

## ANÁLISE DO PROCESSAMENTO DE PERFIS METÁLICOS: APLICAÇÃO DE TEORIA DE FILAS EM UMA INDÚSTRIA DE ESQUADRIAS

NUNES, Ana Livia dos Santos <sup>1</sup>  
STANZANI, Amélia de Lorena <sup>2</sup>

### RESUMO

Os sistemas produtivos frequentemente enfrentam gargalos e tempos de espera devido à variabilidade na chegada de materiais, à disponibilidade de máquinas ou à mão de obra limitada. Na indústria de esquadrias, devido a exigência de alta produtividade e qualidade bem como a complexidade do processo de conformação mecânica de perfis, a teoria de filas é uma ferramenta que pode ser utilizada para dimensionar o processo e identificar gargalos. Diante disso, o presente estudo teve como objetivo analisar o fluxo de processamento de perfis metálicos a fim de identificar acúmulos na operação, e sugerir por meio de simulações novos cenários para otimizar o processo. A análise dos dados revelou a existência de gargalo no processo de produção de um perfil do sistema estudado, em vista disso foram simulados 4 cenários no *Software Arena* com o intuito de encontrar uma configuração eficiente para assegurar um bom funcionamento do sistema. A melhor alternativa encontrada para reduzir significativamente a aglomeração de peças em fila e o tempo de espera consistiu na adição de uma nova máquina para produzir apenas o produto gargalo, dessa maneira espera-se que com os dados fornecidos pelo trabalho a empresa consiga avaliar os riscos e vantagens de adotar a sugestão. Além disso, os resultados obtidos forneceram diretrizes práticas para o processo de tomada de decisão e contribuíram para o avanço da aplicação de teorias de filas em cenários industriais.

**Palavras-chave:** Teoria de filas; Perfis Metálicos; Processamento; Software Arena; Indústria de Esquadrias;

### ABSTRACT

Production systems often face bottlenecks and waiting times due to variability in the arrival of materials, the availability of machines or limited labor. In the framing industry, due to the requirement for high productivity and quality as well as the complexity of the mechanical profile forming process, queuing theory is a tool that can be used to size the process and identify bottlenecks. Therefore, the present study aimed to analyze the processing flow of metal profiles in order to identify accumulations in the operation, and suggest new scenarios through simulations to optimize the process. Data analysis revealed the existence of a bottleneck in the production process of a profile of the studied system. In view of this, 4 scenarios were simulated in *Software Arena* with the aim of finding an efficient configuration to ensure good functioning of the system. The best alternative found to significantly reduce the crowding of parts in the queue and the waiting time consisted of adding a new machine to produce only the bottleneck product, in this way it is expected that with the data provided by the work the company will be able to assess the risks and advantages of adopting the suggestion.

---

<sup>1</sup> Graduando(a) em Engenharia de Produção pela UFMS-CPNA. E-mail: livia\_nunes@ufms.br. 2024.

<sup>2</sup> Docente do curso de Engenharia de Produção na UFMS-CPNA. E-mail: amelia.stanzani@ufms.br. 2024.

Furthermore, the results obtained provided practical guidelines for the decision-making process and contributed to the advancement of the application of queuing theories in industrial scenarios.

**Keywords:** Queuing theory; Metallic Profiles; Processing; Arena Software; Frame Industry;

## 1. INTRODUÇÃO

Cotidianamente as filas de espera estão presentes na sociedade moderna e, como dificilmente podem ser evitadas, tendem a ser toleradas (Fogliatti e Mattos, 2006). No entanto, os processos responsáveis por causar as filas podem ser estudados e dimensionados a fim de amenizar os prejuízos em tempo e produtividade e garantir a melhoria da eficiência operacional e aumentar a satisfação do cliente.

