



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

RAFAEL NASCIMENTO NERI

**APLICAÇÃO DE MODELO PARA AVALIAÇÃO DA PRODUTIVIDADE DE
OPERADORES EM UMA INDÚSTRIA SIDERÚRGICA COM ILIMITADOS SKUS**

Recife
2023

RAFAEL NASCIMENTO NERI

**APLICAÇÃO DE MODELO PARA AVALIAÇÃO DA PRODUTIVIDADE DE
OPERADORES EM UMA INDÚSTRIA SIDERÚRGICA COM ILIMITADOS SKUS**

Trabalho de Conclusão de Curso de
Graduação em Engenharia de Produção
da Universidade Federal de Pernambuco,
como requisito parcial para a obtenção do
grau em Engenharia de Produção.

.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo José Pires Ferreira

.

Recife

2023

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

Nascimento Neri, Rafael.

APLICAÇÃO DE MODELO PARA AVALIAÇÃO DA PRODUTIVIDADE DE
OPERADORES EM UMA INDÚSTRIA SIDERÚRGICA COM ILIMITADOS
SKUS / Rafael Nascimento Neri. - Recife, 2023. 44 : il., tab.

Orientador(a): Rodrigo José Pires Ferreira

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

1. Indústria Siderúrgica. 2. PERT. 3. Avaliação de Produtividade. 4. SKUs. I.
José Pires Ferreira, Rodrigo. (Orientação). II. Título.
620 CDD (22.ed.)

RAFAEL NASCIMENTO NERI

**APLICAÇÃO DE MODELO PARA AVALIAÇÃO DA PRODUTIVIDADE DE
OPERADORES EM UMA INDÚSTRIA SIDERÚRGICA COM ILIMITADOS SKUS**

Trabalho de Conclusão de Curso de
Graduação em Engenharia de Produção
da Universidade Federal de Pernambuco,
como requisito parcial para a obtenção do
grau em Engenharia de Produção.

Aprovado em: 27/04/2023

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Raphael Harry Frederico Ribeiro Kramer
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Marcelo Hazin Alencar
Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a minha mãe Alveny e meu pai Reniere, por todo suporte, carinho e atenção em todas as fases de minha vida e, principalmente, durante a graduação e realização desse trabalho.

Dedico ao meu avô, que mesmo ausente fisicamente durante essa etapa da minha vida, esteve sempre ao meu lado em pensamento.

A todos meus amigos que caminharam junto a mim até aqui, em especial, àqueles do colégio, Francisco, Marina, Nilo, Djalma, Iago e Paulo, que, em um período de tantas mudanças em minha vida, se mantiveram constantes por todo esse tempo. Com certeza essa jornada foi mais agradável com vocês.

A meu professor orientador, Rodrigo, por acreditar em meu potencial durante toda a graduação e por dar todo suporte e orientação durante minha graduação, iniciação científica e, por fim, monografia.

Por fim, à Universidade Federal de Pernambuco por ter me dado a oportunidade de aprendizagem e desenvolvimento na graduação.

RESUMO

A indústria siderúrgica no Brasil tem apresentado um alto crescimento devido ao crescimento, em paralelo, de outros setores do mercado, tais como, o da construção civil e do ramo eólico. Dessa forma, garantir a competitividade do setor em tempos de crescimento econômico, faz da produtividade da operação, a chave para o sucesso do negócio. Existem diversas maneiras de se garantir a produtividade do negócio, mas para aplica-las de maneira eficaz, é necessário entender o sistema produtivo como um todo e mapear as possíveis oportunidades de melhoria. Para isso, a avaliação de desempenho atua de maneira estratégica para a obtenção de insights e reconhecimento de gaps no processo. Porém, existem cenários onde a função produção é bastante complexa de se padronizar uma a avaliação de desempenho, tal como é o apresentado neste trabalho, onde a indústria analisada é produtora de vergalhões de aço cortados e dobrados, podendo ser descrita como um cenário de ilimitados SKUs. Portanto, neste trabalho, propõe-se a aplicação de um modelo de avaliação da produtividade desse cenário, utilizando a técnica PERT para estimação de tempos de operação e obtenção de distribuições de probabilidade que representem o tempo total de produção. A utilização da técnica PERT se mostrou como uma sofisticação do modelo de avaliação desenvolvido por Oliveira (2022) e apresentou resultados promissores em relação a sua aplicação e obtenção de resultados de maneira mais simplificada e o método de avaliação de desempenho se mostrou promissor na classificação do desempenho dos colaboradores no desenvolvimento de atividades secundárias à produção, aumentando a assertividade da aplicação de melhorias no processo.

Palavras-chave: Indústria Siderúrgica, PERT, Produtividade, SKU.

ABSTRACT

The steel industry in Brazil has shown high growth due to the parallel growth of other market sectors, such as civil construction and the wind industry. In this way, ensuring the sector's competitiveness, in times of economic growth, productivity of the operation turns out the key to the success of the business. There are several ways to ensure business productivity, but to apply them effectively, it is necessary to understand the production system as a whole and map possible opportunities for improvement. To this end, performance evaluation works strategically to obtain insights and recognize gaps in the process. However, there are scenarios where the production function is quite complex to standardize a performance evaluation, as presented in this work, where the analyzed industry is a producer of cut and bent steel bars, which can be described as a scenario of unlimited SKUs. Therefore, in this work, we propose the application of a productivity evaluation model for this scenario, using the PERT technique to estimate operating times and obtain probability distributions that represent the total production time. The use of the PERT technique proved to be a sophistication of the evaluation model developed by Oliveira (2022) and presented promising results in its methodology and obtained results in a more simplified way and the performance evaluation method proved to be promising in classifying the performance of employees in the development of activities secondary to production, increasing the assertiveness of the application of improvements in the process.

Keywords: Steel Industry, PERT, Productivity, SKU.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - <i>FRAMEWORK</i> DO MODELO DE AVALIAÇÃO DA PRODUTIVIDADE	25
FIGURA 2 - DISTRIBUIÇÃO NORMAL DO CENÁRIO 1.....	36
FIGURA 3 - DISTRIBUIÇÃO NORMAL DO CENÁRIO 2.....	37
FIGURA 4 - DISTRIBUIÇÃO NORMAL DO CENÁRIO 3.....	37
FIGURA 5 - DISTRIBUIÇÃO NORMAL DA DURAÇÃO DE TEMPO DA PRODUÇÃO COM N INTERVALOS.....	38
FIGURA 6 - INTERVALOS DE DESEMPENHO PARA O CENÁRIO 1.	39
FIGURA 7 - INTERVALOS DE DESEMPENHO PARA O CENÁRIO 2.	39
FIGURA 8 - INTERVALOS DE DESEMPENHO PARA O CENÁRIO 3.	40

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - TABELA DE TEMPOS ESTIMADOS PARA CADA ATIVIDADE NOS TRÊS CENÁRIOS.	28
TABELA 2 - TABELA DAS MÉDIAS E VARIÂNCIAS PARA CADA ATIVIDADE.	29
TABELA 3 - TABELA DO SEQUENCIAMENTO DE SKUS SELECIONADOS PARA O CENÁRIO 1.	30
TABELA 4 - TABELA DO SEQUENCIAMENTO DE SKUS SELECIONADOS PARA O CENÁRIO 2.	30
TABELA 5 - – TABELA DO SEQUENCIAMENTO DE SKUS SELECIONADOS PARA O CENÁRIO 3.	30
TABELA 6 - MATRIZ BINÁRIA DE ATIVIDADES PARA O CENÁRIO 1.	32
TABELA 7 - MATRIZ BINÁRIA DE ATIVIDADES PARA O CENÁRIO 2.	33
TABELA 8 - MATRIZ BINÁRIA DE ATIVIDADES PARA O CENÁRIO 3.	34
TABELA 9 - TABELA DE MÉDIAS, VARIÂNCIAS E DESVIO-PADRÕES PARA CADA CENÁRIO.	36

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	Justificativa e Relevância.....	13
1.2	Metodologia.....	13
1.3	Objetivos do trabalho	14
1.3.1	Objetivo Geral	14
1.3.2	Objetivos Específicos.....	14
1.3.3	Estrutura do Trabalho	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1	Referencial Teórico	16
2.1.1	Avaliação de Produtividade.....	16
2.1.2	Técnica PERT (Program Evaluation and Review Technique).....	17
2.2	Revisão de Literatura	18
2.2.1	Avaliação de Produtividade.....	18
2.2.2	Técnica PERT (Program Evaluation and Review Technique).....	20
3	ESTUDO DE CASO.....	23
3.1	Contextualização do Problema.....	23
3.2	Descrição do <i>Framework</i>	24
3.2.1	Estimação dos Tempos.....	25
3.2.1.1	Seleção das Máquinas.....	25
3.2.1.2	Lista de Atividades do Operador.....	26
3.2.1.3	Estimação de Distribuições de Probabilidade	27
3.2.2	Programação da Produção	29
3.2.2.1	Sequenciamento de SKUs.....	29
3.2.2.2	Lista de Atividades por SKU	31
3.2.3	Avaliação da Produtividade.....	35
3.2.3.1	Obtenção da Distribuição.....	35

3.2.3.2	Obtenção dos Intervalos de Desempenho	37
3.2.3.3	Classificação da Produtividade	40
4	DISCUSSÃO DE RESULTADOS	42
4.1	Limitações e Sugestões para Trabalhos Futuros	42
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44

1 INTRODUÇÃO

Carvalho et al. (2015) define a siderurgia como o setor produtivo responsável pela transformação do minério de ferro, conhecido como gusa ou ferro-esponja, em produtos a base de aço que são utilizados em diversos setores da economia, tais como: o setor automobilístico, construção civil, indústria de energia, naval e dentre outros; e muitos desses setores vem apresentado um crescimento significativo nos últimos anos. Em 2021, a indústria eólica teve um crescimento de cerca de 12%, fazendo o Brasil tomar a 6ª posição no ranking de capacidade total instalada (*Global Wind Report*, 2022) e o setor da construção civil, representa cerca de 13% do PIB mundial e no Brasil apresentou um crescimento de 9,7% em 2021 (IBGE, 2022).

