

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA

Gabriel Rubem Ogata Kiam

**Estudo de expansão de capacidade de uma reformadora
de pneus do interior paulista**

São Paulo
2019

GABRIEL RUBEM OGATA KIAM

**Estudo de expansão de capacidade de uma reformadora
de pneus do interior paulista**

Versão Original

Trabalho de Formatura apresentado
ao departamento de Engenharia de
Produção da Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para título
de Engeneheiro de Produção

Área de concentração: Engenharia de
Produção

São Paulo
2019

GABRIEL RUBEM OGATA KIAM

**Estudo de expansão de capacidade de uma reformadora
de pneus do interior paulista**

Versão Original

Trabalho de Formatura apresentado
ao departamento de Engenharia de
Produção da Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para título
de Engeneheiro de Produção

Área de concentração: Engenharia de
Produção

Orientador: Prof. Dr. Marco Aurélio de
Mesquita

São Paulo
2019

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catalogação-na-publicação

Kiam, Gabriel Rubem Ogata

Estudo de expansão de capacidade de uma reformadora de pneus do interior paulista / G. R. O. Kiam -- São Paulo, 2014.
77 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Produção.

1.Simulação por eventos discretos 2.Planejamento da capacidade
3.Aumento da capacidade I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica.
Departamento de Engenharia de Produção II.t.

Dedicatória:

Aos meus pais e meu irmão.

RESUMO

Frente ao crescimento de demanda previsto para os próximos anos, uma empresa reformadora de pneus de médio porte do interior paulista busca expandir sua capacidade produtiva de modo a se adaptar às novas necessidades de demanda. Em 2019, a empresa já atuava com ciclos de produção extras para atender a demanda atual. O presente projeto possui como objetivo auxiliar a empresa por meio de um estudo detalhado sobre os impactos operacionais e econômicos que a realização de investimentos em equipamentos terá sobre as atividades. A empresa considera duas alternativas de aquisição de autoclaves, o atual recurso gargalo da produção com capacidade de 14 pneus por ciclo: substituição da autoclave atual por uma nova, com capacidade para 22 pneus por ciclo, ou a aquisição de uma autoclave seminova, com capacidade para 12 pneus por ciclo. As alternativas de aquisição serão avaliadas em três cenários de demanda mensal: 800 (situação atual), 1100 e 1400. Para isso, foi desenvolvido um modelo de simulação por eventos discretos. Os resultados dos experimentos de simulação foram utilizados na avaliação operacional e econômica dos cenários, auxiliando na recomendação de qual alternativa de investimento seguir.

Palavras-chave: simulação por eventos discretos, planejamento de capacidade, aumento de capacidade

ABSTRACT

Faced with the expected growth in demand in the coming years, a medium-sized tire retreading company in the state of São Paulo seeks to expand its production capacity in order to adapt to new demand needs. By 2019, the company was already operating extra production cycles in order to meet current demand. This project aims to assist the company by developing a detailed study on the operational and economic impacts that the investment in equipment will have on the activities. The company considers two autoclave acquisition alternatives, the current production bottleneck resource with a capacity of 14 tires per cycle: replacing the current autoclave with a new one with a capacity of 22 tires per cycle, or the purchase of a semi-new autoclave with capacity for 12 tires per cycle. The acquisition alternatives will be evaluated in three scenarios of monthly demand: 800 (current situation), 1100 and 1400. For this, a discrete event simulation model was developed. The results of the simulation experiments were used in the operational and economic evaluation of the scenarios, supporting the recommendation of which investment alternative to follow.

Keywords: discrete event simulation, capacity planning, capacity expansion

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Ciclo de vida dos pneus	23
Figura 2	– Fluxograma do Processo Produtivo na Novo Pneu	26
Figura 3	– Metodologia de Simulação por Banks (1996)	40
Figura 4	– Etapas do projeto	43
Figura 5	– Fluxograma do Processo Produtivo na Novo Pneu	48
Figura 6	– Disponibilidade de operadores em dias de semana	51
Figura 7	– Componentes do modelo de simulação.	61
Figura 8	– Pseudocódigo de inicialização da classe Etapas.....	63
Figura 9	– Pseudocódigo dos métodos da classe Etapas.....	64
Figura 10	– Pseudocódigo da função chegar_entidades	65
Figura 11	– Pseudocódigo da função turno_recurso	66
Figura 12	– Exemplo de resultados de etapas	67
Figura 13	– <i>Throughput time</i> em cenário de alta demanda.....	72
Figura 14	– Resultados dos cenários D1 e D2	73
Figura 15	– Crescimento projetado da produção mensal ao longo dos anos	74
Figura 16	– Fluxo de caixa projetado nos cenários.....	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Estrutura de mercado de reformadoras no Brasil	24
Tabela 2	– Processos de Reforma e Estágios de Vida de Pneus.....	31
Tabela 3	– Estrutura de mercado de reformadoras no Brasil	33
Tabela 4	– Principais Decisões de Produção.....	34
Tabela 5	– Etapas do DMAIC	37
Tabela 6	– Cenários de simulação	55
Tabela 7	– Tempos de processo - Novo Pneu.....	56
Tabela 8	– Entradas das etapas	57
Tabela 9	– Turnos de produção	58
Tabela 10	– Opções de investimento.....	59
Tabela 11	– Dados financeiros da Novo Pneu.....	59
Tabela 12	– Resultados do modelo de simulação.....	68
Tabela 13	– Resultados do cenário D3	69
Tabela 14	– Comportamento da Vulcanização no Cenário D3	70
Tabela 15	– Resultados do cenário de alta demanda	71
Tabela 16	– Nível de serviço no cenário D0	72
Tabela 17	– Indicadores econômicos dos cenários.....	75

LISTA DE ABREVIASÕES

ABR	Associação Brasileira do Segmento de Reforma de Pneus
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
DMAIC	<i>Define, Measure, Analyze, Improve, Control</i>
ETRMA	<i>European Tyre and Rubber Manufacturers' Association</i>
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
MTO	<i>Make-to-order</i>
MTS	<i>Make-to-stock</i>
OEM	<i>Original Equipment Manufacturer</i>
TIR	Taxa interna de retorno
VPL	Valor presente líquido
WIP	<i>Work in process</i>

TABLE OF CONTENTS

1. Introdução	21
1.1. Mercado de Recauchutagem de Pneus	21
1.2. A empresa	23
1.3. O Projeto.....	24
1.4. Os Objetivos	25
1.5. Estrutura do Trabalho	26
2. Revisão Bibliográfica.....	29
2.1. Reforma de Pneus.....	29
2.2. Estratégias de Produção.....	31
2.3. DMAIC.....	33
2.4. Simulação.....	35
2.4.1. Definição e conceitos básicos	35
2.4.2. Vantagens e desvantagens da simulação	36
2.4.3. Metodologias de Projetos de Simulação	37
3. Metodologia	41
3.1. Definir.....	42
3.2. Modelar.....	42
3.3. Mensurar.....	42
3.4. Analisar.....	43
3.5. Incrementar.....	43
3.6. Controlar.....	43
4. Projeto de Melhoria – Desenvolvimento dos Modelos.....	45
4.1. Definir.....	45
4.2. Modelar.....	45
4.2.1. Mapeamento de processos	45
4.2.2. Construção do modelo conceitual	49
4.2.3. Coleta de dados	53
4.3. Analisar.....	58
4.3.1. Modelo Computacional.....	58
4.3.2. Funções de Apoio.....	59
4.3.3. Funções de Processamento.....	60

4.4. Verificação do modelo computacional.....	64
4.5. Validação do modelo conceitual	65
5. Experimentos	67
5.1. Avaliação de capacidade máxima	67
5.2. Análise dos experimentos	69
5.3. Análise Econômica	72
5.4. Proposta de investimento.....	74
6. Conclusões	77
6.1. Síntese.....	77
6.1. Síntese.....	77
Referências.....	79
Anexos	83

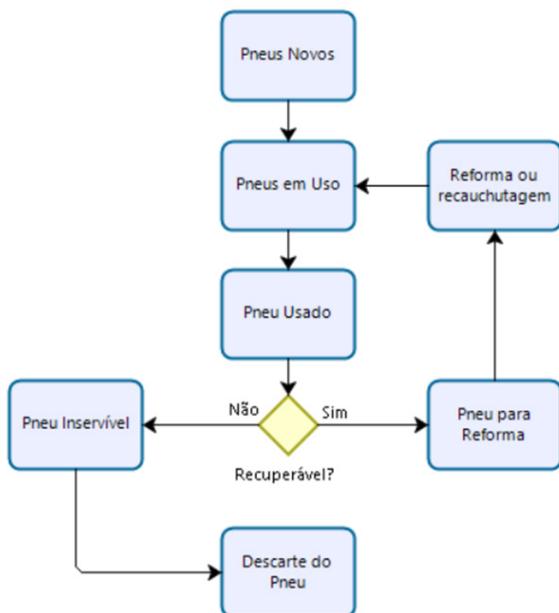
1. Introdução

Neste capítulo, será apresentada a empresa em que o autor desenvolveu o projeto de formatura, além de detalhar o serviço prestado e seus processos. Por meio de uma breve contextualização do mercado no qual a empresa está inserida, dos objetivos e consequente posicionamento estratégico, derivar-se-á o principal problema enfrentado pela empresa e que será tratado nesse projeto. Assim, os objetivos propostos e a estrutura do trabalho são apresentados ao final do capítulo 1.

1.1. Mercado de Recauchutagem de Pneus

A gestão eficiente de pneus e seu ciclo de vida desempenha um relevante papel no sistema logístico. A matriz de transportes brasileira possui predominância rodoviária, modo responsável por 52% dos fluxos de movimentação de carga (BRASIL, 2012). Porém, a importância da manutenção de pneus não se limita à redução de custos. Fatores sociais (como a segurança dos motoristas de transportadoras) e ambientais (como destinação e descarte corretos de pneus) são diretamente afetados pela qualidade dessa gestão em diferentes fases de seu ciclo de vida, apresentado sucintamente na Figura 1.

Figura 1: Ciclo de vida dos pneus



Fonte: Elaborado pelo autor.

As empresas recauchutadoras e reformadoras de pneus (que diferem quanto às partes substituídas) atuam sobre os pneus usados cuja recuperação é possível. Segundo o Instituto de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO, 2015), pneu reformado pode ser definido como pneu usado que passou pelo processo de substituição de sua banda de rodagem, dos seus ombros e de toda superfície de seus flancos. Trata-se de uma atividade com vantagens econômicas e ambientais (SIMIC; DABIC-OSTOJIC, 2017, p. 1490), pois o pneu reformado apresenta uma vida-útil de rodagem próxima ao pneu novo (ABR - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO SEGMENTO DE REFORMA DE PNEUS, 2018) e requer menor quantidade de matéria-prima e energia para sua produção (MORRIS, 1996). Ademais, o processo de reforma pode ser realizado, em média, duas vezes. Reduz-se, assim, o descarte de diversos materiais presentes nas carcaças de pneu, cujos tempos de degradação são elevados.

Do aspecto regulatório, a reforma de pneus ganhou destaque com a publicação de duas resoluções do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA): nº 258 de 1999 e nº 416 de 2009. Na primeira estabeleceu-se o dever de fabricantes e importadores de pneus coletarem e destinarem pneus usados; de forma complementar, a segunda resolução explicita a preferência pela reciclagem, reforma e reutilização antes da destinação final de pneus.

Segundo dados da Associação Brasileira do Segmento de Reforma de Pneus (ABR, 2018), trata-se de um mercado que reformou aproximadamente 7,2 milhões de pneus de caminhão e ônibus em 2017, volume de produção comparável ao mercado de pneus novos (7,4 milhões em 2016) e substancialmente maior que o mercado europeu (4,3 milhões em 2018) (ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE PNEUMÁTICOS - ANIP, 2017; EUROPEAN TYRE & RUBBER MANUFACTURERS' ASSOCIATION - ETRMA, 2019). No Brasil, trata-se de um mercado pouco consolidado, com destaque às empresas de médio porte.

Tabela 1: Estrutura do mercado de reformadoras no Brasil

Porte	Produção Mensal	Empresas	Representatividade
Grande	Maior que 1500	117	9%
Médio	De 500 a 1499	637	49%
Pequeno	Menor que 499	548	42%

Fonte: Adaptado de ABR (2018).

Para empresas desse segmento é comum a adoção das estratégias de produção *Make-to-Stock* (MTS) (com a compra pneus usados e venda de pneus reformados) e *Make-to-Order* (MTO) (em que a empresa presta um serviço de reforma para os clientes).

1.2. A empresa

O autor desenvolveu o presente projeto de formatura em uma empresa reformadora de médio porte de pneus de caminhão, cuja produção mensal fica em torno de 700 pneus. A empresa atua nos mercados de reforma e recauchutagem de pneus no interior paulista e possui gestão familiar. Por questões de confidencialidade, optou-se pela utilização de um nome fictício para designar a empresa: Novo Pneu Ltda.

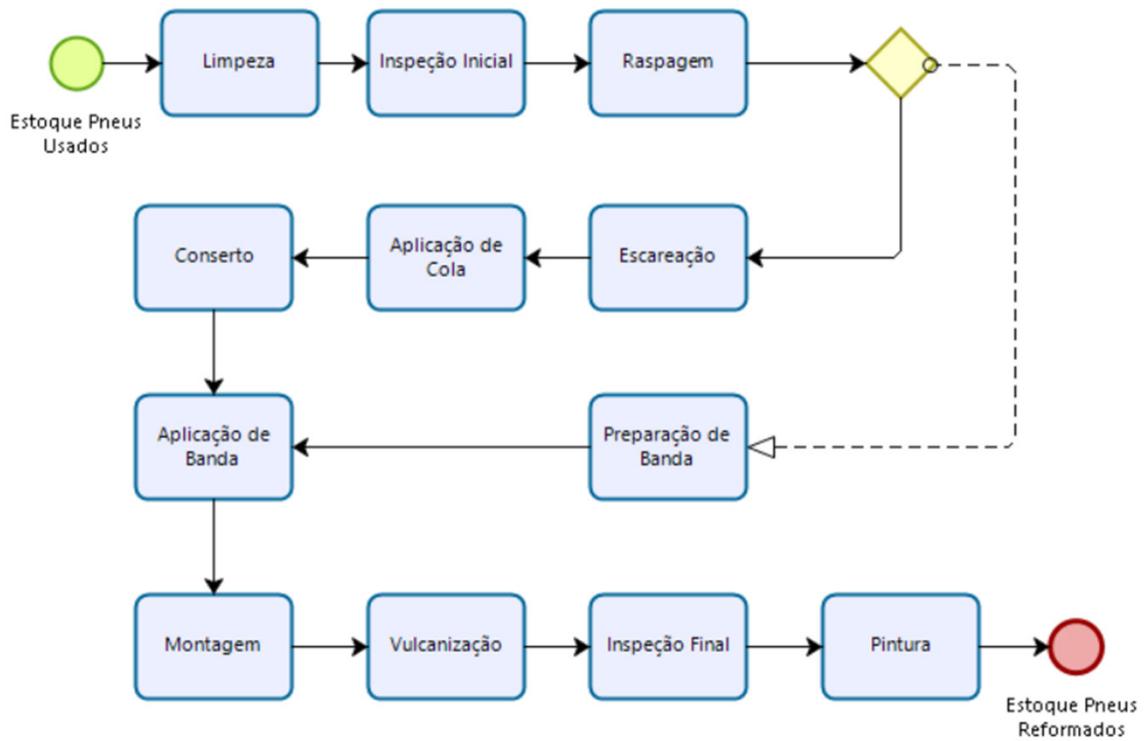
Do ponto de vista operacional, a estratégia de produção que a Novo Pneu adota é o MTO, isto é, a produção ocorre apenas após a confirmação da venda do serviço. Os clientes são responsáveis pelo fornecimento do pneu que será processado e posteriormente retornado. Uma parte relevante da gestão do ciclo de vida dos pneus é o controle de seu uso e do número de reformas (DABIĆ-OSTOJIĆ, et al., 2014, p. 115). Portanto, o cliente encomendar a reforma de seus próprios pneus é vantajoso para seus controles internos.

Em consonância com a escolha da estratégia MTO e a preocupação com a gestão do ciclo de vida de pneus estão a escolha de fornecedores de insumos produtivos e o desenho de processos logísticos para a coleta de pneus gastos e para a devolução de pneus reformados. Além disso, a empresa possui certificação do INMETRO quanto à adequação de processos aos padrões de operação exigidos. A empresa, portanto, consegue oferecer aos clientes reformas com menor *lead-time* e maior desempenho quilométrico (indicador que é medido pela distância percorrida pelo pneu reformado por custo de reforma, o que se traduz em menor custo por quilômetro com a reforma).

Quanto aos segmentos de clientes atendidos pela Novo Pneu, destacam-se as parcerias com clientes do mercado de transporte rodoviário (e.g. transportadoras e caminhoneiros autônomos) e com clientes com foco na manutenção de frotas (e.g. oficinas mecânicas e borracharias).

A reforma de pneus, principal atividade da empresa, é ilustrada a seguir na Figura 2 o fluxograma da produção na planta. Não foram incluídas as atividades de coleta e entrega de pneus nesse fluxograma.

Figura 2: Fluxograma do Processo Produtivo na Novo Pneu



Fonte: Elaborado pelo autor.

1.3. O Projeto

Em seu planejamento para médio e longo prazos, a empresa projeta um aumento de demanda dos serviços de reforma de pneus de caminhão. No decorrer de 2019, observou-se a intensificação das atividades na oficina, que precisa operar com ciclos produtivos extras para atender a demanda de alguns meses. Segundo diagnósticos realizados pela empresa em conjunto com uma consultoria parceira, a capacidade instalada da área produtiva será, já no médio prazo, insuficiente para suportar o crescimento da demanda previsto.

Um estudo sobre a viabilidade econômica de um projeto de expansão de capacidade pode ser considerado como central para o planejamento estratégico da empresa. Assim, a Novo Pneu deseja avaliar a viabilidade econômico-operacional de se expandir sua capacidade instalada. Dessa forma, a empresa poderá adequar sua capacidade produtiva ao crescimento de demanda esperado, evitando o cenário em que possíveis vendas sejam recusadas por gargalos operacionais e produtivos da empresa e que os níveis de serviço sejam negativamente afetados.

O projeto começará pela análise do atual recurso gargalo: a autoclave, cuja capacidade produtiva é de 14 pneus/ciclo produtivo (durante a semana são realizados três ciclos, apenas dois aos sábados e nenhum aos domingos). Com o investimento em uma autoclave de maior

capacidade, deseja-se avaliar a necessidade de aumentar o quadro de operadores e de aquisição ou substituição de outros recursos da linha para conseguir alcançar a produtividade desejada. Como a autoclave só opera quando há um lote para suprir sua capacidade máxima por ciclo, outro ponto de atenção monitorado será o *lead-time* dentro da fábrica, que pode ser afetado com o aumento do tamanho do lote a ser preparado antes da vulcanização.

Optou-se pela realização de um projeto de simulação para se estudar a expansão da capacidade produtiva da Novo Pneu. A simulação permite a avaliação do comportamento da linha produtiva antes da realização dos investimentos e, assim, verificar quais são os riscos da operação. Outro ponto é a possibilidade de coletar dados durante a simulação que serão empregados posteriormente na avaliação de indicadores de desempenhos operacional e econômico. Para a condução do projeto, o método empregado envolve o DMAIC (método empregado em projetos de melhoria) junto à metodologia apresentada por Banks et al. (2010) (com diretrizes para projetos de simulação).

Portanto, o presente projeto de formatura possui como motivação elaborar um estudo sobre a expansão de capacidade produtiva da Novo Pneu. Com isso, a empresa estará mais bem embasada para a tomada de decisão sobre a realização dos investimentos em novos recursos. Ademais, esse estudo carrega o potencial de gerar reflexos positivos sobre o desempenho da empresa, melhorando sua operação, resultados financeiros e longevidade. A execução desse projeto de formatura pode ser dividido em duas principais etapas:

- realização de um modelo de simulação da ampliação da capacidade da planta; e
- análise econômico-operacional dos resultados da simulação.

1.4. Os Objetivos

De acordo com a contextualização apresentada nos tópicos anteriores, o objetivo desse trabalho de formatura é de realizar um estudo sobre os impactos econômicos e operacionais de investimentos em ampliação da capacidade da planta da Novo Pneu. Essa análise será realizada com a utilização de um modelo de simulação por eventos discretos, que envolverá a modelagem do processo da planta e simulação de cenários para diferentes aquisições de equipamentos e realização da demanda prevista.

Derivar-se-á, a partir dos indicadores de desempenho operacionais obtidos pelas simulações, os retornos financeiros do investimento em expansão da capacidade. Com orçamentos levantados junto a fornecedores de equipamentos para recauchutagem, será realizada a análise de retornos do projeto de expansão da capacidade como um todo.