A teoria de filas é um campo de estudo da Pesquisa Operacional que utiliza uma modelagem com base em processos estocásticos e de matemática aplicada para analisar sistemas que resultam em espera. Segundo Hillier e Lieberman (2013), a teoria de filas é um estudo matemático que visa solucionar problemas que envolvem filas de espera, e para isso estuda a espera em todas as suas formas, identificando novos modelos para representar diferentes sistemas de filas que vemos no cotidiano.

O estudo de modelos de fila é essencial para aprimorar o desempenho de sistemas de serviço, otimizando o uso de recursos, reduzindo o tempo de espera e agilizando o atendimento. Esses modelos permitem prever e quantificar o comportamento de sistemas com demandas aleatórias, possibilitando uma distribuição eficiente dos recursos para atender à qualidade desejada pelos clientes e garantir viabilidade econômica, evitando gargalos e ineficiências (Abensur, 2018).

No setor industrial, a teoria de filas desempenha um papel fundamental, sendo uma ferramenta teórica e prática amplamente utilizada para otimizar processos e gerir de maneira eficiente os recursos disponíveis. De acordo com Gross e Harris (1998), a teoria de filas fornece uma base matemática para modelar e analisar sistemas onde há demanda por serviços e restrições nos recursos disponíveis, permitindo decisões mais estratégicas.

Ao avaliar o processo de fabricação de esquadrias metálicas, especialmente, o processo de perfilação (ou conformação contínua por rolos), pode-se destacar que

devido à sua complexidade e à necessidade de alta precisão, o processo é suscetível a atrasos causados por falhas no equilíbrio de capacidade ou por tempos de inatividade não planejados. Segundo Gross e Harris (1998), a aplicação da teoria de filas em sistemas produtivos permite prever e mitigar tais problemas, auxiliando na otimização do fluxo de materiais, na redução de tempos de espera e no aumento da eficiência.

Dado que as filas impactam diretamente o desempenho industrial, este estudo foca no setor de esquadrias e tem como objetivo analisar a etapa de conformação de perfis metálicos, aplicando os conceitos de teoria de filas para identificar gargalos operacionais e propor possíveis melhorias no fluxo de processamento das peças a fim de garantir maior eficiência da linha.

Além disso, tal estudo visa utilizar a simulação computacional por meio do *software* Arena para evidenciar o cenário atual e o futuro, para que o responsável por tomar decisões possa avaliar quais seriam os impactos e os riscos da implantação de uma nova estratégia. De acordo com Shannon (1998), a simulação é uma das ferramentas mais eficazes para auxiliar na tomada de decisões em projetos e operações de sistemas complexos.

## **2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1 Teoria de Filas**

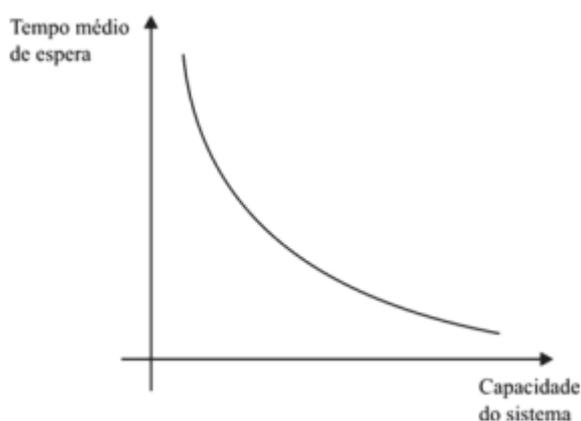
A teoria de filas é um campo da Pesquisa Operacional que investiga as relações entre as demandas de um sistema e a espera enfrentada pelos usuários deste sistema. Uma fila se forma quando a demanda excede a capacidade do sistema de oferecer o serviço em um determinado período. Segundo Arenales *et al.* (2007) as filas de espera são encontradas em diversos sistemas de produção, no caso de sistemas de manufatura, por exemplo, podem ser representadas como peças aguardando processamento em máquinas ou estações de trabalho.