No Brasil, a indústria siderúrgica se destaca pela produção de diversos produtos de aços longos e planos. O instituto Aço Brasil apresentou em seu mais recente anuário o cenário atual da indústria siderúrgica, mostrando que o Brasil é considerado o 9º maior produtor de produtos de aço no mundo, representando uma produção de 36,1 milhões de toneladas de aço produzidos em 2021, tornando o Brasil um importante *player* no setor siderúrgico mundial.

Por ser um setor produtivo bastante presente em diversos setores e diante todas a mudanças sociais, ambientais e tecnológicas que a indústria como um todo vem passando com o passar dos anos, verifica-se a importância de se garantir a competitividade dessa indústria no atual cenário econômico. Uma das formas de se garantir a competitividade empresarial é garantir a produtividade e eficiência do processo como um todo.

Contudo, avaliar a produtividade se apresenta como um desafio em muitas indústrias devido a complexidade inerente a seus processos e ao contexto em que ele se encontra, principalmente na indústria de vergalhões de aço cortados e dobrados, pois, o processo de corte e dobra insere uma certa complexidade na confecção de seus produtos, devido a infinidade de especificações que um produto pode ter a depender da demanda de seus clientes.

Portanto, propõe-se nesse trabalho a aplicação de um modelo de avaliação de produtividade do processo de uma unidade responsável pela produção de produtos de aço cortados e dobrados com infinitos SKUS (*Stock Keeping Units*), utilizando técnicas de simulação para auxiliar no processo de obtenção de intervalos de desempenho. Devido à complexidade da operação, simplificações foram propostas nesse modelo, tais como a utilização de conhecimento de especialistas e análise de um conjunto n de SKUS mais produzidos na unidade.

1.1 Justificativa e Relevância

Diante de um cenário de recessão econômica e de crescimento de alguns setores chaves da economia para o setor siderúrgico, tais como a indústria imobiliária e a indústria eólica, garantir a eficiência do processo se torna imprescindível para assegurar o atendimento às demandas crescentes.

Em um contexto de produção a qual cerca de 80% do tempo despendido na produção é gasto em atividades manuais não mapeadas e onde há a presença de infinitos SKUs, avaliar a produtividade da operação se torna, não só importante para garantir a eficiência da operação e, consequentemente, aumentar a competitividade do negócio, como também se torna um desafio mensura-la, devido a grande variabilidade de atividades requisitadas no processo de produtos customizados.

Diante desse contexto, esse trabalho propõe a implementação de um modelo de avaliação de desempenho que atenda a esse desafio de mensurar a produtividade no setor siderúrgico brasileiro. As vantagens desse trabalho se apresentam no maior conhecimento da operação como um todo, devido à análise de desempenho dos operadores em atividades secundárias à produção, e na possibilidade de se mapear as perdas do processo e atuar de forma mais assertiva para garantia de maior utilização da capacidade produtiva da unidade.

1.2 Metodologia

O presente trabalho pode ser classificado, segundo Gil (2002), quanto a finalidade como uma pesquisa aplicada. Pois, apresenta-se interesse em aplicação e utilização de técnicas de simulação para a avaliação da produtividade de operadores em uma unidade produtora de aço cortado e dobrado.

Quanto ao objetivo, essa pesquisa pode ser classificada como descritiva. Gil (2002) aponta que uma pesquisa descritiva tem como finalidade descrever características de uma determinada população ou fenômenos, ou evidenciar relação entre variáveis de um problema. Esse trabalho se propõe a observar um cenário real e aplicar um modelo de avaliação de produtividade, o qual relaciona variáveis de tempo de operação da atividade.

A natureza dessa pesquisa se define por quantitativa e qualitativa, pois traz a utilização de técnicas de simulação, utilizando planilhas Excel, para desenvolvimento do modelo de avaliação e qualitativa, por discriminar intervalos de desempenho para os operadores.

Quanto aos dados, essa pesquisa pode ser classificada, principalmente, como estudo de caso, pois, para o desenvolvimento da avaliação, serão utilizados dados levantados diretamente da operação, tais como os SKUS estudados, as operações envolvidas em sua produção e os tempos gastos pelos operadores, e de forma mais secundária, bibliográfica, pois, para fins de conceitualização do tema, será necessário fazer um levantamento do estado da arte e uma revisão bibliográfica simples será necessária para tal atividade.

Em relação as técnicas de pesquisa utilizadas nesse trabalho, segundo Gil (2002), serão a de documentação indireta, pois, como foi dito anteriormente, será feito um levantamento do estado da arte sobre o tema através de pesquisas bibliográficas, e a de levantamento, pois, serão recolhidas informações sobre o desempenho dos operadores para, em seguida, ser feita uma análise quantitativa desses dados, através da adequação nos intervalos de desempenho.

1.3 Objetivos do trabalho

1.3.1 Objetivo Geral

Esse trabalho tem como objetivo geral apresentar a aplicação de um modelo de avaliação da produtividade de operadores de uma unidade produtora de aços cortados e dobrados e discutir os resultados obtidos, afim de melhorar a produtividade da operação.

1.3.2 Objetivos Específicos

Dentre os objetivos específicos desse trabalho, estão listados:

- Fazer um levantamento do estado da arte sobre o tema a ser pesquisado e utilizá-lo como diretriz para a pesquisa;
- Realizar uma observação sistemática do problema, colhendo informações que possam ser utilizadas para o modelo de avaliação de produtividade;
- Obter os intervalos de desempenho através de técnicas de simulação de eventos discretos;
- Aplicação do modelo de avaliação de produtividade no cenário estudado;
- Comparar os resultados obtidos com os indicadores de produtividade utilizados pela empresa e avaliar os possíveis ganhos da utilização desse modelo.

1.3.3 Estrutura do Trabalho

Esse trabalho foi estruturado em 4 capítulos:

- Capítulo 1 – apresentação do tema, justificativa e relevância do trabalho, metodologia e objetivo geral e específicos;
- Capítulo 2 – discussão de conceitos básicos utilizados no trabalho, assim como desenvolvimento de uma revisão de literatura, de forma a fazer um levantamento do estado da arte sobre o tema;
- Capítulo 3 – descrição genérica de todas as etapas do *framework* proposto e aplicação do *framework* em um estudo de caso real;
- Capítulo 4 – Conclusões e limitações do *framework* apresentados, assim como as sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Referencial Teórico

2.1.1 Avaliação de Produtividade

Segundo Slack (2006), todo gestor de produção, ao administrar um sistema produtivo, deve se questionar como a função produção se adequa aos planos estratégicos da empresa, garantindo sua competitividade e em como avaliar sua contribuição para os objetivos estratégicos da organização, através da avaliação dos objetivos de desempenho utilizados.

Para tal, é necessário descrever quais os cinco objetivos de desempenho que a função produção pode atender para garantir a competitividade organizacional e atendimento aos objetivos estratégicos. Sendo eles: qualidade, rapidez, confiabilidade, flexibilidade e custo.

O conceito de qualidade pode variar a depender do cenário que esteja sendo analisado. Em uma prestadora de serviços de limpeza, qualidade pode significar o grau de esterilidade do ambiente, caso se trate de um ambiente hospitalar, nível de organização do ambiente, nível de satisfação do cliente e entre outros. Enquanto em uma empresa produtora de eletrodomésticos, o conceito de qualidade pode significar o atendimento às especificações do produto ou qualidade dos materiais utilizados em sua confecção. Porém, um consentimento entre todas as organizações é que a qualidade significa fazer o certo suas operações, pois, garantirá a satisfação dos consumidores externos.

Enquanto rapidez, tem um conceito bastante objetivo dentro da função produção. Sendo ele o quanto de tempo que os consumidores externos precisam esperar para obter o produto ou serviço disponibilizado pela organização. A rapidez garante que haja um giro de estoque mais rápido, repercutindo numa possível redução de seus estoques. Em sistemas produtivos que utilizam o conceito de produção puxada, esse objetivo se torna imprescindível para o seu adequado funcionamento.

Confiabilidade se refere a capacidade da organização de desenvolver e entregar seu bem de consumo em tempo hábil para seus clientes. Apesar de aparentar um conceito semelhante aos objetivos de rapidez e qualidade, a confiabilidade é um objetivo que se traduz mais na perspectiva do cliente sobre o produto ou serviço. Quando se trata da confiabilidade na operação, os clientes passam a ser os players internos à organização e se reflete na capacidade de entrega de resultado nas atividades inerentes ao sistema produtivo.

O objetivo de flexibilidade se traduz na capacidade de alteração e adaptabilidade a alguma mudança exercida na operação. Esse objetivo na operação pode se manifestar através de mudança de exigências dos clientes, fazendo-se necessário a mudança de visão e de atividades necessárias para entregar o que se é pedido.

Por fim, o objetivo de custo apresenta seu significado de maneira mais objetiva, expressando-se no valor financeiro que cada recurso necessita para produzir ou entregar um serviço ao cliente. O custo pode se manifestar no valor necessário a ser investido em matéria-prima, no valor investido em equipamentos e em recursos humanos.

Como pôde ser visto, cada objetivo de desempenho requer maneiras diferentes para avalia-los em distintos cenários. Dessa forma, o gestor deve garantir o alinhamento da função produção com o atendimento aos objetivos de desempenho estratégicos para a organização.

Para cada cenário organizacional, os objetivos de desempenho terão um grau de prioridade diferente. Por isso, torna-se importante garantir o alinhamento do sistema produtivo com os atuais objetivos estratégicos da empresa, para garantir a competitividade no mercado.

