicos tem-se:

- Estruturar um método viável e aplicável atribuindo o tratamento de incertezas para o processo de gerenciamento do cronograma em projetos reais da Engenharia;
- Transformar dos dados obtidos do cronograma do projeto em insights para o processo de tomada de ação;
- Identificar os pontos positivos e negativos da metodologia proposta, bem como sugerir melhorias para estudos futuros.

1.3. METODOLOGIA

O presente trabalho buscará o desenvolvimento de uma pesquisa aplicada, visando o levantamento de técnicas já existente e apresentando uma aplicação prática por meio de uma metodologia única, contribuindo para com o conhecimento científico disponível na literatura referente ao gerenciamento do cronograma do projeto, podendo ser expandida e aplicada por toda organização do ramo, de modo que todo gerente de projetos possa se beneficiar. De acordo com Gil (2008), o desenvolvimento de pesquisas aplicadas têm como característica fundamental a utilização do conhecimento, apresentação das consequências práticas e o desenvolvimento de teorias que gerem valores universais.

Quanto a natureza da pesquisa, será focada apenas em variáveis quantitativas para a obtenção de insights referente ao cronograma do projeto, se baseando na prática tradicional científica que visa levantamento de variáveis, mensuração e a análise dos dados obtidos a fim de se obter evidências (Cauchick-Miguel, 2012).

Trata-se de uma pesquisa explicativa, pois busca o estudo das variáveis envolvidas no processo a fim de obter relações de causa e efeito, como elas influenciam no correto andamento do projeto e, principalmente, servindo de base para o processo de tomada de decisão. Tendo portanto como objetivo central a identificação dos fatores que determinam ou que contribuem para a ocorrência dos fenômenos estudados (Gil, 2008).

Para aplicação de todo conhecimento apresentado será então realizado um Estudo de caso visando simular a técnica desenvolvida em um projeto de Engenharia real, com a utilização de dados históricos reais, e assim servindo de base para futuras aplicações por parte de empresas do mesmo ramo. Esse método de pesquisa permite uma interação maior e uma análise aprofundada do pesquisador para com o ambiente de estudo, facilitando assim a aplicação dos conhecimentos obtidos (Cauchick-Miguel, 2012).

Dessa forma, as técnicas de pesquisa utilizada será a documentação por meio de fontes

primárias, levantamento de dados históricos das atividades do projeto que se deseja estudar, ou mesmo por fontes secundárias, buscando na literatura estudos já realizados contendo dados referente ao comportamento das variáveis de tempos das atividades do projeto (Lakatos, 2003).

1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO

Para alcance de todos os objetivos propostos para este estudo, o documento está estruturado em oito capítulos. O primeiro apresentou uma introdução geral ao tema, incluindo o problema, a justificativa e relevância, o objetivo geral, os objetivos específicos e a metodologia.

No segundo capítulo será apresentado um referencial teórico com conceitos a serem trabalhados em torno da temática de forma dividida entre planejamento, gerenciamento e controle do cronograma e rede de atividades do projetos. Em seguida, no terceiro capítulo, serão apresentadas as principais abordagens, metodologias, técnicas e ferramentas, amplamente aplicados para o gerenciamento do cronograma do projeto, suas contribuições no que concerne ao tema.

E finalmente no quarto capítulo, a metodologia proposta será apresentada. A coleta, análise e transformação dos dados se seguirá no capítulo cinco, apresentando portanto os resultados obtidos e os principais insights e inferências acerca deles.

O último capítulo traz as considerações finais, onde são apresentadas as conclusões mais relevantes da pesquisa, bem como serão reafirmadas as suas principais contribuições. Além disso, será apresentado as principais limitações da pesquisa e em seguida replicado sugestões e possibilidades de desenvolvimento em trabalhos futuros.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Um dos maiores desafios no desenvolvimento de um projeto é referente a sua conclusão no tempo preestabelecido entre os Gestores e o Cliente. Quando se vê a possibilidade de um projeto atrasar na sua entrega, necessitando assim de mais recursos materiais e principalmente de recursos humanos, conseqüentemente tem-se um custo maior associado. Também é sabido que a melhor maneira para garantir que o prazo final de um projeto seja respeitado é garantindo que todas as entregas do sejam realizadas dentro de um prazo pré estabelecido. Além do mais, outro processo de grande importância no planejamento do cronograma é o sequenciamento das atividades e processos (PMI, 2017).

Gerenciar os Riscos de um projeto consiste em aplicar um conjunto de atividades e técnicas para identificação, avaliação e controle de todas as incertezas inerente aos processos do projeto, seja nas atividades de construção como as de gerenciamento, e por consequência obtém-se um aumento potencial do sucesso (Carvalho e Rabechini, 2011).

Tais incertezas estão presentes em todos os projetos e variam de acordo com o nível e complexidade das atividades nele presente. São derivadas de eventos internos ou externos à organização que possam vir a ocorrer. Os riscos estão associados aos impactos que os eventos incertos poderão causar no projeto. Um risco é medido por uma combinação da probabilidade de um evento incerto ou oportunidade percebida ocorrendo, e a magnitude de seu impacto nos objetivos (AXELOS, 2017).

Segundo o PMI (2017), a equipe de gerenciamento do cronograma deve então formalizar políticas, documentos e procedimentos para garantir o planejamento, desenvolvimento, gerenciamento, execução e controle do cronograma do projeto. Isso inclui um tratamento de incertezas e avaliação de criticidade para a rede do projeto, pois cada projeto possui uma seqüência de atividades que não é tolerante a atrasos, pois ameaçam a conclusão do projeto no prazo pré-estabelecido. A rede do projeto é um diagrama de fluxo da seqüência, inter-relações e dependências de todas as atividades em um pacote de trabalho (AXELOS, 2017).

A equipe responsável para o planejamento do cronograma seleciona um método para aplicação no qual retornará dados como prazos, datas previstas, duração, recursos necessários, e auxiliarão na criação do modelo de Cronograma a ser seguido durante todo o ciclo de vida do projeto (PMI, 2017). Quando existe a possibilidade de um projeto atrasar na sua entrega, isso refletirá em mais recursos materiais e principalmente de recursos humanos sendo requeridos e, conseqüentemente, é obtido um custo maior associado.

Planejar, desenvolver e gerenciar o cronograma de um projeto então envolve atividades para assegurar que todas as entregas do projeto a curto e longo prazo sejam respeitadas e alcançadas.

2.1. PLANEJAMENTO DO CRONOGRAMA DO PROJETO

Um planejamento do cronograma do projeto deve fornecer um plano detalhado que permita a visualização de como e quando cada entrega do projeto poderá ser finalizada, serviços e resultados definidos no escopo do projeto, permitindo uma alocação eficaz de recursos, correto dimensionamento das equipes para atender às demandas de cada fase, evitando sobrecargas ou ociosidade de recursos e colaborando para a otimização do uso de recursos financeiros, humanos e tecnológicos.

Segundo o PMI (2017), a fase de planejamento do cronograma começa com a transformação do pacote de trabalho do escopo em um conjunto de atividades necessárias para garantir todas as entregas pré definidas e também em determinar a sequência lógica das atividades de modo a obter uma melhor otimização dos recursos financeiros, humanos e do tempo. É um processo iterativo e o resultado é um modelo de cronograma da execução do projeto usado para monitorar e controlar até a finalização do projeto.

Segundo a AACE (*Association for the Advancement of Cost Engineering*) (2015), a fase de desenvolvimento do cronograma se inicia com o modelo gerado no planejamento do mesmo, e é o processo que aloca os recursos disponíveis (mão de obra, material, equipamento, etc.) para as atividades planejadas, após esse desenvolvimento do cronograma é gerado o cronograma linha de base para controle do projeto.

Existem diversas práticas recomendadas para o desenvolvimento de cronograma. De acordo com PMI (2017), um adequado gerenciamento do cronograma do projeto é dividido em seis etapas, sendo elas:

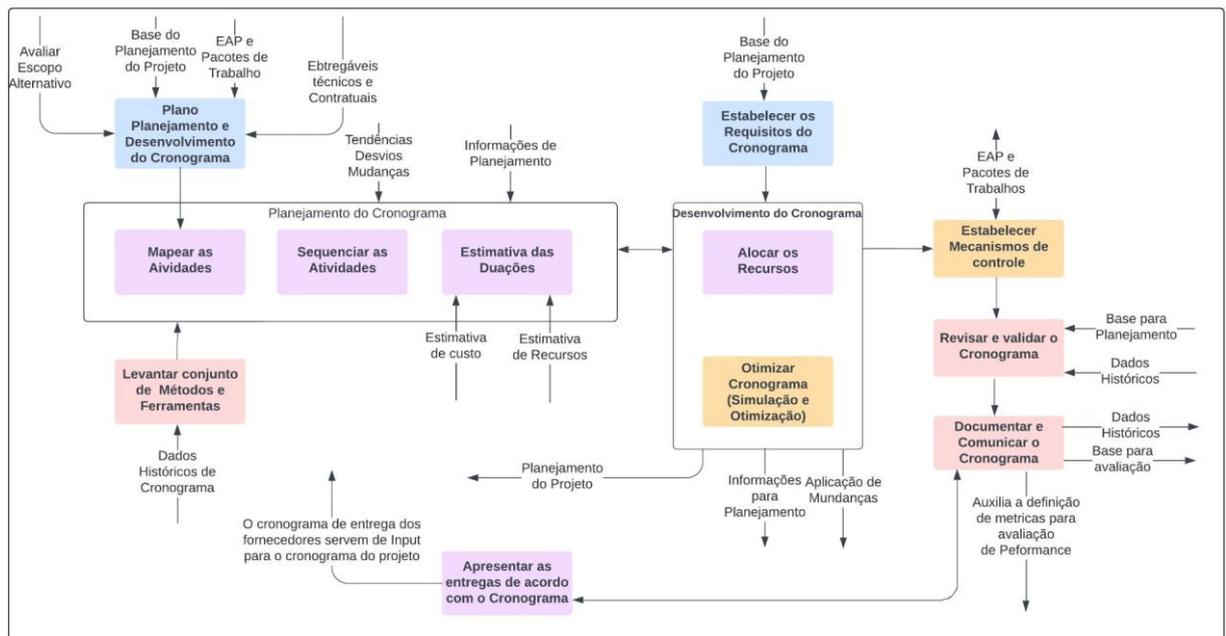
- Planejar o Gerenciamento do Cronograma;
- Definir as Atividades;
- Sequenciar as Atividades;
- Estimar as Durações das Atividades;
- Desenvolver o Cronograma;
- Controlar o Cronograma.

Segundo AACE em suas publicações especializadas, apresenta um conjunto de boas práticas para o desenvolvimento de uma estrutura analítica do projeto, possibilitando a

identificação das atividades, desenvolvimento do sequenciamento lógico e determinação da duração das atividades (AACE, 2015).

A Figura abaixo apresentada pela AACE (2015), mostra o conjunto de processos de planejamento para elaboração de cronogramas:

Figura 01 - Mapa de processos para desenvolvimento e planejamento do cronograma



Fonte: Adaptado de AACE (2015)

2.2. DESENVOLVIMENTO DO CRONOGRAMA DO PROJETO

Segundo o guia IPMA (2012), as principais tarefas para elaboração de um cronograma são: definir os pacotes de trabalho e suas respectivas atividades, estimar o tempo de duração das atividades, definir as relações de precedência entre as atividades, identificar o caminho crítico e aplicar métodos para otimização do cronograma.

O Guia de Avaliação de Cronograma do GAO (*Government Accountability Office*) (2012), descreve dez práticas recomendadas para o desenvolvimento de cronogramas, sendo elas:

- Identificar as atividades;
- Sequenciar as atividades;
- Alocar os recursos necessários para cada atividade;
- Estimar as durações de cada atividade;
- Verificar se o cronograma pode ser traçado horizontalmente e verticalmente;

- Confirmar se o caminho crítico é válido;
- Assegurar uma folga total razoável;
- Conduzir uma análise de risco do cronograma;
- Atualizar o cronograma usando progresso atual e a lógica;
- Garantir a linha de base do cronograma.

As principais ferramentas disponíveis para auxiliar o gerenciamento do sequenciamento das atividades são: os diagramas Gantt, diagramas de rede PERT e CPM, Método do Diagrama de Precedência (PDM - *Precedence Diagramming Method*), Método do Diagrama de Flecha (ADM - *Arow Diagramming Method*), Método do Diagrama Condicional (CDM - *Conditional diagramming method*), Diagrama de Marcos (*Milestones*), diagrama de barras ou histogramas de recursos, entre outros (Carvalho e Rabechini, 2011).

Além de estabelecer as relações de dependência entre as atividades por meio de ferramentas gráficas, outra etapa importante e fundamental para garantir um bom desempenho no desenvolvimento do projeto está na correta estimativa das variáveis de tempo. Realizar essas estimativas de forma acurada se torna portanto um grande desafio para as organizações comprometidas, aceitando o desafio de levantar estimativas significativas e investir de forma massiva no aprimoramento de suas capacidades técnicas. Pois é sabido que estimativas acuradas são capazes de diminuir as incertezas e dão sustentação às atividades de monitoramento e controle para alcançar resultados de maneira efetiva (Gray e Larson, 2010).

De acordo com Carvalho e Rabechini (2011), para realizar essas estimativas das durações das atividades é comumente recorrido a dois tipos de fontes de informações: utilização de dados históricos e/ou avaliação por empresas e profissionais especialistas. Quando se tem um cenário de atuação recorrente em desenvolvimento de projetos do mesmo segmento possibilitando assim registros históricos sobre tempos de duração, é comumente recorrido ao tratamento de dados visando inferir sobre cenários futuros e assim tomar uma estimativa com um certo grau de confiança que pode ser analisada. Ou quando esse cenário não representa a realidade de uma equipe de projeto, pode-se recorrer a especialistas para as atividades a serem executadas que trarão estimativas acerca das durações das atividades em questão igualmente baseado em dados históricos de sua atuação em atividades semelhantes. Essas estimativas representam portanto a quantidade de tempo ou períodos de trabalho necessário para se completar uma atividade.

2.2.1. TÉCNICA CLÁSSICA PERT/CPM E SUAS LIMITAÇÕES

Atualmente os métodos para gerenciamento das redes dos projetos mais utilizados são o CPM (Método do Caminho Crítico) e o PERT (*Program Evaluation and Review Technique*), que sendo aplicados de forma conjunta são capazes de identificar as atividades gargalos, que juntas formarão o caminho crítico do projeto e que determinarão a duração total mínima para o mesmo (Carvalho e Rabechini, 2011).

A Técnica de Avaliação e Revisão de Programas original (PERT) foi desenvolvida por Malcolm, *et al.* (1959) com o objetivo de analisar possíveis datas de término de um projeto e assim obter um melhor tempo prazo para conclusão possível.

Numa aplicação mais clássica do método PERT/CPM, o tempo de duração das atividades são consideradas com valores fixos. A duração das atividades é definida por três dados, independentes entre si, obtidas a partir de uma distribuição beta onde a primeira estimativa de duração é o menor valor (otimista), o maior valor (pessimista) e o topo da distribuição (valor mais provável). Esses valores representam, portanto, uma estimativa de três tempos utilizados na aplicação clássica do PERT (Takakura *et. al.*, 2019).