1.5. Estrutura do Trabalho

O trabalho está organizado em seis capítulos. O primeiro capítulo, a Introdução, apresenta o mercado de reformadoras de pneu e descreve o contexto da Novo Pneu, empresa na qual o trabalho de formatura será desenvolvido; o principal problema a ser tratado no projeto é fornecer à empresa um estudo sobre quais os retornos esperados com a execução dos planos de investimentos em expansão da capacidade e quais seus efeitos operacionais. O objetivo e a estrutura do trabalho são descritos neste capítulo também.

Segue-se, no segundo capítulo deste trabalho, a Revisão Bibliográfica orientada para a construção de um arcabouço conceitual dos principais temas abordados e métodos empregados no desenvolvimento do presente trabalho. Os principais temas são apresentados a seguir:

- Recauchutagem de pneus: revisa-se os pontos de maior interesse tratados sobre o tema na literatura, além de prover informações sobre os processos produtivos e dados do mercado brasileiro de reforma de pneus;
- Estratégias de Produção: prover ao estudo conceitos para auxiliar na modelagem conceitual da planta e identificação dos principais indicadores de desempenho a serem medidos; e
- DMAIC e simulação por eventos discretos: revisa-se métodos de análise e resolução de problemas, e assim embasar o método proposto para a realização do presente estudo, com foco em projetos de simulação.

Sintetizando os conceitos e métodos de resolução de problemas e de projetos de simulação apresentados na revisão bibliográfica, o terceiro capítulo, Método, apresenta o método para a realização do projeto na Novo Pneu.

Com base no método proposto, no quarto capítulo, Projeto de Melhoria – Desenvolvimento dos Modelos, é detalhado o desenvolvimento do trabalho de formatura seguindo o método proposto, desde a abertura do projeto até o projeto de simulação realizado.

Os resultados da simulação são submetidos a uma análise crítica, com maior profundidade, no quinto capítulo, Projeto de Melhoria – Análise dos Resultados. Os cenários de alterações no sistema produtivo para diferentes realizações de demanda prevista são avaliados com base em indicadores operacionais e financeiros. Além disso, a valoração do projeto de expansão da capacidade instalada é abordada.

O sexto capítulo, Conclusão, apresenta os resultados do trabalho de formatura, embasadas nos resultados e discussões obtidas durante seu desenvolvimento. De acordo com o objetivo proposto no primeiro capítulo, espera-se obter recomendações e dados para apoiar a decisão da empresa sobre o investimento em expansão de capacidade. No final, as limitações encontradas

no decorrer do projeto são sumarizadas e oportunidades para futuros desenvolvimentos de trabalhos ou projetos na Novo Pneu apresentadas.

2. Revisão Bibliográfica

Neste capítulo é apresentada a revisão bibliográfica realizada para o presente trabalho de formatura. A revisão objetiva detalhar conceitos, métodos e práticas relevantes para o desenvolvimento do projeto.

Os tópicos sobre recauchutagem de pneus e estratégia de produção relacionam-se com a modelagem do sistema de produção, utilizada no Projeto de Simulação. DMAIC e simulação por eventos discretos, contribuem para a formulação do método utilizado no Projeto de Melhoria – Desenvolvimento de Modelos.

2.1. Reforma de Pneus

A reforma de pneus é um processo de recuperação da carcaça de um pneu gasto e substituição de sua banda de rodagem. Há grande ênfase para que todas as etapas do processo sigam rigorosos padrões de execução, uma vez que afetam não só a qualidade do produto final, como também a segurança do veículo; assim, as exigências dos padrões de reforma no Brasil seguem os mesmos padrões aplicados nos EUA e em países mais desenvolvidos da Europa (RAMOS FILHO, 2005; MOREIRA et al., 2010). Como o termo “reforma de pneus” engloba diferentes processos, a Tabela 2 compila as definições dos principais processos e principais fases do ciclo de vida do pneu segundo a Portaria nº 554 de 2015 do INMETRO (que regula a atividade no Brasil) e a Resolução CONAMA nº416 de 2009. Essas definições servirão como referência para o presente projeto.

Tabela 2: Processos de Reforma e Estágios de Vida de Pneus

Conceito	Definição
Pneu Novo	Pneu que não sofreu qualquer uso, nem foi submetido a qualquer tipo de reforma e não apresenta sinais de envelhecimento nem deteriorações de qualquer origem.
Pneu Usado	Pneu que foi submetido a qualquer tipo de uso e/ou desgaste, englobando os pneus reformados e os inservíveis.
Pneu Inservível	Pneu usado que apresente danos irreparáveis em sua estrutura não se prestando mais à rodagem ou à reforma.
Pneu Reformado	Pneu usado, que passou por um dos seguintes processos para reutilização de sua carcaça: recapagem, recauchutagem ou remoldagem.
Recapagem de Pneus	Processo pelo qual um pneu é reformado pela substituição de sua banda de rodagem.
Recauchutagem de Pneus	Processo pelo qual um pneu é reformado pela substituição de sua banda de rodagem e dos seus ombros.
Remoldagem de Pneus	Processo pelo qual um pneu é reformado pela substituição de sua banda de rodagem, dos seus ombros e de toda superfície de seus flancos.

Fonte: Adaptado de INMETRO e CONAMA

Do ponto de vista financeiro, a atividade de reforma de pneus apresenta importância estratégica para o segmento de transportes rodoviários. Segundo a ABR (2018), o pneu reformado possui o mesmo desempenho de um pneu novo, porém com custo quilométrico cerca de 57% menor. Ademais, estima-se que aproximadamente dois terços dos pneus de caminhão e ônibus em circulação no Brasil sejam reformados.

Outro forte apelo que o processo de reforma de pneus possui é o de sustentabilidade. Um pneu pode ser reformado, em média, duas vezes, maximizando a vida útil dos pneus, e a reforma gera uma economia energética que pode chegar a 48.800 kJ/kg em relação à produção de um novo pneu (MORRIS, 1996). Há estudos que observaram pneus de carga sendo reformados por até 5 vezes (DABIĆ-OSTOJIĆ, et al., 2014, p. 110).

O processo de reforma de pneus ganhou maior notoriedade no cenário brasileiro a partir de 1999, com a publicação da Resolução CONAMA nº 258 que determinou a obrigação de empresas fabricantes e importadoras de pneumáticos em coletar e dar destinação final ambientalmente adequada aos pneus inservíveis. Em 2009, a Resolução CONAMA nº 416 tornou explícito que os pneus usados devem ser preferencialmente reutilizados, reformados ou reciclados antes de sua destinação final (CONAMA, 2009).

Em número de pneus, o mercado brasileiro de reformas de pneus de carga foi maior que a venda de novos em 2017: 7,2 milhões vs. 6,6 milhões (ABR, 2018; ANIP, 2017). Como ambos os mercados são relacionados (dado que os pneus novos servirão de insumo para a reforma posteriormente), o crescimento das vendas em 2018 dos pneus de carga de 8,9% (totalizando 7,2 milhões) corrobora com uma visão otimista para o crescimento do setor de reformas nos próximos anos. Comparativamente, o mercado brasileiro de reformas é consideravelmente maior que o europeu (em queda desde 2009), que acumulou 4,2 milhões de pneus de carga reformados em 2017 (40% menor no Brasil durante o mesmo período) (EMRTA, 2019).

A competição no mercado brasileiro pode ser considerada como pouco consolidada, com destaque às reformadoras de pequeno e médio porte representando mais de 90% do número de empresas do setor. A Novo Pneu pertence à categoria de reformadoras de médio porte e, mesmo que execute o projeto de expansão, não deve atingir o patamar de grande reformadora em nível de produção mensal. A distribuição deste mercado é discriminada na Tabela 2.

Tabela 3: Estrutura de mercado de reformadoras no Brasil

Porte	Produção Mensal	Empresas	Representatividade
Grande	Maior que 1500	117	9%
Médio	De 500 a 1499	637	49%
Pequeno	Menor que 499	548	42%

Fonte: Adaptado de ABR

Ademais, a reforma de pneus é recorrente em estudos, com enfoques sobre a sustentabilidade do processo, abordagens matemáticas e quantitativas para a avaliação da operação e abordagens financeiras sobre sua relevância. DABIĆ-OSTOJIĆ, et al. (2014) et al propõem um modelo matemático para melhoria do processo de reformas de pneus e destacam a complexidade da elaboração do modelo dada a dificuldade de avaliação do histórico de utilização de pneus gastos. Lebreton e Tuma (2006) apresentam uma abordagem quantitativa para avaliar a lucratividade das atividades de reforma do ponto de vista dos OEM (*Original Equipment Manufacturers* ou fabricantes originais de equipamento). Este modelo engloba três fatores chave para a operação de reforma (segmentação de mercado, estrutura do fluxo de retorno e potencial de reintegração) junto à parâmetros monetários para encontrar um mix de produtos ótimo de vendas para os OEM.

2.2. Estratégias de Produção

Sistemas de manufatura podem ser considerados como sistemas restringidos por tecnologias disponíveis de equipamentos, processos, materiais e gestão (SKINNER, 1996; SOOSAY, et al., 2016). Portanto, escolhas em diferentes frentes acerca destes recursos podem ser definitivos para o desempenho geral da operação produtiva. Em estudo sobre estratégias em manufatura, Wheelwright e Hayes (1985) destacam os principais tipos de decisão ligados à fatores de manufatura, que, juntos, definem o nível de desenvolvimento geral da operação. Empresas de manufatura em estágios intermediários apresentam como característica o investimento de capital como essencial para alcançar a competição ou adquirir vantagem competitiva.

Tabela 4: Principais Decisões de Produção

Decisões	Fatores Influenciados
Capacidade	Quantidade, <i>timing</i> , tipo
Instalações	Tamanho, localização, especialização
Tecnologias de Processo e Equipamentos	Escala, flexibilidade, interconectividade
Integração Vertical	Direção, extensão, equilíbrio
Fornecedores	Número, estrutura, relacionamento
Novos Produtos	<i>Hand-off, start-up, modificação</i>
Recursos Humanos	Seleção e treinamento, compensação e segurança
Qualidade	Definição, papéis, responsabilidades
Sistemas	Organização, cronogramas, controles

Fonte: Adaptado de Hayes e Wheelwright (1985)

A estrutura do processo de manufatura pode ser definida como uma forma de se organizar recursos em torno do produto. Sua escolha deriva fundamentalmente do volume e do grau de especialização do processo produtivo tratado (KRAJEWSKI; RITZMAN; MALHOTRA, 2012). Prioridades competitivas como qualidade superior e entrega no prazo têm maior aderência com estruturas de processo por tarefa (individualizado) ou em pequenos lotes, enquanto operações de baixo custo e alta disponibilidade exigem processos em grandes lotes ou em linha. Com isso, podem ser selecionadas complementarmente as estratégias de produção.

A estratégia *Make-to-Order* (“fabricar sob encomenda” ou MTO) é uma das principais estruturas tratadas em estudos de pesquisa operacional. Segundo (KRAJEWSKI; RITZMAN; MALHOTRA, 2012), adotam essa estratégia empresas cujos produtos exigem um alto grau de personalização (como especificações dos clientes), pouco volume e processos com alta variação e complexidade. Indicadores de desempenho MTO são orientados ao atendimento de pedidos dos clientes (e.g. cumprimento de prazos, atrasos médios, recusas e *lead-times*) (SOMAN; VAN DONK; GAALMAN, 2004), dado que normalmente envolvem requisitos e acordos de prazos de entrega e multas. A competição entre empresas MTO também envolve a apresentação a potenciais clientes de propostas que incluem, além dos fatores supracitados,

a expertise técnica e o preço, tornando-o mais complexo (KINGSMAN, et al.). Portanto, ressalta-se a importância do acompanhamento das capacidades instalada e disponível no aceite de pedidos. Sobrecargas na produção afetarão negativamente os resultados e a reputação da empresa (OG˘UZ; SIBEL SALMAN; BILGINTÜRK YALÇIN, 2010). Esta, porém, também pode incorrer de recusas de pedidos.

Com maior foco na disponibilidade imediata de produtos e controle de custos, a estratégia de produção *Make-to-Stock* (“fabricar para estocar” ou MTS) é vantajosa para produtos com pouca (ou nenhuma) variação e alto volume (KRAJEWSKI; RITZMAN; MALHOTRA, 2012). Soman, Van Donk e Gaalman (2004) descrevem o sistema MTS como orientado a antecipação e projeção de demanda e ao planejamento de estoques.

O número de estratégias de produção, entretanto, varia na literatura revista. Kingsman et al. (1996) destaca que companhias de manufatura são basicamente classificadas como MTO ou MTS, enquanto (KRAJEWSKI; RITZMAN; MALHOTRA, 2012) descreve o modelo *Assembly-to-Order* (“montar sob encomenda” ou ATO) e Soman, Van Donk e Gaalman (2004) explora o caso de combinação de sistemas MTO-MTS.

2.3. DMAIC

Six Sigma pode ser definido como uma ferramenta com fins gerenciais e operacionais para auxiliar empresas a atingirem objetivos como: redução de custos, aumento de lucratividade, redução de refugo, redução de variações no projeto e melhoria na satisfação do cliente (KAID et al., 2016).

Em meio a este contexto desenvolveu-se o método DMAIC para a condução de projetos de melhoria de processo, que divide os projetos em cinco etapas: *Define, Measure, Analyze, Improve, e Control* (Definir, Mensurar, Analisar, Incrementar e Controlar) (BOON SIN et al., 2015). O sucesso obtido em suas aplicações pode ser explicado pelo foco do método em resolver diretamente as causas do problema tratado, e não seus efeitos (CLEGG; REES; TITCHEN, 2010). Fatores como a gestão de projetos Six Sigma, que gera equilíbrio entre escopo buscado e prazo do projeto, também contribuem positivamente para o sucesso do método (MARZAGÃO; CARVALHO, 2016). A seguir, todas as cinco etapas são apresentadas com maior detalhe e, ao final, um resumo contendo uma breve descrição e atividades de cada etapa.

Definir é a primeira etapa do DMAIC e possui como objetivo apresentar e acordar com a gerência o desenvolvimento do projeto, isto é, se as atividades a serem desenvolvidas para a resolução do problema estão alinhadas com as necessidades e limitações de recursos

da empresa (SMĘTKOWSKA; MRUGALSKA, 2018; MAST; LOKKERBOL, 2012). O problema a ser resolvido é, portanto, definido. É comum o uso de um documento Project Charter nesta etapa, pois trata-se de um elemento influente na inicialização, planejamento, execução, controle e sobrevivência do estudo ao definir o objetivo e as variáveis do projeto (SRINIVASAN, et al., 2014).

Com o objetivo definido, segue-se com a etapa Mensurar. Nesta ocorre a tradução do problema em uma forma mensurável e a coleta de dados da situação atual, refinando a definição de objetivos do projeto (MAST; LOKKERBOL, 2012). Para isso, faz-se necessário realizar a identificação de métricas válidas e confiáveis, levantamento de dados disponíveis e indisponíveis e testes comparativos (SMĘTKOWSKA; MRUGALSKA, 2018).

A etapa de Analisar engloba a análise de dados obtidos na etapa anterior, de modo a identificar as causas raiz do problema e seus efeitos (KAID et al., 2016). Existem diversas ferramentas da qualidade para determinação de tais efeitos de forma quantitativa (estatística) e qualitativa. Incrementar é a etapa que trata das aplicações dos resultados da análise para aprimorar do processo. Por meio da informação gerada durante o projeto, é criado e desenvolvido um plano de ação para melhorar o funcionamento operacional e financeiro da empresa (SMĘTKOWSKA; MRUGALSKA, 2018). Para isso, diversas soluções e cenários alternativos são criados, avaliados, comparados e validados (KAID et al., 2016).

Por fim, a etapa Controlar objetiva o acompanhamento e verificação de resultados das melhorias implementadas. Além disso, métodos de controle são empregados para monitorar e manter o processo sob controle (SMĘTKOWSKA; MRUGALSKA, 2018).

O DMAIC, porém, apresenta limitações quanto ao seu emprego. Trata-se de um método com alta generalidade, ou seja, pode ser aplicado em diversos campos e em diferentes tipos de problemas. Essa generalidade pode tornar o método ineficiente em casos mais específicos de aplicação. Com isso, o método necessita de adaptações específicas para o domínio no qual será aplicado para se conseguir melhores resultados (MAST; LOKKERBOL, 2012).

As principais atividades de cada etapa estão resumidas na Tabela 5.

Tabela 5: Etapas do DMAIC

Nome da Etapa	Descrição
Definir	Identificar e definir o problema, apresentar o projeto para solucioná-lo e alinhar com o cliente as prioridades e custos do projeto.
Mensurar	Identificar métricas válidas e confiáveis com base no problema definido e realizar coleta de dados.
Analisar	Analizar dados obtidos e identificar causas raiz do problema.
Incrementar	Desenvolver plano de ação para solucionar o problema com base nas informações produzidas e implementá-lo.
Controlar	Avaliar e monitorar resultados da implementação do projeto.

Fonte: elaborado pelo autor.

2.4. Simulação

2.4.1. Definição e conceitos básicos

A simulação é uma poderosa ferramenta para se analisar sistemas complexos. Com um extenso histórico de resoluções de problemas reais, a simulação comprova sua eficácia como abordagem para resolução de problemas no setor de manufatura (NEGAHBAN; SMITH, 2014), pois permite a experimentação e validação de um processo ou configuração de um sistema com o emprego de métodos e ferramentas tecnológicas (MOURTZIS; DOUKAS; BERNIDAKI, 2014, p. 213). Dentre os objetivos do emprego de simulações, Chung (2004) destaca conseguir insights sobre a operação de um sistema, desenvolver políticas operacionais e de recursos para melhorar o desempenho do sistema, testar novos conceitos e/ou sistemas antes de sua implementação, e conseguir informações sem interferir no sistema real.

Em seu manual de simulações, Banks (1998) apresenta algumas definições de simulação, que serão utilizadas no presente projeto de formatura:

- A simulação é a imitação da operação de um processo ou sistema do mundo real ao longo do tempo;
- A simulação envolve a geração de um histórico artificial do sistema e a observação deste histórico para se extrair inferências quanto às características de operação do sistema real que está sendo representado;
- A simulação é uma metodologia indispensável de resolução de problemas para solucionar diversos problemas do mundo real;
- A simulação é utilizada para se descrever e analisar o comportamento de um sistema e

auxiliar no projeto de um sistema real. Tanto modelos existentes como conceituais podem ser modelados por meio da simulação.

Ademais, o tema de simulações abrange outros conceitos importantes em sua fundamentação, como modelo, evento e sistema. Segundo Banks et al. (2010) , um modelo é uma representação limitada de um sistema real, que deve ser complexo o suficiente para se responder às perguntas realizadas, porém não deve ser demasiado complexo. Ainda de acordo com este autor, evento pode ser definido como uma ocorrência que altera o estado do sistema. Por sistema, entende-se o conjunto de componentes que recebe entradas e fornece resultados para algum propósito (CHUNG, 2004).

2.4.2. Vantagens e desvantagens da simulação

Conforme supracitado, a simulação é uma ferramenta tecnológica com diversas áreas de aplicação. Deve-se, porém, entender para quais situações essa ferramenta se adequada. É oportuno, portanto, discorrer sobre as vantagens e desvantagens da simulação.

Dentre suas vantagens, pode-se destacar que a simulação permite ao usuário a previsão dos resultados de um projeto em um sistema, mas sem que haja a alocação de recursos para a implementação desse projeto. Os custos de alterações e correções após a aquisição de um ativo podem ser extremamente altos (BANKS et al., 2010). Além disso, é possível realizar diagnóstico de problemas em sistemas muito complexos por meio da simulação.

Outra vantagem de ambientes de simulação é a possibilidade de se comprimir ou expandir o tempo (BANKS et al., 2010). Isto é, um processo com duração de meses pode ser simulado em questão de segundos. Processos muito rápidos, todavia, podem ser desacelerados e pausados durante a simulação. Assim, a simulação permite a avaliação de sistemas e processos em horizontes temporais razoáveis.

Contudo, a aplicação de simulações em projetos apresenta algumas limitações. Chung (2004) destaca a importância da qualidade dos dados de entrada para a simulação e a dificuldade em consegui-los, uma vez que a coleta de dados configura como uma atividade custosa e demorada. Independentemente da qualidade do modelo, os resultados da simulação serão imprecisos caso os dados de entrada também sejam.