Para este trabalho o objetivo de desempenho avaliado é o de rapidez, tendo em vista que grande parte da capacidade produtiva da unidade é afetada com a perda de tempo ocasionada por atividades secundárias a produção. Ou seja, essas atividades afetam diretamente no tempo necessário para produzir uma certa quantidade de produto e limita a capacidade produtiva do operador/máquina. Dessa forma, o modelo apresentado se propõe em avaliar a produtividade da operação em relação ao atendimento do objetivo de desempenho rapidez.

2.1.2 Técnica PERT (Program Evaluation and Review Technique)

Na área de gestão de projetos, o gestor deve avaliar corretamente os riscos presentes no desenvolvimento do seu projeto, devido às incertezas presentes no projeto, relacionadas à falta de mão-de-obra, questões sobre o clima, eventuais atrasos, etc. Para evitar esses riscos, é de suma importância que o gestor apresente um plano de gerenciamento de riscos (Krajewski et al. 2012).

Nessa análise, deve-se levar em conta diversos fatores, tais como: o ajuste estratégico, avaliando quão alinhado com os objetivos o projeto se encontra; os atributos de serviço e produtos, envolvendo lançamento de produtos e serviços novos no mercado, havendo a presença de riscos tecnológicos e de mercado; competências da equipe e operações.

Para quantificar esses riscos, pode-se utilizar as redes PERT/CPM, onde a incerteza vinculada as atividades do projeto, podem estar atreladas ao seu tempo de execução. A técnica PERT

apresenta uma maneira simples de estimar tempos incorporando a incerteza de um cenário real. Para isso é necessário obter parâmetros que serão utilizados em uma distribuição beta, a qual será o fator gerador da incerteza no modelo. Esses parâmetros são da média e da variância, utilizadas na distribuição e eles podem ser obtidos através das equações (1) e (2), abaixo.

$$\text{Duração Média} = \frac{To + 4 * Tm + Tp}{6} \quad (1)$$

$$\text{Variância}^2 = \left(\frac{Tp - To}{4} \right)^2 \quad (2)$$

Onde, To , Tm e Tp representam, respectivamente, os tempos otimistas, tempos mais prováveis e os tempos pessimistas definidos a priori. Cada tempo de atividade é tratado como uma variável aleatória que pode ser obtida através da distribuição beta e todos os tempos obtidos por ela serão utilizados para definição do tempo de conclusão do projeto. Porém, para definir esse tempo, é necessário adotar que todos os tempos das atividades são independentes entre si.

Portanto, em decorrência da hipótese de que os tempos das atividades são variáveis aleatórias independentes entre si, pode-se utilizar o teorema do limite central para garantir que a soma de inúmeras variáveis aleatórias, independentes entre si, aproxima-se de uma distribuição normal. Logo, essa distribuição normal representará os tempos de conclusão possíveis do projeto.

Para este trabalho, foi utilizada técnica PERT/CPM para obtenção dos tempos das atividades para o desenvolvimento de cada SKU e, por fim, obtenção de uma distribuição normal que represente o tempo de conclusão de um sequenciamento de SKUs. Essa distribuição, posteriormente, será utilizada para obtenção dos intervalos de desempenho que formarão o modelo de avaliação de desempenho proposto. Mais detalhes sobre o *framework* serão expostos nas próximas seções.

2.2 Revisão de Literatura

2.2.1 Avaliação de Produtividade

Neste capítulo foi realizada uma revisão de literatura sobre o tema de avaliação de produtividade em diversos setores da economia. Tendo em vista que o modelo desenvolvido

nesse trabalho tem como principal objetivo a avaliação da eficiência na realização de atividades secundárias a produção e a produtividade da operação é de suma importância para garantir a competitividade empresarial, fazer um levantamento de trabalhos sobre esse tema se torna valioso para demonstrar a relevância desta pesquisa.

AlChaer e Issa (2020) apresentam uma metodologia de avaliação da produtividade de engenheiros na realização da gestão de projetos na área de construção civil. Nessa pesquisa é desenvolvida um modelo empírico que avalia a produtividade do engenheiro a partir do cumprimento de atividades repetitivas e da ocorrência de atrasos de entregas, onde esses valores servem de entrada para uma equação quadrática que retorna um valor em porcentagem referente ao desempenho do engenheiro. Essa métrica pode ser utilizada de diversas maneiras, seja no mapeamento de oportunidades de melhoria, até a definição de salários.

Shan et al. (2021), foi feita uma análise comparativa em relação aos indicadores de produtividade mais utilizados na área da construção civil. A área da construção civil apresenta bastante incerteza em relação a realização de suas atividades, sejam elas operacionais ou gerenciais, dessa forma a avaliação da produtividade nesse setor se torna um desafio gerencial, pois, cada cenário pode requerer a utilização de diferentes indicadores que mais se adequem. Primeiramente, foi feita uma revisão de literatura para se obter os principais indicadores utilizados para mensurar a produtividade, foram levantados 33 tipos de indicadores utilizados em diversas áreas da construção civil, e, posteriormente, foi feito um questionário interrogando 53 empresas situadas em Singapura para obtenção de dados a serem analisados estatisticamente. A relevância desse estudo se apresenta no levantamento de indicadores mais utilizados e a diferença no uso de certos indicadores quando se trata da avaliação de produtividade de diferentes níveis operacionais, evidenciando, assim, que a avaliação da produtividade é uma decisão estratégica no contexto organizacional.

Outro estudo desenvolvido por Lyu et al. (2020) avalia a produtividade dos trabalhadores em uma cidade que tem sua infraestrutura voltada para o tráfego, onde se tem fortes investimentos em transporte público e rede de tráfegos eficientes, a qual é denominado TOD (*Transit-Oriented Development*). O modelo de avaliação da produtividade desenvolvido demonstrou uma não relação entre um aumento da produtividade de trabalhadores na indústria com a presença do TOD, porém, quando a análise foi feita para empresas prestadoras de serviço, foi percebido um aumento na produtividade dos trabalhadores.

No estudo apresentado por Rodríguez et al. (2019) uma análise de produtividade do mercado eólico na Espanha é desenvolvida, expondo a evolução da produtividade total dos

fatores, ou TFP (*Total Factor Productivity*), através do indicador de produtividade chamado Índice de Malmquist (*Malmquist productivity index*). Com esse indicador, é possível medir o nível da evolução tecnológica de um sistema produtivo. Para desenvolvimento dessa pesquisa, foi utilizado dados de um banco de dados SABI (*Iberian Balance sheet Anlysis System*) e a técnica de Análise Envoltória dos Dados. Foi percebido que cerca de 96 fazendas eólicas apresentaram um aumento de 14% da capacidade instalada entre 2007 e 2015.

Silva et al. (2022) apresenta um sistema de pontuação e classificação de desempenho de mão de obra na construção civil. O objetivo do sistema é avaliar a eficiência e qualidade da mão de obra e fornecer informações para melhorar a produtividade e reduzir custos. O sistema de pontuação e classificação é baseado em cinco fatores principais: habilidade, conhecimento, experiência, atitude e segurança. Cada fator é pontuado em uma escala de 0 a 10 e a pontuação total é usada para classificar o desempenho do trabalhador em uma escala de A à D. O trabalho destaca a importância da avaliação do desempenho da mão de obra na construção civil, que é uma indústria com alta demanda de mão de obra e custos significativos. O modelo de avaliação apresentado pode ajudar a melhorar a eficiência e qualidade da mão de obra, bem como ajudar as empresas a identificar áreas que precisam de mais treinamento e desenvolvimento.

Percebe-se então uma grande preocupação em garantir a produtividade dos operadores de diversos setores industriais e para isso, modelos de avaliação da produtividade são desenvolvidos e aplicados e como foi percebido, existe uma grande concentração de esforços em avaliar a produtividade de trabalhadores na área da construção civil.

Dessa forma, percebe-se a relevância desse trabalho na área de avaliação da produtividade por apresentar um estudo de caso em uma indústria siderúrgica e em um cenário bastante específico de ilimitados SKUs.

2.2.2 Técnica PERT (Program Evaluation and Review Technique)

Nesta seção foi feito um levantamento do estado da arte sobre a técnica PERT (*Program Evaluation and Review Technique*) ferramenta bastante utilizada na área de gestão de projetos, e principal ferramenta, neste trabalho, para determinação de tempos de atividades em um sistema produtivo.

Na pesquisa desenvolvida por Erdei et al (2018) foi feita uma análise de produtividade de três empresas diferentes do setor alimentício. É pontuado que esse setor tem investido fortemente em eficiência do processo, pois, produzindo em menos tempo e com qualidade, se

entrega mais ao cliente. Dessa forma, para análise da produtividade, foi utilizada a técnica PERT-CPM para definição da duração das atividades através de uma distribuição beta definida pelos parâmetros de média e variância, obtidos por uma base de dados de 4 anos e meio de produção. Para analisar a produtividade foram analisadas os tempos de duração das atividades para se produzir uma tonelada de produtos e o que se observou foi que, empresas que investiram mais fortemente em automação dos processos, tiveram um resultado estimado de produção menor que as outras e percebeu-se que a técnica PERT apresenta uma certa robustez em seus resultados estimados, tendo em vista que os tempos obtidos das bases de dados se aproximaram bastante deles.

Em outra pesquisa desenvolvida por Liu et al. (2021), a técnica PERT foi utilizada para definição dos tempos de atividades de um projeto de construção civil e para a definição de sua rede de atividades. Como as atividades de construção civil apresentam um certo grau de incerteza em sua conclusão, foi desenvolvido um modelo que utiliza conceitos de teoria das restrições e PERT. O modelo focou na obtenção de uma distribuição de probabilidade que estima os tempos de atividades críticas do sistema, como as atividades gargalos e de elementos que compõe o DBR (*Drum-buffer-rope*). Os resultados obtidos apontaram para melhores resultados quando a simulação utilizava conceitos de DBR para o processo de sequenciamento de atividades, apresentando um tempo final de projeto quatro dias menores do que só utilizando a técnica PERT. Concluindo-se, portanto, que o uso da técnica PERT para o sequenciamento e definição de tempos de atividades de um projeto de construção civil, aliada à conceitos de teoria das restrições, diminuem a incerteza em sua operação, podendo entregar planejamentos de atividades mais eficientes, com menores tempos de finalização de um projeto.