O principal objetivo da técnica PERT é criar um diagrama de distribuição normal para a duração total do projeto, cuja média é obtida pela análise de tempo com base nas durações médias das atividades, que por sua vez seguem uma distribuição beta onde a média \bar{x} é dada por:

$$\bar{x} = \frac{\text{otimista} + 4 * \text{mais provável} + \text{pessimista}}{6}$$

e a variância da duração do projeto total é obtido pelo somatório da variância de cada atividade (σ_x^2), onde:

$$\sigma_x^2 = \left(\frac{\text{pessimista} - \text{otimista}}{6} \right)^2$$

De forma semelhante, pode se definir uma previsão otimista e pessimista para a duração total do projeto por meio dos resultados da análise de tempo realizada com o somatório dos valores otimista e pessimista, respectivamente, das atividades, sempre levando em consideração as relações de precedências (Hajdu e Bokor, 2014).

O problema PERT/CPM clássico sem incerteza assume que as durações das tarefas são conhecidas e constantes (PMI, 2017). No entanto, tal suposição é muitas vezes inválida visto que não incluem riscos, que afetam a duração estimada das atividades, na modelagem. Dessa forma se torna necessária a realização de uma revisão da literatura com o objetivo de identificar

metodologias capazes de incluir um tratamento de incertezas. Para um primeiro momento é preciso definir como será feito a abordagem de riscos das atividades, ou seja, como as possíveis variações do tempo de duração de cada uma delas serão tratadas e modeladas no processo.

Um risco é medido por uma combinação da probabilidade de um evento incerto ou oportunidade percebida ocorrendo, e a magnitude de seu impacto nos objetivos (AXELOS, 2017). O objetivo então é incluir tais incertezas na duração das atividades de forma a aumentar a confiabilidade da previsão, e assim evitar atrasos na conclusão do projeto, pois eles geram insatisfação para com os patrocinadores do projeto.

Porém é sabido que um projeto é bastante passível de atrasos durante todo seu ciclo de vida, causado pelas ocorrências de riscos, e são comumente tratados por meio de registros junto ao cronograma base do projeto. É importante adotar algum tipo de técnica para gerenciá-los, buscando sempre integrar todas as informações possíveis a fim de evitar ou mitigar sua ocorrência (AXELOS, 2017).

2.3. GERENCIAMENTO E CONTROLE DO CRONOGRAMA EM PROJETOS

Durante a etapa de execução de um projeto é de extrema importância estabelecer ações e medidas sólidas para estruturar as atividades, permitindo que a equipe compreenda o trabalho que precisa ser realizado para entregar os produtos do projeto sem comprometer o orçamento e sem ultrapassar o prazo preestabelecido. Bem como distribuir as responsabilidades para cada entrega entre os membros da equipe. Todas as partes envolvidas na execução devem ter clareza sobre os resultados que devem alcançar, além do como deve ser alcançado e quais as responsabilidades associadas, para que possa haver um compromisso genuíno (AXELOS, 2017).

Nesta etapa é onde é percebido a maior concentração de mudanças, objetivando o realinhamento do desenvolvimento do projeto em direção aos objetivos. Bem como exige um gerenciamento efetivo dos recursos materiais e humanos, garantindo de forma precisa a disponibilidades de todos os recursos necessários, bem como orientar e manter o material humano empenhado e motivado na execução das atividades. Nesse estágio também é onde têm-se a maior concentração de riscos associados, de forma a garantir que o Plano de Contenção aos Riscos seja devidamente aplicado (PMI, 2017).

Os processos envolvidos nesse estágio têm por obrigação monitorar, identificar, analisar e implementar mudanças no plano de gerenciamento visando assim garantir a viabilidade do projeto, facilitando o alcance de metas e objetivos. Também Responsável por

apresentar o feedback sobre o andamento do projeto à equipe e às partes interessadas de forma a estarem a parte da situação real do andamento do Projeto, dos problemas enfrentados, das modificações a serem realizadas e permitindo que eles tenham uma ideia da situação futura. Nessa etapa é onde a área de gerenciamento as mudanças exercem maior influência, visto que será necessária uma análise das implicações para as mudanças solicitadas, de forma que sua aplicação dependerá de seus retornos comparado às suas possíveis alterações exercidas no escopo, plano orçamental e cronograma base do projeto (PMI, 2017).

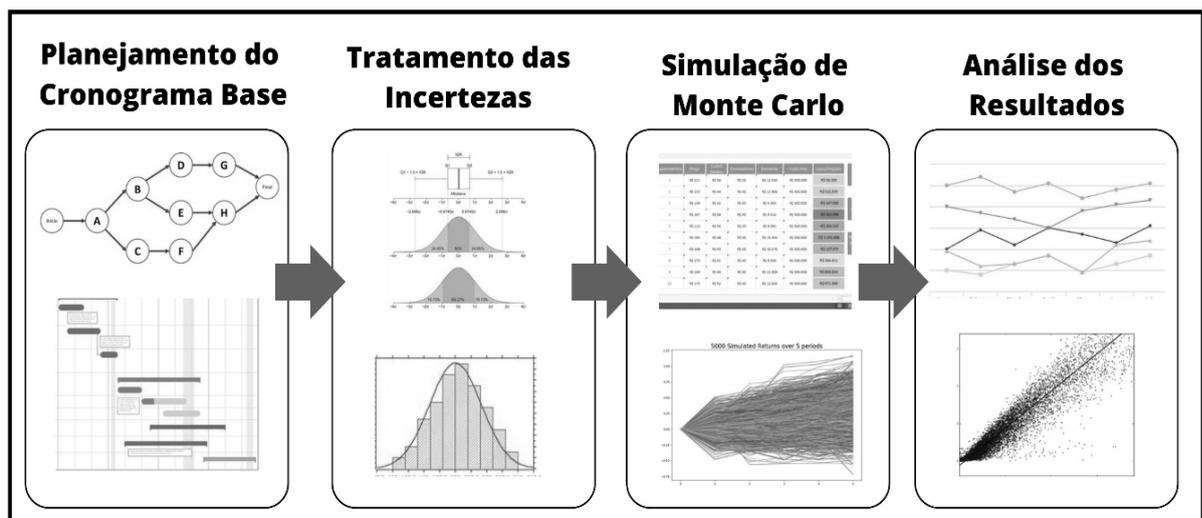
3. REVISÃO DA LITERATURA

Na presente temática abordada neste estudo, destaca-se o trabalho desenvolvido por Vanhoucke (2015), que implementou um trabamento de incertezas para o cronograma do projeto em quatro etapas, que são eles:

- Criar o cronograma base do projeto seguindo técnicas e ferramentas tradicionais para o planejamento;
- Identificar as incertezas do cronograma atribuindo a variável duração das atividades uma distribuição de probabilidade;
- Simular a execução do cronograma base por meio da simulação de Monte Carlo;
- Analisar os resultados da simulação por meio de métodos estatísticos e métricas de qualidade.

A Figura abaixo ilustra tais etapas:

Figura 02 - Passos para uma análise de riscos do cronograma do projeto



Fonte: Adaptado de Vanhoucke (2013)

Estas etapas evidenciam a busca por um conjunto ferramental e de técnicas que possam modelar e se adaptar as reais necessidades do gerente de projetos e suas equipes. Tais ferramentas devem ser capazes de identificar possíveis impactos que venham a afetar o desempenho do projeto no que se diz respeito a sua entrega. Gerenciar o cronograma de um projeto então envolve atividades para assegurar que todas as entregas do projeto a curto e longo prazo sejam respeitadas e alcançadas (Takakura *et. al.* 2019).

Utilizar técnicas, métodos e ferramentas adequadas para conseguir o melhor sequenciamento de forma a extrair a máxima eficiência na utilização dos recursos disponíveis, diminuindo ou eliminando a ociosidade e garantindo uma melhor resposta aos riscos inerentes

às atividades do projeto (Gray e Larson, 2010). Dessa forma, a revisão da literatura aqui realizada tem como foco principal a identificação das principais técnicas e ferramentas que possam ser aplicadas e venham a auxiliar no processo de gerenciamento das atividades do projeto.

3.1. TÉCNICAS E FERRAMENTAS PARA GERENCIAMENTO DO CRONOGRAMA DO PROJETO

O processo de gerenciamento de projetos geralmente é trabalhoso e requer a utilização em larga escala de um conjunto de técnicas e ferramentas para garantir o seu melhor desempenho que por muitas vezes podem exigir um alto investimento financeiro inicial, principalmente para organizações que desejam começar a investir em um processo mais estruturado para o gerenciamento do cronograma.

Essa necessidade reflete a característica dinâmica de um ambiente de execução, que são suscetíveis a vários riscos e representam um desafio que se reflete no demorado processo de planejamento e atualização, que geralmente é realizado diariamente ou semanalmente. Este problema torna-se mais evidente quando um projeto atinge a fase de construção, onde o número e a frequência de alterações de projeto aumentam (Srđic e Selih, 2015).

Dessa forma, é de extrema necessidade saber integrar as metodologias para otimização do recurso tempo de um projeto em um conjunto de ferramentas que muitas vezes necessitam ser pré-configuradas para atender e contemplar todas as variáveis utilizadas para aquele determinado método. Também requer trabalho adicional considerável para atualização completa e harmonizada de cronogramas durante a execução da construção (Dasovic, *et. al.*, 2020).

Os modelos para otimizar o processo de gerenciamento do cronograma em projetos vêm se desenvolvendo intensamente há décadas, No entanto, a dificuldade do processo de coleta e tratamento dos dados que servirão de entrada para as modelagens são significativamente menos abordadas além de tal atividade exigir uma quantidade significativa de tempo e trabalho. Assim, é necessário um método para transferir dados da fonte para o modelo matemático do problema, conforme aborda Baruah e Burns (2006).

3.1.1. SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO

A Simulação de Monte Carlo é uma ferramenta útil na estimativa probabilística para durações de atividades, e também permite várias análises de caminho crítico usando durações de atividades diferentes a cada vez. Isso resulta em um modelo estatístico de duração do projeto

que, por meio de uma função de distribuição de probabilidade, pode ser usado para calcular a probabilidade de um projeto ser concluído em uma data específica ou para prever a data de término mais provável (Votto, *et. al.*, 2020).

Os resultados obtidos por simulação podem servir de sinalizador para a aplicação de mudanças no cronograma base. O desempenho registrado do cronograma serve como indicação para a necessidade de revisão de premissas como a duração das atividades e seu sequenciamento, podendo até ser necessário revisar os métodos aplicados para estimativa das atividades. Em alguns casos, os atrasos registrados no cronograma são tão notáveis que geram a necessidade da construção de um novo cronograma contendo dados realísticos para a continuação do trabalho e medição do desempenho do progresso (Vanhoucke, 2014).

É bastante comum nos encontrar na literatura com uma infinidade de estudos e artigos apresentando a ideia de aplicar a simulações de Monte Carlo como uma técnica mais acessível para estimar a distribuição do tempo de conclusão de um projeto. Esses trabalhos de pesquisa geralmente apresentam métricas simples para medir a sensibilidade de um projeto sob várias configurações. Essa abordagem de Monte Carlo é usada para gerar estimativas para a duração das atividades que podem diferir dos valores bases, valores médios, de acordo com uma distribuição pré determinada, levando a uma mudança no conjunto de cenários críticos e uma duração real total do projeto que pode agregar em sua modelagem o tratamento de riscos (Vanhoucke, 2014).

3.1.2. ALGORITMOS E MÉTODOS HEURÍSTICOS

Quando se trata da otimização do tempo de conclusão total para o projeto, existe uma gama de métodos de programação matemática exata, heurística, meta e hiper-heurística que são comprovadamente capazes estruturar um processo quantitativo sustentável de tomada de decisão (Dasovic e Klansek, 2020). Tais técnicas são modeladas a partir de uma função objetivo $f(x)$, sujeito a funções restrições como $h(x) = 0$ e $g(x) \leq 0$, na qual busca minimizar $f(x)$ respeitando as restrições estabelecidas. No contexto de gerenciamento do cronograma de projetos, a função objetivo representa a duração total do projeto enquanto as funções restritivas, que determinam limites para a região de todas as soluções viáveis, representam os recursos tanto materiais como mão de obra.

Numa abordagem adaptada para grafos, uma estrutura de dados que consiste em um conjunto de Nós, no contexto de projetos representam as atividades, e um conjunto de arestas que conectam esses Nós, no contexto de projetos representam as relações de interdependência das atividades. Nesse tipo de representação é possível portanto aplicar algoritmos específicos

para solucionar diversas problemáticas que podem ser modeladas com esse tipo de dado, como é a problemática do caminho crítico, como por exemplo o algoritmo de Dijkstra, aplicado por Mahdavi *et. al.* (2021) para otimizar o tempo de conclusão de projetos da engenharia de uma indústria de gás onde existe uma limitação de recursos, e heurística NEH (Nawaz-Enscore-Ham), proposta inicialmente para problemas de minimização do makespan em ambientes flowshop, onde se busca o menor tempo de processamento em um cenário onde todas as tarefas têm o mesmo sequenciamento de máquinas.

Os algoritmos heurísticos são técnicas que não garantem a solução ótima porém buscam aproximações suficientemente boas do melhor resultado possível. Alguns exemplos de heurísticas incluem o algoritmo de Johnson, utilizado por Xiong *et. al.* (2019) que combinado a técnica dos algoritmos genéticos e com processo de simulação buscaram solucionar a problemática do agendamento de tarefas em um cenário de alto escalonamento em bancos de dados na nuvem, o algoritmo de NEH, um algoritmo guloso aplicado por Zhongshi *et. al.* (2021) que em seus estudos objetivaram criar e iterar sobre o conjunto solução até a busca do melhor resultado para o makespan para um conjunto de atividades de uma fábrica, e o algoritmo meta-heurístico de GRASP (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure), aplicado por Neira e Torres (2019) que combinando a simulação de monte carlo solucionaram uma função bi-objetivo que incluía GRASP o makespan e o atraso esperado de um processo de agendamento flowshop.

No contexto de gerenciamento do cronograma do projeto, Watermeyer e Zimmermann (2022) buscaram aplicar um algoritmo de busca em profundidade, algoritmo de branch-and-bound, para diminuir a duração total do projeto pela realocação dos recursos materiais limitados, identificando sua disponibilidade na rede do projeto, possibilitando o seu remanejamento e assim maximizando a utilização do recurso tempo.

Esses algoritmos são frequentemente usados na literatura como ferramenta para determinar as estimativas de duração do cronograma do projeto, principalmente para grandes projetos devido à sua eficiência computacional. Entretanto, a maioria desses problemas são considerados NP-difíceis e, devido a esse fator, são de complexa resolução. Para tentar contornar esse cenários, vários softwares e ferramentas foram construídos e disponibilizados integrando em si uma modelagem computacional para a problemática de otimização do cronograma do projeto sujeito a limitações de recursos, possibilitando assim uma aplicação mais prática (Liu *et. al.*, 2022, Mahdavi *et. al.*, 2021).

Do ponto de vista do problema de otimização de cronograma de construção, tais softwares e aplicações, como o MS Project e o Primavera Risk, utilizam como inputs dados de

entrada que vão de conjuntos de atividades de projeto e relações de precedência entre elas, bem como tempo, custo, recursos e outras opções relacionadas aos possíveis modos de execução. As variáveis de decisão, para as quais os valores ótimos devem ser identificados pela otimização do cronograma, geralmente representam horários de início e duração das atividades, atrasos e prazos de entrega, duração do projeto, quantidades de recursos, etc. (Dasovic, *et. al.*, 2020).