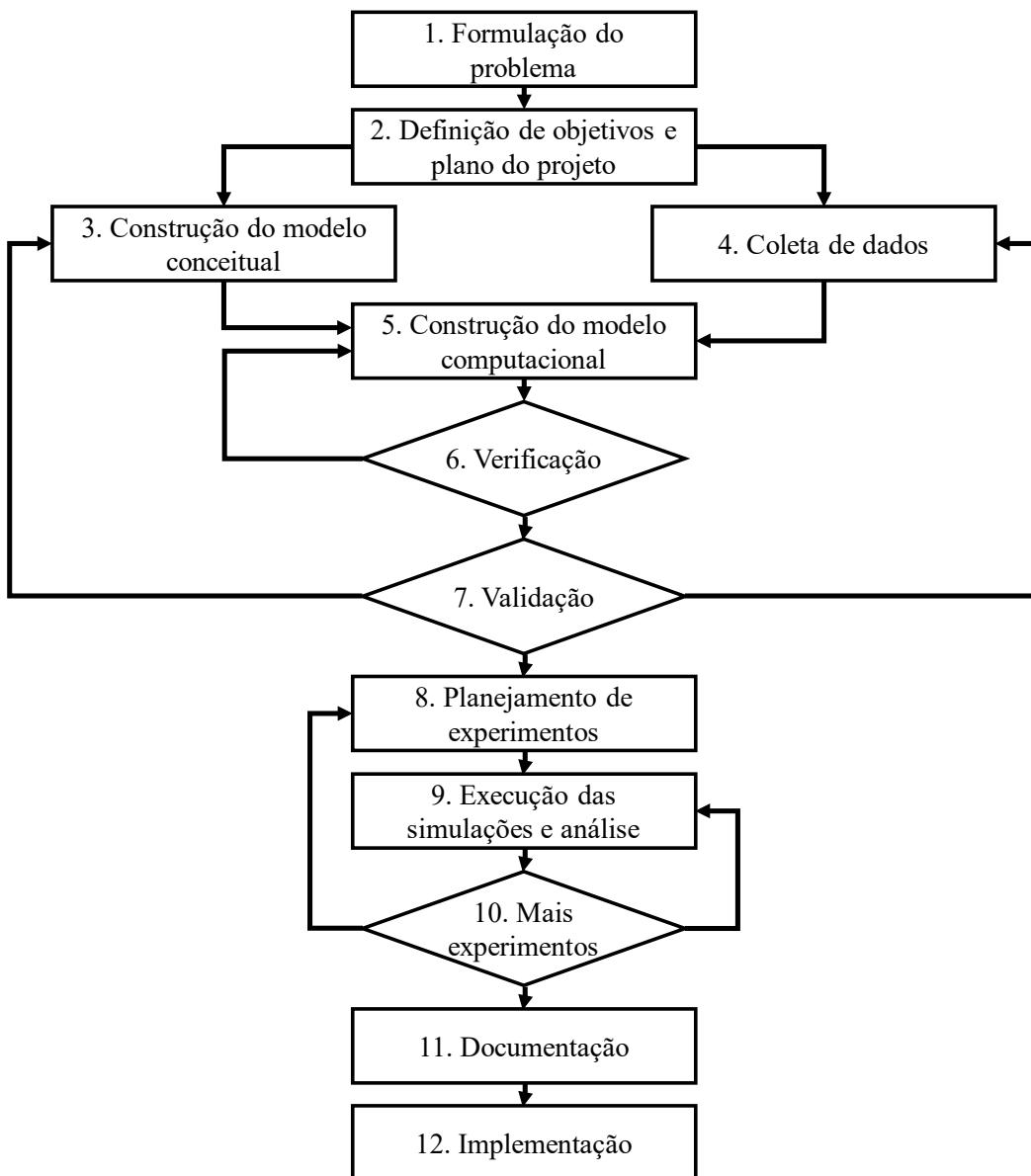
Projetos de simulação podem incorrer em altos custos e em longos períodos para sua realização, principalmente no caso em que a complexidade do problema é subestimada. A modelagem de simulações geralmente envolve treinamentos especiais e é de alta complexidade (BANKS et al., 2010; CHUNG, 2004).

2.4.3. Metodologias de Projetos de Simulação

Para a realização de projetos de simulação, diversos autores propõem métodos e especificam as etapas que o projeto deve seguir, de acordo com suas características, limitações e necessidade de adaptações. Fernández (2014) realizou uma abrangente revisão bibliográfica sobre tais metodologias e quais etapas as compõem (com metodologias mais enxutas, com apenas três etapas, e metodologias mais detalhadas, com até doze etapas), e apresenta algumas conclusões sobre a revisão. Dentre essas conclusões, destaca-se a relevância de alguns procedimentos para a boa estruturação de um projeto de simulação: definição do problema a ser estudado, coleta e tratamento de dados e informações, codificação, verificação, validação, análise e implementação e documentação final. Este mesmo autor, além disso, afirma que “[...] esses procedimentos não são uma obrigação e muito menos requisitos para a modelagem dos sistemas visando obter a melhor resposta, mas [...] facilitam o trabalho de quem deseja planejar e executar projetos deste tipo”.

Banks et al. (2010) propõe um guia detalhado e robusto para a realização de projetos de simulação dividido em doze etapas, ilustrado na Figura 3. Nesta metodologia, os sete primeiros passos focam na modelagem da simulação com base na formulação do problema. As três etapas seguintes abrangem a realização dos experimentos utilizando o modelo obtido. Encerram o guia as etapas de documentação do estudo de simulação e sua implementação. As doze etapas são todas descritas a seguir de acordo com Banks et al. (2010), com alguns complementos de outros autores.

Figura 3: Metodologia de Simulação por Banks (1996)



Fonte: Adaptado de Banks (1996)

- 1. Formulação do problema:** trata-se do passo inicial de todo projeto de simulação (BANKS et al., 2010). A definição do problema a ser estudado deve garantir que o problema esteja claramente compreendido e alinhado com as necessidades do cliente.
- 2. Definição de objetivos e plano do projeto:** os objetivos indicam quais os problemas a serem resolvidos pelo projeto de simulação. O plano de projeto deve incluir estimativas de alocação de recursos para sua execução (e.g. tempo e tamanho do time), quais as etapas e seus respectivos resultados esperados, de modo a fornecer uma visão geral do projeto.

3. **Construção do modelo conceitual:** a partir da descrição e abstração do sistema real é elaborado o modelo conceitual, no qual os componentes e estrutura do sistema são relacionados de formas lógica e matemática. O grau de complexidade do modelo ser adequada com os objetivos e plano do projeto. Complexidade excessiva pode incorrer em aumento de custos, com ganhos marginais de qualidade. Pereira e Chwif (2010) propõem que nesta etapa deve ser definida a abrangência do estudo, sua complexidade e quais as entradas e saídas que alimentarão o simulador. Chung (2004) destaca que a definição do modelo e a formulação do modelo devem envolver a escolha de quais eventos e componentes serão contemplados no modelo.
4. **Coleta de dados:** conforme ilustrado na Figura 3, a coleta de dados ocorre concomitantemente à construção do modelo conceitual. Além disso, Chung (2004) alerta que dados disponíveis podem estar incompletos e com padrões diferentes dos que serão utilizados no projeto, exigindo uma nova rodada de coleta.
5. **Construção do modelo computacional:** o modelo conceitual é convertido para uma linguagem de programação computacional, formando o modelo computacional. Esta etapa requer a escolha do programa utilizado para modelar e a programação do modelo de simulação (CHUNG, 2004).
6. **Verificação:** trata-se de um processo que ocorre continuamente durante a modelagem computacional. O processo de verificação busca avaliar se o modelo computacional foi construído da forma correta e com precisão suficiente. Segundo Chung (2004), a verificação é considerada que atingiu seus objetivos quando o modelo opera conforme foi planejado, sem erros ou avisos.
7. **Validação:** o processo de validação serve para avaliar se o modelo conceitual representa com precisão suficiente o sistema real, conforme os objetivos do projeto. Problemas com a validação do modelo conceitual podem resultar de hipóteses assumidas, simplificações e limitações do projeto (CHUNG, 2004)
8. **Planejamento de experimentos:** para solucionar o problema definido, deve-se definir quais serão os experimentos realizados utilizando o modelo de simulação construído. Assim, cada cenário deve ser detalhado (e.g. quanto ao tempo de simulação, número de simulações e alteração de recursos).
9. **Execução das simulações e análise:** os cenários de simulação definidos na etapa 8 são executados. A partir da análise e comparação dos resultados obtidos, pode-se tirar conclusões sobre o projeto e gerar recomendações para a resolução do problema definido.

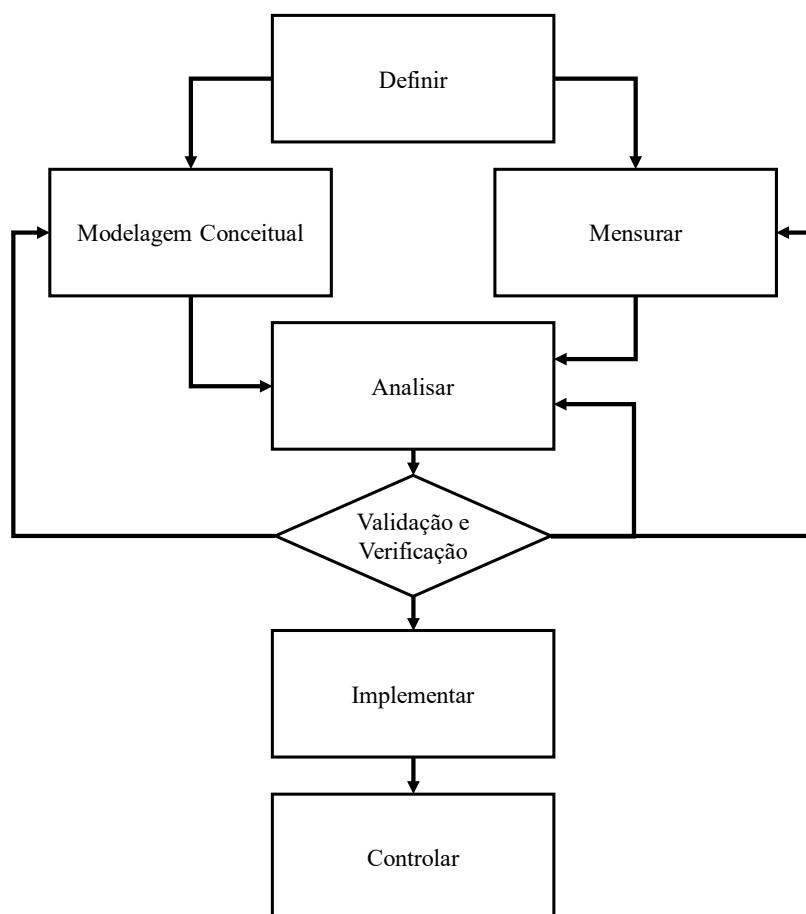
- 10. Mais experimentos:** com base nos resultados das análises, avalia-se a necessidade de novas execuções e novos cenários.
- 11. Documentação:** informações sobre todas as etapas anteriores do projeto devem ser consolidadas para que sejam apresentadas ao cliente. Portanto, a documentação deve ser clara e concisa.
- 12. Implementação:** baseando nas conclusões do projeto de simulação, o cliente tomará a decisão de executar ou não as recomendações.

3. Metodologia

Neste capítulo, será descrito o método aplicado para o desenvolvimento do trabalho de formatura. Ao se considerar as características do projeto e seu objetivo de realizar um estudo sobre o retorno de investimentos em expansão da capacidade produtiva, optou-se pela adoção da metodologia DMAIC como base para o método do deste trabalho. Conforme descrito anteriormente, trata-se de um método bem estabelecido para a condução de projetos de melhoria.

Contudo, Mast e Lokkerbol (2012) ressaltam que o método deve ser adaptado de acordo com o domínio do projeto para que se obtenha melhores resultados. Como o presente projeto envolve a utilização de um modelo de simulação para se analisar a expansão da capacidade da planta, é oportuna a combinação do DMAIC com elementos de metodologias de projeto de simulação. Portanto, propõe-se para este projeto um método que abrange as etapas do DMAIC, com adaptações de acordo com a metodologia para projetos de simulação proposta por Banks et al. (2010) (ilustrado na Figura 4). Destaca-se a adição da etapa Modelar, realizada de forma conjunta à etapa Mensurar.

Figura 4: Etapas do projeto.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1. Definir

Definir é a etapa inicial do projeto na qual o problema tratado é identificado e definido. Além disso, estabelece-se o plano do projeto, que deve conter informações de como será conduzido o projeto, qual o cronograma a ser seguido e quais os papéis e responsabilidades dos envolvidos.

A proposta, que inclui a definição do problema e o plano de projeto, é apresentada e disponibilizada para a análise do cliente. Com sua revisão e confirmação, prossegue-se com o desenvolvimento do projeto.

3.2. Modelar

Conforme descrito por Banks et al. (2010), a modelagem de simulação envolve primeiramente a construção do modelo conceitual. A etapa Modelar envolverá o mapeamento dos processos da Novo Pneu, a descrição de sua operação, e a construção dos modelos conceitual e econômico. Com isso, segue-se concomitantemente a etapa Mensurar.

O modelo conceitual será considerado validado se representar o sistema real com precisão suficiente. Esse modelo deverá conter informações sobre o escopo do projeto, complexidade e quais suas entradas e saídas, de acordo com Pereira e Chwif (2010), e incluirá a descrição dos cenários de interesse para o estudo, como Chung (2004) propõe. As modelagens conceitual e computacional ocorrerão de forma iterativa, com a evolução dos modelos em complexidade até que sejam aprovados quanto a verificação e validade.

O modelo econômico será construído com base em métricas de avaliação de projetos. Por meio deste modelo, serão avaliados os retornos esperados sobre o investimento em expansão da capacidade. Para isso, os resultados operacionais da simulação servirão como dados de entrada para o modelo econômico.

3.3. Mensurar

A etapa Mensurar envolve a tradução do problema para uma forma mensurável, de modo a fornecer produtos que servirão de *inputs* para a etapa Analisar. Para isso, atividades de coleta de dados devem ser realizadas nesta etapa. A coleta será direcionada pela identificação e especificação de informações presentes nos modelos conceitual e econômico.

3.4. Analisar

A terceira etapa do método do presente projeto denomina-se Analisar. Por meio da análise dos dados e direcionamentos obtidos nas etapas Modelar e Mensura, a etapa objetiva a tradução do modelo conceitual para o modelo computacional, permitindo a obtenção e detalhamento de resultados.

O modelo computacional será concebido a partir da tradução do modelo conceitual, que passa pela escolha da linguagem de programação/simulação, codificação do modelo e sua verificação. Quando o modelo de simulação estiver operando da forma correta, sem erros e com precisão suficiente, este será considerado como verificado e validado. Com isso, segue-se para o planejamento e execução dos experimentos, tratados na próxima etapa.

3.5. Incrementar

A etapa Incrementar aborda a aplicação dos modelos desenvolvidos, isto é, execução de experimentos e discussão dos resultados. Objetiva-se a apresentação da sugestão de investimento baseada nesses resultados e, enfim, a implementação desse plano.

O planejamento de experimentos partirá dos *inputs* detalhados no modelo conceitual para os diferentes cenários de simulação. Por se tratar de um projeto de expansão da capacidade produtiva, alterações de capacidade nos recursos gargalo e demanda são oportunas para se definir os cenários. Conforme os resultados são coletados, o plano de experimentos poderá ser revisto com a inclusão ou exclusão de cenários de acordo com sua relevância para o projeto. Os resultados dos modelos de simulação e econômico serão analisados separadamente, dado que suas finalidades são distintas (apesar de relacionadas). Assim, espera-se direcionar as discussões sobre os resultados.

Como o presente projeto objetiva a realização de um estudo dos impactos de investimentos em expansão da capacidade, entende-se que a implementação do projeto decorrerá da decisão do cliente e será de sua responsabilidade. Portanto, a etapa focará na elaboração de recomendações de investimentos para os diferentes cenários considerados.

3.6. Controlar

Complementarmente, a etapa Controlar é responsável pelo monitoramento dos resultados das outras etapas do projeto. Assim, as conclusões, limitações e desdobramentos que surgiram no decorrer do projeto serão apresentadas de forma sucinta.

4. Projeto de Melhoria – Desenvolvimento dos Modelos

A construção dos modelos de simulação e econômico será tratada no presente capítulo. O desenvolvimento das etapas Definir, Modelar, Mensurar e Analisar, conforme o método proposto, será descrito, abordando desde a formulação do problema até a validação do modelo computacional.

4.1. Definir

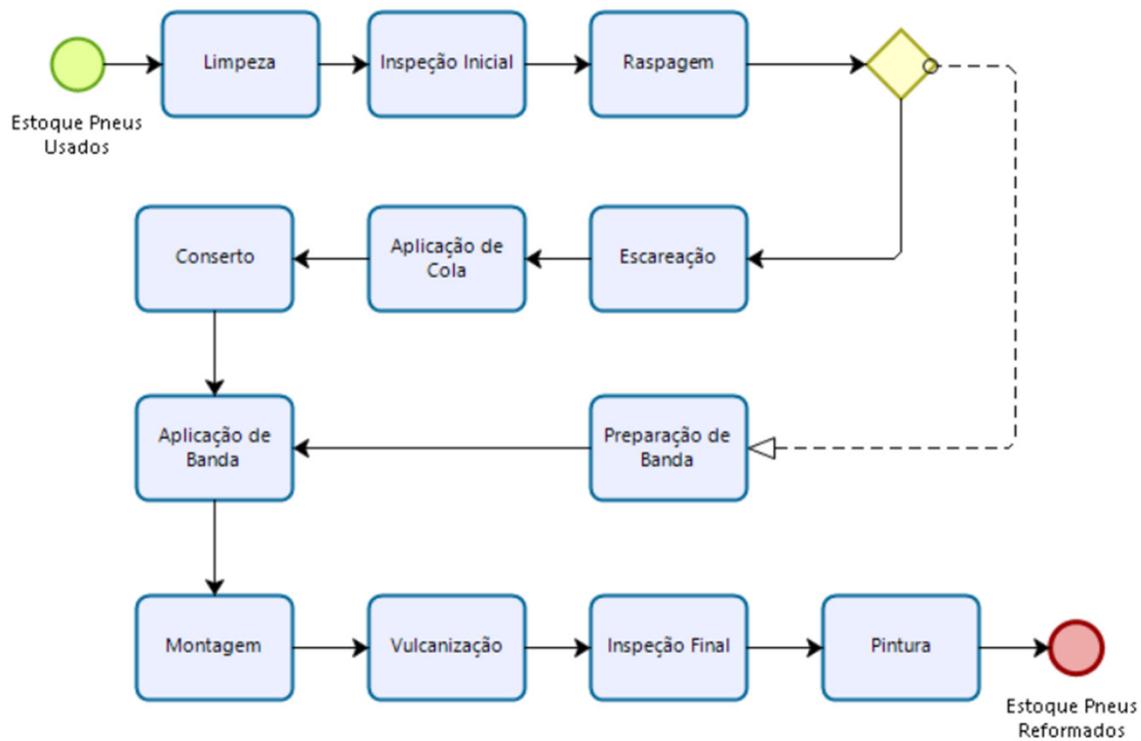
Projeções da Novo Pneu apontam aumento da demanda por serviços de reforma de pneu de caminhão em médio e longo prazos. Com o auxílio de uma consultoria parceira, a empresa diagnosticou que sua autoclave se tornará o recurso gargalo da produção dentro do próximo ano, não suportando o crescimento previsto da demanda. Durante 2019 já se observou intensificação das atividades na oficina, que têm recorrido à ciclos extras de produção para atender a demanda. A Novo Pneu e a consultoria levantaram algumas opções de aquisição de equipamentos. Todavia, a empresa carece de estudos sobre os impactos econômicos e operacionais desses investimentos. Portanto, o presente projeto possui como objetivo a realização desse estudo, de modo a fornecer recomendações de investimentos à empresa. Modelos de simulação e econômico serão empregados para se analisar esses impactos, explorando os diversos cenários de aquisição por meio dos experimentos propostos.

4.2. Modelar

4.2.1. Mapeamento de processos

O modelo conceitual possui como objetivo representar o sistema real com precisão suficiente requerida pelo projeto (CHUNG, 2004). Para melhor se compreender as atividades da Novo Pneu, foi realizado o mapeamento dos processos da planta. A descrição dos processos se baseia no fluxograma apresentado no Capítulo 1 e retomado na Figura 5, a seguir.

Figura 5: Fluxograma do Processo Produtivo na Novo Pneu



Fonte: Elaborado pelo autor.

A operação na fábrica ocorre durante a semana com três ciclos de quatro horas (total de 12 horas) e aos sábados com dois ciclos produtivos (total de 8 horas). As atividades se iniciam com o carregamento da autoclave com um lote de pneus montados (preparados no dia anterior). Simultaneamente, no início da linha, inicia-se a raspagem do lote 2 (preparado no dia anterior) e a inspeção inicial do lote 3. Limita-se o volume de estoque em processo para 3 vezes a capacidade da autoclave (neste caso $3 \times 14 = 42$ pneus) para garantir controle do nível de estoque de produtos semiacabados. Em casos de picos de demanda, a empresa possui a opção de operar com um ciclo extra de produção diariamente, elevando para 4 ciclos durante a semana e 3 ciclos aos sábados. Porém, essa decisão incorre no aumento dos custos de produção, pois envolve a operação em horários de bandeiras tarifárias mais caras e pagamento de horas extras aos operadores. Além disso, afeta-se o escalonamento dos operadores e não é uma operação desejável caso ocorra com alta frequência.