Chang et al. (2021) apresenta em sua pesquisa a utilização da técnica PERT para desenvolver um modelo que refletisse a ordem sequencial de operações de descarte de peças em casos de emergências envolvendo a quebra de tubos de perfuração em plataformas marítimas. Em um acidente envolvendo quebra da broca de perfuração de plataformas marítimas, deve-se agir de forma a minimizar os danos aos sistemas da plataforma, utilizando ferramentas, tais como veículos operados remotamente, para executar a retirada de partes danificadas e subsequente instalação de uma nova. Esse processo envolve uma série de atividades importantes que devem ser corretamente mapeadas e analisadas para se propor melhorias em termos de tempo de execução, pois, como se trata de uma situação emergencial, quanto mais rápida sua execução, melhor. Dessa forma, um modelo foi desenvolvido

apresentando todas as atividades executadas, utilizando a rede PERT, podendo ser utilizado para futuros casos envolvendo acidentes nessa área.

Aplicando-se novamente na área de construção civil, Kholil et al. (2018) utiliza a técnica PERT-CPM para planejar o sequenciamento de atividades em um projeto construção de uma casa e estimar os tempos de suas atividades. Os dados obtidos para desenvolvimento dessa técnica foram obtidos através da observação direta da empresa, dados da literatura e entrevistas. Obteve-se com esse trabalho o tempo ótimo de construção de uma casa, utilizando o sequenciamento das operações definidas na rede PERT associados a seus tempos estimados. Utilizando-se do conceito do caminho crítico, obteve-se um tempo de 131 dias, o método PERT obteve um tempo de 136 dias, enquanto, utilizando-se dos dois métodos simultaneamente, obteve-se um tempo maior de 176 dias. Apesar de ter apresentado um resultado inferior, comparando-se com o método CPM, a técnica PERT ainda se mostra uma ferramenta robusta para planejamento das atividades e estimação de tempos para análise de eficiência da operação.

Uma aplicação distinta do método PERT é observado no trabalho de Masłowski et al. (2021) onde, utiliza-se essa técnica na área de gerenciamento de tráfego de transporte público municipal. O método PERT aplicado ao setor logístico tem como objetivo identificar uma rota que apresente o menor tempo de trânsito de um transporte público entre paradas de ônibus, ou seja, cada atividade estimada se refere a um nó de uma rede logística. Os resultados obtidos nessa aplicação foram bastante promissores, mostrando que houve um ganho em torno de 1 a 1,5 minutos por rota e, considerando que na cidade analisada, existem 47 ônibus trafegando, o ganho estimado chega a ser de uma hora e 10 minutos. Esse trabalho mostra não só a robustez dessa técnica, mas também sua vasta aplicabilidade.

Como foi possível perceber, a técnica PERT ainda vem sido bastante utilizada em diversos setores da economia e vem apresentando resultados promissores no que diz questão à avaliação de eficiência de processos. Dessa forma, evidencia-se a relevância desse trabalho ao aplicar essa técnica ao modelo apresentado por Oliveira (2022).

3 ESTUDO DE CASO

3.1 Contextualização do Problema

O presente trabalho consiste em um estudo de caso em uma indústria siderúrgica, situada na região metropolitana do Recife. Essa unidade é responsável pela confecção de produtos de aço cortados e dobrados para diversas áreas da economia, mas, principalmente, a indústria imobiliária e eólica. Segundo o Anuário Imobiliário desenvolvido pela SECOVI-SP, o mercado imobiliário apresentou um bom desempenho em relação a vendas, havendo aumento de cerca de 5% em relação ao ano anterior, tornando a perspectiva desse mercado para o ano de 2023 bastante otimistas. No setor eólico, segundo o boletim anual da Associação Brasileira de Energia Eólica, em 2021 foram instalados 7,6 GW de potência e a eólica foi a fonte que mais cresceu, com crescimento de 51% da nova capacidade instalada no ano.

Tendo em vista o crescente aumento desses dois setores da economia, o aumento na demanda de produtos de aço cortados e dobrados tendem a aumentar. Dessa forma, garantir o atendimento da demanda é uma tarefa de suma importância para a manutenção do negócio como um todo e para garanti-lo, avaliar a produtividade da operação torna-se imprescindível.

Porém, a avaliação da produtividade dos operadores dessa unidade se torna uma tarefa moderadamente complexa, devido à grande diversidade de produtos a serem confeccionados. Cada SKU pode apresentar especificações diferentes, tais como: o diâmetro do vergalhão, comprimento da peça, formato e quantidade. Essa variedade de especificações gera um cenário de infinitos SKUs em que cada um requer a execução de diferentes atividades, o que torna difícil a padronização de um modelo de avaliação.

Vale ressaltar que todas as máquinas da unidade são semiautomatizadas, necessitando da presença do operador para a execução de atividades secundárias à produção em si do material, tais como: Abastecimento de máquina, Introdução do vergalhão na máquina, Checagem da máquina, Amarração de materiais acabados dentre outras atividades.

Apesar da automatização da produção, foi percebido que, em um turno de produção no mês de junho, na máquina FOCUS, cerca de 60% do tempo a máquina realmente estava confeccionando produtos e nos outros 40% estava ociosa, enquanto os operadores responsáveis desempenhavam as atividades secundárias supracitadas. Observa-se, então, a possibilidade de se avaliar a produtividade dessas atividades, afim de evidenciar janelas de oportunidades no

processo, pois, todo tempo ganho para a máquina produzir, é um aumento na capacidade produtiva da máquina.

Importante ressaltar a presença de bancos de dados da produção em tempo real e das operações secundárias da produção para fundamentação das constatações anteriores e para obtenção de dados de entrada para o *framework* descrito a seguir.

3.2 Descrição do *Framework*

O *framework* utilizado, proposto por Oliveira (2022), pode ser definidas por três etapas básicas, sendo elas: a de estimação de tempos, referente a seleção do cenário a ser analisado e obtenção de estimativas de tempos para as atividades a serem analisadas; Programação da produção, a qual se refere a seleção de cenários de produção de forma a simular um cenário de produção real e, por fim, a avaliação da produtividade, onde será obtido uma distribuição que mais se assemelha ao cenário estudado e, através dela, definir intervalos de desempenho para avaliação da produtividade do operador. Esse *framework* é representado na Figura 1, assim como suas subsequentes etapas. Nesta seção, cada etapa do *framework* será descrita e aplicada no estudo de caso proposto.

Vale ressaltar que o a distribuição encontrada na etapa de avaliação de produtividade será única para cada caso analisado, tornando o método de avaliação, um método flexível para distintos cenários.

Neste trabalho, foi proposta uma sofisticação do modelo de avaliação desenvolvido por Oliveira (2022), utilizando conceitos de gestão de projetos, tais como a técnica de obtenção de estimativa de tempos de operação pela PERT. Esse aprimoramento veio para simplificar a aplicação de um modelo de avaliação de desempenho em um cenário de infinitos SKUs.

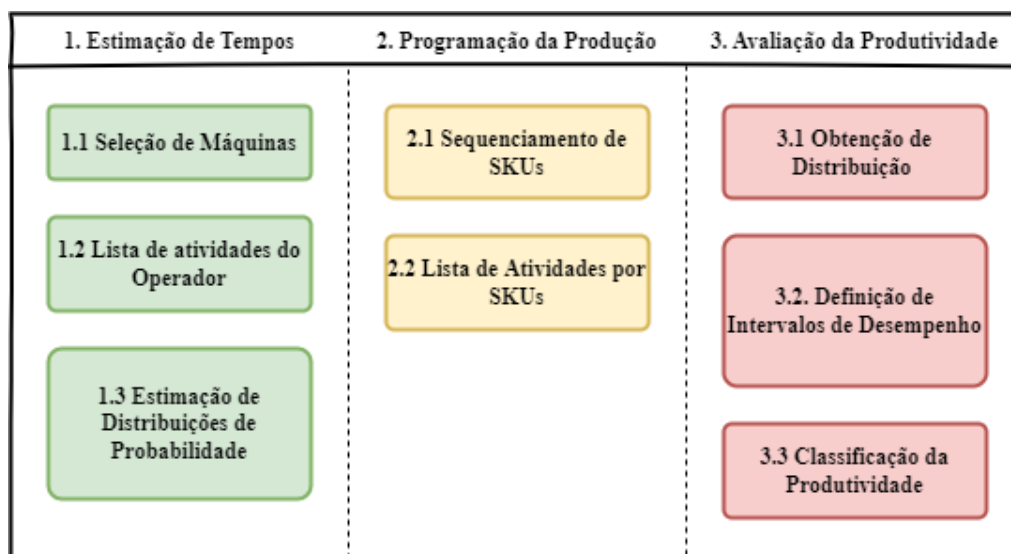


Figura 1 - Framework do Modelo de Avaliação da Produtividade

Adaptado de: Oliveira (2022)

3.2.1 Estimação dos Tempos

3.2.1.1 Seleção das Máquinas

Nessa etapa, a partir do contexto analisado, o decisor deverá selecionar a máquina a ser avaliada pelo modelo. A seleção da máquina proporciona o cenário de análise para avaliação, pois, diferentes SKUs poderão ser atribuídos a elas. A seleção da máquina pode variar a depender do contexto a ser analisado.

Como descrito na contextualização do problema, a Focus foi selecionada para análise de produtividade. Sua escolha se deve a unicidade da máquina no sistema produtivo como um todo.