Seguindo a perspectiva de Taha (2007) em uma situação de fila os principais protagonistas são o cliente e o servidor. Os clientes são gerados por uma fonte, e ao chegarem a uma instalação de serviço podem ser atendidos de imediato ou esperar em uma fila se a instalação estiver ocupada. O autor ainda pontua que para efeito de análise, a chegada de clientes é representada pelo intervalo de tempo entre os clientes

sucessivos, e o serviço é caracterizado pelo tempo de serviço (ou de atendimento) por cliente.

A Figura 1 expõe uma curva de *trade-off* entre a capacidade de atendimento/processamento do sistema e o tempo médio de espera dos usuários/peças. Cabe ressaltar que o tempo de espera diminui com o aumento da capacidade, e vice-versa, e considerando que em geral os custos de capacidade são altos, o desafio é encontrar o equilíbrio ideal entre as duas medidas em um dado sistema.

**Figura 1** – Curva *Trade-off*: Capacidade de atendimento x Tempo Médio de Espera



Fonte: Arenales *et al.* (2007)

Para Arenales *et al.* (2007) existem quatro classificações de sistemas de filas:

- I. Fila única e um servidor;
- II. Fila única e múltiplos servidores em paralelo;
- III. Múltiplas filas e múltiplos servidores em paralelo;
- IV. Fila única e múltiplos servidores em série.

### 2.1.1 Notação de Kendall

A notação de Kendall descreve as principais características de um sistema de filas. Essa notação leva este nome pois foi proposta por David Kendall em 1953. Kendall propôs a seguinte ordem: A/B/m/C/K/N

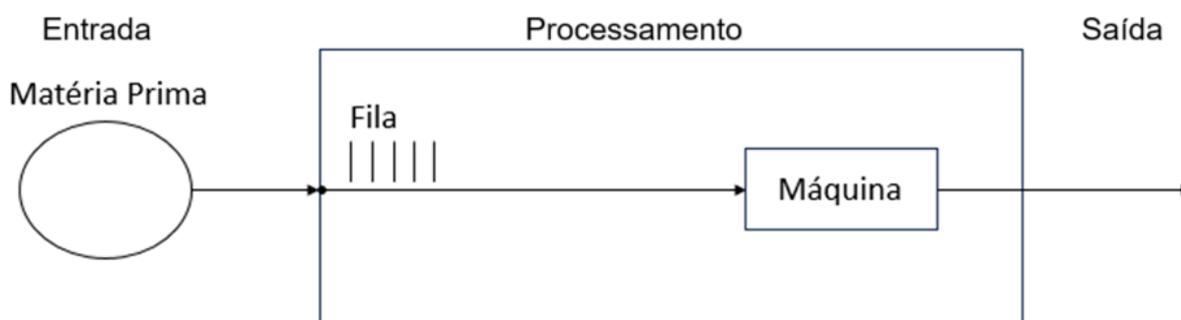
Em que:

A: descreve a distribuição do processo de chegada;  
 B: descreve a distribuição do processo de atendimento;  
 m: número de servidores;  
 C: disciplina da fila;  
 K: capacidade máxima do sistema;  
 N: tamanho da população.

### 2.1.2 Modelo M/M/1

Em consonância com as ideias de Ferreira (2018), o modelo M/M/1, pode ser classificado como FIFO (*First In First Out*) e representa um sistema de uma única fila em que tanto os intervalos entre chegadas, quanto o tempo de atendimento seguem uma distribuição exponencial e existe apenas um servidor responsável pelo atendimento. Tal modelo foi adotado neste estudo, e a Figura 2 representa o comportamento da fila formada na etapa de perfilação.