3.1.3. PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA

Alguns métodos matemáticos, como o algoritmo branch-and-bound e a programação linear inteira mista (MILP – mixed integer linear programming), são capazes de modelar o sistema do gerenciamento do cronograma do projeto, mas podem envolver um rigor técnico maior, porém são capazes de chegar a uma solução ótima exata para um problema modelado, como Liu *et. al.* (2023) que aplicaram o algoritmo de branch-and-bound para otimizar a utilização dos recursos unitários do projeto pelo melhor agendamento para a rede das atividades, obtendo um melhor desempenho do que outras técnicas disponíveis na literatura.

Apesar de alguns algoritmos genéticos amplamente aplicados na literatura sobre o tema em questão obterem sucesso na sua aplicação, Liu *et. al.* (2022) mostram em seu estudo que, por meio de uma análise de benchmark, que uma adaptação para um algoritmo de busca em profundidade como o de branch-and-bound, são capazes de proporcionar uma maior performance no alcance dos resultados.

A programação matemática geralmente requer conhecimento de linguagens de modelagem algébrica, portanto, o maior desafio é integrar esse sistema aos softwares e ferramentas atualmente disponíveis no mercado. Alguns dos estudos realizam essa integração da otimização de cronogramas de projetos com base em planilhas (Valenko e Klansek, 2017). Mas esta técnica apresenta algumas limitações. Os modelos de otimização em planilhas são menos transparentes do que os modelos desenvolvidos em linguagens de modelagem algébrica. Os modelos de planilha também têm um limite no número de variáveis e restrições. Além disso, modelos de planilhas muitas vezes causam problemas no dimensionamento do tamanho do problema de otimização e são limitados no número de solucionadores disponíveis. Embora a entrada tabular de parâmetros de entrada e fórmulas de modelo possa consumir muito tempo, elas ainda podem ser adequadas para projetos de construção de pequeno e médio porte com um número razoável de parâmetros (Dasovic e Klansek, 2021).

Buscando suprir este limitante, Takakura *et. al.* (2019) utilizaram técnicas de programação matemática para encontrar uma solução para uma função objetivo, que visa maximizar a probabilidade da duração total real do projeto ser abaixo da duração planejada com

um conjunto maior de parâmetros modelados por meio da linguagem de programação.

3.2. INTEGRAÇÃO DAS INCERTEZAS DAS ATIVIDADES PARA O CAMINHO CRÍTICO DO PROJETO

Pode-se entender os riscos como qualquer evento que venha a ocorrer durante a etapa de execução do projeto que possam afetar todas as variáveis base do projeto, como por exemplo: tempo e custo. Para um bom planejamento do projeto, lidar com essas incertezas é uma tarefa crucial. Dessa forma, eles devem ser sempre considerados para que a definição do cronograma base reflita a real necessidade do projeto (Takakura *et. al.*, 2019).

Dessa forma, a utilização de distribuições beta para as atividades sempre recebeu muitas críticas por parte dos pesquisadores, que defendem a inclusão de outros tipos de distribuições para o desenvolvimento do método. Já outros defendem que a falta de informações sobre dados de durações das atividades pode tornar a inclusão de outras distribuições inviável, e a utilização da distribuição beta é suficiente para contemplar as incertezas das atividades no processo pois a inclusão de novas distribuições não apresenta uma diferença significativa (Hajdu e Bokor, 2014).

Hajdu e Bokor (2014) buscaram analisar o efeito de cada distribuição na duração do projeto e concluíram que a utilização de uma distribuição mais adequada para as atividades do projeto conseguiu diminuir para menos de 10% o erro de previsão caso a distribuição beta clássica fosse aplicada.

Dajiang *et. al.* (2022) utilizaram um conjunto de base de dados históricos combinado com a opinião de especialistas para desenvolver uma medida que venha a substituir de forma mais eficiente e com maior confiabilidade a utilização dos números Fuzzy para a incrementação das incertezas na modelagem do conjunto de atividades do projeto. Li e Womer (2015) utilizaram da simulação de Monte Carlo para integrar um fator de aleatoriedade no processo de gerenciamento do cronograma de acordo com sua função de distribuição para as durações das atividades.

Takakura *et. al.* (2019) trouxeram quatro aplicações para integrar as incertezas das atividades na modelagem do problema: utilizando estimativas fixas de duração em três pontos (pessimista, otimista e Mais provável), utilizando números Fuzzy para a duração das atividades, utilizando distribuição de probabilidade contínua para a duração das atividades (Normal ou Beta) e utilizando histograma feito por levantamento dos dados históricos das atividades para obter distribuições discretas (probabilidade da duração levantada para cada valor).

Um teste não paramétrico comumente usado para avaliar a aderência dos dados a uma

distribuição é o teste qui-quadrado e a correlação de Spearman. Este representa uma medida da força e direção da relação entre duas variáveis, tornando-a adequada para avaliar a adesão de dados não paramétricos a uma distribuição. O teste de aderência é uma técnica estatística usada para determinar se um determinado conjunto de dados segue uma distribuição específica ou não. É uma ferramenta essencial na análise de distribuição, pois ajuda pesquisadores e estatísticos a avaliar a qualidade do ajuste entre os dados observados e uma distribuição teórica. Um teste de aderência comumente usado para análise de distribuição é o teste Shapiro-Wilk, principalmente quando se busca avaliar a normalidade de um conjunto de dados (Moore, 2007).

O teste Shapiro-Wilk é usado para verificar se uma amostra segue uma distribuição normal. Ele avalia se os desvios entre os valores observados e os valores esperados para uma distribuição normal são estatisticamente significativos. Avalia a hipótese nula de que um conjunto de dados é normalmente distribuído. Se o valor-p resultante do teste de Shapiro-Wilk for maior que um nível de significância predeterminado (geralmente 0,05), falhamos em rejeitar a hipótese nula e conclui-se que os dados seguem uma distribuição normal (Choueiry e Salameh, 2019). Esse teste de aderência é particularmente útil ao trabalhar com dados paramétricos, onde a suposição de normalidade é necessária para muitos testes estatísticos, como testes e análise de variância. É importante observar que nem todos os dados podem seguir uma distribuição normal e, nesses casos, testes não paramétricos são empregados.

3.3. INDICADORES DE DESEMPENHO PARA MONITORAMENTO DO CRONOGRAMA

Quando se fala em gerenciamento de projetos, uma das habilidades essenciais da equipe de projetos não é apenas identificar tais atrasos, mas como também saber direcionar adequadamente as ações para mitigar ou até mesmo eliminar os impactos causados por esses de forma a garantir o correto andamento do projeto e a realização de todas as entregas no prazo pré-determinado (Martens e Vanhoucke, 2017).

Dessa forma, compreender a criticidade das atividades é fundamental para uma correta distribuição de recursos. Hu *et. al.* (2015) basearam-se no método clássico para gerenciamento dos buffers em uma rede de projeto, o CC/BM (*Critical Chain Scheduling and Buffer Management*), e apresentou um método capaz de calcular a probabilidade de conclusão bem-sucedida do projeto em relação ao custo de atraso e que determina quando e qual atividade agilizar para gerar menos prejuízo, e logo após introduziu um KPI para monitorar a criticidade das atividades a fim de controle, incrementando assim ao método de gerenciamento de buffers (BM) e se mostrando mais eficiente, pois gerenciar apenas a criticidade dos buffers não geram

informações precisas sobre as atividades (Hu *et. al.*, 2016).

Zhang, Shi e Diaz (2015) estabeleceram um modelo de monitoramento e controle de desvio de buffer para softwares de projeto baseado no “grey prediction mode”. Colin e Vanhoucke (2015) combinou o método EVM/ESM (Valor agregado) com o conceito de buffers do CC/BM e propôs duas novas abordagens de controle de projeto com múltiplos pontos de controle com o objetivo de minimizar o esforço do gerente de projeto e logo após, Votto *et. al.* (2020) aplicaram a metodologia EDM na rede de projetos, uma adaptação das metodologias EVM e ESM que busca eliminar os elementos monetários, que são muito mais suscetíveis a riscos, da sua modelagem.

Hu *et. al.* (2016) propuseram melhoria por meio da utilização do indicador de desempenho “Crucialidade” como gatilho para o processo de monitoramento dos buffers do cronograma. Williams (1992) avaliou as vantagens e desvantagens das medidas de sensibilidade discutidas e sobre a importância de utilizá-las de forma combinadas para maior eficiência do processo de identificação da variabilidade das atividades na duração geral do projeto. O que todos esses artigos buscam trazer como inovação ao processo de gerenciamento de cronograma é a agregação de fatores a modelagem do processo, como por exemplo a restrição de recursos e a avaliação de riscos, que trazem como consequência a alta incerteza nas variáveis de tempo para as atividades do projeto. Tais artigos evidenciam, portanto, a necessidade de uma abordagem probabilística em contraponto ao padrão determinístico comumente empregado no planejamento real de projetos.

3.3.1. GERENCIAMENTO DE RISCOS E INDICADORES DE REDES

Os riscos estão associados aos impactos que os eventos incertos poderão causar no projeto. Entretanto, os riscos não estão associados apenas a perdas, mas também a oportunidades de investimento, podendo trazer consequências positivas ou negativas dependendo da Natureza do Risco. Explorar essas oportunidades envolve processos de tomada de decisão por parte dos gerentes responsáveis, e, portanto, é preciso de antemão um plano de gerenciamento dos Riscos que consistirá em identificar os eventos, analisar seus impactos e aplicar técnicas para buscar prever a probabilidade do seu acontecimento. Tais medidas servirão como apoio aos gerentes na tomada de decisão (Martens e Vanhoucke, 2017).

A partir dessa necessidade intriduziu-se algumas métricas para monitorar o desempenho do projeto. Os principais indicadores para projetos na literatura que buscam medir a sensibilidade do cronograma do projeto e a capacidade de prever a duração final durante sua

execução, tornam-se parâmetros-chave para os gerentes de projeto tomarem suas decisões de forma assertiva. A confiabilidade das medidas de desempenho de duração e previsões no nível do projeto são cruciais durante o acompanhamento do projeto e afetam a adequação do processo de tomada de decisão de ação corretiva (Vanhoucke, 2010).

3.3.2. INDICADORES DE SENSIBILIDADE DO CRONOGRAMA DE PROJETOS

A cada execução da simulação de Monte Carlo é registrado a duração total do projeto, e essa estimativa é feita em cima do caminho crítico, os resultados de cada simulação realizada são registrados e avaliados estatisticamente a fim de calcular as medidas de sensibilidade. Essas medidas de sensibilidade indicam o grau de risco a qual uma atividade está propensa e o quanto ela pode impactar nos desempenho final do projeto. Esse conjunto de medidores possibilitam assim uma visão mais holística para um correto planejamento de gestão de riscos do que apenas avaliar o caminho crítico, que apenas indica se uma atividade é crítica ou não (Martens, 2017).

Em termos práticos, o gestor do cronograma do projeto deve calcular e monitorar os índices de sensibilidade para cada uma das atividades do cronograma, até mesmo as que estão fora do caminho crítico esperado, e que as atividades com maiores índices serão consideradas as mais propensas a causarem maior impacto no desempenho final do projeto e portanto, as que devem receber uma prioridade maior (Rosa, 2017).

Os próximos tópicos apresentarão os principais indicadores de sensibilidade para controle e monitoramento do cronograma do projetos mais citados na literatura.

3.3.2.1. INDICADOR DE CRITICIDADE (CI)

O Índice de criticidade (CI - *Criticality Index*) é o indicador que possui a definição mais intuitiva dentre os indicadores de sensibilidade, isso porque baseia-se no conceito de caminho crítico comumente já abordado em grande parte da literatura focada no gerenciamento de projetos. Podemos entender o caminho crítico como o conjunto de tarefas dispostas em sequência que determina o caminho cujo tempo de execução é o que demanda mais tempo para a sua devida conclusão, servindo como base para o nivelamento de recursos e principalmente determinado o tempo total mínimo necessário para a conclusão do projeto. Dessa forma, o caminho crítico fornece a data de conclusão prevista do projeto (Luiz *et. al.*, 2017).

A formulação matemática para o CI pode ser representado da seguinte forma:

$$CI_i = \frac{1}{S} * \sum_{n=1}^S \tau(tf_i = 0)$$

Onde:

- CI_i : índice de Criticidade para a atividade ‘i’;
- tf_i : folga, variação entre a duração média e a duração na simulação de número ‘n’ para uma atividade ‘i’;
- $\tau(x)$: representa uma função genérica que retorna valor 1 se o teste lógico for verdadeiro e retorna valor 0 caso o teste lógico seja falso (Vanhoucke, 2014);
- S : número total de simulações.

Em termos estatísticos, o CI mede a probabilidade de uma atividade estar no caminho crítico. É assim uma porcentagem, quanto maior a porcentagem, maior a probabilidade de que a atividade seja crítica (Martens, 2017). Onde o CI é calculado pela probabilidade da flutuação do valor da duração de um atividade ‘i’ corresponder a zero.

$$CI_i = Pr(tf_i = 0)$$

Apesar de ser bastante aplicado, o Índice de Criticidade apresenta algumas desvantagens. A principal desvantagem é que ele mede apenas a probabilidade, enquanto o risco é definido por duas variáveis que são probabilidade e impacto. Isso significa que as atividades com um alto valor de CI não necessariamente têm um alto impacto no projeto duração (Williams, 1992). Além disso, a métrica não pode ser calculada quando há restrições de recursos, visto que até as atividades com baixa probabilidade de estar no caminho crítico podem ser deslocadas ainda mais no tempo devido aos recursos de restrições (Vanhoucke, 2015).

3.3.2.2. INDICADOR DE SIGNIFICANCIA (SI)

O índice de Significância (SI - *Significance Index*) é o que melhor reflete o grau de importância relativa entre as atividades, representando o impacto de uma atividade na duração total do projeto (Williams, 1992).

Sua formulação matemática pode ser dado por:

$$SI_i = \frac{1}{S} \sum_{n=1}^S \left(\frac{d_i^n}{d_i^n + tf_i^n} * \frac{DR^n}{\overline{DR}} \right)$$

Onde:

- SI_i : índice de Significância para a atividade 'i';
- d_i^n : duração da atividade 'i' na simulação de número 'n';
- tf_i^n : variação entre a duração média e a duração na simulação de número 'n' para uma atividade 'i';
- DR^n : duração total do projeto na simulação de número 'n';
- \overline{DR} : duração total média esperada para o projeto;
- S : número total de simulações.

3.3.2.3. INDICADOR DE SENSIBILIDADE (SSI)

Visto que o gerenciamento dos riscos para um projeto, incluindo seu cronograma, deve se levar em consideração as variáveis de probabilidade e impacto de forma, deve-se haver algum indicador capaz de relacionar essas duas variáveis em sua medição. Sabendo que o CI nos traz o conceito de probabilidade aplicado a duração das atividades de um projeto e o conceito de SI trazendo o levantamento dos impactos relativos que o atraso de uma atividade teria na duração final do projeto, o PMI (2004) então apresentou o conceito de Indicador de Sensibilidade (SSI - *Schedule Sensitivity Index*).

O SSI propõe combinar os desvios padrão da duração da atividade e da duração do projeto com o CI. Sua formulação matemática é feita da seguinte forma:

$$SSI_i = \sqrt{\left(\frac{Var(d_i)}{Var(DR)}\right) * CI}$$

onde:

- SSI_i : índice de Sensibilidade para a atividade 'i';
- d_i : duração média para a atividade "i";
- DR : duração total esperada para o projeto;
- CI : índice de Criticidade para a atividade 'i'.