Dentre as 20 máquinas presentes na unidade, a Focus é a única que consegue processar materiais de diâmetro de 5mm, tornando a confecção de materiais com esse diâmetro relativamente lenta, considerando a capacidade produtiva de outras máquinas, e bastante crítica para o processo, pois, em caso de eventuais quebras durante sua confecção, nenhuma outra máquina pode substituí-la. Outro fator importante para a escolha dessa máquina, foi a observação de uma grande perda de tempo em atividades secundárias a produção.

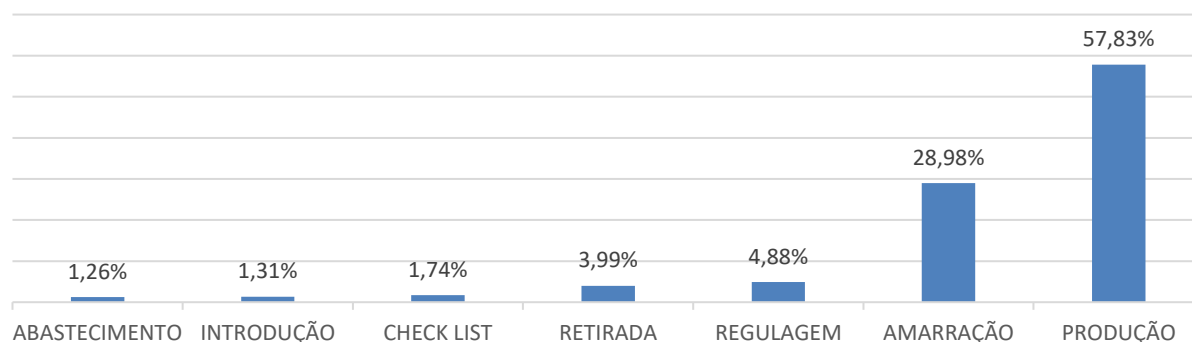


Gráfico 1 – Gráfico de porcentagens de tempos de cada atividade em um turno.

Fonte: O autor (2023)

O Gráfico 1 apresenta porcentagens de tempos utilizados para cada atividade em um turno durante o mês de junho. Pode-se observar a predominância da atividade de amarração no tempo útil de um turno, com 28,98% do tempo representando essa atividade, cerca da metade do tempo utilizado para a produção em si. Ou seja, durante um mês, cerca de metade do tempo de produção foi gasta em uma única atividade.

Dessa forma, percebe-se a oportunidade de ganho ao analisar a produtividade de diferentes colaboradores nessa máquina, pois, segundo Chase (2004) uma hora ganha em um recurso gargalo é uma hora ganha para o sistema como um todo. Logo, o mapeamento da produtividade dessa máquina, pode ajudar a visualizar perdas no processo e atuar de forma mais assertiva para ganho de eficiência.

3.2.1.2 Lista de Atividades do Operador

Para a etapa de estimação de tempos, é necessário definir quais atividades serão desempenhadas pelos operadores, pois, tempos serão estimados para cada atividade resultando em um tempo total de produção.

Dentre as atividades desempenhadas pelos operadores na Focus, estão listadas:

- 1. Abastecimento da máquina:** podendo ser o abastecimento manual de vergalhões pelo próprio operador, ou no abastecimento de carretéis de aço por um outro operador da área de movimentação de materiais;

2. **Introdução do vergalhão na máquina:** essa operação ocorre logo após o abastecimento da máquina, onde o vergalhão, ou rolo, deve ser introduzido na máquina para ela operar o corte e/ou dobra dele;
3. **Checagem da máquina:** em todo início de turno o operador é instruído a executar um checklist de segurança na máquina em que está operando, executando uma série de testes para avaliar o bom funcionamento dela. Caso contrário, a equipe de manutenção é acionada para atuar na máquina;
4. **Regulagem do vergalhão:** em alguns SKUs, devido a seu formato e comprimento, são necessárias haver regulagens dos dispositivos de dobras da máquina para a confecção dele de maneira segura e eficiente;
5. **Amarração do material acabado:** após a confecção do produto pela máquina, operador deve recolher o material produzido e amarra-lo de maneira a compactá-los. Essa operação ocorre através de pontos de amarração específicos sobre o corpo do produto, de maneira a compactar uma grande quantidade de produtos. Em SKUs de comprimentos e diâmetros pequenas, a utilização de sacos de rafia é recomendada para a operação;
6. **Retirada do material amarrado:** por fim, após a amarração de uma certa quantidade de produtos, eles são transportados, por outro operador, para a baia de estoque de materiais acabados, onde aguardarão serem carregados em carretas. A periodicidade dessa operação varia conforme a máquina, em alguns casos, a retirada do material amarrado ocorre logo após a amarração, mas, em outros, pode haver o acúmulo de materiais amarrados próximo a máquina e o lote de materiais é transportado para a baia de produtos acabados.

3.2.1.3 Estimação de Distribuições de Probabilidade

Na gestão de projetos, a técnica PERT é utilizada para estimação de tempos de atividades relacionadas ao projeto quando não se tem um histórico de dados para fundamentar a utilização de tempos.

Essa estimação utiliza informações de um especialista para determinar os tempos para cada um dos três cenários possíveis para cada atividade: o cenário otimista, pessimista e o mais provável. Esses tempos serão utilizados, posteriormente em uma distribuição de probabilidade Beta para estimação de tempos das atividades.

Para esse trabalho foi escolhida essa técnica devido ao contexto do processo. Devido a presença de infinitos SKUs, o processo de estimação de tempos para as atividades descritas no item anterior se torna uma atividade bastante complexa e a técnica PERT permite uma certa flexibilidade nesse ponto, além de ser uma técnica de estimação de tempos e é uma técnica bastante robusta para a modelagem de atividades reais (Hajdu e Bokor, 2016).

Para a utilização da distribuição Beta, é preciso definir dois parâmetros, sendo eles a definição da duração média e da variância da duração, utilizando, respectivamente, as equações (1) e (2), apresentadas anteriormente.

Esses dois argumentos serão utilizados para definir a distribuição Beta que representa a estimativa de duração das atividades. A Tabela 1 apresenta a tabela de tempos otimistas, mais prováveis e pessimistas para cada atividade desempenhada na máquina.

	Otimista	Mais Provável	Pessimista
Abastecimento	10	15	32
Introdução de Vergalhão	4	10	15
Checagem da Máquina	6	12	15
Regulagem da Máquina	1	3	6
Amarração	2	4	6
Retirada de Material	2	6	10

Tabela 1 - Tabela de tempos estimados para cada atividade nos três cenários.

Fonte: O autor (2023)

Com os tempos apresentado na tabela 1, é possível definir o valor dos dois parâmetros utilizados na distribuição Beta: a média e a variância das durações, utilizando as equações (1) e (2) apresentadas na seção anterior. As médias e variâncias obtidas podem ser visualizadas na Tabela 2 abaixo e serão utilizados nas próximas etapas do *framework*.

	Média	Variância
Abastecimento	17.00	30.25
Introdução de Vergalhão	9.83	7.56
Checagem de Máquina	11.50	5.06
Regulagem da Máquina	3.17	1.56
Amarração	4.00	1.00
Retirada de Material	6.00	4.00

Tabela 2 - Tabela das médias e variâncias para cada atividade.

Fonte: O autor (2023)

3.2.2 Programação da Produção

3.2.2.1 Sequenciamento de SKUs

Para obtenção da distribuição de probabilidade Beta que representa o tempo de execução do processo produtivo como um todo, é necessário se definir uma sequência de produção a ser seguida e para isso, é necessário definir quais SKUs serão utilizados para análise. Cada SKU é diferenciado entre si através de seu formato e comprimento.

No contexto atual, como se trata de um cenário que produz infinitos SKUs, a seleção dos SKUs deve ser feita de forma que melhor represente um cenário real de produção. Para isso, deve-se fazer uma análise dos SKUs mais frequentes da máquina em questão e definir seu sequenciamento de forma condizente com sua confecção real.

Para a definição do sequenciamento da produção, foram utilizados históricos de produção em junho, de dias e turnos diferentes, para garantir a diferenciabilidade dos SKUs utilizados e que diferentes operadores fossem utilizados. Dessa forma, três cenários distintos foram obtidos, onde o primeiro, segundo e terceiro cenário tem 26, 19 e 35 SKUs diferentes, que serão apresentados posteriormente.

Os sequenciamentos de SKUs utilizados foram obtidos utilizando um banco de dados históricos da produção de dias diferentes e turnos diferentes. Esses dados estão disponíveis em formato CSV, a qual é possível manipulá-los via Excel. O procedimento de obtenção desses sequenciamentos, foi através da retirada de SKUs duplicados (àqueles que apresentam mesmo formato e mesmo comprimento) em turnos de produção diferentes, utilizando a função retirar

duplicadas no Excel. O resultado é uma sequência de produção com SKUs únicos. Os sequenciamentos obtidos podem ser visualizados nas Tabela 3, 4, 5.

Cenário 1										
SKU	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Comprimento(cm)	915	1120	2260	2170	2160	2100	1775	1600	1990	1775
Formato	411	192	2	2	2	2	911	911	2	3
SKU	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Comprimento(cm)	1875	1675	1595	1395	1195	2955	2275	800	690	490
Formato	5	5	5	5	5	5	5	911	7	7
SKU	21	22	23	24	25	26				
Comprimento(cm)	1555	460	1355	1475	1515	860				
Formato	5	1	5	5	5	1				

Tabela 3 - Tabela do Sequenciamento de SKUs selecionados para o cenário 1.

Fonte: O autor (2023)

Cenário 2										
SKU	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Comprimento(cm)	2555	2355	2335	1030	2035	1235	1215	1155	1135	730
Formato	5	504	5	6	5	5	5	5	5	6
SKU	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
Comprimento(cm)	1035	530	380	555	1635	1535	1435	435	735	
Formato	5	6	6	5	5	5	5	5	5	

Tabela 4 - Tabela do Sequenciamento de SKUs selecionados para o cenário 2.