A chegada de pneus ocorre duas vezes ao dia: de manhã e à tarde. O volume que chega varia de acordo com as vendas.

O primeiro processo pelo qual o pneu passa dentro da fábrica é a Limpeza, cujos objetivos

são eliminar resíduos e melhorar a assertividade dos testes de qualidade. Os pneus limpos seguem para a Inspeção Inicial, onde as avarias expostas pela Limpeza são analisadas e decide-se se o pneu continua ou não o processo de reforma. A partir desse ponto, todos os pneus são transportados com o auxílio de uma estrutura de trilhos aéreos e ganchos. Os trilhos se estendem até a Pintura, última etapa da reforma de pneus.

O processo seguinte é a Raspagem, em que a banda gasta do pneu é removida e seu diâmetro e superfície acertados. A empresa dispõe de duas máquinas de raspagem que podem trabalhar em paralelo, caso haja disponibilidade de operadores. Como a quantidade de borracha raspada nessa etapa varia de acordo com o modelo e o estado do pneu, também é medido o seu diâmetro final. Essa informação é recebida pelo operador no Preparação de Banda que cortará a nova banda e o coxim no comprimento necessário para aplicar sobre o pneu gasto. De modo a priorizar a preparação dos lotes que serão vulcanizados no dia seguinte, o turno de operação da raspadeira se encerra às 17 horas.

Com isso, o pneu segue para a Escareação, etapa que possui três máquinas disponíveis. A Escareação do pneu envolve a remoção de pontas da malha de aço danificadas, que ficam expostas com a raspagem. Além disso, outras avarias (como cortes) são minuciosamente removidas das partes externas e internas da carcaça.

A Aplicação de Cola é feita sobre a superfície escareada com o auxílio de um spray. Não há uma restrição de tempo mínimo ou máximo para a secagem da cola aplicada. O pneu segue diretamente para a próxima etapa: Conserto. Para esta etapa, o operador utiliza uma pistola de borracha para aplicar cola nas áreas escareadas. Quando há ocorrência de orifícios (identificados ou produzidos na Escareação), também são aplicados no Conserto os enchimentos, um tipo especial de borracha.

O pneu segue no trilho até a área de Aplicação de Banda, onde até dois pneus podem ser processados simultaneamente. As bandas preparadas com informações de comprimento obtidas na Raspagem são aplicadas sobre a superfície do pneu raspado, escareado e com cola. Com o auxílio de máquinas, o operador une o pneu à nova banda no encaixe correto e remove todo o ar entre a carcaça e a banda, evitando a formação de bolhas durante a Vulcanização. Sobre a carcaça do pneu podem ser aplicados diferentes tipos de banda para reforma, de acordo com as condições em que o pneu será usado (e.g. quantidade de carga e condições das vias).

A próxima etapa é a Montagem, onde o pneu com banda é envelopado em suas áreas interna e externa. O envelope é então acoplado a uma bomba de vácuo que distribui uniformemente uma elevada pressão sobre toda a superfície do pneu. O conjunto montado melhora a aderência da

banda à carcaça e fica sob pressão à espera da liberação da autoclave.

A autoclave funciona em ciclos produtivos de 4 horas e comporta lotes de 14 pneus. Durante o ciclo, os conjuntos montados são submetidos a uma condição de alta temperatura e alta pressão, ocorrendo de fato a união entre banda, carcaça, coxim e cola. Para o carregamento ou descarregamento da autoclave são formados grupos de 3 operadores, de modo a agilizar essas etapas de transporte e maximizar a utilização deste recurso. Quando o horário de início ou fim de ciclo está próximo, 3 operadores param suas atividades para priorizar o descarregamento seguido de outro carregamento. Finalizada esse transporte, os operadores retornam às atividades que estavam desempenhando. Após a Vulcanização, os conjuntos são desmontados, isto é, o envelope é retirado. O último ciclo produtivo do dia deve começar até às 15 horas, para que possa ser descarregado da autoclave antes das 19 horas (fim do expediente).

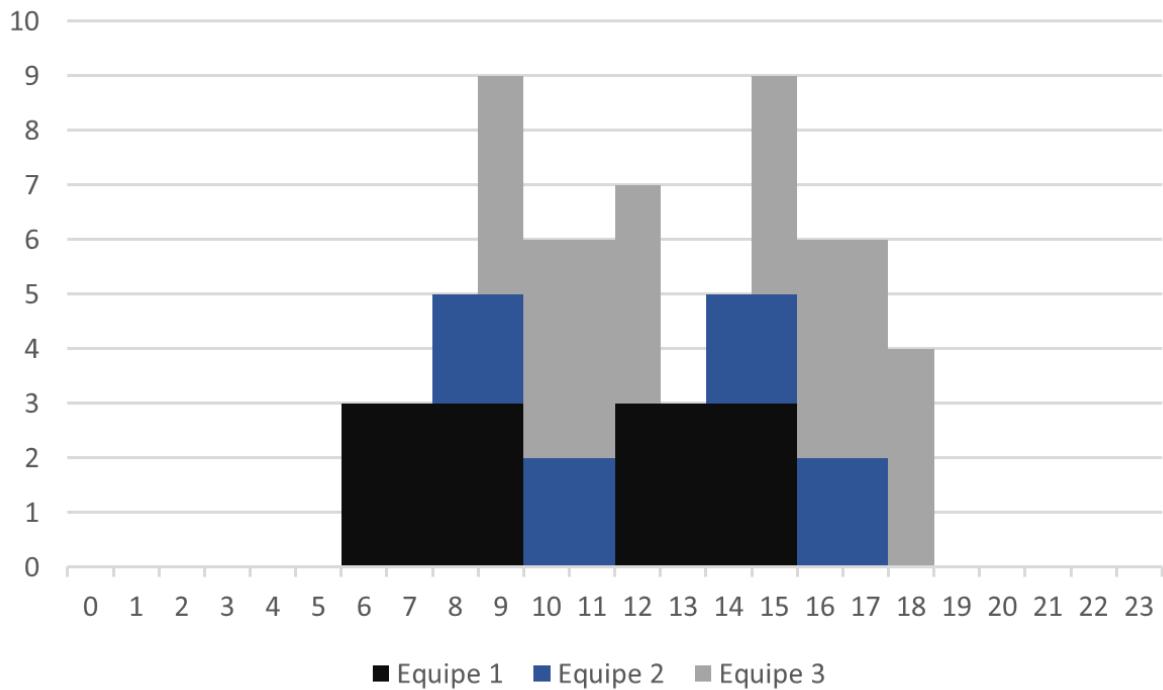
A Vulcanização ocorre preferencialmente quando há um lote de 14 pneus para serem processados, de modo a reduzir gastos com a queima de gás. Há casos, porém, do processo ocorrer com menos de 14 pneus para que prazos de entrega sejam atendidos.

Com isso, os pneus reformados seguem para a Inspeção Final, que avalia a integridade da carcaça, a aderência da banda e qualidade de acabamento. Os pneus aprovados seguem para a Pintura, etapa em que um operador pinta o pneu com tinta preta com o auxílio de um spray, conferindo-lhe um aspecto de pneu “zero quilômetros”. Após um rápido período de secagem, o pneu segue para a área de expedição.

A partir da Inspeção Inicial, o transporte dos pneus entre as estações de trabalho é feito de forma rápida graças à estrutura de trilhos aéreos e ganchos. Esse transporte dura certa de 20 segundos, com exceção do carregamento/descarregamento da autoclave.

A Novo Pneu atua com três equipes de operadores (10 no total). A primeira equipe inicia suas atividades às 6:00 e encerra às 16:00, com horário de almoço das 10:00 às 12:00. A segunda equipe começa a operar às 8:00 e continua até às 18:00, com horário de almoço das 12:00 às 14:00. A última equipe opera das 9:00 às 19:00, com horário de almoço das 13:00 às 15:00. A Figura 6 ilustra o número de operadores disponíveis durante o dia.

Figura 6: Disponibilidade de operadores em dias de semana



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.2. Construção do modelo conceitual

Com base no processo mapeado, será construído o modelo conceitual para a simulação. Este deve ser capaz de reproduzir a situação atual da Novo Pneu e permitir a alteração de entradas para a avaliação de diferentes cenários de expansão da capacidade. Para isso, a modelagem conceitual envolverá a especificação do sistema a ser modelado, descrição de entradas e saídas do simulador, eventos que afetam o funcionamento do sistema e apresentação de cenários que serão simulados (CHUNG, 2004; PEREIRA; CHWIF, 2007).

Para a especificação do sistema, como o presente estudo envolve apenas os investimentos em expansão de capacidade produtiva, o modelo conceitual considerou apenas o processo produtivo da planta da Novo Pneu, que abrange processos entre Inspeção Inicial e a Pintura. A coleta e o retorno de pneus dos clientes não foram contemplados. As chegadas de pneus no sistema produtivo serão consideradas como constantes, para determinados intervalos de tempo. Além disso, não foram considerados estoques de insumos produtivos (como cola, borracha para enchimento e bandas). Portanto, as movimentações de entidades referem-se apenas aos pneus em reforma.

As entradas consideradas para o modelo de simulação foram classificadas como Entradas dos Recursos Produtivos, Entradas de Experimentos e Entradas Financeiras. As Entradas de Recursos Produtivos abrangem informações sobre as etapas produtivas, seus equipamentos e operadores, e alterá-las permite a análise do comportamento da produção de acordo com diferentes cenários de configurações produtivas. Essas entradas são descritas como:

- Ordem da etapa: indica a sequência de processamento que o simulador deve seguir;
- Tempo de *setup*: distribuição de probabilidade e quais seus parâmetros para a geração de tempos de preparação do equipamento e posicionamento do pneu para ser processado;
- Tempo de processamento: distribuição de probabilidade e quais seus parâmetros para a geração de tempos de transformação do pneu no equipamento;
- Tempo de *setdown*: distribuição de probabilidade e quais seus parâmetros para a geração de tempos para retirar o pneu em reforma do equipamento e movimentá-lo para a próxima etapa;
- Quantidade de equipamentos: número de equipamentos disponíveis para a etapa produtiva;
- Tamanho do lote trabalhado: número de pneus que um equipamento consegue processar simultaneamente;
- Número de operadores necessários para realizar a atividade;
- Turnos de funcionamento: capacidade disponível de um recurso de acordo com um intervalo de tempo e dia da semana;
- Prioridade de uma etapa: parâmetro de entrada que serve para direcionar a alocação de operadores;
- Preempção: parâmetro que informa se a etapa é prioritária e pode retirar operadores (já alocados) de outras atividades.

As Entradas de Experimentos incluem informações para controle dos experimentos de simulação: tempo de simulação, número de simulações e demanda mensal. Em combinação com as Entradas de Recursos Produtivos, o modelo de simulação permite avaliar as alternativas de expansão de capacidade de acordo com diferentes cenários de realização da demanda.

As Entradas Financeiras são aquelas necessárias para se avaliar o retorno sobre os investimentos propostos. Essas entradas abrangem, portanto, informações sobre a estrutura de custos e despesas da Novo Pneu e dados sobre as opções de investimento contempladas.

O modelo de simulação deve fornecer ao estudo informações sobre os impactos da expansão da capacidade nos resultados da Novo Pneu. Para isso, determinou-se quais saídas do modelo são necessárias para a realização das análises. Soman et al. (2004) destaca o emprego de

indicadores relacionados ao atendimento de clientes em ambientes de produção MTO (como é o caso da Novo Pneu). Assim, a análise operacional dos cenários requer os tempos de entrada e saída de cada etapa, pois permitem o cálculo do *throughput time*, nível de serviço e fluxo produtivo para cada configuração. Além disso, essas saídas são importantes para a validação do modelo conceitual. Para a análise econômica será considerada também a produção mensal da configuração. Como simplificação, considerou-se um prazo único acordado para reforma de pneus de três dias (*throughput time* da planta). Ademais, foram desconsiderados o sequenciamento da produção por prazos e ocorrência de vulcanizações abaixo da capacidade máxima de pneus.

Para a modelagem conceitual, foram considerados alguns eventos que afetam as entradas e saídas do modelo: preempção de operadores, controle de WIP, turnos. O *setup* e *setdown* da autoclave causam eventos de preempção (preferência) na produção, isto é, fazem com que operadores parem atividades menos prioritárias para a realização de uma atividade prioritária; após esta ser completada, os operadores retornam às atividades menos prioritárias.

A empresa limita o número de pneus em processo para 3 vezes a capacidade da autoclave ($3 \times 14 = 42$ pneus, na situação atual). Durante a simulação, portanto, o número de entidades no ambiente de simulação não deve superar esse limite.

Quanto aos turnos, estes são relevantes para a operação da raspadeira, autoclave e operadores. O modelo de simulação levará em conta os turnos desses três recursos produtivos, de acordo com o dia da semana (3 ciclos produtivos durante a semana, 2 ciclos aos sábados e nenhum aos domingos). Não será considerada a operação em turnos extras como resposta a picos de demanda.

Após avaliação do modelo conceitual, destaca-se os desafios da operação para a modelagem de simulação:

- Recurso móvel de capacidade variável e com preempção: os operadores apresentam disponibilidade variável para alocação nas células produtivas, devido à configuração de turnos e horários de almoço.
- Recurso com preempção: para a realização das atividades de *setup* e *setdown* da autoclave, os operadores atuam como recursos com preempção, isto é, interrompem atividades menos prioritárias para serem realocados para uma atividade com preferência.
- Recursos produtivos muito diferentes: os equipamentos e processos da fábrica possuem características consideravelmente distintas (e.g. lógicas de *setup* e *setdown*, número de operadores necessários para operação, disponibilidade ao longo do dia, número de

entidades processadas simultaneamente).

- Processo de formar e desfazer lotes: etapas da produção processam lotes de tamanhos diferentes, sendo necessária a formação e desmontagem de lotes. Além disso, as entidades loteadas devem manter seus atributos após o processamento e desagregação do lote.
- Lógicas de liberação de WIP: nível máximo de WIP para diferentes blocos de recursos produtivos.

Apresenta-se, enfim, os cenários a serem estudados. Para facilitar o entendimento e identificação dos cenários, adotou-se a seguinte nomenclatura: as opções de aquisição de autoclaves serão designadas pela letra “A” seguida da capacidade expandida da autoclave; os cenários de demanda serão indicados pela letra “D” seguida do número do cenário.

A Novo Pneu considera atualmente duas opções de investimento em expansão da capacidade. A primeira opção (A12) considera a aquisição de uma autoclave seminova com capacidade de 12 pneus por ciclo e funcionamento a gás natural, negociada a R\$68.000,00 e custos de revisão e manutenção em torno de R\$60.000,00 para a compra. A segunda proposta (A22) analisada envolve a venda da atual autoclave por R\$100.000,00 e a compra de uma nova autoclave com capacidade para 14 pneus por ciclo e funcionamento híbrido: tanto a gás natural quanto energia elétrica. O investimento necessário é de R\$300.000,00. Ademais, será considerado a configuração atual (A00) para fins de comparação. Para ambos os casos a empresa estima custos de implantação de R\$10.000,00.

As opções de investimento serão analisadas em três cenários de demanda: ruim (D0), realista (D1) e otimista (D2). O cenário ruim D0 considera a não realização das projeções de aumento da demanda da Novo Pneu, mantendo-se com uma demanda mensal de 800 pneus. Para o cenário realista D1, espera-se a total concretização das projeções da empresa, isto é, demanda de 1100 pneus por mês. O terceiro cenário de demanda, D2, considera um forte aumento da demanda mensal, chegando a 1400 pneus. Adicionalmente, um cenário de alta demanda (D3) foi aplicado. Trata-se de uma demanda superior à capacidade produtiva das configurações consideradas, permitindo a avaliação de sua capacidade máxima. A Tabela 6 resume os cenários para simulação.

Tabela 6: Cenários de simulação

Cenário	Autoclave	Demanda	Custo	Insumo
A00-D0	Atual (14)	800	-	Gás
A14-D0	Atual (14) + Seminova (12)	800	68 + 60 + 10	Gás
A22-D0	Nova (22)	800	300 - 100 + 10	Gás e elétrica
A14-D1	Atual (14) + Seminova (12)	1100	68 + 60 + 10	Gás
A22-D2	Nova (22)	1100	300 - 100 + 10	Gás e elétrica
A14-D2	Atual (14) + Seminova (12)	1400	68 + 60 + 10	Gás
A22-D2	Nova (22)	1400	300 - 100 + 10	Gás e elétrica

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.3. Coleta de dados

Junto à modelagem conceitual, foram definidas quais as informações de entradas necessárias para a simulação e cenários. Algumas informações foram coletadas durante a fase de mapeamento de processo: ordem da etapa, quantidade de equipamentos, tamanho do lote trabalhado, número de operadores, número de operadores requeridos por etapa, turnos, prioridade de processamento e preempção. A coleta de dados, então, focou nos dados em falta: tempos de *setup*, processamento e *setdown*. Ademais, dados econômicos, como custos, margem de contribuição e número de pneus faturados também foram levantados. Iniciou-se essa etapa com a verificação junto à gerente da Novo Pneu de quais dados estavam disponíveis, ilustrados na Tabela 7 a seguir:

Tabela 7: Tempos de processo - Novo Pneu

Ordem	Operação	Capacidade	Tamanho do Lote	Tempo de processo por pneu	Tempo de processo por lote	Produção por ciclo produtivo
1	Limpeza	1	1	00:01:15	00:17:30	192
2	Inspeção Inicial	1	1	00:02:30	00:35:00	96
3	Raspagem	2	1	00:06:40	00:46:40	72
4	Escareação	3	1	00:13:00	01:00:40	55
5	Aplicação de Cola	1	1	00:01:17	00:17:58	187
6	Conserto	1	1	00:07:00	01:38:00	34
7	Aplicação de Banda	1	1	00:06:53	01:36:22	35
8	Montagem	2	1	00:04:20	00:30:20	111
9	Vulcanização	1	14	03:55:00	03:55:00	14
10	Inspeção Final	1	1	00:03:00	00:42:00	80
11	Pintura	1	1	00:02:20	00:32:40	103

Fonte: Novo Pneu; adaptado pelo autor.

A produtividade por ciclo de cada etapa permite verificar que o recurso gargalo para essa operação se trata da autoclave. Para o estudo de simulação, porém, são necessárias informações sobre a distribuição de probabilidade dos tempos de processos e seus parâmetros para a geração de números aleatórios.

Decidiu-se, portanto, realizar uma nova coleta de amostras de tempos de alguns processos para se obter os dados no formato desejado. Junto ao responsável pelo planejamento da produção, foi definido que a nova coleta seria realizada apenas para as etapas com maior variabilidade de tempos de processo, agilizando o processo de coleta. Considerou-se para essa decisão que os processos de Limpeza, Aplicação de Cola, Aplicação de Banda e Pintura são mais padronizados e menos suscetíveis a imprevistos, excluindo-os da nova coleta. Assim, o autor acompanhou as atividades da planta por dois dias para realizar a cronometragem dos tempos de processamento.

Para se realizar o ajuste de distribuição dos dados coletados, utilizou-se o software *Stat::Fit*, desenvolvido pela *Geer Mountain Software Corporation*, em sua versão estudantil. Por meio da função *auto-fit* do *Stat::Fit*, é possível inferir qual a distribuição de probabilidade de uma amostra, quais seus parâmetros e a aceitação do ajuste (que reflete o resultado do teste de adequação do ajuste a um determinado nível de significância). Utilizou-se apenas as distribuições com maior nível de aceitação para as amostras. O resultado, que inclui os antigos e novos tempos de processo, é apresentado na Tabela 8 a seguir.

Tabela 8: Entradas das etapas

Ordem	Operação	Capacidade	Lote	Setup/ Setdown	Distribuição	Média	Desvio Padrão	Máximo/ Mínimo
		(#)	(#)	(min)		(min)	(min)	(min)
1	Limpeza	1	1	0.5	TRI	1.25		1.00/ 1.50
2	Inspeção Inicial	1	1	0.5	LOG	1.19	0.39	
3	Raspagem	2	1	0.5	LOG	1.64	0.33	
4	Escareação	3	1	0.5	EXP	0.10		
5	Aplicação de Cola	1	1	0.5	TRI	1.25		1.00/ 1.50
6	Conserto e enchimento	1	1	0.5	LOG	1.37	0.84	
7	Aplicação de Banda	1	1	0.5	LOG	1.55	0.59	
8	Montagem	2	1	0.5	TRI	4.33		4,00/ 5,00
9	Vulcanização	1	14	10	CON	210.00		
10	Inspeção Final	1	1	0.5	LOG	0.79	0.39	
11	Pintura	1	1	0.5	TRI	2.33		2,00/ 3,00

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os turnos são relevantes para três recursos produtivos: operadores, raspadeira e autoclave.