Segundo Martens (2017), devido ao conceito de risco, como apresentado anteriormente, o índice de sensibilidade pode ser calculado como proxy de impacto e probabilidade, como uma equação diretamente proporcional do índice de criticidade (CI) e o índice de significância (SI), ou seja:

$$SSI_i = CI_i * SI_i$$

3.3.2.4. INDICADOR DE CRUCIALIDADE (CRI)

O índice de Crucialidade (CRI - *Cruciality Index*) assim como o índice de significância mede a correlação entre a variação da duração média esperada e simulada de uma atividade com a duração total de um projeto. De acordo com Vanhoucke (2013), mede a parcela da variação entre a duração total estimada e medida explicada pela variação total estimada e medida de uma atividade “i”.

De acordo com Rosa (2017), existem três formas diferentes para se obter o indicador de Crucialidade. São eles:

- ICR-r: coeficiente de correlação linear de Pearson:

$$CRI_{ri} = \frac{\sum_{n=1}^S (d_i^n - d_i) * (DR^n - \overline{DR})}{S * \sigma_{d_i} * \sigma_{DTP}}$$

Onde:

- CRI_{ri} : índice de Crucialidade de Pearson para a atividade ‘i’;
- d_i^n : duração da atividade “i” na simulação de número “n”;
- d_i : duração média para a atividade “i”;
- DR^n : duração total do projeto na simulação de número “n”;
- \overline{DR} : duração total média esperada para o projeto;
- S : número total de simulações.

No entanto, a relação entre a duração de uma atividade e a duração total do projeto geralmente segue uma relação não linear. Vanhoucke (2014) propõe então o uso de medidas de correlação não linear de Spearman Rank ou a medida tau de Kendall.

- ICR-rho: coeficiente de correlação posto ordem de Spearman:

$$CRI_{rho_i} = 1 - \frac{6}{S * (S^2 - 1)} \sum_{n=1}^S dif_n^2$$

Onde:

- CRI_{rho_i} : índice de Crucialidade de Spearman para a atividade ‘i’;
- dif_n : diferença entre a ordem de grandeza da variação da duração obtida para a atividade na simulação de número “n” e a variação da duração total do projeto;

- S : número total de simulações.

- ICR-tal: coeficiente de correlação posto ordem de Kendall:

$$CRI_{tal_i} = \lfloor \frac{4}{S(S-1)} * \sum_{n=1}^{S-1} \sum_{t=n+1}^S \tau((d_i^t - d_i^n) * (DR^t - DR^n) > 0) \rfloor - 1$$

Onde:

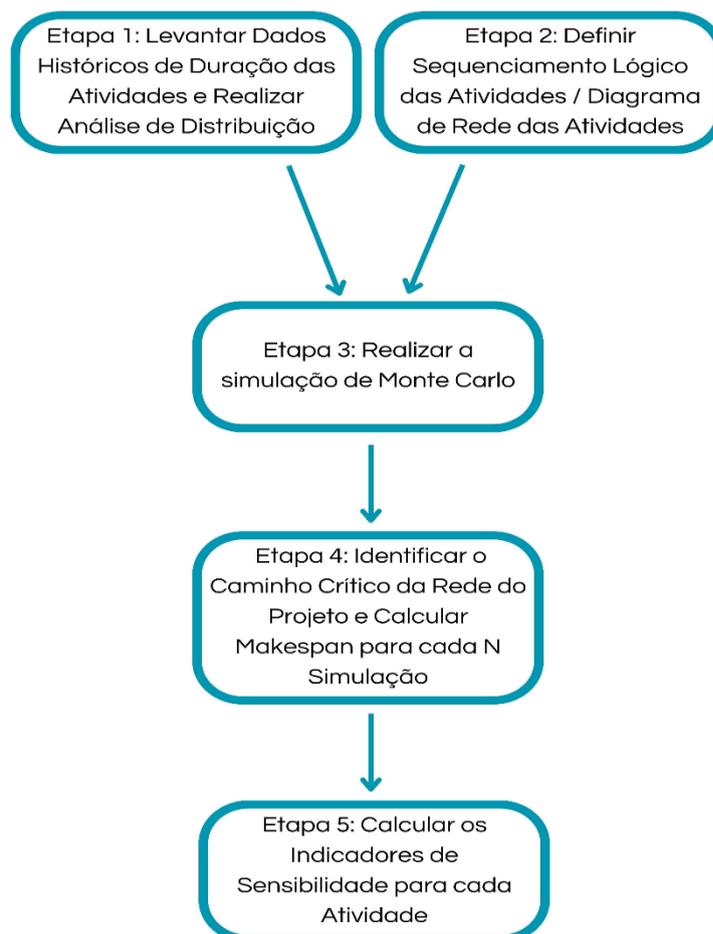
- CRI_{tal_i} : índice de Crucialidade de Kendall para a atividade ‘i’;
- d_i^n : duração da atividade ‘i’ na simulação de número ‘n’;
- d_i^t : duração da atividade ‘i’ na simulação de número ‘n+1’;
- DR^n : duração total do projeto na simulação de número ‘n’;
- DR^t : duração total do projeto na simulação de número ‘n+1’;
- S : número total de simulações;
- $\tau(x)$: representa uma função genérica que retorna valor 1 se o teste lógico for verdadeiro e retorna valor 0 caso o teste lógico seja falso (Vanhoucke, 2014);

4. METODOLOGIA PARA GERENCIAMENTO DAS INCERTEZAS DO CRONOGRAMA DO PROJETO POR INDICADORES DE SENSIBILIDADE

Este estudo tem como objetivo aplicar as principais ferramentas e tecnologias aplicadas pelo mercado para garantir um gerenciamento eficiente do cronograma de um projeto, sendo capaz de incorporar em sua modelagem indicadores de desempenho que facilite o acompanhamento e ajude a criar expectativas realistas quanto ao tempo necessário para cada fase e para o projeto como um todo. Sendo crucial para a comunicação eficaz com as partes interessadas e para garantir que as expectativas sejam gerenciadas adequadamente.

O fluxograma ilustrado na Figura abaixo representa a aplicação da metodologia proposta para gerenciamento das incertezas do cronograma do projeto por indicadores de sensibilidade.

Figura 03 – Fluxograma para aplicação da Metodologia Proposta



Os tópicos que se seguem explicam detalhadamente os objetivos de cada etapa, meios para aplicação e em seguida um fluxograma que ilustra a metodologia proposta para gerenciamento das incertezas do cronograma do projeto por indicadores de sensibilidade.

4.1. LEVANTAMENTO, TRATAMENTO E TRANSFORMAÇÃO DOS DADOS / ANÁLISE DE DISTRIBUIÇÃO (ETAPA 1)

Após o devido planejamento do escopo do projeto, levantamento dos pacotes de trabalho e das atividades associadas, pode-se então estabelecer o diagrama de rede do projeto, ponta pé inicial para a estruturação de uma metodologia voltada para o gerenciamento do cronograma do projeto (PMI, 2017). Tal ferramenta nos proporciona uma correta busca de dados históricos referente a duração das atividades em projetos semelhantes.

A partir do conjunto de dados obtidos do processo de levantamento e extração será possível modelar computacionalmente este sistema do mundo real, aplicando às adequadas técnicas e ferramentas estatísticas para análise e tratamento de dados, possibilitando assim a criação de uma espécie de analogia digital deste sistema.

O conjunto ferramental a ser utilizado deve possuir a capacidade de analisar o seu comportamento de modo prévio e semelhante ao que possa vir a acontecer no sistema original, bem como fornecer uma integração usuário e sistema que permita a realização de experimentos com a intenção final de um maior entendimento e compreensão do sistema real por meio da inferência estatística.

Quando é realizado uma análise das variáveis que compõem este sistema por uma modelagem voltada a simulação, é necessário o uso das distribuições de probabilidades, como realizado por Takakura *et. al.* (2019), de forma a representar a multiplicidade de ocorrências de eventos aleatórios, ou seja, sendo possível integrar as incertezas do processo ao modelo, possibilitando assim uma análise estruturada para os riscos.

Nesta etapa será realizada o levantamento de dados histórico para duração das atividades, a análise de distribuição de probabilidades dos conjuntos de dados obtidos para tratamento das incertezas.

4.2. SEQUENCIAMENTO LÓGICO DAS ATIVIDADES E ESTRUTURAÇÃO DA REDE DO PROJETO (ETAPA 2)

Algumas atividades podem depender da conclusão de outras antes de poderem começar. Identificar estas relações de interdependência nos diz quais atividades podem ser realizadas em paralelo por diferentes equipes de trabalho de forma a se obter uma maior otimização do recurso

tempo, fator de extrema importância pois a duração total do projeto está diretamente ligado ao seu custo final.

Assim como Takakura *et. al.* (2019), a presente metodologia se baseia na estruturação da rede das atividades do projeto como a modelagem principal para fazer com que as métricas a serem aplicadas possa refletir a real necessidade do projeto, proporcionando maiores ganhos e minimização dos riscos e seus impactos. Outra vantagem de se estabelecer um correto sequenciamento lógico das atividades está na correta alocação dos recursos materiais e humanos, evitando assim a criação de estoques, matéria prima parada e mão de obra ociosa, fatores esses que também afetam diretamente nas variáveis de custo do projeto.

4.3. APLICAÇÃO DA SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO (ETAPA 3)

A partir da simulação de Monte Carlo, é possível gerar diversos resultados para a duração de um projeto e suas atividades de acordo com a disposição da rede de atividades previamente estabelecida respeitando as relações de precedência e principalmente de acordo com a distribuição de cada atividade previamente avaliada, o que nos ajuda a identificar quais fatores ou eventos têm maior impacto nos resultados do projeto. Com base nos resultados da simulação, decisões podem ser tomadas de forma mais estratégica e direcional, por permitir que os esforços sejam concentrados nos pacotes de trabalho mais críticos do projeto.

A simulação de Monte Carlo, conforme aplicado por Vanhoucke (2014), fornece um grande conjunto de dados modelados a realidade do projeto em questão possibilitando assim a criação de gráficos, relatórios visuais, dashboards, aplicação de indicadores de desempenho que ajudam a adaptar o planejamento e gerenciamento do projeto a natureza incerta dos projetos, bem como servir de evidências para a comunicação com as partes interessadas, ajudando a construir uma compreensão compartilhada.

Existem diversas ferramentas e softwares no mercado que possibilitam a aplicação da técnica de simulação de Monte Carlo na modelagem do cronograma do projeto, como os softwares Primavera Risk Analysis e Crystall Ball. Esta etapa portanto traz para a implementação da modelagem de simulação ao processo a utilização como ferramenta auxiliar a tecnologia Python na versão 3.10. E por meio da biblioteca nativa “random” será possível realizar a geração dos números aleatórios que integrado a modelagem do tipo de distribuição especificada, serão obtidos os dados simulados.

A escolha desta ferramenta se deu principalmente pelo fato de ser uma linguagem de programação de código aberto. Isso significa que seu código-fonte é disponibilizado

publicamente e pode ser acessado, usado, modificado e distribuído livremente por qualquer pessoa, além de ser uma ferramenta bastante atual, inovadora, de fácil acesso e bastante difundida entre as organizações de todos os setores da economia. Dessa forma é possível desenvolver uma metodologia que pode ser aplicada por profissionais devidamente orientados em qualquer empresa, de qualquer porte, que busque estruturar seu processo de tomada de decisão para gerenciamento de cronogramas de projetos orientado à dados.

4.4. IDENTIFICAÇÃO DO CAMINHO CRÍTICO E CÁLCULO DO MAKESPAN DO PROJETO (ETAPA 4)

Uma das principais técnicas utilizadas para evitar que os eventos incertos tragam grandes impactos no cronograma do projeto está na identificação dos caminhos e atividades críticas para o projeto e assim portanto poder priorizá-las em detrimento das outras que não apresentam sua execução e conclusão como críticas para o projeto.

Identificar os caminhos e atividades críticas do projeto nem sempre é trivial. Quanto mais complexo o projeto, mais complexo será tal identificação. Muitas técnicas utilizadas são muito manuais, exigindo assim muito esforço por parte da equipe e como consequência está muito sujeito a erros e falhas, bem como também não levam em consideração os fatores de aleatoriedade gerados pelos riscos associados a cada atividade.

A metodologia aqui utilizada permite a identificação dos caminhos e atividades críticas de forma estruturada partindo do algoritmo de busca em profundidade aplicado para identificação do caminho crítico do projeto, como feito por Liu *et. al.* (2022), possibilitando também o cálculo do makespan do projeto, que servirá de estimativa inicial para a duração total do projeto. E assim como Liu *et. al.* (2023) que posteriormente utilizaram a linguagem de programação Java como tecnologia auxiliar para implementação da metodologia.

Neste estudo será utilizado de forma integrada as bibliotecas “pandas” e “networkx” da linguagem de programação Python, por ser altamente performática para o tratamento de dados e por possuir um arcabouço de funções específicas para o cálculo do makespan da rede do projeto, respectivamente.

4.5. INDICADORES DE SENSIBILIDADE PARA MONITORAMENTO DOS RISCOS E ATIVIDADES (ETAPA 5)

A aplicação dos indicadores de sensibilidade pode ser realizada de forma a dar sentido a essa grande quantidade de dados gerados após a simulação de Monte Carlo, transformando o dado bruto em insights. Os indicadores de sensibilidade tem como objetivo identificar as

variáveis, fatores e atividades que têm o maior impacto nos resultados do projeto. Isso ajuda na priorização e re-alocação estratégica dos recursos, caso necessário, isso envolve a alocação adequada de pessoal, orçamento e outras fontes para gerenciar especificamente os riscos mais sensíveis e de maior impacto ao projeto, permitindo um gerenciamento mais focado e eficaz dos riscos, como realizado por Vanhoucke (2014).

Os indicadores de sensibilidade ajudam a criar planos de contingência mais robustos e adaptáveis. Ao entender quais variáveis têm maior influência nos resultados, possibilita concentrar os esforços de gerenciamento de riscos nas áreas nas quais os impactos são mais significativos, ajudando assim a economizar tempo e recursos, evitando o desperdício em áreas de menor sensibilidade.

5. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PARA GERENCIAMENTO DAS INCERTEZAS DO CRONOGRAMA DO PROJETO POR INDICADORES DE SENSIBILIDADE

Em um primeiro momento será realizada a aplicação da metodologia com o levantamento de dados históricos referente a duração das atividades de projetos semelhantes. Devido a grande dificuldade na obtenção de dados reais de projetos de engenharia e construção, recorreu-se a utilização de dados por fontes secundárias retirados de estudos anteriormente publicados que realizaram o mapeamento das atividades para uma rede de projetos. Neste presente estudo, foi realizada uma simulação numérica usando os dados do estudo de Votto, Lee e Berssaneti (2020), para fins de simulação e aplicação.

Comumente o escopo do projeto é dividido em atividades de entregas menores e mais gerenciáveis, mas que por sua características de sequenciamento e interdependência, o desempenho de uma afeta diretamente o desempenho de outra, e conseqüentemente do projeto como um todo. Segue-se portanto a criação de uma lista de todas as tarefas que precisam ser realizadas para completar todas as entregas do projeto. Essa lista de atividades bem como suas estimativas iniciais para a execução total é a base para o cronograma.