Fonte: O autor (2023)

Cenário 3										
SKU	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Comprimento (cm)	955	815	755	380	580	1435	1755	1575	1535	1475
Formato	5	5	5	6	6	5	5	5	5	5
SKU	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Comprimento (cm)	1455	1375	1275	1255	1155	1510	1560	3875	3475	3375
Formato	5	5	5	5	5	190	190	5	5	5
SKU	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Comprimento (cm)	3075	2875	2675	2695	2375	2335	2075	340	320	290
Formato	5	5	5	5	5	5	5	6	6	6
SKU	31	32	33	34	35					
Comprimento (cm)	595	3795	485	1675	1615					
Formato	5	5	911	5	5					

Tabela 5 – Tabela do Sequenciamento de SKUs selecionados para o cenário 3.

Fonte: O autor (2023)

3.2.2.2 Lista de Atividades por SKU

Utilizando os sequenciamentos obtidos na etapa anterior, deve-se analisar quais atividades serão desempenhadas para confeccioná-los. Após feita a análise, uma matriz binária de operações deve ser obtida, onde 1 representa a execução da atividade naquele SKU e 0 a não execução. Essa matriz pode ser representada pela Equação 3 abaixo, onde n é o número de atividades e m o número de SKUs.

$$\begin{pmatrix} \textit{Atividade 1} & \cdots & \textit{Atividade n} \\ a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \cdots & a_{mn} \end{pmatrix} \quad (3)$$

Para cada sequenciamento obtido na seção anterior é possível definir uma matriz binária de atividades, pois é possível cruzar o sequenciamento obtido com uma base de dados sobre as operações realizadas e, através de informações sobre os formatos, comprimentos e quantidades de peças. A partir dessas informações, foi possível definir três matrizes binárias de atividades para cada cenário proposto.

Cenário 1						
SKU	Abastecimento	Introducao	Check-list	Regulagem	Amarração	Retirada
1	0	0	1	1	1	0
2	0	1	0	1	1	1
3	0	0	0	1	0	0
4	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	1	0
7	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	1	1
10	0	0	0	0	1	0
11	0	0	0	1	0	0
12	0	0	0	0	1	0
13	0	0	0	0	1	0
14	0	0	0	0	1	0
15	0	0	0	0	0	1
16	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	1	0
18	0	0	0	1	1	0
19	0	0	0	1	0	1
20	0	0	0	0	1	0
21	0	0	0	1	0	0
22	0	0	0	0	1	0
23	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	1	0
25	0	0	0	0	1	0
26	0	0	0	0	1	1

Tabela 6 - Matriz Binária de Atividades para o Cenário 1.

Fonte: O autor (2023).

Cenário 2						
SKU	Abastecimento	Introdução	Check-list	Regulagem	Amarração	Retirada
1	0	0	1	1	1	0
2	0	0	0	1	1	1
3	0	0	0	1	0	0
4	0	0	0	1	1	0
5	0	0	0	1	0	0
6	0	0	0	0	1	0
7	0	0	0	0	1	1
8	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	1	0
10	0	0	0	1	1	0
11	0	0	0	0	1	0
12	0	0	0	0	1	0
13	0	0	0	0	1	1
14	0	0	0	1	1	0
15	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0
17	0	1	0	0	1	0
18	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	1	1

Tabela 7 - Matriz Binária de Atividades para o Cenário 2.

Fonte: O autor (2023).

Cenário 3						
SKU	Abastecimento	Introducao	checagem maq	Regulagem	Amarração	Retirada
1	0	0	1	1	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	1	1
5	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	1	1
9	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	1	0	0
12	0	0	0	0	1	0
13	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	1	0
15	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	1	0
17	0	0	0	0	1	1
18	0	0	0	1	0	0
19	0	0	0	0	1	1
20	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	1	1
23	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0
26	0	0	0	0	0	0
27	0	0	0	0	1	0
28	0	0	0	0	0	0
29	0	0	0	0	1	1
30	0	0	0	1	1	1

Tabela 8 - Matriz Binária de Atividades para o Cenário 3.

Fonte: O autor (2023)

Cada matriz binária será utilizada para definir uma distribuição de probabilidade nas etapas seguintes que serão utilizadas para definir os intervalos de desempenho para cada cenário.

3.2.3 Avaliação da Produtividade

3.2.3.1 Obtenção da Distribuição

A partir da lista de atividades por SKU e dos parâmetros da média e variância da duração para cada atividade, é possível determinar a média e a variância de toda a produção. Para isso deve-se multiplicar a matriz binária das atividades por SKU pela média e variância obtida por cada atividade com os tempos otimistas, mais prováveis e pessimista, vide equações (4) e (5).

$$\begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \cdots & a_{mn} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} média_1 \\ \vdots \\ média_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} média\ total_1 \\ \vdots \\ média\ total_m \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \cdots & a_{mn} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} variância_1 \\ \vdots \\ variância_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} variância\ total_1 \\ \vdots \\ variância\ total_m \end{pmatrix} \quad (5)$$

Onde, da esquerda para a direita, a primeira matriz se refere a matriz binária de atividades por SKU, a segunda da média e variância e terceira o resultado dessa multiplicação. Os índices m e n se referem, respectivamente, ao SKU e a atividade em questão.

O resultado dessa multiplicação resultará em uma matriz de médias e variâncias totais para cada SKU naquele sequenciamento. Segundo o teorema central do limite, a soma de variáveis aleatórias independentes, distribuídas de maneira idênticas, se aproxima de uma distribuição normal à medida que o número de variáveis aumenta. Dessa forma, a soma dessas médias e variâncias totais será o tempo médio total e a variância total de toda operação e serão utilizados como parâmetros para obter a distribuição normal que representará os tempos totais de produção.

Para cada cenário, foi possível obter as médias e as variâncias totais que serão utilizados como parâmetros de uma distribuição normal. Na Figura 6, observa-se os valores obtidos a partir da aplicação das equações (4) e (5), supracitadas.

	Média total	Variância total	Desvio-padrão
Cenário 1	133.52	58.54	7.651144
Cenário 2	119.52	52.54	7.248448
Cenário 3	110.18	50.3	7.092249

Tabela 9 - Tabela de médias, variâncias e desvio-padrões para cada cenário.

Fonte: O autor (2023)

Os parâmetros apresentados na tabela 9 servirão de input para uma simulação de tempos totais de produção que formarão distribuições normais para cada um dos três cenários. Para obtenção desses tempos, foi utilizado a plataforma R Studio para simular os tempos utilizando os parâmetros da Tabela 9, de forma simples, através da função inversa da distribuição normal. Como citado anteriormente através do teorema do limite central, quanto maior for o número de amostras, mais próximo será de uma distribuição normal, logo, utilizando os parâmetros de média e desvio-padrão, foram obtidos 1000 valores de tempos para plotar a distribuição normal para cada cenário. As distribuições normais podem ser visualizadas nas Figuras 2, 3 e 4 e essas distribuições serão utilizadas nas próximas seções para definir os intervalos de desempenho.

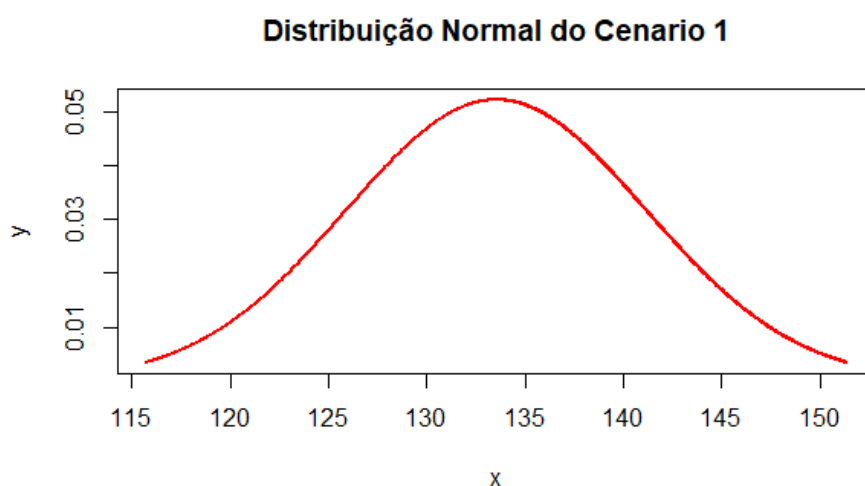


Figura 2 - Distribuição normal do cenário 1.

Fonte: O autor (2023)

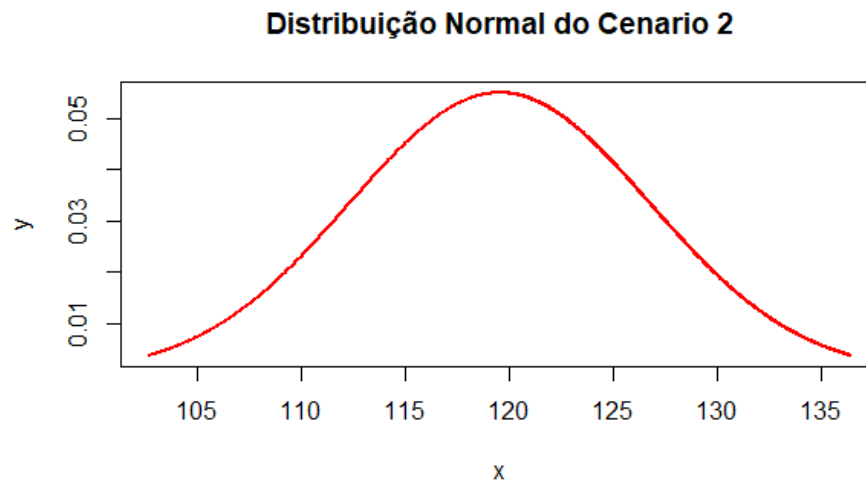


Figura 3 - Distribuição normal do cenário 2.