**Figura 2** – Sistema de Fila Única e Servidor Único do Caso em Estudo



Fonte: Adaptado de Arenales *et al.* (2007)

Conforme exposto por Taha (2007) no estudo de filas o  $\lambda$  representa a taxa de chegada de usuários no sistema por unidade de tempo e o  $\mu$  corresponde a taxa de serviço, ou seja, usuários atendidos por unidade de tempo. Abensur (2018) reitera que o sistema M/M/1 é composto por um servidor que atende uma fila única e as chegadas são aleatórias, com intervalos de tempo exponencialmente distribuídos com média  $E(X) = 1/\lambda$ , e tempos de atendimento também aleatórios e exponencialmente distribuídos com média  $E(S) = 1/\mu$ .

Ao abordar o modelo de sistema M/M/1, cabe destacar as medidas de desempenho fundamentais para as análises, como mostra o Quadro 1.

**Quadro 1 – Medidas de Desempenho para Análise de Filas M/M/1**

<b>Fórmula</b>	<b>Descrição</b>
$\rho = \frac{\lambda}{\mu}$	Taxa de utilização do sistema ( $\rho$ )
$E(L) = E(Ls) + E(Lq)$	Número médio de usuários no sistema (L)
$E(Lq) = \frac{E(Ls)^2}{1 - E(Ls)}$	Número médio de usuários na fila (Lq)
$E(Ls) = \frac{\lambda}{\mu}$	Número médio de usuários sendo processados (Ls)
$E(W) = E(Ws) + E(Wq)$	Tempo médio de permanência no sistema (W)
$E(Wq) = \frac{E(Ls)}{\mu(1 - E(Ls))}$	Tempo médio de espera na fila (Wq)
$E(Ws) = \frac{1}{\mu}$	Tempo médio de processamento (Ws)

Fonte: Adaptado de Arenales *et al.* (2007)

### 2.1.3 Contribuições da Teoria de Filas

O estudo de filas ganhou grande destaque com o passar dos anos e está presente em diversos trabalhos. Seguindo a perspectiva de Boff e Corso (2018), a teoria das filas é um recurso da Pesquisa Operacional de suma importância pelo fato de criar modelos e métodos para resolução de problemas e auxiliar na tomada de decisões. Diante da relevância deste tema e a alta competitividade no mercado atual são inúmeras as pesquisas e contribuições encontradas sobre tal assunto.

Romero *et al.* (2010) em seu estudo em uma indústria química utilizou a teoria de filas para aprimorar o sistema de armazenamento de ácido láctico. Com sua análise, conseguiu identificar um acúmulo de produtos esperando em paletes para serem empilhados, e como sugestão propôs um novo modelo para o sistema adicionando uma nova empilhadeira ao sistema.

Silva *et al.* (2021) em seu trabalho desenvolvido em torno da espera dos navios no Porto de Itajaí, conseguiu demonstrar por meio de simulações oportunidades de melhoria no sistema, seguindo seus modelos o Porto alcançaria uma redução no tempo de espera e no tempo de operação dos navios.

Ao estudar a geração de filas de trens na malha da MRS Logística (Oliveira, 2006) verificou que os vagões ficavam em média 4 horas e meia aguardando para

entrar no sistema. Um ponto importante exposto pelo autor é que através de simulações foi possível compreender que as filas eram geradas não por falta de capacidade do sistema, mas sim por picos de demanda. Com essas conclusões, o autor sugeriu a utilização de técnicas de previsão para identificar estes picos e redimensionar o sistema.

Ao aplicar os conceitos de teoria de filas no âmbito do PCP Ticiani *et al.* (2018) evidenciou a ineficiência da linha de produção estudada, onde chegavam 5,9 ordens de produção por dia e eram finalizadas apenas 5,1 ordens de produção ao dia. Com o objetivo de tratar o problema foi proposto a adição de uma nova linha de produção para a montagem dos produtos, o que aumentaria a capacidade produtiva proporcionando o equilíbrio entre a produção e a demanda.