5.1. ETAPA 1: MODELAGEM DOS DADOS

Seja a seguir um dado projeto (Votto, Lee e Berssaneti, 2020) onde as atividade para execução estão enumeradas e suas relações de precedências registradas como pode ser observado na Tabela 1, onde também as durações planejadas para as atividades seguem uma distribuição triangular, e as atividades 1, 9, 19 e 36 são marcos para essa etapa, ou seja, sua duração é zero.

Tabela 1 - Estimativa para duração das atividades do projeto seguindo uma distribuição triangular

Atividades	Precedentes	Duração (dias)		
		Mínima	Média	Máxima
1 - Engenharia	-	0	0	0
2	-	10	15	20
3	2	25	30	35
4	2	20	30	40
5	3, 4	45	55	65
6	3	60	70	80
7	3	80	90	100
8	2	50	70	90
9 – Aquisições		0	0	0
10	6	20	25	30

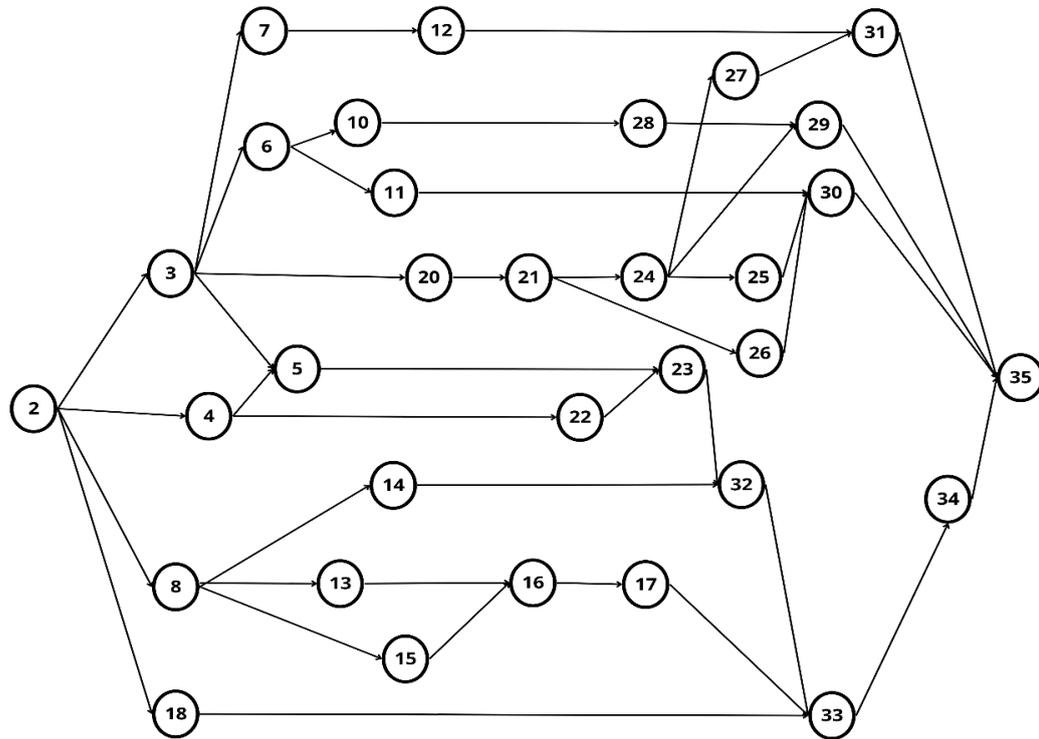
11	6	70	85	100
12	7	70	85	100
13	8	70	80	90
14	8	100	110	120
15	8	70	80	90
16	15, 13	25	30	35
17	16	12	15	18
18	2	170	190	210
19 - Construção	-	0	0	0
20	3	40	50	60
21	20	45	50	55
22	4	45	55	65
23	5, 22	80	95	110
24	21	15	20	25
25	24	18	20	22
26	21	35	40	45
27	24	65	75	85
28	10	75	80	85
29	24, 28	45	60	75
30	11, 25	12	15	18
31	12, 27	40	55	70
32	14, 22	12	15	18
33	17, 18	50	60	70
34	29, 33	12	15	18
35	34, 30, 31	12	15	18
36 - Entrega	35	0	0	0

A Tabela 1 representa portanto a modelagem utilizada para a aplicação, contemplando as etapas de levantamento, tratamento e transformação dos dados por meio da análise estatística da distribuição, que nesse caso temos que todas as atividades seguem uma distribuição triangular. Fator essencial que representa a integração das incertezas das atividades e é um fator fundamental para a simulação dos indicadores de sensibilidade por auxílio das ferramentas sinalizadas.

5.2. ETAPA 2: DRIAGRAMA DE REDES

Com a construção da tabela é possível construir o sequenciamento lógico do projeto, ou seja, a ordem em que as atividades precisam ser executadas. A coluna de precedências da tabela 1 nos permite estabelecer um diagrama de redes para o projeto conforme ilustrado na Figura abaixo:

Figura 04 - Diagrama de Redes do Projeto



Após a definição do sequenciamento lógico das atividades será aplicado um algoritmo heurístico específico para solucionar problemas que envolvam a definição do Makespan, que no nosso caso é o caminho crítico, a fim de encontrar uma estimativa para a duração total do projeto. E com o uso da metodologia de simulação de Monte Carlo é possível levantar todos os indicadores de sensibilidade para as atividades, sendo a técnica de grande valia para auxiliar na tomada de decisão no que se refere ao gerenciamento dos riscos, mitigando ou até evitando possíveis atrasos no Projeto.

O algoritmo que será descrito a seguir contempla as etapas de cálculo do caminho crítico e makespan do projeto, por meio de um algoritmo de busca em profundidade, estimativas e simulação de dados de duração com a integração da simulação de Monte carlo, e também, uma iteração entre os resultados de todas as simulações realizadas para o cálculo dos indicadores de sensibilidade.

5.3. ETAPAS 3 E 4: ALGORITMO PARA TRANSFORMAÇÃO DOS DADOS

O processo de transformação dos dados do cronograma do projeto para a obtenção de insights que auxiliam a tomada de decisão no que diz respeito ao processo de planejamento e

gerenciamento do cronograma foi realizado com o auxílio da tecnologia Python pela criação de um código seguindo o fluxograma para transformação dos dados apresentado na Figura 03.

A função principal a ser primeiramente executada é a responsável por gerar uma série de execução/repetições que variam em um intervalo totalizando ‘N’ repetições pois, para realizar uma aplicação voltada para a obtenção de insights por meio da análise de sensibilidade se faz necessário a criação de uma base de dados com um número suficiente de Durações para o projeto capaz de conduzir a uma análise estatística para se poder realizar inferências sobre o comportamento do projeto.

É nesse cenário que se faz necessário a aplicação do conceito da simulação de Monte Carlo. Para nosso algoritmo será realizado o processo repetidamente até obter um conjunto de dados com N simulações, dados esses que servirão de input para o cálculo dos indicadores de sensibilidade. Dessa forma temos:

```
# INPUTS:
#     n: ordem numérica da simulação
# OUTPUTS:
#     N: lista contendo os dados finais da simulação n

# Cria uma matriz/tabela para armazenar os dados da simulação
N = []

# realizar n simulações
for j in Range(1, n+1)

    # função geração de números aleatórios partindo de distribuições
    # pré definidas
    random.triangular(minim, maxim, med)*np.random.binomial(1,
    prob/100)

    N.append([])
```

Entre cada simulação, uma função presente no script tem como responsabilidade a geração de uma estimativa para o tempo das atividades seguindo os parâmetros das distribuição previamente apresentados na Tabela 1, gerado por dados históricos de projetos similares e apresentado por Votto, Lee e Berssaneti (2020). A biblioteca “random” do python é a responsável pela geração de dados aleatórios a partir de modelos de distribuições de probabilidades pré determinadas.

Seja portanto ED(X) a função em Python responsável por criar uma estimativa para a duração da atividade ‘X’ do projeto, o algoritmo responsável por criar dados de estimativa de simulação de execução de todas as atividades da rede do projeto:

```

# INPUTS:
#     X: lista para atividades do projeto
#     i: índice numeração da atividade
#     ED(): função de estimativa da duração para atividades
# OUTPUTS:
#     EDX: lista para estimativa das atividades
#     EDXi: estimativa para a duração da atividade

# cria as listas
X = []
EDX = []
# itera sobre a lista das atividades
for atividade in X:
    #realiza a estimativa para cada atividade
    EDXi = ED(atividade)
    #armazena os valores estimados em uma lista
    EDX.append(EDXi)

return EDX

```

Após a geração da lista de estimativas para a duração simulada das atividades, segue-se o desenvolvimento da terceira parte do código que consiste num algoritmo para determinar a duração total para o cronograma do projeto. O algoritmo a seguir foi baseado na teoria dos caminho crítico para grafos adaptado para a rede do cronograma do projeto, onde as atividades são representadas por Nós, as arestas representadas pelas relações de interdependência pré estabelecido para as atividades, cujo valor é representado pela duração estimada ED para a atividade ‘Xi’. Tomando G (EDX, PX) uma representação para o grafo onde EDX representa a lista para as durações estimadas para as atividades e P as relações de precedências, onde:

```

# INPUTS:
#     EDX: lista para estimativa das atividades
#     G: representação em matriz para o Grafo
#     PX: matriz de precedência para as atividades
#     PXi: lista precedência para a atividade Xi
# OUTPUTS:
#     DT: duração total do projeto

# Cria uma lista para o Grafo
G = []
# cria a matriz de precedências para as atividades
PX = ['Atividades', 'Precedentes']

# Cria uma matriz para o Grafo
G = [[] * colunas for _ in range(EDX)]

# adicionar elementos Nós e Arestas no Grafo
For i, duration in enumerate(EDX):
    for PXi in PX:
        G.append([i, EDXi], PXi)
# função para calcular DT pelo algoritmo para Makespan do Grafo
DT = makespan(G)

return DT

```

O algoritmo final (Apêndice C) se baseia em uma técnica fundamentada na busca em profundidade objetivando a otimização do processo pela busca intensiva do melhor conjunto solução dentro de um gigantesco universo de possibilidade, sendo portanto um algoritmo bastante escalável. A sua aplicação em Python pode ser auxiliada pela biblioteca “networkx” específica para Grafos. Fazendo desta forma, o algoritmo adaptado será capaz de nos retornar a duração total do projeto (DT).

Para nossa aplicação foi realizada um total de 10000 que retornarão dados de simulações que servirão para cálculo dos indicadores de sensibilidade (criticidade (CI), significância (SI), sensibilidade (SSI) e crucialidade (CRI)) conforme descrito anteriormente neste presente trabalho.

5.3.1. RESULTADOS OBTIDOS PARA A SIMULAÇÃO

Os resultados a seguir foram obtidos pela aplicação do script desenvolvido em Python, Apêndice C, na tabela do cronograma base do projeto (Tabela 1). A Tabela 2 representa os dados obtidos para as estimativas de duração para cada atividade do projeto (EDX) em todas as N (10000) simulações realizadas. Já a Tabela 3 apresenta os valores para a estimativa da duração total (EDT) do projeto bem como o caminho crítico encontrado para todas as N (10000) simulações realizadas.

Tabela 2 – N estimativas para a duração das atividades da rede do projeto

Atividades	EDX1	EDX2	EDX3	EDX4	EDX5	...	EDX9999	EDX10000
1	0	0	0	0	0		0	0
2	13,83	11,72	14,97	12,95	12,5		15,74	16,92
3	29,39	29	32,36	29,88	34,18		31,91	31,81
4	33,85	30,92	26,8	35	22,23		24,71	27,74
5	57,23	57,17	53,09	56,8	52,52		58,85	58,34
6	73,21	61,5	71,3	73,33	70,69		72,5	69,04
7	91,77	89,53	84,14	94,23	84,58		93,79	90,27
8	61,76	52,15	63,44	67,82	70,78		76,14	65,48
9	0	0	0	0	0		0	0
10	21,51	24,68	22,64	25,03	25,17		25,59	29,71
11	84,55	82,25	84,94	83,41	94,06		93,43	89,74
12	93,37	91,78	87,17	84,34	85,8		78,22	87,05
13	87,76	79,47	74,52	76,65	80,39		81,58	87,02
14	118,6	107,76	109,46	107,59	107,95		113,39	110,41
15	80,08	79,64	81,32	81,73	75,41		80,12	79,93
16	32,17	29,36	33,77	30,61	30,05		32,92	27,65
17	15,52	13,89	14,62	13,2	16,34		13,09	15,78
18	176,04	189,46	180,7	198,83	205,01		198,96	204,8
19	0	0	0	0	0		0	0
20	48,16	57,78	49,12	49,13	56,87		45,99	57,53
21	48,41	51,99	47,93	46,48	52,01		47,47	52,86
22	46,46	63,1	63,15	48,22	48,96		52,9	62,15
23	105,65	96,51	101,34	101,57	101,77		92,08	100,85
24	18,75	19,13	20,37	18,76	18,76		22,12	21,3
25	20,25	20,23	19,13	19,88	20,37		19,25	20,49
26	42,83	40,36	38,21	39,63	40		37,47	38,02
27	73,76	72,31	70,55	70,88	77,34		75,85	78,14
28	79,76	79,41	79,97	80	76,9		81,98	77,73
29	61,92	58,07	55,36	52,09	53,52		63,19	64,49
30	15,21	15,26	12,3	14,28	15,25		16,5	15,8
31	49,63	45,08	44,04	51,03	63,13		58,8	55,17
32	14,96	15	14,42	14,88	13,53		14,96	15,24
33	64,7	57,46	57,8	58,19	69,12		60,26	52,46
34	17,17	14,97	12,9	13,06	15,16		15,94	14,24
35	17,18	14,25	14,14	13,76	14,35		14,81	13,9
36	0	0	0	0	0		0	0

Tabela 3 – N estimativas para a duração total do projeto pelo cálculo do caminho crítico

Simulação	EDT	Caminho Crítico
EDT1	313,97	['2', '3', '6', '10', '28', '29', '34', '35']
EDT2	301,26	['2', '3', '20', '21', '24', '27', '31', '35']
EDT3	303,63	['2', '3', '6', '10', '28', '29', '34', '35']
EDT4	300,11	['2', '3', '6', '10', '28', '29', '34', '35']
EDT5	329,15	['2', '3', '20', '21', '24', '27', '31', '35']
EDT6	328,20	['2', '3', '6', '10', '28', '29', '34', '35']
EDT7	314,87	['2', '3', '6', '10', '28', '29', '34', '35']
EDT8	311,35	['2', '3', '6', '10', '28', '29', '34', '35']
EDT9	324,97	['2', '3', '20', '21', '24', '27', '31', '35']
...		
EDT9999	321,67	['2', '3', '6', '10', '28', '29', '34', '35']
EDT10000	327,62	['2', '3', '20', '21', '24', '27', '31', '35']

Com os dados da Tabela 3 e apoiado com o conceito de criticidade para o cronograma do projeto, é possível levantar também a criticidade de todos os caminhos críticos retornados pela simulação. A criticidade dos caminhos críticos foi obtida pelo cálculo da sua frequência relativa dentro de um conjunto de 10000 simulações realizados, e o resultado pode ser visualizado na tabela abaixo:

Tabela 4 – Índice de Criticidade para o Caminho Crítico

	Caminho Crítico	Contagem	Criticidade (%)
I	['2', '18', '33', '34', '35']	294	2,94
II	['2', '3', '20', '21', '24', '27', '31', '35']	4095	40,95
III	['2', '3', '6', '10', '28', '29', '34', '35']	4107	41,07
IV	['2', '3', '7', '12', '31', '35']	23	0,23
V	['2', '8', '13', '16', '17', '33', '34', '35']	742	7,42
VI	['2', '8', '15', '16', '17', '33', '34', '35']	739	7,39

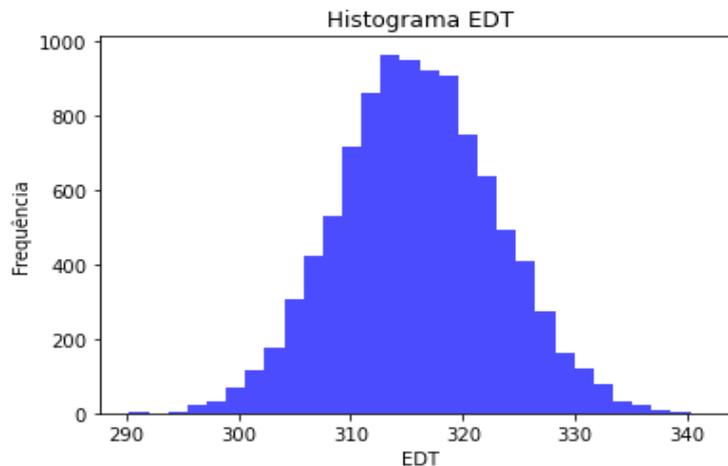
Ambas as Tabelas de resultados 03 e 04 apresentadas acima servirão de input tanto para realizar as primeiras inferências sobre a duração total estimada do projeto, quanto para prosseguir com a análise de sensibilidade das atividades do projeto, técnica fundamental para apoiar no processo de tomada de decisão.