Fonte: O autor (2023)

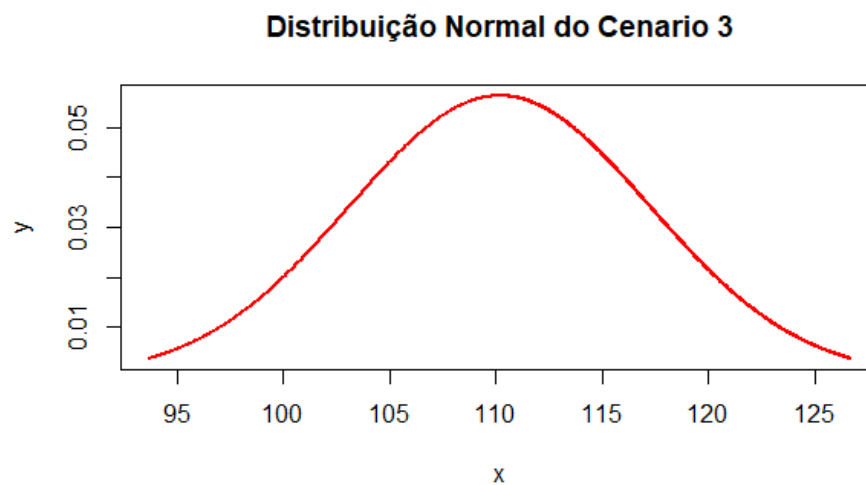


Figura 4 - Distribuição normal do cenário 3.

Fonte: O autor (2023)

3.2.3.2 Obtenção dos Intervalos de Desempenho

Com os parâmetros de média e variância, que darão forma a distribuição normal, será possível plotar a distribuição de probabilidades pelas possíveis durações de tempo. Essa

distribuição representará o tempo total de duração para produzir um determinado sequenciamento proposto.

A partir dessa distribuição, intervalos de tamanhos iguais, como apresentado na Figura 6, podem ser definidos para classificar o desempenho do operador naquele turno, onde intervalos mais próximos da origem, apresentam resultados melhores que os mais distantes, tendo em mente que a unidade analisada é o tempo. Os tempos que delimitam cada intervalo podem ser obtidos através da inversa da distribuição normal.

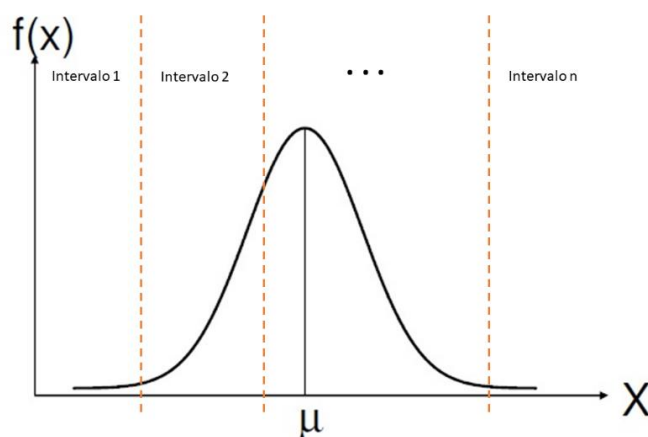


Figura 5 - Distribuição Normal da duração de tempo da produção com n intervalos.

Fonte: O autor (2022)

Com as distribuições obtidas na etapa anterior e apresentadas nas Figuras 3, 4 e 5, torna-se possível a obtenção de intervalos de desempenho para posterior avaliação de desempenho. Para os intervalos de desempenho, foram definidos 5 intervalos de desempenho, baseados nas escalas de avaliação de Likert, definidos por: Excelente, Muito bom, Bom, Razoável e Insatisfatório. Os intervalos foram definidos com tamanhos de área iguais, considerando 20% da área abaixo da curva para cada intervalo proposto. Para obtenção dos valores que delimitam os intervalos, foi utilizada a função inversa da função densidade da normal, considerando as probabilidades 20%, 40%, 60% e 80%.

Para cada cenário foi feita a divisão dos intervalos de desempenho e plotados nos histogramas obtidos, podendo ser visualizado nas Figuras 6, 7 e 8. As regras de classificação para o cenário 1, 2 e 3 podem ser definidas, respectivamente, pelas Fórmulas 6, 7 e 8, abaixo.

$$\begin{cases} \text{Excelente:} & t < 127,08 \\ \text{Muito Bom:} & 127,08 \leq t < 131,58 \\ \text{Bom:} & 131,58 \leq t < 135,45 \\ \text{Razoável:} & 135,45 \leq t < 139,95 \\ \text{Insatisfatório:} & t \geq 139,95 \end{cases} \quad (6)$$

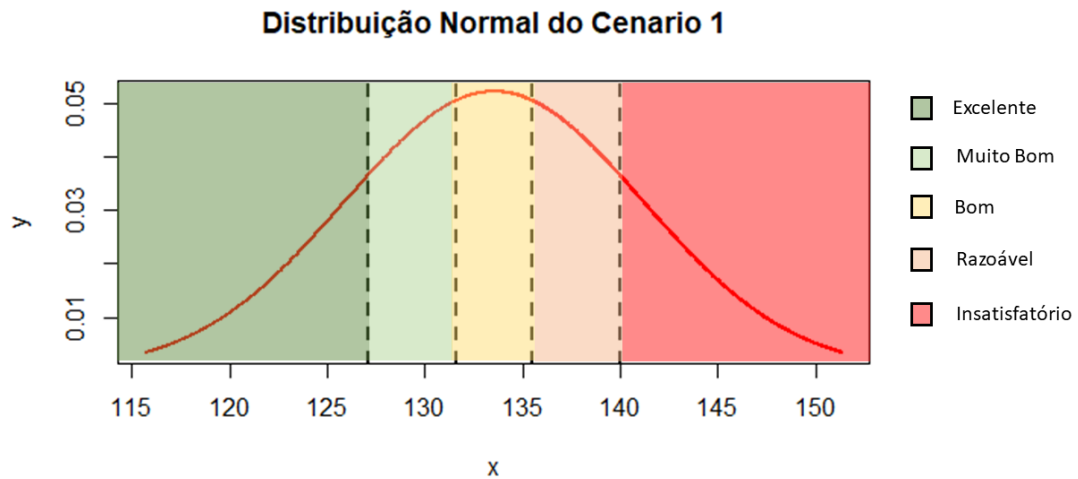


Figura 6 - Intervalos de desempenho para o cenário 1.

Fonte: O autor (2022)

$$\begin{cases} \text{Excelente:} & t < 113,41 \\ \text{Muito Bom:} & 113,41 \leq t < 117,68 \\ \text{Bom:} & 117,68 \leq t < 121,35 \\ \text{Razoável:} & 121,35 \leq t < 125,62 \\ \text{Insatisfatório:} & t \geq 125,62 \end{cases} \quad (7)$$

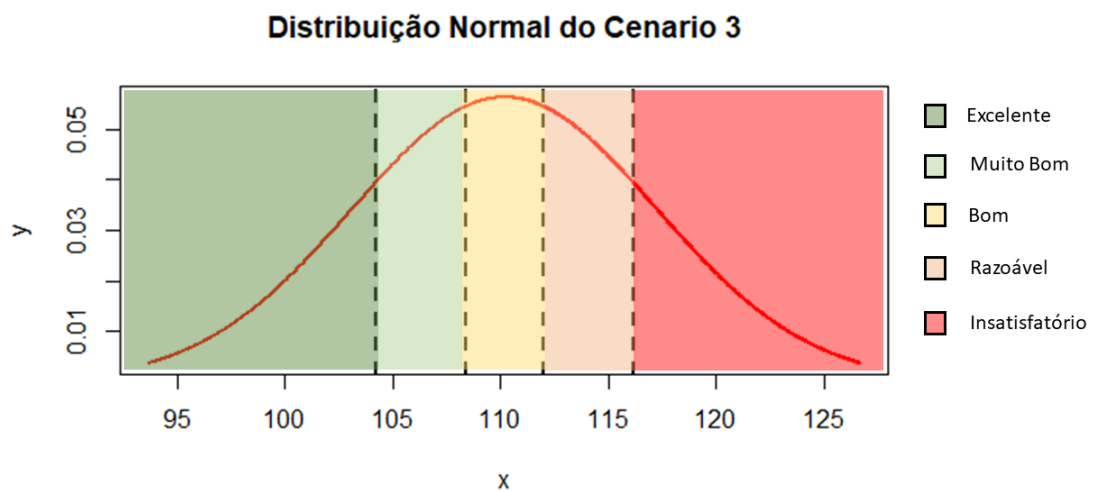


Figura 7 - Intervalos de desempenho para o cenário 2.