Os dados destes turnos, apresentados anteriormente, são resumidos a seguir:

Tabela 9: Turnos de produção

Horários	Raspadeira	Autoclave	Operadores (dias de semana)	Operadores (sábado)
06:00	2	1	3	3
07:00	2	1	3	3
08:00	2	1	5	7
09:00	2	1	9	7
10:00	2	1	6	4
11:00	2	1	6	4
12:00	2	1	7	0
13:00	2	1	3	0
14:00	2	1	5	0
15:00	2	1	9	0
16:00	2	0	6	0
17:00	2	0	6	0
18:00	0	0	4	0

Fonte: Elaborado pelo autor.

Considera-se, então, as Entradas Financeiras. As duas alternativas de aquisição contempladas no estudo foram levantadas pela gerente da Novo Pneu com fornecedores de equipamentos e outras reformadoras. Outras opções também foram recebidas, porém foram consideradas pouco convidativas após análises preliminares e não serão incluídas no presente projeto.

Para ambas alternativas de investimentos, estimou-se que serão necessários R\$10.000,00 para a instalação de uma nova autoclave na planta. A autoclave seminova requer investimentos de R\$70.000,00 para sua aquisição, e incorrerá em custos de manutenção e revisão, orçados em R\$60.000,00. A autoclave nova de funcionamento híbrido foi orçada em R\$300.000,00, e envolverá a venda da atual autoclave por R\$100.000,00. Adotou-se a premissa que a vidas úteis da A12 e A22 serão de 8 e 15 anos, respectivamente. As formas de pagamento foram consideradas como à vista. A Tabela 10 resume as propostas recebidas e o desembolso necessário.

Tabela 10: Opções de investimento

Opções de investimento	A12	A22
Custo de aquisição	R\$70.000,00	R\$300.000,00
Custo de implantação	R\$10.000,00	R\$10.000,00
Revisão e Manutenção	R\$60.000,00	-
Venda de equipamentos	-	R\$100.000,00
Desembolso	R\$140.000,00	R\$210.000,00
Insumo	Gás	Gás ou eletricidade
Capacidade	12	22
Vida útil	8 anos	15 anos

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os dados utilizados para a análise da estrutura de custos da empresa foram fornecidos pela empresa e pela consultoria parceira, que faz o acompanhamento mensal de alguns indicadores financeiros de empresas do setor. Os dados refletem os resultados da Novo Pneu de janeiro até julho de 2019. Primeiramente agregou-se os resultados em custos e despesas fixos (que não são diretamente afetados pelo número de pneus reformados) e custos e despesas variáveis (proporcionais ao número de pneus reformados). Com isso, resumiu-se os dados em margem de contribuição unitária e custos e despesas fixos, que serão utilizados na avaliação dos investimentos:

Tabela 11: Dados financeiros da Novo Pneu

Indicador	Valor
Margem de contribuição unitária	R\$176,00/pneu
Custo variável de gás ou energia elétrica	R\$5,00/pneu
Custos e despesas fixos mensais	R\$110,000,00
Ponto de equilíbrio	625 pneus/mês

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com auxílio da consultoria parceira da Novo Pneu, estimou-se que os custos variáveis relacionados ao gás natural e energia elétrica usados na Vulcanização podem ser considerados equivalentes, com base em dados agregados do segmento de reformadoras.

A produção da planta registrada de janeiro a julho de 2019 teve uma média mensal de 756 pneus, com produções máxima de 881 e mínima de 625 pneus. Esse resultado apresenta um crescimento de aproximadamente 17% sobre a média mensal de 644 pneus registrada em 2018.

4.3. Analisar

O objetivo dessa etapa é a obtenção, detalhamento e análise de resultados. Para isso, será desenvolvido o modelo computacional e ocorrerá a execução de experimentos.

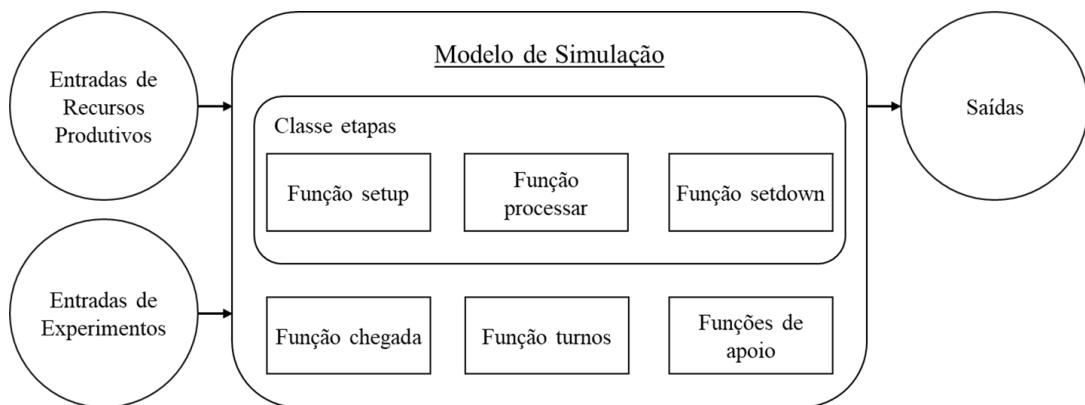
4.3.1. Modelo Computacional

A modelagem computacional envolverá a tradução do modelo conceitual para uma linguagem de programação computacional. Para o presente projeto, escolheu-se a linguagem de programação *Python* e sua biblioteca *SimPy*. *SimPy* é um software open source estruturado em *Python*, publicado sob a *MIT License*. Trata-se de um módulo que permite a simulação de eventos discretos baseada em processos por meio da definição de ambientes de simulação e utilização de suas classes para modelagem de recursos compartilhados (e.g. *Resources*, *Containers* e *Stores*).

A escolha da biblioteca *SimPy* decorre também de outros fatores, como abranger funções específicas para recursos com preempção e prioridades (presente no modelo de simulação da planta da Novo Pneu). Além disso, sua base em *Python* permite a utilização de diversas bibliotecas, ampliando as possibilidades de aplicação de seus recursos na modelagem computacional. Comparado a outros softwares de simulação, portanto, o *SimPy* pode conferir ao projeto maior liberdade para customização.

Com base no sistema, entradas e saídas descritos no modelo conceitual, o modelo computacional foi construído por meio do desenvolvimento de funções e uma classe. Estas estão resumidas na Figura 7.

Figura 7: Componentes do modelo de simulação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3.2. Funções de Apoio

Considerou-se como função de apoio aquelas que são necessárias para a realização da simulação e registro de seus resultados, porém não atuam diretamente sobre o processamento das entidades no ambiente de simulação.

Para o manuseio de dados de entrada e saída, foram criadas quatro funções baseadas na biblioteca nativa csv do *Python*, que permite o uso e a edição arquivos de extensão “.csv”. A função “ler_csv” realiza a leitura de tabelas csv e as traduz para listas no *Python*, possibilitando o recebimento de entradas no modelo computacional. A função “limpar_csv” prepara um arquivo csv para receber novos dados de saída limpando os dados existentes. A função “escrever_csv” transforma uma lista do *Python* em uma tabela csv, que é registrada em um arquivo destino. A última função que utiliza a biblioteca csv é “criar_csv”, que cria um arquivo csv com um cabeçalho apenas.

A geração de números aleatórios também foi classificada como função de apoio, pois fornece tempos de processamento de pneus para as funções de *setup*, processamento e *setdown*. A função “gerar_num_aleatório” retorna um número por meio de amostragem aleatória com base em uma distribuição de probabilidade e parâmetros recebidos. Para isso, foi empregada a biblioteca *NumPy*, software open source licenciado sob a *BSD License*, para a linguagem de programação *Python*. Trata-se de um pacote abrangente de funções matemáticas para computação científica, com recursos para a geração de números aleatórios. A função pode ser utilizada para a geração de amostras de distribuição exponencial, normal, constante, triangular, uniforme e log-normal. As funções “hora_dia” e “dia_semana” foram criadas para traduzir o tempo de simulação

decorrido em dados que possam ser usados para o monitoramento e execução dos turnos de operação. A função “hora_dia” transforma o tempo decorrido em minutos do dia, dentro do intervalo de 0 (início do dia) até 1439 (final do dia ou 23:59). A função “dia_semana” recebe o tempo decorrido e retorna o dia da semana ao qual se refere (seguindo o formato 0 para segundas-feiras, e 5 para sábados).

4.3.3. Funções de Processamento

As funções de processamento são aquelas que interagem diretamente com o processamento de entidades (pneus) no modelo de simulação, e são baseadas em recursos do *SimPy* e estão instanciadas em seu ambiente de simulação, que permite a execução dos processos no tempo. Empregou-se, para o presente projeto, dois principais recursos:

- Resources: são recursos que são solicitados (*request*) por processos e liberados após seu uso (*release*). A alocação dos recursos é limitada e ocorre de acordo com sua capacidade e disponibilidade. Os tipos *PriorityResource* e *PreemptiveResource* foram utilizados no projeto, porque permitem a ordenação de filas de solicitação de recurso de acordo com a prioridade do processo. Além disso, um *PreemptiveResource* pode interromper processos menos prioritários para acessar o recurso, como é o caso do *setup* e *setdown* da autoclave da Novo Pneu.
- Stores: são recursos que podem receber (*put*) ou devolver (*get*) objetos concretos para processos, isto é, que possuem características próprias registradas e podem ser diferenciados. No caso dos pneus usados, essas informações seriam o número do pneu produzido e os tempos de processo em cada etapa.

Para a modelagem computacional, o principal módulo desenvolvido foi a classe “Etapas”, cujas instâncias são objetos que representam as etapas produtivas. Em conjunto, todos os objetos compõem o processo produtivo completo. A classe “Etapas” é formada por variáveis de classe (variáveis compartilhadas por todas as instâncias da classe), métodos (funções responsáveis a inicialização de instâncias e processamento de pneus) e métodos de classe (relacionadas à atualização de variáveis de classe). Um objeto da classe “Etapas” será doravante designado como “etapa”.

A utilização da classe “Etapas” começa com o fornecimento das informações de entrada sobre uma etapa para a sua criação no ambiente de simulação do *SimPy*. As entradas necessárias são: ordem da etapa, quantidade de equipamentos, tamanho do lote processado, número de operadores necessários, tempos de *setup*, processamento e *setdown*, e prioridade e preempção da etapa, de acordo com as definições presentes no modelo conceitual.

Figura 8: Pseudocódigo de inicialização da classe Etapas

```

Classe “Etapas”: Inicialização de uma etapa

1: Método inicializar(informações da etapa)
2:     Atualiza a classe                                # como número total de etapas do processo
3:     Cria equipamento para a etapa
4:     Cria estoque para a etapa
5:     Cria setup da etapa
6:     Cria processamento da etapa
7:     Cria setdown da etapa

```

Fonte: Elaborado pelo autor.

Simultaneamente à criação de etapas no ambiente de simulação ocorre a atualização das variáveis que afetam todas as etapas da classe, como ordens de fluxo de pneus nos processos produtivos, controles de produtos em processo no sistema e filas de produtos semiacabados.

Os três métodos que atuam sobre a etapa são o “*setup*”, “processar” e “*setdown*”. Estes foram desenvolvidos de modo iterativo, com incrementos de complexidade de acordo com os requisitos e especificidades das operações da Novo Pneu. Esses três métodos são semelhantes, porém diferem em alguns pontos. Todos verificam constantemente a ocorrência de solicitações com preempção no sistema e, em caso positivo, interrompem suas atividades e liberam os operadores. Enquanto isso não ocorre, seguem normalmente com suas atividades de *setup/* processamento/*setdown* e, quando as finaliza, libera os operadores.

Os requisitos de solicitação e liberação de recursos são diferentes. Para o início do *setup* requer-se as disponibilidades de equipamento, de pneus para processar na etapa e de operadores (considerando, ainda, a prioridade e preempção da etapa), além da liberação de entrada de WIP no sistema. Contudo, o equipamento só será liberado ao final do *setdown*, de modo a manter o processo sobre o mesmo pneu. Como o pneu para processo e a liberação de WIP já foram conseguidos no *setup* da etapa, estes não são requisitados por “processar” e “*setdown*”. O pseudocódigo da Figura 9 ilustra o funcionamento desses métodos.

Figura 9: Pseudocódigo dos métodos da classe Etapas

Classe “Etapas”: Inicialização de uma etapa	
1:	Método <i>setup</i> (informações de <i>setup</i>)
2:	Gera tempo de <i>setup</i>
3:	Solicita equipamento
4:	Verifica a liberação de WIP
5:	Coleta pneus/lote para a etapa
6:	Atualiza WIP
7:	Continua até finalizar <i>setup</i> :
8:	Enquanto não ocorre preempção:
9:	Solicita operadores
10:	Realiza/retoma <i>setup</i>
11:	Finaliza <i>setup</i>
12:	Libera operadores
13:	Em caso de preempção:
14:	Interrompe <i>setup</i>
15:	Libera operadores
16:	Chama método “processar” # encadeia o <i>setup</i> com processamento
17:	Método <i>processar</i> (informações de processamento)
18:	Gera tempo de processo
19:	Continua até finalizar processo:
20:	Enquanto não ocorre preempção:
21:	Solicita operadores
22:	Realiza/retoma processo
23:	Finaliza processo
24:	Libera operadores
25:	Em caso de preempção:
26:	Interrompe processo
27:	Libera operadores
28:	Chama método <i>setdown</i> # encadeia o processo com <i>setdown</i>
29:	Método <i>setdown</i> (informações de <i>setdown</i>)
30:	Gera tempo de <i>setdown</i>
31:	Continua até finalizar <i>setdown</i> :
32:	Enquanto não ocorre preempção:
33:	Solicita operadores
34:	Realiza/retoma <i>setdown</i>
35:	Finaliza processo
36:	Libera operadores
37:	Em caso de preempção:
38:	Interrompe <i>setdown</i>
39:	Libera operadores
40:	Libera equipamento
41:	Atualiza WIP
42:	Registra resultados da etapa em csv
43:	Chama método de <i>setup</i> # coloca o processo em laço

Fonte: Elaborado pelo autor.

Além disso, o método *setdown* é responsável por gravar as informações coletadas desde o *setup* até o final do *setdown*. Esses resultados são os horários de início e fim do *setup*, processamento e *setdown*.

Os métodos de classe da classe “Etapas” são responsáveis para atualizar as variáveis de classe durante a inicialização de cada etapa. Essas atualizações são importantes para o encadeamento de processos, criação de estoques entre as etapas e de controles de produtos semiacabados no sistema, pois afetam todas as etapas em simulação. O controle de WIP é realizado por meio do recurso Store, que é preenchido ao começo da simulação com um número máximo de entidades que podem estar no sistema simultaneamente (na situação atual, 42 unidades). Para cada entidade que entra no sistema, retira-se um item do Store. Quando a reforma de um pneu é finalizada (após a Pintura), devolve-se o item ao Store, que poderá ser retirado novamente para o processamento de outro pneu. Com isso, encerra-se a descrição da classe “Etapas” e suas contribuições ao modelo.

As duas funções de processamento restantes são a “turno_recurso” e “chegar_entidades”. Apesar de estarem relacionadas à disponibilidade de recursos durante a simulação, ambas não atuam diretamente no processamento dos pneus. Portanto, optou-se por deixar essas funções fora da classe “Etapas”.

A função “chegar_entidades” é responsável por abastecer um estoque específico com entidades. No caso do modelo de simulação desse projeto, como se considerou apenas a movimentação de pneus no sistema, o estoque abastecido será o da primeira etapa: Limpeza. As chegadas ocorrem de acordo com um ritmo pré-estabelecido e parâmetros como tamanho do lote de chegada. Os pneus que chegam ao estoque inicial são numerados de acordo com a chegada, de modo a identificá-los. Essa informação é mantida como um atributo da entidade até sua saída do sistema, permitindo o cálculo de indicadores como *lead-time* após a simulação.

Figura 10: Pseudocódigo da função *chegar_entidades*

Classe “Etapas”: Inicialização de uma etapa

- 1: Função *chegar_entidades*(informações de chegada)
- 2: Enquanto há entidades para descarregar no estoque:
- 3: Registra número de chegada da entidade
- 4: Coloca entidade no estoque
- 5: Aguarda o horário para próxima chegada
- 6: Chama função *chegar_entidades* # coloca o processo em laço

Fonte: Elaborado pelo autor.

A função “turno_recurso” controla a disponibilidade de recursos de acordo com o horário do dia e dia da semana. Ao término de um turno de trabalho, a função exerce uma solicitação de alta prioridade sobre o recurso (não necessariamente associada com preempção), capturando o recurso assim que possível. No início de um turno, a função libera a capacidade capturada.

Figura 11: Pseudocódigo da função turno_recurso

Classe “Etapas”: Inicialização de uma etapa

```

1: Função turno_recurso(informações do turno)
2:   Verifica qual capacidade retirar
3:   Aguarda o horário para retirada
4:   Retira capacidade do recurso
5:   Aguarda o horário para liberação
6:   Libera capacidade do recurso
7:   Chama função "turno_recurso"           # inicia o processo do próximo turno

```

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.4. Verificação do modelo computacional

Nesta etapa será descrito o processo de verificação das principais funções do modelo computacional, que ocorreu concomitantemente ao seu desenvolvimento. A verificação foi realizada para garantir que o modelo computacional estivesse livre de erros e funcionasse de acordo com seu propósito. Cada função foi testada individualmente antes e depois de sua implementação no código principal.

A função de apoio “gerar_num_aleatório” foi verificada com o auxílio do *Stat::fit*. Para isso, foram geradas diversas amostras para cada tipo de distribuição de probabilidade contempladas pela função. Os resultados foram submetidos à função *auto-fit* do *Stat::fit* para ajuste de distribuições, confirmando a distribuição da amostra gerada. Além disso, comparou-se as médias e desvio padrão dos valores amostrados com os parâmetros fornecidos.

As aplicações da classe “Etapas” foram implementadas de forma iterativa, com verificações a cada iteração. Para isso, verificou-se o comportamento da classe de acordo com seu propósito em alguns cenários, comparando-o com resultados esperados. Para o controle de WIP no sistema, monitorou-se durante as simulações o número de entradas e saídas de pneus do sistema durante o dia. Ao final de cada dia da simulação, verificou-se o volume em cada estoque de produtos semiacabados. De forma similar, a função “turno_recurso” foi avaliada de acordo com a disponibilidade de um recurso durante o dia em dias da semana específicos. O encadeamento

de processos e ordem *setup*-processo-*setdown* nas etapas foi avaliado por meio de saídas do modelo escritas em arquivos csv.

Figura 12: Exemplo de resultados de etapas

Entidade	Etapa	ChegadaFila	InícioSetup	InícioProc	InícioSetdo	FimSetdown
0	0	0.00	0.00	0.50	1.72	2.22
0	1	2.22	2.22	2.72	3.51	4.01
1	0	0.00	2.22	2.72	3.86	4.36
2	0	0.00	4.36	4.86	5.91	6.41
0	2	4.01	4.01	4.51	6.22	6.72
1	1	4.36	4.36	4.86	6.73	7.23
3	0	0.00	6.41	6.91	8.35	8.85
2	1	6.41	7.23	7.73	8.67	9.17
1	2	7.23	7.23	7.73	9.60	10.10
4	0	0.00	8.85	9.35	10.50	11.00
3	1	8.85	9.17	9.67	10.89	11.39
2	2	9.17	9.17	9.67	11.12	11.62

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os eventos de prioridade e preempção foram testados inicialmente em cenários específicos. Para a chegada de diversas solicitações de diferentes prioridades para um recurso, avaliou-se por meio de impressões na tela a ordem que as solicitações seriam atendidas e comparou-se com a prioridade de cada solicitação. Em um segundo momento, inseriu-se a característica de preempção para as solicitações. Assim, foi verificada a ocorrência da preempção e do tratamento de exceção, isto é, como o processo lida com sua interrupção.

4.5. Validação do modelo conceitual

Segundo Banks et al. (2010), o processo de validação consiste em avaliar se o modelo conceitual representa o sistema real com precisão necessária. Essa etapa foi realizada em dois momentos do projeto. Com sua construção, o modelo conceitual foi apresentado à gerente e ao responsável pela operação da fábrica da Novo Pneu. Ambos concordaram com o escopo do modelo, as hipóteses simplificadoras adotadas e os cenários contemplados pelo estudo.