5.3.2. INFERÊNCIA SOBRE A DURAÇÃO TOTAL DO PROJETO

A primeira etapa para se analisar o comportamento do conjunto de dados sobre a duração total do projeto (EDT) que pode ser observado no Tabela 3 foi a disposição dos dados em um histograma pois é capaz de oferecer insights sobre como os dados estão distribuídos e ajuda a entender melhor sua forma e características. Ao entender a distribuição dos dados, você

pode tomar decisões informadas sobre qual método estatístico ou modelo é mais apropriado para análise subsequente. A figura abaixo representa um histograma obtido para os dados da Tabela 3:

Figura 05 – Histograma EDT para estimação da duração total do projeto



Pela análise do gráfico é possível estimar que os dados estão seguindo uma distribuição normal, porém para confirmação nossa hipótese, o teste estatístico de Shapiro-Wilk, conforme apresentado no Apêndice A, foi aplicado para confirmação da aderência a distribuição normal com base no valor-p e em um nível de significância previamente escolhido (geralmente 0,05).

Após a verificação de normalidade dos dados, é possível obter o valor máximo para uma estimativa segura de duração total do projeto com um nível de significância de 0,05 que, o projeto cujo caminho de maior criticidade retornado pela simulação é composto pelas atividades ['2', '3', '6', '10', '28', '29', '34', '35'], conforme a Tabela 4, a duração total esperada para o projeto são 327.55 ou 328 dias.

5.4. ETAPA 5: ANÁLISE DE SENSIBILIDADE PARA AS ATIVIDADES DO PROJETO

Com as tabelas resultantes do processo de simulação, é possível calcular os índices de sensibilidade do projeto para cada atividade do cronograma, colocando-as em ordem de importância. A Tabela 5 apresenta os resultados obtidos para os valores calculados dos Índices de sensibilidade conforme demonstrados na seção 4.8.1 deste estudo.

Tabela 5 – Índices de Sensibilidade para as atividades do projeto

Atividades	Criticidade CI (%)	Significância SI (%)	Sensibilidade SSI (%)	Crucialidade CRI (%)
2	100,00	28,95	28,00	68,39
3	82,25	28,62	22,96	66,73
4	0,00	57,93	0,00	64,89
5	0,00	57,25	0,00	65,49
6	41,07	57,36	23,37	67,39
7	0,23	57,71	0,00	66,13
8	14,81	115,57	16,10	66,05
10	41,07	28,88	11,48	65,69
11	0,00	86,16	0,00	65,60
12	0,23	85,56	0,00	65,76
13	7,42	57,46	3,99	65,34
14	0,00	57,53	0,00	65,57
15	7,39	57,44	3,99	65,50
16	14,81	28,71	3,92	66,23
17	14,81	17,31	2,38	65,57
18	2,94	114,71	2,28	64,09
20	40,95	57,97	22,80	68,04
21	40,95	28,71	11,20	65,88
22	0,00	57,67	0,00	64,75
23	0,00	85,03	0,00	65,02
24	40,95	28,72	11,20	66,16
25	0,00	11,47	0,00	65,32
26	0,00	28,80	0,00	65,62
27	40,95	56,61	22,40	67,66
28	41,07	28,77	11,48	66,29
29	41,07	86,52	35,26	70,07
30	0,00	17,45	0,00	65,46
31	41,18	85,05	34,85	70,21
32	0,00	17,24	0,00	65,36
33	17,75	56,96	9,52	65,81
34	58,82	17,28	9,86	65,40
35	100,00	17,23	17,00	65,83

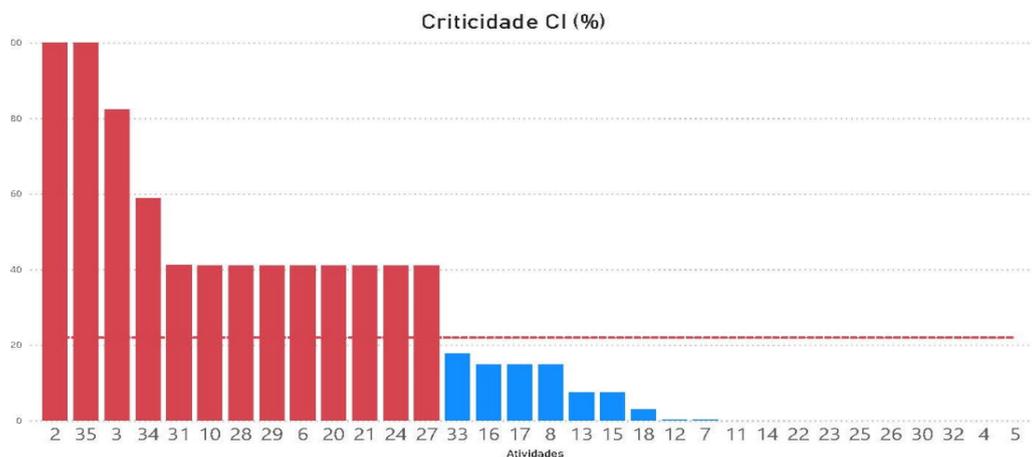
Com o resultado da Tabela 5 é possível iniciar o processo de tomada de decisão baseado em indicadores de sensibilidade para a rede do projeto. Como por exemplo, as atividades com valores nulo para a criticidade nos indica que elas apresentam grandes folgas, e dessa forma, baixo risco de pertencerem ao caminho crítico do projeto, podendo ter seus recursos remanejados para melhor eficiência das atividades de criticidade não nula.

Os gráficos que se seguem representam os valores para cada indicador de sensibilidade ordenado para as atividades da rede de projeto. Como exemplo, as Figuras de 06 a 09 indicam o índice de significância para as atividades do projeto escolhido, por ordem do número da atividade.

A linha vertical tracejada representa o Limite de ação, e pode ser definido como um valor limite mínimo da medida de sensibilidade. Este limite de ação define o grau de controle, que pode variar entre a adoção de nenhuma medida de controle ou controle total sobre a atividade do projeto.

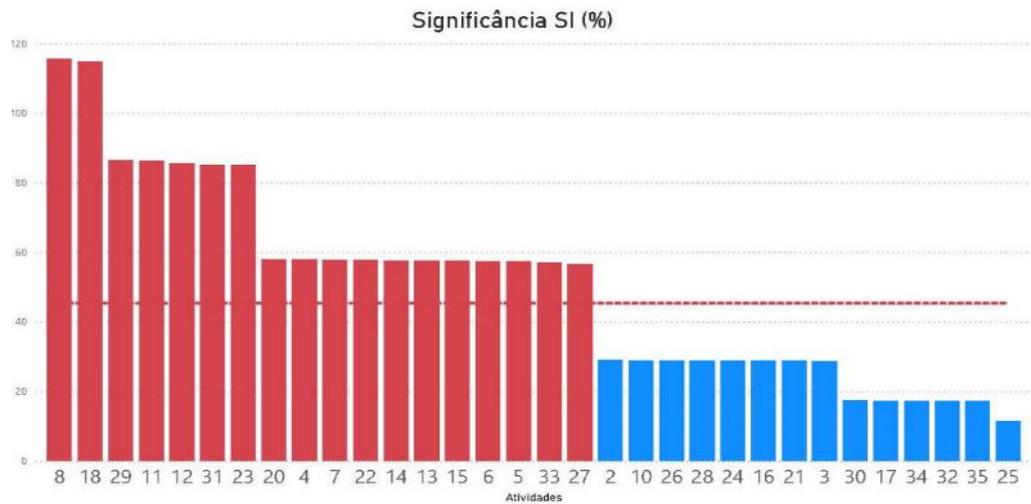
Todas as atividades com valores maiores ou iguais a esta linha são consideradas atividades altamente sensíveis e requerem atenção durante o processo de monitoramento, bem como também implementado no plano de mitigação dos riscos do projeto. No exemplo da figura, o limite de ação foi definido como o percentil de 50% em relação ao conjunto de dados, como aplicado por Vanhoucke (2010).

Figura 06 – Criticidade das Atividades do Projeto



A partir da linha de ação traçada no gráfico apresentado na Figura 06, representado pela linha horizontal vermelha tracejada, as atividades ‘2’, ‘35’, ‘3’, ‘34’, ‘31’, ‘10’, ‘28’, ‘29’, ‘6’, ‘20’, ‘21’, ‘24’ e ‘27’ estão na zona de ação, apresentam alta criticidade em relação às demais atividades, isso quer dizer que elas possuem alta probabilidade de estarem no caminho crítico do projeto, ou seja, serem atividades críticas para o projeto, e dessa forma devem ser priorizadas. Um destaque maior é dado para as atividades ‘2’ e ‘35’, que devido a sua disposição na rede de projeto, são ponto de partida e chegada, respectivamente para todas as demais atividades, dessa forma, assume criticidade de 100% como bem retornado pela metodologia aplicada.

Figura 07 – Significância das Atividades do Projeto



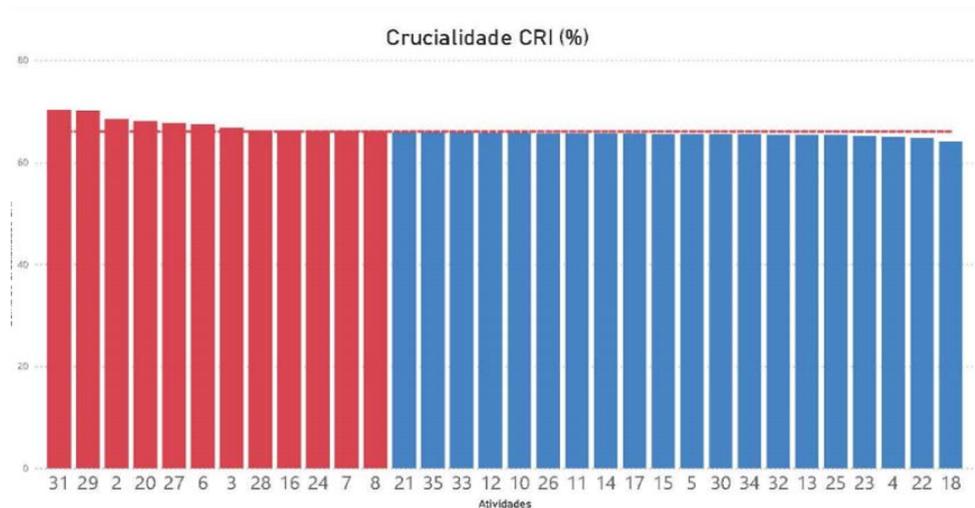
Com o índice de significância é realizado uma análise para a importância relativa de cada atividade. De acordo com a linha de ação também traçada no gráfico representado na Figura 07, as atividades '8', '18', '29', '11', '12', '31', '23', '20', '4', '7', '22', '14', '13', '15', '6', '5', '33' e '27' possuem altos níveis de significância, ou seja, possuem maior folga (Rosa, 2017). Tal fator pode ser analisado por parte do gerente de projeto a fim de identificar oportunidades para remanejamento de recursos, seja ele material ou humano, ou até mesmo um remanejamento da rede do projeto, caso possível. Porém um estouro no tempo de conclusão para uma atividade de alta Significância pode gerar grandes impactos na rede de projeto, podendo provocar mudanças no caminho crítico, visto que essas atividades representam grandes folgas para as demais atividades.

Figura 08 – Sensibilidade das Atividades do Projeto



O índice de Sensibilidade é uma métrica que representa o conceito de risco na definição clássica, probabilidade versus impacto, calculado aqui neste estudo como resultado das duas métricas anteriores, corroborando com a sugestão do PMI (2017) em seu Guia PMBoK para gestão de projetos. Dessa forma, as atividades '29', '31', '2', '6', '3', '20', '27', '35', '8', '10', '28', '21', '24', '34' e '33' representam alto risco para o cronograma base do projeto e devem ser priorizadas no processo de estabelecimento do plano de contingência e tomada de ação.

Figura 09 – Crucialidade das Atividades do Projeto



Já a Figura 09 com o índice de Crucialidade, que representa até que proporção da variação do projeto pode ser explicado pela variação da atividade em questão, ou seja, esta métrica representa no conjunto total de simulações realizadas, a proporção pela qual o projeto apresentou variação em relação da sua duração estimada pela variação daquela atividade em específico. Na nossa aplicação portanto as atividades '31', '29', '2', '20', '27', '6', '3', '28', '16', '24', '7' e '8' as que exigem maior controle por partes dos gerentes do projeto sob análise desta matriz.

5.5. MODELAGEM PARA INTEGRAÇÃO DE RISCOS NO CRONOGRAMA

Para ilustrar o propósito e as características do presente estudo de simulação, a presente etapa faz a inclusão de um mapeamento dos riscos que possam vir a afetar o cronograma base do nosso projeto. Dessa forma é incluído na modelagem do problema os riscos de alta severidade e que possam vir a impactar o desempenho e o correto andamento do projeto em relação à duração.

Os riscos são tratados com eventos, e cada um desses eventos possíveis tem uma probabilidade de ocorrência, bem como um impacto causado ao projeto, caso ele venha a ocorrer de fato. Para essa modelagem é considerado apenas o impacto em termos de tempo de duração em dias.