Fonte: O autor (2022)

$$\begin{cases} \text{Excelente:} & t < 104,21 \\ \text{Muito Bom:} & 104,21 \leq t < 108,38 \\ \text{Bom:} & 108,38 \leq t < 111,97 \\ \text{Razoável:} & 111,97 \leq t < 116,14 \\ \text{Insatisfatório:} & t \geq 116,14 \end{cases} \quad (8)$$

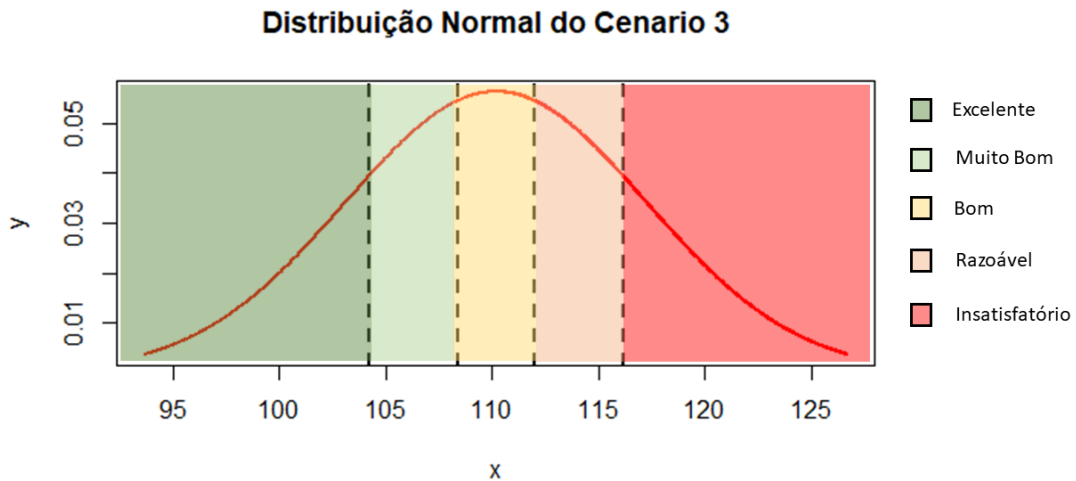


Figura 8 - Intervalos de Desempenho para o cenário 3.

Fonte: O autor (2022)

3.2.3.3 Classificação da Produtividade

Por fim, com os intervalos de desempenho bem definidos na etapa anterior, é possível fazer a avaliação de produtividade do operador. Para isso, será necessário obter tempos reais de operação para a máquina selecionada, levando em conta as mesmas atividades desempenhadas e analisar a adequação do tempo despendido nas atividades listadas com os intervalos de desempenho criados.

Para a avaliação da produtividade dos operadores, foi possível obter os tempos gastos para produzir cada sequenciamento a partir de uma base de dados com as operações acionadas pelo operador no momento. Dois operadores, que chamaremos de operador A e B, de turnos diferentes operaram nos cenários analisados, um no turno da tarde e outro no turno da manhã de dias diferentes.

Para o cenário 1, o operador A totalizou 132,5 minutos para desenvolver o sequenciamento proposto e, por se encontrar entre 131,58 e 135,45, teve seu desempenho avaliado como bom. Para o cenário 2, o operador B totalizou 65,5 minutos e por se encontrar abaixo de 113,41 minutos, pôde ser avaliado com o desempenho excelente. Por fim, para o cenário 3, o operador B totalizou 117,35 minutos e por se encontrar acima de 116,14, teve seu desempenho avaliado como insatisfatório.

Vale ressaltar que existe um certo grau de incerteza na obtenção dos tempos totais desenvolvidos pelo operador, pois, eles são obtidos através do computador de bordo da máquina, onde o operador deve acionar o início da operação utilizando uma pistola leitora de códigos de barras, ou seja, a marcação de tempo destinado às operações analisadas neste trabalho está suscetível ao cumprimento correto do apontamento do operador na operação listada.

4 CONCLUSÃO

A aplicação do modelo de avaliação em um caso real, com tempos de operação disponíveis, mostrou-se bastante promissora, pois, apresentou oportunidades de melhoria de atividades paralelas a produção e de maneira simples.

A utilização de conceitos de gestão de projetos, tais como o PERT, auxiliou, não só na simplificação do modelo desenvolvido por Oliveira, mas também na diminuição do esforço computacional, pois, não apresentou necessidade de se aplicar simulação para obtenção de tempos para a distribuição final. Apenas com os tempos otimistas, mais provável e pessimista, definido por um especialista, facilmente se obteve os parâmetros finais para a distribuição final utilizada. O mesmo se aplica para a definição dos tempos que limitam cada intervalo, através da função inversa da normal.

A avaliação da produtividade de diferentes cenários em uma mesma máquina pode dar futuros insights para a gestão sobre propostas de melhoria e entendimento sobre a performance dos colaboradores.

A exemplo do cenário 3 e 2, que, apesar de terem um número de SKUs diferentes, analisando na perspectiva dos formatos, eles não apresentaram tanta diferenciação. Sendo predominante formatos repetidos que não necessitam de tantas operações paralelas como a de regulagem e movimentação de materiais de maneira tão frequente. Dessa forma, comparar os resultados obtidos pelo modelo e avaliar a situação de maneira *in loco*, pode dar insights para melhorias operacionais e de gestão de recursos humanos dentro da unidade.

Neste trabalho, além de aplicar um modelo de avaliação em um cenário pouco trabalhado na literatura, apresentou-se uma sofisticação do modelo criado utilizando conceitos de PERT em sua obtenção de dados, tornando sua metodologia mais simplificada.

4.1 Limitações e Sugestões para Trabalhos Futuros

Apesar da simplificação proposta neste trabalho, o modelo ainda requer um certo esforço na obtenção de dados reais da produção. Seja em relação ao sequenciamento da produção ou na sequência de atividades executadas pelo operador. Para aplicação desse modelo, foi necessário cruzar dados de bancos de dados diferentes, aumentando a complexidade da realização do modelo. Além de haver a necessidade de se lidar com a incerteza de dados sobre

as atividades desempenhadas pelos colaboradores, tendo em vista que, eles mesmos são responsáveis pelos próprios apontamentos.

A inexistência de uma plataforma que agregue as diversas etapas do modelo, aumentou a complexidade da realização desse modelo, pois, foi necessário um desenvolvimento manual, utilizando planilhas Excel e softwares estatísticos.

Portanto, como sugestões para trabalhos futuros:

- Propor uma maneira sistemática e simples de obter os dados necessários para aplicação do modelo, sem necessitar da intervenção manual para analisar os dados obtidos;
- Desenvolvimento de uma plataforma computacional que agregue as diferentes etapas do modelo, que retorne a avaliação de desempenho operacional diariamente a cada fim de turno. Fazendo com que a avaliação, a investigação de resultados insatisfatórios e proposição de melhorias se torne parte da rotina de gestores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKARTE, M., KHANZODEL, V., IQBALL, R. & TIWARIL, M. K. (2021). IE Tools for Boosting Competitiveness in Iron and Steel Industry: A Review. The Indian Institute of Metals – IIM 2021.

ALCHAER, E. & ISSA, C. A. (2020). Engineering Productivity Measurement: A Novel Approach. Journal of Construction Engineering and Management. V. 146

CARVALHO, P.S.L.; MESQUITA, P. P. D.; ARAUJO, E.D.G. Sustentabilidade da siderurgia brasileira: eficiência energética, emissões e competitividade. **BNDES Setorial**, V.41, p. 181-236., 2015.

CHANG, Y., JIANG, Y., ZHANG, C., XUE, A. , CHEN, B., ZHANG, W. XU, L., LIU, X. DAI, Y. (2021). PERT based emergency disposal technique for fracture failure of deepwater drilling riser. Journal of Petroleum Science and Engineering. V. 201.

CHASE, R. B. & JACOBS, F. R. Administração da Produção e de Operações: O Essencial. Porto Alegre: Editora Bookman, 2004.

ERDEI, E., POPP, J. & OLÁH, J. (2018). Comparison Of Time-Oriented Methods To Check Manufacturing Activities And An Examination Of Their Efficiency. Scientific Journal of Logistics, p. 371-386.

GIL, A. C. Como elaborar Projetos de Pesquisa. 4ª Edição. São Paulo: Editora Atlas, 2002. INSTITUTO AÇO BRASIL. **Anuário Estatístico 2022**. Rio de Janeiro. 2022.

KHOLIL, M., ALFA, B. N. & HARIADI, M. (2018). Scheduling of House Development Projects with CPM and PERT Method for Time Efficiency. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, V. 140.

KRAJEWSKI, L.; RITZMAN, L.; MALHOTRA, M. Administração da Produção e Operações. 8ª Edição. São Paulo: Pearson, 2009.

LIU, X., SHEN, L. & ZHANG, K. (2021). Estimating the Probability Distribution of Construction Project Completion Times Based on Drum-Buffer-Rope Theory. *Applied Sciences – MDPI*, V.11.

LYU, G., BERTOLINI, L. & PFEFFER, K. (2020). Is Labour Productivity Higher in Transit Oriented Development Areas? A Study of Beijing. *Tijdschrift voor Economische en Sociale Geografie*, V.111, p. 652-670.

MASLOWSKI, D. KIJEWSKA, K. & KULINKSA, E. (2021). Management of Municipal Public Transport Vehicle Journeys by Using the PERT Method. *Energies – MDPI*, V.14.

OLIVEIRA, I. R. **MODELO PARA AVALIAÇÃO DA PRODUTIVIDADE DE OPERADORES EM UMA INDÚSTRIA SIDERÚRGICA COM INFINITOS SKUS.** Tese (Mestrado Profissional) – Programa de Pós-Graduação Profissional em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Pernambuco. Recife, p. 72, 2022.

RODRIGUEZ, X.A., REGUEIRO, R. M. & DOLDAN, X.R. (2020) Analysis of productivity in the Spanish wind industry. *RENEWABLE & SUSTAINABLE ENERGY REVIEWS*. Vol 118.

SHAN, M., LI, Y. HWANG, B. & CHUA, J. (2021). Productivity Metrics and Its Implementations in Construction Projects: A Case Study of Singapore. *Sustainability – MDPI*, V. 13.

SILVA, J. M. R.; MOTA, C. A. A Labour Performance Score and Grading System to the Next Normal Practices in Construction. *Built Environment Project and Asset Management*, [S.l.], v. 11, n. 4, p. 561-573, Maio de 2021. Emerald Publishing Limited. DOI: 10.1108/BEPAM-10-2021-0125. Disponível em: <https://doi.org/10.1108/BEPAM-10-2021-0125>. Acesso em: 04 maio 2023.

SLACK, N., CHAMBER, S., HARLAND, C., HARRISON, A. & JOHNSTON, R. *Administração da Produção*. São Paulo: Editora Atlas, 2006.