Posteriormente, o modelo de simulação foi avaliado quanto à geração de resultados correspondentes com o sistema real e comportamento de acordo com as especificidades descritas

no modelo conceitual. Assim, executou-se uma simulação com o modelo e entradas de sua configuração produtiva atual em um cenário de alta demanda para avaliar seu comportamento e sua capacidade máxima. Os resultados são apresentados na tabela a seguir.

Tabela 12: Resultados do modelo de simulação

Mês	Produção (# pneus)	Lead-time (# dias)	WIP médio diário
0	854	1.29	42
1	826	1.32	42
2	742	1.44	42
3	742	1.47	42
4	770	1.43	42
5	756	1.41	42
6	770	1.41	42
7	840	1.32	42
8	728	1.46	42
9	840	1.29	42
10	784	1.41	42
11	742	1.44	42
Média	783	1.39	42

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme levantado na coleta de dados, a produção mensal média da Novo Pneu entre os meses de janeiro e julho de 2019 foi de 756 pneus, com limites máximo de 881 e mínimo de 625 pneus. A média mensal obtida pela simulação da configuração atual em cenário de alta demanda foi de 783 pneus. Comparativamente, esse resultado foi 3,6% maior que o resultado real.

Outros fatores também foram avaliados. O *lead-time* do processo produtivo simulado esteve dentro do limite de dois dias estipulado pela empresa, e o volume de WIP médio diário foi de 42, de acordo com o controle de WIP praticado pela empresa. A disponibilidade de recursos também esteve de acordo com os turnos de operadores, autoclave e raspadeira. Não houve processamentos fora do período de operação da planta (de 06:00 às 19:00). Portanto, considerou-se que o modelo de simulação representa com precisão satisfatória o sistema real.

5. Experimentos

Com o modelo computacional verificado e o modelo conceitual validado, o projeto seguiu com a realização dos experimentos. Os experimentos objetivam a análise da capacidade máxima obtida para cada opção de investimento e qual seu desempenho em diferentes cenários de demanda. Esse capítulo abrange a etapa Incrementar proposta na metodologia.

5.1. Avaliação de capacidade máxima

Inicia-se a análise das opções de aquisição com a simulação de cenários com alta demanda, pois permite inferir qual será a capacidade instalada da planta com a aquisição de equipamentos. A simulação dos cenários A00-D3, A12-D3 e A22-D3 foi executada para doze meses de produção e os resultados são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13: Resultados do cenário D3

Mês	A00-D3		A00-D3		A22-D3	
	Produção (# pneus)	Lead time (# horas)	Produção (# pneus)	Lead time (# horas)	Produção (# pneus)	Lead time (# horas)
0	854	31.0	1482	33.2	1298	35.6
1	826	31.8	1430	34.2	1188	29.8
2	742	34.6	1390	34.5	1166	29.8
3	742	35.2	1756	27.2	1320	29.7
4	770	34.2	1430	34.2	1166	35.3
5	756	33.8	1624	29.3	1122	31.5
6	770	33.8	1522	31.6	1254	35.6
7	840	31.6	1664	29.1	1276	32.5
8	728	35.2	1430	33.9	1452	35.9
9	840	30.9	1572	31.3	1254	35.6
10	784	34.0	1456	33.9	1276	27.2
11	742	34.6	1392	34.5	1232	34.5
Média	783	33.4	1,512	32.3	1,250	32.6

Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se que as três configurações atuam com *lead-times* semelhantes, com médias inferiores a 1,4 dias desde a entrada do pneu na produção até o término de sua pintura. As alternativas A12 e A22 apresentam uma redução de 3% do *lead-time* em relação ao cenário atual. Além disso, o número médio de ciclos produtivos por dia foi aproximadamente 2,2 para todos os cenários. Esses efeitos podem ser relacionados à limitação de WIP adotada pela Novo Pneu para 3 vezes a capacidade de Vulcanização. A Tabela 14 detalha o comportamento do processo de Vulcanização nos três cenários.

Tabela 14: Comportamento da Vulcanização no Cenário D3

Vulcanização						
Cenário	Capacidade	%Δ	Produção	%Δ	Fila	%Δ
A00-D3	14	-	783	-	41.1	-
A12-D3	14+12	86%	1,512	93%	37.5	-9%
A22-D3	22	57%	1,260	61%	42.9	4%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para as três opções de aquisição o recurso gargalo continua sendo a autoclave, pois sua produtividade por ciclo é a menor de todo o processo de reforma de pneus. A expansão de capacidade da autoclave em A12 e A22 foi acompanhado por um aumento quase proporcional do volume produzido na fábrica. Com isso, para o cenário A12-D3 o tempo médio de fila na autoclave caiu 9%, de 41,1 para 37,5 horas entre a chegada do pneu ao processo e o início de seu *setup*.

No cenário A22-D3, contudo, houve aumento no tempo de filas em 4% mesmo com ampliação da capacidade do recurso gargalo. Isso pode ser explicado pela necessidade de se formar um lote maior para o início do processo de Vulcanização. O resultado continua positivo, com um aumento da produção em 61%.

5.2. Análise dos experimentos

O cenário de demanda D0 considera que a demanda não crescerá como projetado e se mantenha no nível atual, isto é, cerca de 800 pneus por mês. Assim, pode-se considerar o cenário como um “worst case”. Serão estudadas as três alternativas de aquisição neste cenário: A00-D0, A12-D0 e A22-D0.

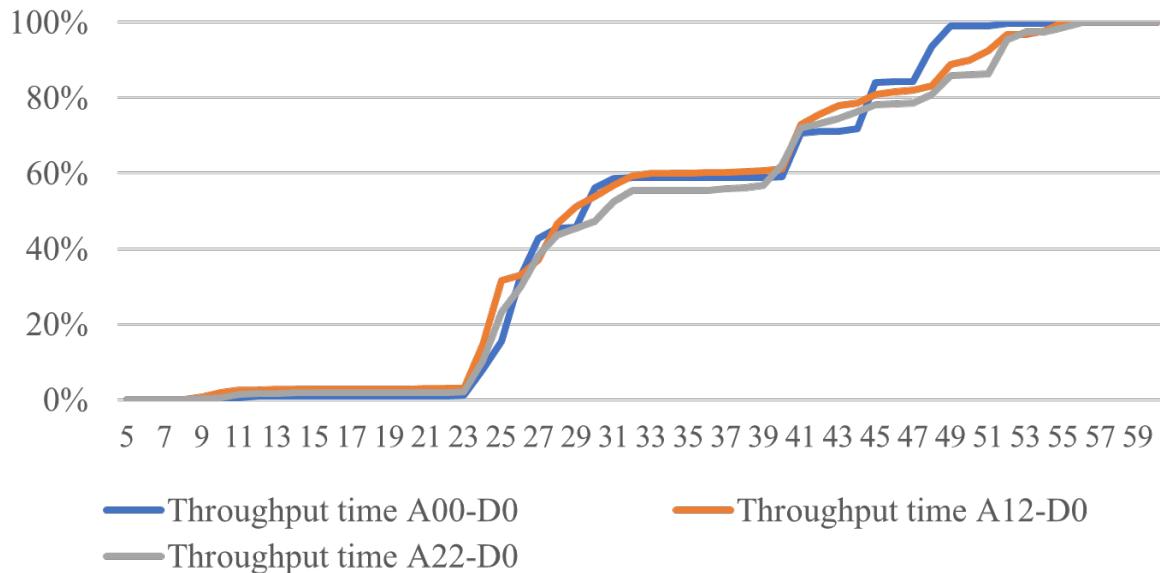
Tabela 15: Resultados do cenário de alta demanda

Mês	A00-D0		A12-D0		A22-D0	
	Produção	TPT	Produção	TPT	Produção	TPT
	(# pneus)	(# horas)	(# pneus)	(# horas)	(# pneus)	(# horas)
0	798	32.6	806	34.9	792	30.4
1	756	34.4	794	35.5	814	35.3
2	728	35.9	806	34.2	792	34.6
3	770	34.2	792	34.8	792	37.0
4	742	34.7	806	30.1	814	31.7
5	784	33.2	794	30.7	792	34.6
6	798	31.7	806	26.8	814	40.7
7	770	33.6	792	35.9	792	31.0
8	784	33.4	806	31.0	792	34.7
9	798	32.6	806	30.6	814	36.4
10	742	35.0	792	35.4	792	30.9
11	798	32.6	806	31.0	792	34.8
Média	772	33.6	801	32.6	799	34.3

Fonte: Elaborado pelo autor.

As configurações A12 e A22, com maior capacidade para Vulcanização, foram capazes de absorver toda a demanda imposta pelo cenário, uma vez que A12-D0 e A22-D0 operam próximos de, respectivamente, 50% e 60% de sua capacidade produtiva máxima (inferida no cenário D3). O *throughput time* médio dessas configurações ficou ligeiramente abaixo do resultado das simulações no cenário D3, porém os gráficos de distribuição acumulada dos *lead-times* dos experimentos ilustram seu comportamento.

Figura 13: *Throughput time* em cenário de alta demanda



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para todos os cenários, a distribuição ocorre de forma semelhante. A maior parte das reformas de pneus são realizadas após 23 horas da entrada do pneu usado no sistema. No primeiro salto, entre 23 e 37 horas, cerca de 55% dos pneus são produzidos. Até um limite de 60 horas (ou 2,5 dias), todos os cenários D0 apresentariam um nível de serviço acima de 95%. Trata-se de um número menor que a atual meta da empresa, de 3 dias para a reforma. Contudo, o nível de serviço seria reduzido consideravelmente caso fosse considerado um prazo de 2 dias para produção, ficando abaixo dos 90%. Como essa análise abrange o cenário atual de demanda e capacidade produtiva, essas informações podem auxiliar a empresa já no curto prazo, com a revisão de metas desse indicador operacional e na negociação com clientes que exigem prazos menores para a reforma. A Tabela 16 resume esses resultados.

Tabela 16: Nível de serviço no cenário D0

Throughput time	Nível de serviço		
Até 48 horas	94%	83%	81%
Maior que 48 horas	6%	17%	19%
Até 60 horas	100%	100%	100%
Maior que 60 horas	0%	0%	0%

Fonte: Elaborado pelo autor.

O cenário de demanda D1, ou cenário realista, considerou a concretização das projeções de aumento da demanda, atingindo uma média mensal de 1100 pneus. O aumento de demanda considerado para o cenário D2 foi de 1400 pneus por mês, um cenário otimista em que as projeções da Novo Pneu são superadas. Em ambos os cenários a configuração A12 foi capaz de absorver toda a demanda, produzindo os 1100 e 1400 pneus por mês. A alternativa A22 também foi capaz de suportar a demanda do cenário D1, mas sua produção mensal no cenário D2 foi de 1243, ou 89% da demanda. Esse resultado não é necessariamente ruim, pois trata-se de uma projeção agressiva de aumento da demanda, menos provável de se realizar, e já representaria um aumento de aproximadamente 60% sobre a atual produção média de 780 pneus.

Figura 14: Resultados dos cenários D1 e D2

Mês	A12-D1		A22-D1		A12-D2		A22-D2	
	Produção	TPT	Produção	TPT	Produção	TPT	Produção	TPT
0	1104	35.2	1100	36.3	1404	32.2	1254	32.7
1	1092	30.3	1100	35.4	1404	31.3	1122	36.0
2	1106	34.2	1100	35.6	1392	28.1	1254	32.6
3	1104	35.0	1100	36.3	1390	34.9	1276	32.4
4	1092	30.3	1100	32.5	1392	31.5	1122	36.0
5	1092	29.8	1100	31.3	1404	34.5	1144	35.9
6	1118	31.6	1100	36.3	1390	34.4	1386	29.7
7	1092	34.8	1100	35.4	1378	34.5	1276	32.1
8	1092	29.8	1100	31.3	1404	34.4	1320	31.5
9	1104	31.8	1100	36.3	1392	30.2	1276	32.4
10	1106	33.6	1100	35.4	1404	31.3	1276	32.1
11	1092	29.9	1100	35.6	1404	34.5	1210	34.5
Média	1,100	32.2	1,100	34.8	1396	32.6	1,243	33.1

Fonte: Elaborado pelo autor.

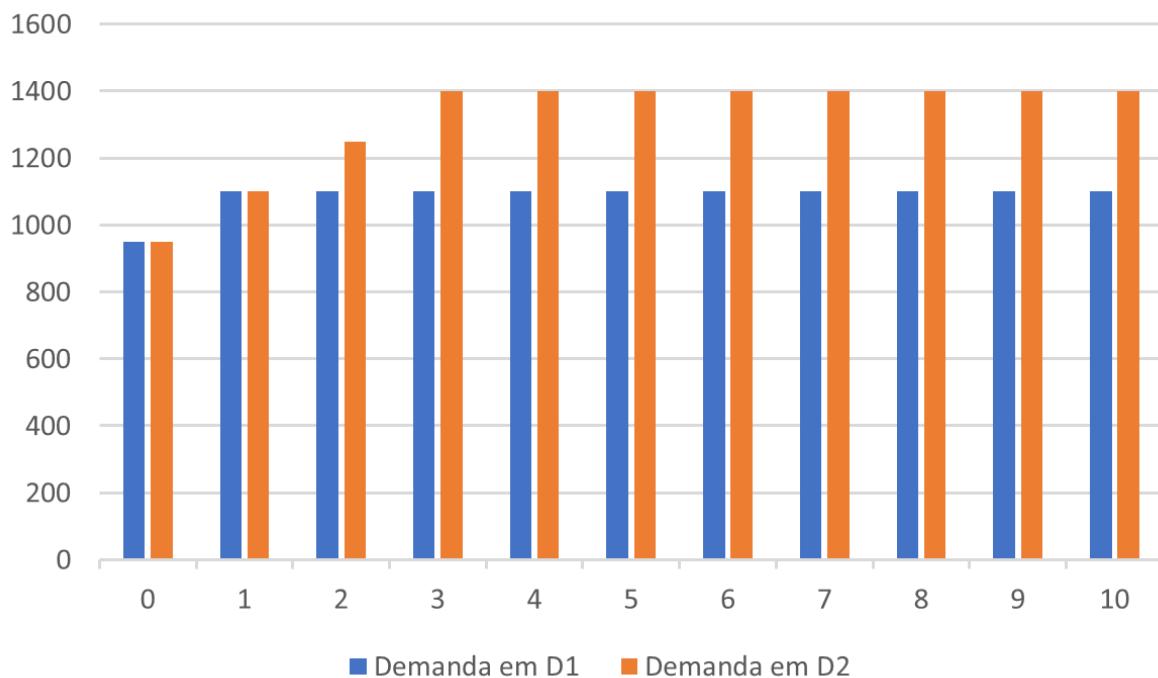
O *throughput time* médio sofreu poucas alterações entre os cenários, e o nível de serviço ficou acima de 95% para um valor acordado de 2,5 dias para a reforma. Em todos os cenários, porém, o *throughput time* da A22 foi superior que da alternativa A12, chegando a ser 8% maior no cenário de demanda D1.

5.3. Análise Econômica

Os cenários simulados terão seus resultados comparados à situação atual. Para isso, os indicadores financeiros valor presente líquido (VPL), *payback* e taxa interna de retorno (TIR) serão empregados.

Nos cenários D1 e D2, adotou-se a premissa que a Novo Pneu não conseguirá capturar todo o aumento de demanda de imediato, logo após a aquisição de equipamentos. Portanto, será considerado um crescimento gradual da média mensal de pneus reformados pela Novo Pneu de 150 pneus em cada ano. No ano da realização do investimento, o crescimento de 780 para 950 pneus reformados por mês representaria um aumento de 21,8%, um valor considerado condizente com o aumento de 17,4% registrado entre 2018 e 2019. A absorção total da demanda ocorreria em dois anos para o cenário D1 e em quatro para o cenário D2. O volume produzido nos dois cenários é representado na Figura 15.

Figura 15: Crescimento projetado da produção mensal ao longo dos anos



Fonte: Elaborado pelo autor.

As análises desses três indicadores levarão em conta apenas os ganhos com a execução dos investimentos. Portanto, as projeções de fluxo de caixa consideram apenas os gastos com o projeto e margem de contribuição proveniente do aumento de reformas de pneus em relação à

situação atual. A margem de contribuição unitária foi considerada constante e igual à margem atual de R\$176,00/pneu. O período analisado será de 10 anos, considerando que A12 será descartada após o fim de sua vida útil (sem valor residual) e A22 seja vendida por R\$50.000,00 como autoclave seminova no final do período.

Com base no perfil de crescimento da produção, investimentos necessários e estrutura de custos da empresa, o fluxo de caixa de cada cenário é montado.

Figura 16: Fluxo de caixa projetado nos cenários

Cenário	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A12-D0	-98	42	42	42	42	42	42	42	42		
A22-D0	-168	42	42	42	42	42	42	42	42	42	92
A12-D1	219	676	676	676	676	676	676	676	676		
A22-D1	149	676	676	676	676	676	676	676	676	676	726
A12-D2	219	676	993	1,309	1,309	1,309	1,309	1,309	1,309		
A22-D2	149	676	978	978	978	978	978	978	978	978	1,028

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o cálculo do VPL e comparação com a TIR considerou-se como taxa mínima de atratividade a taxa Selic, atualmente em 5,00% a.a. (em novembro de 2019). Como para os cenários de demanda D1 e D2 os fluxos de caixa já são positivos no primeiro ano, não será calculada a TIR.

Tabela 17: Indicadores econômicos dos cenários

Cenário	VPL (R\$)	TIR (%)	Payback (anos)
A12-D0	166,901	40%	3.3
A22-D0	180,097	23%	3.3
A12-D1	4,368,703	-	0.4
A22-D1	5,141,327	-	0.4
A12-D2	7,420,432	-	0.4
A22-D2	7,088,425	-	0.4

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ambas as opções de investimento se mostram favoráveis, mesmo no pior cenário. Nesse caso, a atual capacidade produtiva da planta seria capaz de absorver uma demanda de aproximadamente 780 pneus por mês, com a necessidade de recorrer a ciclos extra de produção para absorver o total de 800 pneus por mês. Para o presente projeto não foi analisada a operação em turnos extra, pois aumentaria a sua complexidade e poderia comprometer sua execução, dadas as limitações de disponibilidade de tempo para seu desenvolvimento. Ademais, a empresa não considera como desejável a necessidade recorrente de ciclos produtivos extras.

Em termos relativos, a TIR calculada para todos os cenários considerados supera a taxa mínima de atratividade e, com exceção ao cenário D0, o *payback* seria inferior a um ano. O VPL para a alternativa A12 foi superior à A22 nos cenários D0 e D1.

Para o melhor cenário de crescimento da demanda, A22 apresenta um VPL aproximadamente 4,7% superior. Contudo, trata-se do cenário menos provável, segundo expectativas da empresa e da consultoria parceira. O retorno médio dos investimentos, calculado a partir de uma média simples dos VPL dos três cenários de demanda, indica, ainda, que a alternativa A22 é superior à A12, com um retorno de R\$4,1 milhões sobre R\$4,0 milhões.

5.4. Proposta de investimento

Em relação aos indicadores operacionais coletados nas simulações, as alternativas A12 e A22 apresentam comportamentos semelhantes. O *throughput time* da A22, porém, foi maior em todos os cenários considerados, e ficou 8% no cenário de demanda D1. O tempo necessário para a formação de lotes grandes para a Vulcanização pode representar um problema em cenários de baixa demanda. Todavia, o nível de serviço continuou de acordo com a meta da empresa de três dias.

A alternativa A12 se sobressai em cenários de alta demanda, como foi observado no cenário D2. Esse resultado se reflete nos indicadores operacionais (com a absorção de toda a demanda) e econômicos (maior VPL do projeto de aquisição). Esse cenário, porém, é tido como o menos provável e, em termos econômicos, é inferior à alternativa A22 para cenários mais realistas.

Além disso, a autoclave da A22 é uma autoclave nova, com maior vida útil e sem desgastes. Seu funcionamento híbrido confere à empresa maior flexibilidade em seu planejamento, pois poderá optar pelo uso do insumo menos custoso, o que melhora indicadores de resultado como margem de contribuição e ponto de equilíbrio. A alternativa ainda dispõe de maior facilidade de venda, caso se opte por se desfazer do ativo futuramente, conferindo maior liquidez ao projeto como um todo e potencial de adaptação à empresa.

Com base em indicadores operacionais e econômicos, e outros fatores qualitativos, não diretamente inclusos nas análises das simulações, a opção de se investir na aquisição de uma autoclave híbrida, nova e com capacidade para processamento de 22 pneus por ciclo apresenta-se como a mais vantajosa para a empresa. Destaca-se, porém, que durante o desenvolvimento desse estudo adotou-se hipóteses de simplificação e premissas que devem ser consideradas antes da realização dos investimentos.

6. Conclusões

Neste capítulo serão apresentadas a síntese, limitações do presente trabalho.