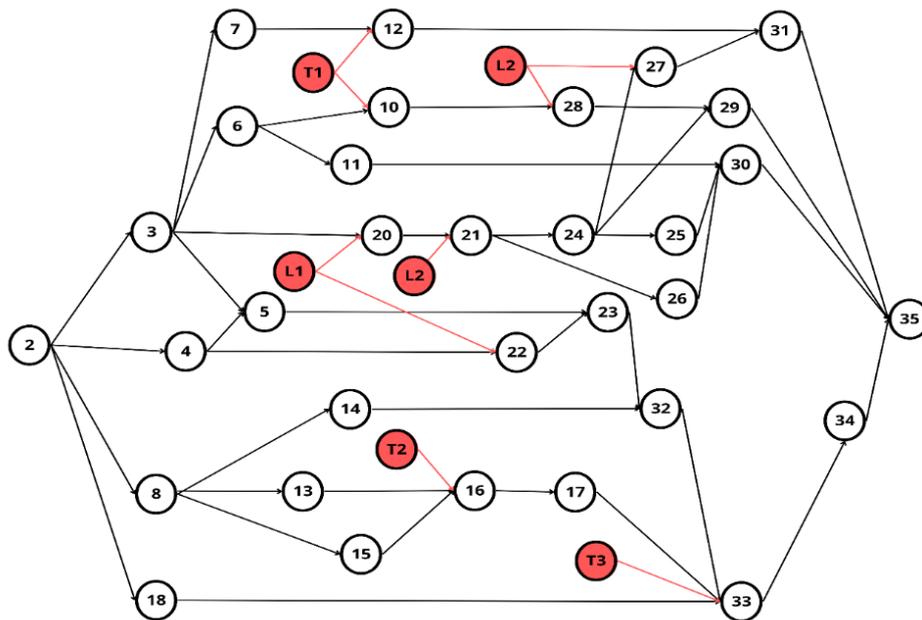
Essa análise de Probabilidade versus Impacto também pode ser modelada pela simulação de Monte Carlo, dessa forma os riscos serão incluídos na nossa rede de atividades referente a fase de execução do projeto. A tabela a seguir contém os possíveis riscos da etapa de execução do projeto, suas respectivas probabilidades de ocorrência e seu impacto a duração do projeto em dias:

Tabela 6 – Mapeamento de Riscos para o projeto

Risco	Descrição	Marco	Atividades Afetadas	Probabilidade (%)	Impacto (dias)		
					Min	Med	Max
L1	Acidentes na obra	Construção	20, 22	15	2	4	6
L2	Acidentes na obra	Construção	21	15	5	7	9
L3	Fortes Chuvas	Construção	28, 27	35	2	3	4
T1	Atraso de fornecedores	Aquisições	12, 10	35	3	5	7
T2	Atraso de fornecedor	Aquisição	16	25	3	4	5
T3	Atraso de fornecedor	Aquisição	33	20	2	3	4

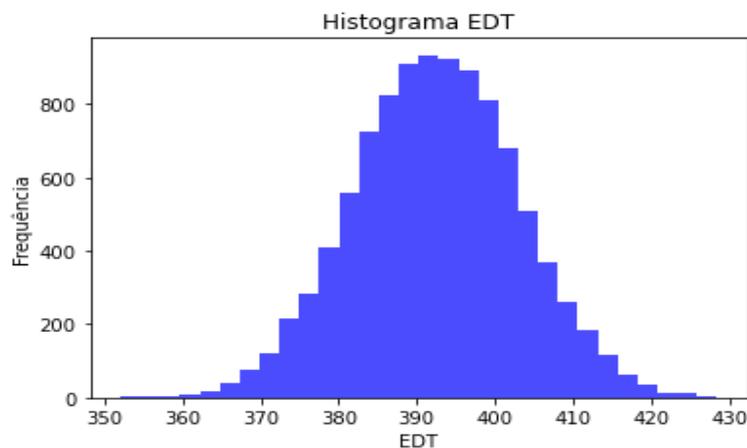
Dessa forma nossa rede de projetos assume a seguinte configuração:

Figura 10 - Diagrama de Redes do Projeto com Riscos integrados



Agregando alguns riscos de forma paralela as atividades a nossa problemática, dados referente a probabilidade dos eventos devem ser incluídos no nosso script. A modelagem foi realizada aplicando a distribuição de Bernoulli para os eventos dos riscos, pois é uma maneira simples de modelar experimentos ou eventos que têm apenas duas saídas possíveis, e a probabilidade de uma saída é conhecida com antecedência. Dessa forma é realizado uma nova estimativa para a duração total do projeto integrado com os riscos, bem como também é desenvolvido a análise de Sensibilidade. O gráfico que segue representa a distribuição de frequência para a estimativa da duração total do projeto com a integração dos riscos mapeados:

Figura 11 - Histograma EDT para estimação da duração total do projeto com Riscos



A duração média para o projeto com os riscos agregados a rede do projeto passa a ser dessa forma equivalente a 392 dias (todos os riscos em série às atividades) e para uma previsão

mais segura com estimativa de conclusão com um nível de confiança de 95% para 409 dias, e para um nível de confiança de 90%, a estimativa de término passa a ser de 405 dias. Dessa forma é percebido um aumento de 24,7% da estimativa para conclusão do projeto em relação a simulação para o cronograma de rede sem os riscos para as atividades associados, que era de 328 dias.

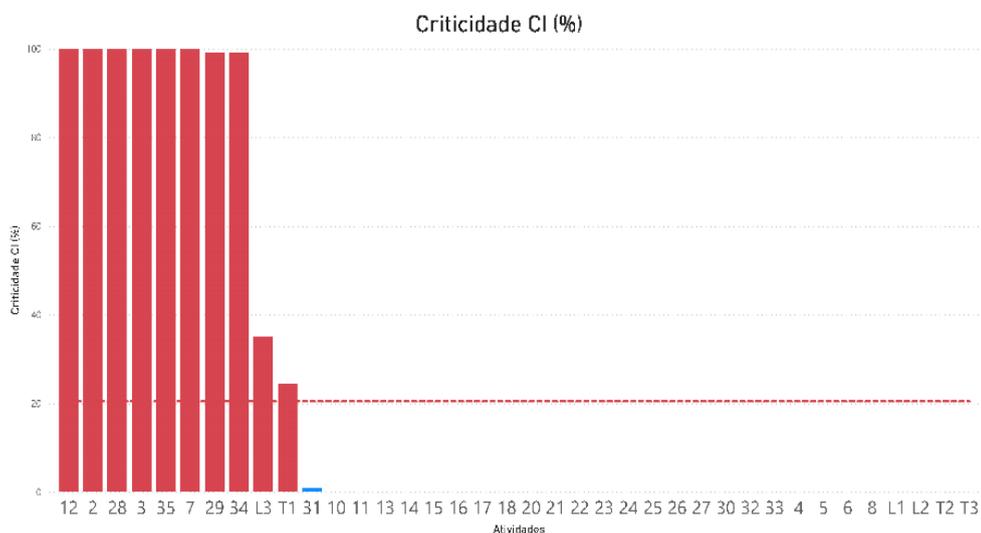
A Tabela 7 representa a configuração dos possíveis caminhos críticos com os riscos associados e seus respectivos índices de criticidade, observando assim uma maior possibilidades de mudança para o caminho crítico ao longo da etapa de execução do projeto, será exigido ainda mais um acompanhamento por parte dos gestores e gerentes do projeto de forma a evitar atraso nas entregas.

Tabela 7 – Índice de Criticidade para o Caminho Crítico com mapeamento de Riscos

	Caminhos Críticos	Contagem	Criticidade do Caminho Crítico (%)
I	['2', '3', '7', '12', '28', '29', '34', '35']	4793	47,93
II	['2', '3', '7', '12', '28', '31', '35']	40	0,40
III	['2', '3', '7', '12', '28', 'L3', '29', '34', '35']	2624	26,24
IV	['2', '3', '7', '12', '28', 'L3', '31', '35']	14	0,14
V	['2', '3', '7', '12', 'T1', '28', '29', '34', '35']	1611	16,11
VI	['2', '3', '7', '12', 'T1', '28', '31', '35']	16	0,16
VII	['2', '3', '7', '12', 'T1', '28', 'L3', '29', '34', '35']	893	8,93
VIII	['2', '3', '7', '12', 'T1', '28', 'L3', '31', '35']	9	0,09

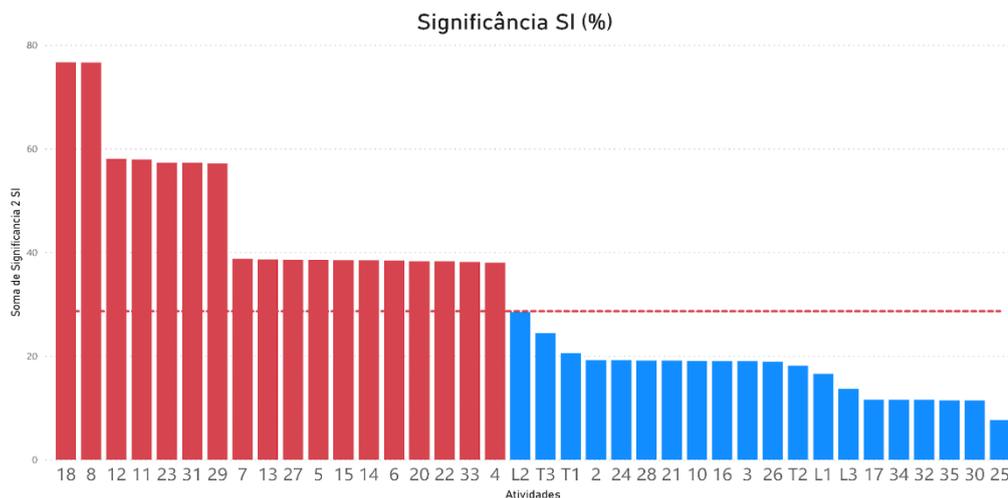
Nos gráficos abaixo é possível observar a nova configuração para os indicadores de sensibilidade para as atividades com mapeamento de riscos.

Figura 12 – Criticidade das Atividades com Riscos associados



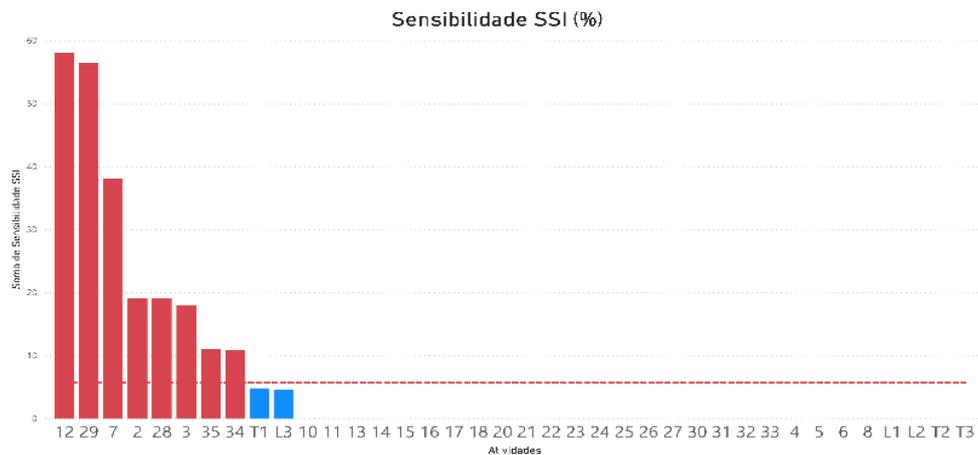
Analisando o gráfico da Figura 12 para a análise de Criticidade com a integração dos riscos é percebido uma mudança expressiva para o indicador de criticidade. A possibilidade de tais eventos que possam causar impacto ao andamento do projeto evidenciam muito mais os caminhos pelos quais estes eventos estão associados, ou seja, a presença dos riscos na rede do projeto tornou mais crítico algumas atividades pelas quais os riscos causam impacto de forma direta. Com por exemplo, a alta criticidade do Risco ‘T1’ evidenciando a criticidade da atividade ‘12’, e a alta criticidade do risco ‘R3’ evidenciando a criticidade da atividade ‘28’. Devido a natureza probabilística dos riscos, nem todos apresentam alta criticidade, podendo de certa forma serem ignorados por parte dos gerentes do projeto.

Figura 13 – Significância das Atividades com Riscos associados



Pela análise da Significância no gráfico da Figura 13 onde os riscos possuem um valor geral menor ao se comparar com os valores obtidos para as atividades, estando fora da região de tomada de decisão, e isso se deve a sua natureza probabilística que o torna eventos incertos. Já para as atividades é possível interpretá-las com eventos com 100% de probabilidade para ocorrência, tendo dessa forma uma maior significância geral em relação aos riscos.

Figura 14 – Sensibilidade das Atividades com Riscos associados



Sendo a sensibilidade o índice mais importante para a avaliação dos riscos acerca do cronograma do projeto, devido a sua natureza probabilidade versus impacto, é possível ver pela Figura 14 que os riscos estão fora da região de alto controle, isso significa que, mesmo que possam vir a ocorrer, seu grau de impacto sobre o andamento geral do projeto pode não ser tão significativo quanto a ocorrência de atraso nas atividades sobre a região de alto controle, sendo portanto a decisão de aceitação ao risco de responsabilidade dos gerentes do projeto.

Figura 15 – Crucialidade das Atividades com Riscos associados



E por fim, pela análise da crucialidade na Figura 15, é perceptível que os riscos tem uma representação maior em relação às atividades, o que também se deve a sua natureza, pois sua ocorrência sempre será um fator de atraso para o projeto, visto que numa modelagem para o cenário ideal, eles não devem estar presentes. Sua presença portanto é sempre um fator crucial para o projeto.

6. CONCLUSÕES

A simulação de Monte Carlo é uma técnica da estatística bastante aplicada por diversos estudos na literatura, e que pode ser aplicada a diversas áreas de estudos, incluindo na área de planejamento e gerenciamento do cronograma base do projeto. Devido às múltiplas possibilidades ainda é possível encontrar diversos estudos recentes na área aplicando esta técnica de forma diversa. Este estudo buscou portanto por meio da simulação de Monte Carlo gerar dados para a modelagem adotada para o cronograma base do projeto, a fim de possibilitar o cálculo de diversas métricas, como os indicadores de sensibilidade, que servem como base para auxiliar gerentes de projetos no processo de priorização e tomada de decisão.

A abordagem apresentada também se mostrou eficiente na implementação de uma modelagem voltada ao tratamentos dos riscos que possam a vir afetar o desempenho do projeto no que se diz respeito ao prazo de entrega dos pacotes de trabalho, possibilitando a adoção de um plano de ação mitigatória que venham a diminuir ou até mesmo eliminar o impacto de tais eventos no cronograma base.

Dessa forma o estudo apresenta relevância para os profissionais, pois fornece insights sobre a fase de controle e monitoramento da rede do projeto e fornece um conjunto de indicadores que são capazes de prescrever onde, ou qual atividade ou série de atividades, o gerente do projeto deve alocar mais recursos para evitar ou mitigar os riscos de atraso, ou, até mesmo, identificando oportunidades de melhoria de desempenho.

Este presente estudo também apresenta como principal ponto positivo a possibilidade da utilização das principais de tecnologias do mercado e presente nas principais organizações, que são as linguagens de programação, como ferramenta auxiliar na implementação da metodologia proposta, alcançando assim maior eficiência e maior margem para a incrementação de novas aplicações para geração de novos insights, sendo portanto altamente adaptável a realidade e necessidade da equipe do projeto. Outro ponto positivo é a viabilidade econômica, necessitando de baixo investimento inicial para aplicação comparado as ferramentas clássicas para gerenciamento de projetos.