6.1. Síntese

O presente trabalho de formatura foi desenvolvido em uma empresa reformadora de pneus de médio porte, localizada no interior paulista. Projeções realizadas pela empresa com uma consultoria parceira indicam que, já no médio prazo, a capacidade produtiva instalada será insuficiente para suportar o crescimento da demanda. De modo a auxiliar a empresa em sua adequação às novas necessidades produtivas, o objetivo desse trabalho de formatura é de realizar um estudo sobre os impactos econômicos e operacionais de investimentos em expansão da capacidade da planta.

Para a realização desse estudo, optou-se pela construção de um modelo de simulação, cuja execução permitiu definir como o sistema se comportaria operacionalmente em diversos cenários de expansão da capacidade e crescimento da demanda. Além disso, os dados coletados durante a simulação possibilitaram a avaliação dos retornos econômicos de cada alternativa de aquisição de equipamentos.

O desenvolvimento do projeto seguiu o método proposto, que foi baseado na metodologia de resolução de problemas DMAIC com adaptações para um projeto de simulação segundo Banks et al. (2010). A primeira parte do projeto abrange construção de modelos utilizados, desde a definição do problema até a validação do modelo de simulação. A segunda parte envolveu a realização dos experimentos, a análise econômica e discussão dos resultados.

Considera-se que o objetivo do projeto foi atingido, pois o estudo realizado permitiu inferir qual das alternativas de investimento consideradas configurava como a mais vantajosa para a empresa, avaliação baseada em fatores operacionais e econômicos. Ademais, as informações obtidas forneceram para a empresa um melhor panorama do comportamento de sua linha produtiva em relação aos seus recursos, o que pode gerar reflexos positivos em futuras decisões.

6.2. Limitações

Ressalta-se, porém, que o projeto apresenta limitações quanto ao seu desenvolvimento. Considerou-se apenas duas alternativas de aquisição de autoclaves. O trabalho não contemplou o acompanhamento e monitoramento da implementação do plano de investimento, cuja execução ficou à cargo do cliente.

Além disso, escopo do modelo de simulação desenvolvido ficou limitado à operação dentro da oficina, não considerando outras atividades relevantes como recebimento, sequenciamento da produção e expedição de pneus. Também não se considerou a operação de ciclos produtivos extras, fator diretamente ligado à disponibilidade de recursos para o atendimento de prazos acordados.

Essas limitações, todavia, apresentam-se como oportunidades de melhoria futuras para o projeto, de modo a complementar as análises já realizadas.

Referências

- ABR - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO SEGMENTO DE REFORMA DE PNEUSABR - Associação Brasileira do Segmento de Reforma de Pneus. Dados do Segmento. Disponível em: <<http://abr.org.br/dados-do-segmento/>>. Acesso em: 13 nov. 2019.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE PNEUMÁTICOS - ANIPAssociação Nacional da Indústria de Pneumáticos - ANIPAssociação Nacional da Indústria de Pneumáticos - ANIP. Dados Gerais. Disponível em: <<http://www.anip.org.br/anip-em-numeros/dados-gerais/>>. Acesso em: 13 nov. 2019.
- Banks, Jerry. **Discrete-event system simulation.** 5. ed. Upper Saddle River, N.J., London: Pearson Education, 2010. 1 p. ISBN 0138150370.
- Banks, Jerry. **Handbook of simulation:** Principles, methodology, advances, applications, and practice. New York, Norcross Ga.: Wiley; Co-published by Engineering & Management Press, 1998. xii, 849. ISBN 0471134031.
- Boon Sin, Ang; Zailani, Suhaiza; Iranmanesh, Mohammad; Ramayah, T. Structural equation modelling on knowledge creation in Six Sigma DMAIC project and its impact on organizational performance. **International Journal of Production Economics**, v. 168, p. 105–117, 2015. doi:10.1016/j.ijpe.2015.06.007.
- BRASIL. **Projeto de Reavaliação de Estimativas e Metas do Plano Nacional de Logística e Transportes.** 2012, 2012.
- Chung, Christopher A. **Simulation modeling handbook:** A practical approach. Boca Raton: CRC Press, 2004. 1 v. (various pagings). (Industrial and manufacturing engineering series). ISBN 0849312418.
- Clegg, Ben; Rees, Chris; Titchen, Mike. A study into the effectiveness of quality management training. **The TQM Journal**, v. 22, n. 2, p. 188–208, 2010. doi:10.1108/17542731011024291.
- Dabić-Ostojić, Svetlana; Miljuš, Momčilo; Bojović, Nebojša; Glišović, Nataša; Milenković, Miloš. Applying a mathematical approach to improve the tire retreading process. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 86, p. 107–117, 2014. doi:10.1016/j.resconrec.2014.02.007.
- ETRMA - EUROPEAN TYRE & RUBBER MANUFACTURERS' ASSOCIATIONETRMA - European Tyre & Rubber Manufacturers' AssociationETRMA - European Tyre & Rubber Manufacturers' Association. Statistics: Edition 2019. Disponível em: <<http://www.etrma.org/statistics-2>>. Acesso em: 13 nov. 2019.
- Kaid, Husam; Noman, Mohammed A.; Nasr, Emad Abouel; Alkahtani, Mohammed. Six Sigma DMAIC phases application in Y company: A case study. **International Journal of**

- Collaborative Enterprise**, v. 5, 3/4, p. 181, 2016. doi:10.1504/IJCENT.2016.082330.
- Kingsman, Brian; Hendry, Linda; Mercer, Alan; Souza, Antonio de. Responding to Customer Enquiries in *Make-to-Order* Companies: Problems and Solutions.
- Kingsman, Brian; Hendry, Linda; Mercer, Alan; Souza, Antonio de. Responding to customer enquiries in *Make-to-Order* companies: Problems and solutions. **Production**, v. 6, n. 2, p. 195–207, 1996. doi:10.1590/S0103-65131996000200004.
- Krajewski, Lee J.; Ritzman, Larry P.; Malhotra, Manoj K. **Administração de produção e operações**. 8. ed. São Paulo: Pearson, 2012. 636 p.
- Lebreton, Baptiste; Tuma, Axel. A quantitative approach to assessing the profitability of car and truck tire remanufacturing. **International Journal of Production Economics**, v. 104, n. 2, p. 639–652, 2006. doi:10.1016/j.ijpe.2004.11.010.
- Marzagão, Daniela Santana Lambert; Carvalho, Marly M. Critical success factors for Six Sigma projects. **International Journal of Project Management**, v. 34, n. 8, p. 1505–1518, 2016. doi:10.1016/j.ijproman.2016.08.005.
- Mast, Jeroen de; Lokkerbol, Joran. An analysis of the Six Sigma DMAIC method from the perspective of problem solving. **International Journal of Production Economics**, v. 139, n. 2, p. 604–614, 2012. doi:10.1016/j.ijpe.2012.05.035.
- Moreira, Sheron Pereira de Lima; Bitencourt, Cleusa Marli Gollo; Motta, Marta Elisete Ventura; Camargo, Marilia Emilia; Maciel, José Mauricio Caré. Um estudo exploratório da cadeia produtiva da recapagem de pneus. **GEPROS: Gestão da Produção, Operações e Sistemas**, Ano 5, n. 4, p. 11–27, 2010.
- Morris, Jeffrey. Recycling versus incineration: An energy conservation analysis. **Journal of Hazardous Materials**, n. 47, p. 277–293, 1996.
- Mourtzis, D.; Doukas, M.; Bernidaki, D. Simulation in Manufacturing: Review and Challenges. **Procedia CIRP**, v. 25, p. 213–229, 2014. doi:10.1016/j.procir.2014.10.032.
- Negahban, Ashkan; Smith, Jeffrey S. Simulation for manufacturing system design and operation: Literature review and analysis. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 33, n. 2, p. 241–261, 2014. doi:10.1016/j.jmsy.2013.12.007.
- Oguz, Ceyda; Sibel Salman, F.; Bilgintürk Yalçın, Zehra. Order acceptance and scheduling decisions in *make-to-order* systems. **International Journal of Production Economics**, v. 125, n. 1, p. 200–211, 2010. doi:10.1016/j.ijpe.2010.02.002.
- Pereira, Wilson Inacio; Chwif, Leonardo. Especificação do Modelo Conceitual de Simulação de Eventos Discretos: Aplicação em um Caso Real. **XXX Encontro Nacional de Engenharia**

de Produção, p. 1–12, 2010.

RAMOS FILHO, Leonardo Sohn Nogueira. **A Logística Reversa de Pneus Inseríveis: O Problema da Localização dos Pontos de Coleta**. Florianópolis, 2005. 99 p.

Simic, Vladimir; Dabic-Ostojic, Svetlana. Interval-parameter chance-constrained programming model for uncertainty-based decision making in tire retreading industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 167, p. 1490–1498, 2017.

Skinner, Wickham. MANUFACTURING STRATEGY ON THE “S” CURVE. **Production and Operations Management**, v. 5, n. 1, p. 3–14, 1996. doi:10.1111/j.1937-5956.1996.tb00381.x.

Smętkowska, Monika; Mrugalska, Beata. Using Six Sigma DMAIC to Improve the Quality of the Production Process: A Case Study. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, v. 238, p. 590–596, 2018. doi:10.1016/j.sbspro.2018.04.039.

Soman, Chetan Anil; van Donk, Dirk Pieter; Gaalman, Gerard. Combined *make-to-order* and *make-to-stock* in a food production system. **International Journal of Production Economics**, v. 90, n. 2, p. 223–235, 2004. doi:10.1016/S0925-5273(02)00376-6.

Soosay, Claudine; Nunes, Breno; Bennett, David John; Sohal, Amrik; Jabar, Juhaini; Winroth, Mats. Strategies for sustaining manufacturing competitiveness: Comparative Case studies in Australia and Sweden. **Journal of Manufacturing Technology Management**, v. 27, n. 1, p. 6–37, 2016. doi:10.1108/JMTM-04-2014-0043.

Srinivasan, K.; Muthu, S.; Prasad, N. K.; Satheesh, G. Reduction of Paint line Defects in Shock Absorber Through Six Sigma DMAIC Phases. **Procedia Engineering**, v. 97, p. 1755–1764, 2014. doi:10.1016/j.proeng.2014.12.327.

Wheelwright, Steven C.; Hayes, Robert H. Competing Through Manufacturing. **Harvard Business Review**, v. 63, n. 1, p. 99–109, 1985.

MURCIA FERNÁNDEZ, Henry. **Um modelo para dimensionamento de um sistema intermodal de transporte de carvão na Colômbia**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Naval e Oceânica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014. doi:10.11606/D.3.2014.tde-18032015-161148. Acesso em: 2019-11-14.

RAMOS FILHO, L.S.N. (2005) **A logística reversa de pneus inservíveis: o problema da localização dos pontos de coleta**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

CONAMA – CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE. (1999) **Resolução CONAMA nº 258/99, de 20 de agosto de 1999**. Resoluções, 1999. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/>>. Acessado em: 13 nov. 2019.

CONAMA – CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE. (2009) **Resolução CONAMA nº 416/09, de 30 de setembro de 2009.** Resoluções, 2009. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/>> Acessado em: 13 nov. 2019.

INMETRO – INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. **Portaria n.º 554, de 29 de outubro de 2015,** Inmetro. Disponível em < <http://http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC002331.pdf>>. Acesso em 13 nov. 2019.

BRASIL. Ministério dos Transportes. **Projeto de Reavaliação de Estimativas e Metas do Plano Nacional de Logística de Transportes – Relatório final.** Secretaria de Política Nacional de Transportes – SPNT. Brasília: Logit, set. 2012. Disponível em: <<http://bibspiplanejamento.gov.br/handle/iditem/559>>. Acesso em: 13 nov. 2019.

Anexos

”””

-----Parte 1:

Bibliotecas-----

Nesta etapa são importadas todas as bibliotecas necessárias para a realização da simulação. A seguir está uma breve descrição de cada biblioteca e sua aplicação no presente programa.

numpy:

biblioteca não nativa do Python utilizado na geração de números pseudo-aleatórios para várias distribuições.

No presente programa, é aplicado na geração dos tempos de processamento na fábrica.

Sua função `numpy.random.seed()` auxilia na replicação de cenários ao definir a inicialização do gerador.

csv:

Módulo nativo do Python utilizado no manuseio de arquivos de extensão ‘.csv’.

As entradas para a simulação deste programa estão em arquivos dessa extensão.

Por meio de suas funções, lê-se os dados arquivo e retorna uma tabela ao Python.

simpy:

`simpy` é uma biblioteca não nativa do Python que fornece um estrutura para a simulação de eventos discretos baseada em processos.

O presente programa utiliza-se dos ambientes de simulação, recursos e processos fornecidos pela biblioteca
para a realização das simulações.

”””

```
import csv
import simpy
import numpy
import sys
”””
```

-----Parte 2: Ler entradas e escrever
saídas-----

As próximas funções utilizam principalmente a biblioteca nativa `csv` para manusear dados de entrada e de saída do programa.

”””

```
def ler_csv(arquivo):
```

”””

Função que lê dados de um arquivo ‘.csv’ e transforma em tabelas de inputs que serão utilizadas na simulação.

O input da função ‘arquivo’ deve ser um string contendo sua extensão (e.g. ‘Inputs.csv’).

```

As colunas devem estar separadas por ';' (ponto e vírgula) no arquivo '.csv'.
"""

with open(arquivo, 'r') as arquivoCSV: # Define qual arquivo será lido.

    linhas_csv = csv.reader(arquivoCSV, delimiter=',') # Define qual será o separador
    de colunas utilizado.

    next(arquivoCSV) # Pula a linha de títulos
    linha = [] # Lista para guardar uma linha do arquivo '.csv'
    tabela = [] # Lista para agregar as linhas do arquivo '.csv'

    for row in linhas_csv: # Loop para percorrer linhas
        for i in range(len(row)): # Loop para percorrer colunas
            if row[i] != '':
                linha.append(row[i])
        if linha:
            tabela.append(linha)
        linha = []

    arquivoCSV.close()
    tabela = floats(tabela) # acerta as entradas para o formato float, quando possível.
    return tabela


def limpar_csv(arquivo):
    """

    Função que limpa os dados existentes em um arquivo '.csv'.
    É utilizada para preparar o arquivo para receber apenas os dados de saída mais recentes
    da simulação.
    """

    header = True # Booleano para guardar títulos da tabela.
    with open(arquivo, 'r') as arquivoCSV: # Define qual arquivo será lido.

        linhas_csv = csv.reader(arquivoCSV, delimiter=',') # Define qual será o separador
        de colunas utilizado.

        linha = [] # Lista para guardar uma linha do arquivo '.csv'
        tabela = [] # Lista para agregar as linhas do arquivo '.csv'

        for row in linhas_csv: # Loop para percorrer linhas
            for i in range(len(row)): # Loop para percorrer colunas
                if header:
                    linha.append(row[i])
                if header:
                    tabela.append(linha)
            header = False
            linha = []

    arquivoCSV.close()

    with open(arquivo, 'w', newline='') as arquivoCSV: # Define qual arquivo será

```

reescrito.

```

    linhas_csv = csv.writer(arquivoCSV, delimiter=',') # Define qual será o separador
    de colunas utilizado.
    linhas_csv.writerows(tabela) # Limpa a tabela

arquivoCSV.close()

return

def criar_csv(arquivo, linha_dados):
    """
    Função que cria um arquivo csv com cabeçalhos.
    :param arquivo: nome do arquivo a ser criado
    :param linha_dados: cabeçalho do arquivo csv
    :return:
    """
    with open(arquivo, 'w', newline='') as csvfile:
        linha_cabeçalho = csv.writer(csvfile, delimiter=';', quotechar='|', quoting=csv.
QUOTE_MINIMAL)
        linha_cabeçalho.writerow(linha_dados)

def escrever_csv(arquivo, linha_dados):
    """
    Função que recebe um arquivo '.csv' e adiciona a linha de dados.
    """
    with open(arquivo, 'a', newline='') as arquivoCSV:
        linhas_csv = csv.writer(arquivoCSV, delimiter=',')
        linhas_csv.writerow(linha_dados)

arquivoCSV.close()

return

def floats(tabela):
    """
    Função que transforma as entradas da tabela, se possível, em floats. Senão, as mantém
    como formato original.
    """
    lin = len(tabela)
    col = len(tabela[0])
    for i in range(lin):
        for j in range(col):
            try:
                tabela[i][j] = float(tabela[i][j])
            except:
                tabela[i][j] = str(tabela[i][j])

```

```

    return tabela

"""

-----Parte 3: Funções de
apoio-----
Nesta etapa estão as funções de apoio utilizadas na simulação.
Elas foram assim categorizadas por não utilizarem recursos do simpy.
-----


"""

def gerar_num_aleatório(dist, t_med, desv_pad, t_min, t_max):
    """
    Função para gerar números por meio da biblioteca numpy.
    Para isso, a função recebe inputs do nome da distribuição, média, desvio padrão, tempos
    mínimo e máximo
    e retorna uma amostra da distribuição.
    (os parâmetros necessários variam de acordo com cada distribuição)
    """
    num_aleatório = 0

    if dist == 'EXP': # Distribuição exponencial
        num_aleatório = numpy.random.exponential(1 / t_med)

    elif dist == 'NOR': # Distribuição normal
        num_aleatório = numpy.random.normal(t_med, desv_pad)

    elif dist == 'CON': # Distribuição constante
        num_aleatório = t_med

    elif dist == 'TRI': # Distribuição triangular
        num_aleatório = numpy.random.triangular(t_min, t_med, t_max)

    elif dist == 'UNI': # Distribuição uniforme
        num_aleatório = numpy.random.uniform(t_min, t_max)

    elif dist == 'LOG': # Distribuição lognormal
        t_med2 = numpy.log(t_med ** 2 / ((desv_pad ** 2 + t_med ** 2) ** .5))
        desv_pad2 = (numpy.log(desv_pad ** 2 / t_med ** 2 + 1)) ** 0.5
        num_aleatório = numpy.random.lognormal(t_med2, desv_pad2)

    return num_aleatório

def hora_dia(minutos):
    # Função que retorna minutos do dia (0 = início do dia e 1439 = 23:59)
    minutos -= int(minutos / t_minutos_dia) * t_minutos_dia
    return minutos

```

```

def dia_semana(minutos):
    # Retorna de 0 (para segunda-feira) a 5 (para sábado).
    dia = int(minutos / t_minutos_dia)
    dia -= int(dia / dias_úteis_semana) * dias_úteis_semana
    return dia

"""
-----Parte 4: Funções de
processamento-----
Nesta etapa estão as funções de processamento utilizadas na simulação.
Elas foram assim categorizadas por utilizarem recursos do simpy.
-----
"""

def chegar_entidades(env, chegada_estoque, chegada ritmo, chegada_qtd, série):
    """
    Função para simular a reposição do estoque de entrada, de acordo com os parâmetros
    abaixo.

    :param env: ambiente de simulação
    :param chegada_estoque: estoque para a chegada de entidades
    :param chegada ritmo: a cada quanto tempo chegam as entidades
    :param chegada_qtd: quantas entidades chegam por vez
    :param série: contador de chegadas
    """

    # for i in range(chegada_qtd): # loop para colocar entidades no estoque de chegada
    i = 0
    while len(chegada_estoque.items) < chegada_qtd: # preenche o estoque de chegada até a
        qtd de chegada
        chegada_estoque.put([str(i + série * chegada_qtd), 0, 0, 0, 0, 0])
        i += 1
    yield env.timeout(chegada ritmo) # delay para a próxima chegada
    env.process(chegar_entidades(env, chegada_estoque, chegada ritmo, chegada_qtd, série +
    1)) # próxima chegada

class etapas(object):
    """
    Classe das etapas de processamento. Contém as funções para processamento de entidades.
    """

    ordem_max = 0 # grava qual é a última etapa
    filas = [] # guarda as filas entre processos
    blocos = [[]] # guarda os quadros de kanban para controle de WIP
    kanban_quadro = [] # quadro de kanban para controle de WIP
    resultado_csv = None # guarda o caminho do arquivo em que serão escritos os resultados
    max_wip = 42 # número máximo de entidades em processo

```

```

min_prioridade = None # guarda a prioridade mínima no processo.
su_autoclave = False # verifica se autoclave está em setup

def __init__(self, env, etapa_infos):

    # atualiza classe
    etapas.atualiza_classe(env, etapa_infos)

    # informações da instância/etapa da classe
    self.etapa_resultados = [] # lista para guardar resultados da etapa
    self.etapa_lote = [] # lista para guardar entidades do lote sendo processado
    self.etapa_req_op = [] # lista para guardar requisições de operadores
    self.etapa_req_equip = None # variável para requisição de equipamento por toda a
etapa
    self.etapa_equip = simpy.PriorityResource(env, capacity=1)
    # cria-se n etapas iguais para recurso com capacidade n.
    # Assim, os atributos são referentes a apenas um equipamento.
    self.etapa_ordem = int(etapa_infos[0]) # ordem da etapa no processo produtivo
    self.etapa_tam_lote = int(etapa_infos[3]) # número de entidades que compõe o lote
na etapa

    # informações de processamento da instância/etapa
    self.proc_dist = etapa_infos[4] # distribuição do tempo de processamento
    self.proc_med = etapa_infos[5] # média
    self.proc_desv = etapa_infos[6] # desvio padrão
    self.proc_min = etapa_infos[7] # mínimo (para triangular)
    self.proc_max = etapa_infos[8] # máximo (para triangular)
    self.proc_num_op = int(etapa_infos[9]) # número de operadores
    self.proc_preemption = bool(etapa_infos[10]) # tem preferência ou não
    self.proc_prioridade = int(etapa_infos[11]) # nível de prioridade
    self.proc_in_proc = False # booleano que informa se o lote está ou não em
processamento

    # informações de setup da instância/etapa
    self.su_dist = etapa_infos[12] # distribuição do tempo de setup
    self.su_med = etapa_infos[13] # média
    self.su_desv = etapa_infos[14] # desvio padrão
    self.su_min = etapa_infos[15] # mínimo (para triangular)
    self.su_max = etapa_infos[16] # máximo (para triangular)
    self.su_num_op = int(etapa_infos[17]) # número de operadores da etapa
    self.su_preemption = bool(etapa_infos[18]) # tem preferência ou não
    self.su_prioridade = int(etapa_infos[19]) # nível de prioridade
    self.su_in_su = False # booleano que informa se o lote está ou não em setup

    # informações de setdown da instância/etapa
    self.sd_dist = etapa_infos[20] # distribuição de tempo do setdown
    self.sd_med = etapa_infos[21] # média
    self.sd_desv = etapa_infos[22] # desvio padrão
    self.sd_min = etapa_infos[23] # mínimo (para triangular)
    self.sd_max = etapa_infos[24] # máximo (para triangular)

```

```

self.sd_num_op = int(etapa_infos[25]) # número de operadores da etapa
self.sd_preemption = bool(etapa_infos[26]) # tem preferência ou não
self.sd_prioridade = int(etapa_infos[27]) # nível de prioridade
self.sd_in_sd = False # booleano que informa se o lote está ou não em setdown

def setup(self, env, operadores):
    # gera tempo de setup
    su_tempo = gerar_num_aleatório(self.su_dist, self.su_med, self.su_desv, self.su_min, self.su_max)
    self.etapa_req_equip = self.etapa_equip.request(priority=self.su_prioridade, preempt=self.su_preemption)
    # define a requisição de equipamento
    yield self.etapa_req_equip # requere equipamento
    if self.etapa_ordem == 8: # verifica se é a autoclave
        while etapas.su_autoclave: # aguarda terminar o setup de outra autoclave.
            yield env.timeout(1) # assim, forma-se o lote primeiro em uma e depois na outra.
            etapas.su_autoclave = True
    while self.etapa_tam_lote > len(self.etapa_lote): # loop para coletar entidades e kanbans
        for i in range(len(etapas.blocos)): # loop para coletar kanbans
            if self.etapa_ordem + 1 < etapas.ordem_max: # verifica se não é a última etapa
                if etapas.blocos[i][self.etapa_ordem + 1] == 1 and etapas.blocos[i][self.etapa_ordem] == 0:
                    # verifica se precisa coletar kanban (blocos de kanban no meio do processo)
                    yield etapas.kanban_quadro[i].get() # coleta kanban
                elif etapas.blocos[i][self.etapa_ordem] == 1 and self.etapa_ordem == 0:
                    # verifica se precisa coletar kanban (primeira etapa)
                    yield etapas.kanban_quadro[i].get() # coleta kanban
            etapa_entidade = yield etapas.filas[self.etapa_ordem].get() # coleta entidade, após ter coletado o kanban
            self.etapa_lote.append([etapa_entidade[0], self.etapa_ordem, etapa_entidade[-1]]) # grava o nome da entidade, etapa do processo e horário que chegou na fila

    for entidade in self.etapa_lote: # loop que passa por todo o lote da etapa
        entidade.append(env.now) # grava tempo de início do setup depois que fechou um lote
    while su_tempo: # setup da etapa
        try: # tenta rodar esse bloco, caso não haja preemption
            while self.su_num_op > len(self.etapa_req_op): # loop para requisitar operadores
                etapa_req_1_op = operadores.request(priority=self.su_prioridade, preempt=self.su_preemption) #
                define a requisição
                yield etapa_req_1_op # requere operador
                self.etapa_req_op.append(etapa_req_1_op) # adiciona operador à lista alocada para o setup

```

```

        self.su_in_su = True # inicia o setup
        su_t_inic = env.now # grava tempo de início do setup
        yield env.timeout(su_tempo) # realiza setup
        su_tempo = 0 # encerra o tempo de setup
        self.su_in_su = False # termina o setup
        for op in self.etapa_req_op: # libera operadores
            operadores.release(op)
        self.etapa_req_op = [] # limpa lista de requisições

    except: # se houver preemption, rodar esse bloco
        if not self.su_in_su: # verifica se o setup já tinha começado
            su_t_inic = env.now
        su_tempo -= env.now - su_t_inic # atualiza o tempo restante de
processamento
        for op in self.etapa_req_op: # libera opeardores
            operadores.release(op)
        self.etapa_req_op = [] # limpa a lista de operadores requisitados
        self.su_in_su = False # pára o setup
    etapas.su_autoclave = False
    env.process(self.processar(env, operadores)) # chama a função de processamento

def processar(self, env, operadores):
    # máquinas e operadores já requisitados em set-up
    # gera tempo de processo
    proc_tempo = gerar_num_aleatório(self.proc_dist, self.proc_med, self.proc_desv,
self.proc_min, self.proc_max)
    for entidade in self.etapa_lote: # loop que passa por todas as entidades para
gravar informações
        entidade.append(env.now) # grava horário de início do processo/fim do setup
    while proc_tempo: # processamento do lote
        try: # tenta rodar esse bloco, caso não haja preemption
            while self.proc_num_op > len(self.etapa_req_op): # loop para requerer
operadores
                etapa_req_1_op = operadores.request(priority=self.proc_prioridade,
                                           preempt=self.proc_preemption) #
define a requisição
                yield etapa_req_1_op # requere operador
                self.etapa_req_op.append(etapa_req_1_op) # adiciona operador à lista
de alocações para a etapa
            self.proc_in_proc = True # inicia o processamento
            proc_t_inic = env.now # grava tempo de início do processo
            yield env.timeout(proc_tempo) # processa
            proc_tempo = 0 # encerra o tempo de processamento
            self.proc_in_proc = False # encerra o processamento
            for op in self.etapa_req_op: # libera operadores
                operadores.release(op)
            self.etapa_req_op = [] # limpa lista de requisições

        except: # rodar esse bloco em caso de preemption
            if not self.proc_in_proc: # verifica se o processamento já tinha começado

```

```

        proc_t_inic = env.now
        proc_tempo -= env.now - proc_t_inic # atualiza tempo de processo restante
        for op in self.etapa_req_op: # loop para liberar operadores
            operadores.release(op) # libera operadores
        self.etapa_req_op = [] # limpa lista de requisições

    env.process(self.setdown(env, operadores)) # chama o setdown

def setdown(self, env, operadores):
    # gera tempo de setdown
    sd_tempo = gerar_num_aleatório(self.sd_dist, self.sd_med, self.sd_desv, self.sd_min, self.sd_max)
    for entidade in self.etapa_lote: # loop que percorre o lote para preencher
        informações de processamento
            entidade.append(env.now) # grava o tempo de fim do processo/início do setdown
    while sd_tempo: # setdown
        try: # rodar esse bloco caso não haja preempt
            while self.sd_num_op > len(self.etapa_req_op): # loop para requisições de
                operadores
                    etapa_req_1_op = operadores.request(priority=self.sd_prioridade,
                                                        preempt=self.sd_preemption) #
                define a requisição
                    yield etapa_req_1_op # requere operador
                    self.etapa_req_op.append(etapa_req_1_op) # adiciona operador à lista
                de alocação para etapa
                    self.sd_in_sd = True # inicia o set down
                    sd_t_inic = env.now # grava tempo de início do set down
                    yield env.timeout(sd_tempo) # set down
                    self.sd_in_sd = False # encerra setdown
                    sd_tempo = 0 # encerra o tempo de setdown
                    for op in self.etapa_req_op: # libera operadores
                        operadores.release(op)
                    self.etapa_req_op = [] # limpa lista de alocações

            except: # rodar esse bloco caso ocorra preempt
                if not self.sd_in_sd: # verifica se o setdown já tinha começado
                    sd_t_inic = env.now
                    sd_tempo -= env.now - sd_t_inic # atualiza tempo de setdown restante
                    for op in self.etapa_req_op: # percorre lista de alocações de operadores
                para liberá-los
                    operadores.release(op) # libera operador
                    self.etapa_req_op = [] # limpa lista de alocações
                    self.etapa_equip.release(self.etapa_req_equip) # libera recursos ao final do
                setdown

            for entidade in self.etapa_lote: # loop para percorrer o lote e gravar informações
                entidade.append(env.now) # grava o horário do final do setdown
                escrever_csv(etapas.resultado_csv, entidade)

        # bloco para retornar kanbans

```

```

        for i in range(len(etapas.blocos)):
            if self.etapa_ordem == etapas.ordem_max: # devolve kanban se é a última
                etapa do processo
                    if etapas.blocos[i][self.etapa_ordem] == 1: # e se a etapa fazia parte
                        do quadro
                            yield etapas.kanban_quadro[i].put('Cartão Kanban Bloco ' + str(i))
                    elif etapas.blocos[i][self.etapa_ordem + 1] == 0 and etapas.blocos[i][self.
                        etapa_ordem] == 1:
                            yield etapas.kanban_quadro[i].put('Cartão Kanban Bloco ' + str(i))

                # coloca entidade na fila para próximo processamento
                etapas.filas[self.etapa_ordem + 1].put(entidade)

            self.etapa_lote = []
            env.process(self.setup(env, operadores))

        """
Métodos de classe para atualizar a classe.
"""

@classmethod
def atualiza_resultado_csv(cls, caminho_arquivo):
    cls.resultado_csv = caminho_arquivo

@classmethod
def limpa_PA(cls, env):
    yield cls.filas[-1].get()
    env.process(cls.limpa_PA(env))

@classmethod
def atualiza_classe(cls, env, etapa_infos):
    # método de classe para atualizar variáveis de classe a cada instância criada.

    while int(etapa_infos[0]) + 2 > len(cls.filas): # cria uma fila a excedente para
        guardar produtos terminados
        cls.filas.append(simpy.Store(env)) # cria filas para a classe (não para a
        instância)
    if int(etapa_infos[0]) + 1 > len(cls.blocos[0]): # cria bloco para toda a
        fábrica
        cls.blocos[0].append(1) # bloco de processamento para kanbans

    # atualiza o número máximo de etapas
    cls.ordem_max = max(cls.ordem_max, int(etapa_infos[0]))

    # se for a primeira instância da classe, cria kanbans para Bloco 0 e
    # inicializa processo de limpeza de estoque de produtos acabados.
    if not cls.kanban_quadro:
        cls.kanban_quadro.append(simpy.Store(env))
        for i in range(cls.max_wip):
            cls.kanban_quadro[0].put('Kanban Bloco 0')

```

```

    env.process(etapas.limpa_PA(env))

        # atualiza variável da classe com a maior prioridade de processo (quanto menor o
        número, maior a prioridade)
        if cls.min_prioridade is None:
            cls.min_prioridade = min(etapa_infos[11], etapa_infos[19], etapa_infos[27])
        else:
            cls.min_prioridade = min(cls.min_prioridade, etapa_infos[11], etapa_infos[19],
etapa_infos[27])

        """
Métodos de classe sobre controle de WIP
"""

@classmethod
def bloco_cria(cls, env, bloco, bloco_max_wip):
    # método de classe para criar blocos de kanbans
    cls.blocos.append(bloco) # coloca o novo bloco na classe
    cls.kanban_cria(env, len(cls.blocos) - 1, bloco_max_wip) # cria cartões e quadro

@classmethod
def kanban_cria(cls, env, bloco_num, bloco_max_wip):
    # método de classe para criar o quadro e cartões kanban
    cls.kanban_quadro.append(simpy.Store(env, capacity=bloco_max_wip)) # cria quadro
    for i in range(bloco_max_wip): # preenche o quadro com kanbans
        cls.kanban_quadro[bloco_num].put('Cartão Kanban Bloco ' + str(bloco_num))

@classmethod
def atualiza_max_wip(cls, novo_max_wip, bloco_num):
    # método de classe para atualizar o valor máximo de WIP de um bloco
    # e coloca kanbans necessários no quadro.
    cls.max_wip = max(novo_max_wip, cls.max_wip)
    while len(cls.kanban_quadro[bloco_num].items) < cls.max_wip:
        cls.kanban_quadro[bloco_num].put('Cartão Kanban Bloco ' + str(bloco_num))

def turno_recurso(env, recurso, turno_infos):
    """
    Função para simular turno dos recursos.
    :param env: ambiente de simulação
    :param recurso: recurso que se deseja aplicar o turno
    :param turno_infos: informações do turno (horário de início, duração, capacidade
durante turno)
    """
    turno_fora = [] # lista que guarda recursos fora do turno
    retirar_turno = recurso.capacity - turno_infos[2] # verifica qual a capacidade ficará
fora de operação
    t_agora = hora_dia(env.now) # grava o início da função
    t_inic = turno_infos[0] # grava tempo de início do turno
    t_fim = hora_dia(t_inic + turno_infos[1]) # grava o tempo de final do turno

```

```

# definir quanto tempo esperar até o começo do próximo turno
if t_agora <= t_inic:
    yield env.timeout(t_inic - t_agora)
elif t_agora >= t_fim:
    yield env.timeout(t_inic + t_minutos_dia - t_agora)

if turno_infos[5 + dia_semana(env.now)] == 0: # verifica se o turno verificado é o do
dia certo
    yield env.timeout(t_minutos_dia) # caso não seja, gera uma espera de 24h até
próxima avaliação
elif turno_infos[5 + dia_semana(env.now)] == 1:
    while retirar_turno > len(turno_fora): # loop para retirar recursos do turno
        retira_1 = recurso.request(priority=turno_infos[3], preempt=turno_infos[4]) # define requisição do recurso
        yield retira_1 # requere o recurso
        turno_fora.append(retira_1) # coloca na lista de recursos fora do turno

# define o tempo de espera até o final do turno (para liberação dos recursos)
if t_fim < hora_dia(env.now):
    t_fim += t_minutos_dia
yield env.timeout(t_fim - hora_dia(env.now))
for cap in turno_fora: # libera recursos
    recurso.release(cap)
env.process(turno_recurso(env, recurso, turno_infos)) # chama próximo turno

def monitor(env):
    # função que imprime na tela o WIP ao final do dia
    est = []
    for i in range(24):
        yield env.timeout(60)
    for fila in etapas.filas:
        est.append(len(fila.items))
    print('%d/%d: final do dia. Dia da semana: %d. %s' % (hora_dia(env.now), int(env.now / 1440), dia_semana(env.now), est))
    env.process(monitor(env))

"""
-----Bloco Principal:
Simulação-----
Neste bloco a simulação é ativada.
É estabelecido um ambiente e requisitos de simulação, os inputs são lidos e as funções são chamadas.
-----
"""

```

```

# Cria ambiente de simulação
env = simpy.Environment()

```

```

# Leitura de listas para guardar dados de input.
etapas_lista = []

# Entrada de cenários: importa lista de inputs lida a partir do arquivo '.csv'
# Os inputs devem estar na mesma pasta
try: # inputs de equipamentos
    num_cenário_equip = str(input('Digite qual o cenário de capacidade dos equipamentos: '))
    etapas_infos = ler_csv('Inputs Etapas - ' + num_cenário_equip + '.csv')
except:
    print('Arquivo não encontrado. Fim da simulação.')
    sys.exit(1)
num_cenário = int(input('Digite qual o cenário de demanda para a simulação: ')) # inputs de demanda

# Cenários de demanda
cenários_infos = ler_csv('Inputs Demanda.csv')
# cenários_infos = ler_csv('C:/Users/Gabriel Kiam/Desktop/Python/Recapog/Inputs Demanda.csv')
t_minutos_dia = int(cenários_infos[num_cenário][1]) # número de minutos no dia
dias_úteis_semana = int(cenários_infos[num_cenário][2]) # número de dias úteis na semana
dias_úteis_mês = int(cenários_infos[num_cenário][3]) # números de dias úteis no mês
num_meses = int(cenários_infos[num_cenário][4]) # número de meses a serem simulados
demanda_mês = int(cenários_infos[num_cenário][5]) # quantas entidades entrarão na simulação
dias_warm_up = int(cenários_infos[num_cenário][6]) # dias de warm up de produção

# etapas_infos = ler_csv('C:/Users/Gabriel Kiam/Desktop/Python/Recapog/Inputs Etapas.csv')
# etapas_infos = floats(etapas_infos) # Ajusta os inputs (números inteiros quando possível).
etapas.max_wip = 0
for etapa_info in etapas_infos: # acerta o max_wip para 3 do maior lote na produção.
    # 1 lote em preparo pré montagem/autoclave
    # 1 lote em vulcanização
    # 1 lote em desmontagem/finalização
    if int(etapa_info[3]) > 1:
        etapas.max_wip = int(etapa_info[3]*3) + etapas.max_wip
# turnos operadores
turnos_infos = ler_csv('Inputs Turnos.csv')
# turnos_infos = floats(turnos_infos)

# turnos raspadeiras
turnos_infos_raspadeira = ler_csv('Inputs Turnos - Raspadeira.csv')

# turnos autoclave
turnos_infos_autoclave = ler_csv('Inputs Turnos - Autoclave.csv')

# Cria Operadores
num_op = 0

```

```

for turno_infos in turnos_infos: # verifica qual o número máximo de operadores
    num_op = max(num_op, turno_infos[2])
operadores = simpy.PreemptiveResource(env, capacity=num_op)

for turno_infos in turnos_infos: # turnos dos operadores
    env.process(turno_recurso(env, operadores, turno_infos))

# Loops para criar etapas e as coloca para serem processados
for infos in etapas_infos: # loop que percorre todas os inputs de entrada
    for i in range(int(infos[2])): # capacidade do recurso
        etapas_lista.append(etapas(env, infos)) # cria a etapa
        env.process(etapas_lista[-1].setup(env, operadores)) # coloca a etapa para ser
processada

for etapa in etapas_lista: # loop para identificar recursos e aplicar turnos
    if etapa.etapa_ordem == 2: # verifica se é raspadeira
        for turno_infos in turnos_infos_raspadeira: # turnos raspadeiras
            env.process(turno_recurso(env, etapa.etapa_equip, turno_infos))
    elif etapa.etapa_ordem == 8: # verifica se é autoclave
        for turno_infos in turnos_infos_autoclave: # turnos autoclave
            env.process(turno_recurso(env, etapa.etapa_equip, turno_infos))

# iniciar processo de chegada de entidades
env.process(chegar_entidades(env, etapas.filas[0], dias_úteis_mês * t_minutos_dia, demanda_mês, 0))

env.process(monitor(env))
# Cria quadros de kanban para blocos de processamento
# A lista de inputs deve conter 28 colunas no mínimo.
# A partir da coluna 29, as colunas ímpares devem conter 1 ou 0 para indicar dentro ou fora
do bloco.
# As colunas ímpares devem conter o número de cartões kanban no quadro (apenas pegará o
maior número da coluna).
if len(etapas_infos[0]) > 28:
    for i in range(28, len(etapas_infos[0]), 2):
        bloco_novo = []
        max_wip = 0
        for j in range(len(etapas_infos)):
            if etapas_infos[j][0] != etapas_infos[j-1][0]:
                bloco_novo.append(int(etapas_infos[j][i]))
                max_wip = int(max(max_wip, etapas_infos[j][i + 1]))
        etapas.bloco_cria(env, bloco_novo, max_wip)

# Grava dados'
# caminho_resultados = 'Resultados Etapas.csv'
caminho_resultados = 'A' + str(num_cenário_equip) + 'D' + str(num_cenário) + '.csv'
criar_csv(caminho_resultados, ['Entidade', 'Etapa', 'ChegadaFila', 'InícioSetup',
'InícioProc', 'InícioSetdown', 'FimSetdown'])
etapas.atualiza_resultado_csv(caminho_resultados)
limpar_csv(caminho_resultados)

```

```
# Ativa a simulação
numpy.random.seed(333)
env.run(until=(dias_úteis_mês + dias_warm_up) * t_minutos_dia * num_meses)
print('Fim da simulação.')
```