Analisando dessa forma a influência da metodologia e conjunto de técnicas proposta, somado a eficiência do conjunto ferramental utilizado mais os resultados propostos alcançados com êxito, conclui-se portanto que o método aqui aplicado se mostra extremamente eficiente para apoiar gestores e gerentes de projeto em situações reais do planejamento do cronograma e estimativa final da duração total do projeto, além de permitir a mitigação ou até mesmo a eliminação dos riscos, além de possibilitar ganhos no que diz respeito a credibilidade do projeto

frente às partes interessadas e por fim na identificação de oportunidades de otimização dos resultados a serem alcançados.

Entretanto uma das principais dificuldades nesta metodologia está na necessidade da implementação de um banco de dados com durações para as atividades de projetos de mesma natureza, sendo dessa forma, como limitação presente neste estudo, a utilização de dados históricos de um conjunto de projetos da literatura, com estimativas de duração de atividades seguindo todos um modelo de distribuição triangular, o que dificilmente acontecerá em um projeto real de engenharia. Isso se deu exclusivamente pela grande dificuldade de acesso a projetos reais.

Tem-se, portanto, como sugestão a aplicação da metodologia proposta com a utilização de um conjunto de dados históricos reais de projetos reais da engenharia ou até mesmo uma aplicação real em uma construção de engenharia, que com certeza apoiará gestores a obter resultados cada vez mais satisfatórios.

O presente estudo se mostra com um médio potencial de inovação pois, apesar de já existirem muitos estudos referente a problemática apresentada, muitas das técnicas praticadas hoje em dia por grandes organizações do ramo de projetos não são capazes de incluir as incertezas atreladas às variáveis de tempo de duração das atividades e assim realizar um tratamento de riscos de forma mais eficaz. E apesar de já haverem métodos capazes de tratar tais variabilidades para o processo de gerenciamento de cronograma, muitas delas utilizam técnicas muito abrangentes que não possibilitam a tomada de ações de forma direcionada, ou utilizam softwares e ferramentas de alto custo de aquisição.

REFERÊNCIAS

- AACE (Association for The Advancement of Cost Engineering International); **AACE International Recommended Practices and Standards: Prática Recomendada nº 33R-15 da AACE International**; 2015.
- APM, Association for Project Management. **APM BODY OF KNOWLEDGE**. 6 Eed. Buckinghamshire, England: APM, 2012.
- AXELOS, **Global Best Practice. Managing Successful Projects with PRINCE2**. 6 ed. Norwich: TSO, 2017.
- BARUAH, S.; BURNS, A.; Sustainable scheduling analysis; **IEEE International Real-Time Systems Symposium**; Pg. 159–168; 2006.
- CARVALHO, M.M.; RABECHINI R. J.; **Fundamentos em Gestão de Projetos: construindo competencias para gerenciar projetos**; 3ed, São Paulo: Atlas; 2011.
- CAUCHICK-MIGUEL; **Metodologia de Pesquisa para Engenharia de Produção e Gestão de Operações**; Rio de Janeiro: Elsevier: ABEPRO; 2012.
- CHOUÉIRY, G.; SALAMEH, P.; Automating Data Analysis Methods In Epidemiology; **Journal of Data Science**; Vol.17; Pag.55-80; 2019.
- DAJIANG L., CHANGMING H., SONGYING G., JIAHE Y.; Z-Number-Based Quantitative Expression of Activity Information in Uncertain Project Scheduling; **Journal of Construction Engineering and Management**; Vol.148; 2022.
- DASOVIC, B.; GALIC M.; KLANSEK, M.; A Survey on Integration of Optimization and Project Management Tools for Sustainable Construction Scheduling; **Sustainability**; Vol.12; Pg.3405 ; 2020.
- DASOVIC, B.; GALIC, M.; KLANSEK, U.; Active BIM Approach To Optimize Work Facilities And Tower Crane Locations On Construction Sites With Repetitive Operations; **Buildings**; Vol.9; Pg.21; 2019.
- DASOVIC, B.; KLANSEK, M.; Integration of Mixed-Integer Nonlinear Program and Project
- GAO (Government Accountability Office); **GAO Schedule Assessment Guide, Best Practices For Project Schedules**; GAO, Washington, DC, 2012.
- GIL, A.C. **Métodos e técnicas da pesquisa social**. 6ed. São Paulo: Atlas, 2008.
- GRAY, Clifford F; LARSON, Erik W.; **Gerenciamento de projetos: o processo gerencial**; 4. ed.; Porto Alegre : AMGH; 2010.
- HAJDU, M.; BOKOR, O.; The effects of different activity distributions on project duration in PERT networks; **Procedia Soc. Behav. Sci.**; Vol. 119; Pg.766–775; 2014.
- HU, Xuejun; *et. al.*; Effective expediting to improve project due date and cost performance through buffer management; **International Journal of Production Research**; Vol. 53;

Pg.1460-1471; 2015.

HU, Xuejun; *et. al.*; Incorporation of activity sensitivity measures into buffer management to manage project schedule risk; **Eur. J. Oper. Res.**; Vol.249; Pg.717-727; 2016.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A.; **Fundamentos de metodologia científica 1**; 5. ed.; São Paulo: Atlas; 2003.

LARSON, E. W.; GRAY, C. F.; Project Management: the managerial process. 7ed. **New York: McGraw-Hill Education**; 2018.

LI, H.; WOMER N. K.; Solving stochastic resource-constrained project scheduling problems by closed-loop approximate dynamic programming; **European Journal of Operational Research**; Vol. 246; Pg. 20-33; 2015.

LIU Y., SHUANG J., ZHOU J., HU Q.; A branch-and-bound algorithm for the unit-capacity resource constrained project scheduling problem with transfer times; **Computers and Operations Research**; Vol. 151; 2023.

LIU Y., ZHOU J., LIM A., HU Q.; A tree search heuristic for the resource constrained project scheduling problem with transfer times; **European Journal of Operational Research**; Vol. 304; Pg.939-951; 2022.

LUIZ, J. V. R.; SOUZA, F. B.; LUIZ, O. R.; Práticas PMBOK e Corrente Crítica: antagonismos e oportunidades de complementação; **Gest. Prod.**; Vol. 24; Pag. 464-476; 2017.

MAHDAVI A., SHIRAZI B., REZAEIAN J.; Toward a scalable type-2 fuzzy model for resource-constrained project scheduling problem; **Applied Soft Computing**; Vol.100; 2021.

Management Tool to Support Sustainable Cost-Optimal Construction Scheduling; **Sustainability**; Vol.12; Pg.12173; 2021.

MARTENS, A., VANHOUCKE, M.; A buffer control method for topdown project control. **European Journal of Operational Research**; Vol.262; Pg.274-286; 2017.

MARTENS, L.; Schedule Risk Analysis Case Studies; Master's Dissertation - Master of Science in Business Engineering; **Universiteit Gent**; 2017.

MOORE, D. S. **The Basic Practice of Statistics**; New York: Freeman. 4 ed; 2007.

NEIRA, E. M. G., TORRES, J. R. M.; A Simheuristic for Bi-objective Stochastic Permutation Flow Shop Scheduling Problem. **Journal of Project Management**; Vol.4; Pg.57-80; 2019.

PMI, Project Management Institute, Inc. **Um Guia do Conhecimento em Gerenciamento de Projetos (Guia PMBOK)**. 6ed. Pensilvânia, EUA: PMI, 2017.

ROSA, R. J.; Avaliação Da Distribuição Bootstrap Na Análise Dos Riscos Em Cronogramas De Projetos; **Dissertação (Mestrado)-Universidade Federal do Paraná**; 2017.

SAID, H.; EL-RAYES, K.; Automated Multi-Objective Construction Logistics Optimization System; **Automation in Construction**; Vol.43; Pg.110-122; 2014.

SRDIC, A.; SELIH, J.; Delays in construction projects: Causes and mitigation. **Organ. Technol. Manag. Constr. Int. J.**; Vol.7; Pg.1383–1389; 2015.

TAKAKURA, Y.; *et. al.*; Application of critical path method to stochastic processes with historical operation data; **Chemical Engineering Research and Design**; Vol.149; Pg.195-208; 2019.

VALENKO, T.; KLANSEK, U.; An integration of spreadsheet and project management software for cost optimal time scheduling in Construction; **Organization, Technology and Management in Construction: an International Journal**; Vol.9, Pg.1627-1637; 2017.

VANHOUCKE, M.; **Integrated Project management and control**: first comes the theory, then the practice. New York: Spring, 2014.

VANHOUCKE, M.; Using activity sensitivity and network topology information to monitor project time performance; *Omega International Journal of Management Science*; Vol.38; Pg.359-370; 2010.

VOTTO, R., LEE HO, L., BERSSANETI, F.; Applying and Assessing Performance of Earned Duration Management Control Charts for EPC Project Duration Monitoring. **Journal of Construction Engineering and Management**; Pg.146; 2020.

WATERMEYER K.; ZIMMERMANN J.; A constructive branch-and-bound algorithm for the project duration problem with partially renewable resources and general temporal constraints; **Journal of Scheduling**; Vol.26; Pg.95-111; 2022.

WILLIAMS, T. M.; Criticality in Stochastic Networks; **Journal of Operational Research Society**; Vol.43; Pg.353-357; 1992.

XIONG, Y., HUANG S., WU M., SHE J., JIANG K.; A Johnson's-Rule-Based Genetic Algorithm for Two-Stage-Task Scheduling Problem in Data-Centers of Cloud Computing; **IEEE Transactions on Cloud Computing**; Vol.7; Pg.597-610; 2019.

ZHANG, J.; SHI, R.; DIAZ, E.; Dynamic monitoring and control of software project effort based on an effort buffer; **Journal of the Operational Research Society**; Vol.66; Pg.1555-1565; 2015.

ZHONGSHI S., SHAO W., PI D.; Effective Constructive Heuristic and Iterated Greedy Algorithm for Distributed Mixed Blocking Permutation Flow-shop Scheduling Problem; **Knowledge-based Systems**; Vol.221; 2021.

APÊNDICES

APÊNDICE A – APLICAÇÃO DO TESTE DE SHAPIRO-WILK EM PYTHON

```
import pandas as pd
from scipy import stats

# Importar a base de dados no formato ".xlsx"
caminho_arquivo_excel = 'caminho/da/tabela.xlsx'
df = pd.DataFrame(caminho_arquivo_excel)

# Extrair a coluna nomeada 'Amostra' da base de dados
amostra = df['Amostra']

# Realizar o teste de Shapiro-Wilk
statistic, p_value = stats.shapiro(amostra)

# Imprimir os resultados
print("Estatística de teste:", statistic)
print("Valor p:", p_value)

# Interpretar os resultados
alpha = 0.05 # Nível de significância
if p_value > alpha:
    print("Não podemos rejeitar a hipótese nula. A amostra parece seguir uma
distribuição normal.")
else:
    print("Rejeitamos a hipótese nula. A amostra não parece seguir uma distribuição
normal.")
```

APÊNDICE B – APLICAÇÃO DO TESTE DE ANDERSON DARLING EM PYTHON

```
import pandas as pd
from scipy import stats

caminho_arquivo_excel = 'caminho/da/tabela.xlsx'

# Carregar a planilha do Excel em um DataFrame
df = pd.read_excel(caminho_arquivo_excel, sheet_name='Sheet1')

# Extrair a coluna de dados da base de dados
amostra = df['Amostra']

# Realizar o teste de Anderson-Darling
result = stats.anderson(amostra, dist='expon')

# Interpretar os resultados
print("Estatística de teste:", result.statistic)
print("Valores críticos:", result.critical_values)
print("Níveis de significância correspondentes:", result.significance_level)

# Verificar se a estatística de teste é menor que os valores críticos para
rejeitar a hipótese nula
if result.statistic < result.critical_values[result.significance_level]:
    print("Não podemos rejeitar a hipótese nula. A amostra parece seguir uma
distribuição exponencial.")
else:
    print("Rejeitamos a hipótese nula. A amostra não parece seguir uma distribuição
exponencial.")
```

APÊNDICE C – APLICAÇÃO DA SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO E BUSCA EM PROFUNDIDADE PARA GERENCIAMENTO DA REDE DE PROJETOS

```

import pandas as pd
import numpy as np
from pandas import ExcelWriter
import random
import networkx as nx

# Importar a planilha dos dados históricos para as atividades do projeto
base_dados = 'C:/Users/CronogramaBase.xlsx'
df = pd.read_excel(base_dados)

def estimar_atividade(minim, maxim, med, prob):
    # Gerar um número aleatório de acordo com a distribuição triangular com a
    # bibliotec "RANDOM"
    r = random.triangular(minim, maxim, med)*np.random.binomial(1, prob/100)

    return r

# Função para calcular o caminho crítico usando busca em profundidade
def critical_path(df):
    G = nx.DiGraph()

    for _, row in df.iterrows():
        G.add_node(str(row['Atividades']), duration=row['EDX'])

    for _, row in df.iterrows():
        if row['Precedentes']:
            for dep in str(row['Precedentes']).split(', '):
                G.add_edge(dep, str(row['Atividades']))

def get_total_duration(path):
    return sum(G.nodes[activity]['duration'] for activity in path)

def dfs(node, caminho_atual, duracao_atual):
    nonlocal maior_caminho, maior_duracao

    if not list(G.successors(node)):
        # Atividade final alcançada
        if duracao_atual > maior_duracao:
            maior_duracao = duracao_atual
            maior_caminho = caminho_atual.copy()
        return

    for successor in G.successors(node):
        successor_duration = G.nodes[successor]['duration']
        dfs(successor, caminho_atual + [successor], duracao_atual +
            successor_duration)

    maior_caminho = []
    maior_duracao = 0
    for no_inicial in G.nodes():
        dfs(no_inicial, [no_inicial], G.nodes[no_inicial]['duration'])

```

```

        return maior_caminho, maior_duracao

# criar Tabelas para armazenar os dados da Simulação
# Tabela das estimativas para as atividades
dados_estimados = {'Atividades': df['Atividades']}
ed = pd.DataFrame(dados_estimados)

# Tabela para dados da Simulação do Caminho Crítico
dados_makespan = ['Simulacao', 'Makespan', 'Caminho Critico']
mp = pd.DataFrame(columns=dados_makespan)

# Repetir o processo de Simulação N vezes (MONTE CARLO)
for n in range(1, 10001):

    # Copia dos dados originais
    df2 = df.copy()

    # Gerar coluna valores para a primeira estimativa das atividades do
projeto
    df2['EDX'] = df2.apply(lambda row: estimar_atividade(row['Mínima'],
row['Maxima'], row['Média'], row['Probabilidade']), axis=1)

    # gerar as listas de durações e precedencia
    estimativa_atividades = df2['EDX'].tolist()

    # Usar query() para selecionar as linhas onde 'EDX' é diferente de zero
    df2 = df2.query('EDX != 0')

    # declarar lista
    precedencia_atividades = []

    #df2['Precedentes'] = str(df2['Precedentes'])
    aux = str(df2['Precedentes'])[2]).split(', ')
    df2 = df2.replace({np.nan: None})

    # chamar a função para calcular Makespan
    caminho_critico, makespan = critical_path(df2)

    # Inserir os dados da simulação para as atividades
    ed['EDX' + str(n)] = estimativa_atividades
    # Inserir os dados da simulação para a rede de projetos
    # Criar dicionário com os dados da nova linha
    nova_linha = {'Simulacao': 'EDX' + str(n), 'Makespan': makespan, 'Caminho
Critico': caminho_critico}
    # adicionar a nova linha ao DataFrame
    mp.loc[len(mp)] = nova_linha

```