## **2.2 Indústria de Esquadrias**

As esquadrias são compostas por perfis, vidros, guarnições, ferragens, vedações entre outros componentes de fixação e acabamento. Dessa maneira, configura-se como um produto que combina diversos materiais conectados por juntas fixas ou móveis em várias configurações (Revista alumínio & cia, 2014). Este setor é responsável pela produção de portas e janelas em materiais como aço e o alumínio, os quais tem se destacado pela durabilidade, resistência e flexibilidade que oferecem em diferentes tipos de projetos.

O mercado de esquadrias metálicas no Brasil é um setor de grande relevância para a construção civil, devido sua participação significativa no desenvolvimento de obras residenciais, comerciais e industriais. Uma pesquisa de mercado realizada no início de 2023 pela ABIE (Associação Brasileira das Indústrias de Esquadrias) revelou otimismo no setor, com 55% das empresas planejando aumentar a produção e 45% pretendendo investir em novas estruturas e processos, destacando a importância econômica do setor para a cadeia produtiva da construção civil.

## **2.3 Processo de Perfilação de Metais**

A perfilação de metais é um processo industrial no qual uma longa chapa ou tira de metal plana é deformada plasticamente por meio de uma série de rolos moldadores montados sequencialmente (Cavaguti, 2005). Durante o processo, o metal é guiado ao longo de um sistema de alinhamento que o posiciona corretamente para entrar na zona de perfilação. Desse modo, essa etapa é crucial para garantir que

a tira de metal seja processada de forma precisa e uniforme para atender às especificações exatas de forma e dimensão.

Almeida (2012) define a perfilação como um processo contínuo, no qual uma chapa metálica em temperatura ambiente é tracionada por pares de rolos moldadores dispostos em sequência. Cada par de rolos tem a função de alterar mecanicamente a forma geométrica da chapa, este conjunto de rolos é responsável por dobrar uma chapa plana ou blank, e dessa forma o material é progressivamente conformado até atingir o perfil desejado.

Segundo Aquino (2019) a perfilação trata-se de uma operação contínua de conformação de uma chapa metálica plana, a qual é deformada de maneira progressiva ao passar por rolos com formatos previamente estabelecidos e dispostos em sequência. A chapa adquire sua forma por meio da deformação plástica, resultantes das restrições impostas pelos rolos moldadores.

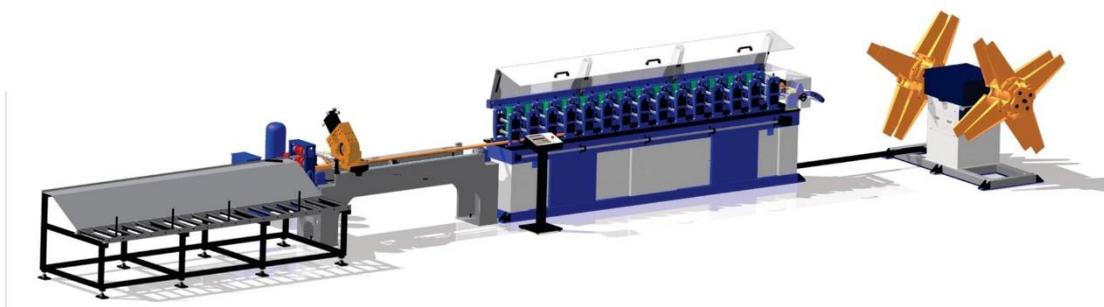
### 2.3.1 Perfiladeira

De acordo com Halmos (2006), a perfiladeira é o componente fundamental de uma linha de produção de perfis metálicos, sua função é produzir perfis de seção variados e com alta qualidade. É composta por rolos moldadores sustentados por castelos posicionados em sequência em uma mesa de apoio.

Uma máquina perfiladeira é responsável por modelar chapas ou tiras de metal, como aço ou alumínio, em perfis com dimensões transversais específicas. Ela é constituída de gabinetes de sustentação posicionados sequencialmente em linha, onde são montados os rolos moldadores capazes de modelar a peça desejada (Cavaguti, 2005).

A Figura 3 exemplifica um modelo de perfiladeira semelhante ao que foi estudado.

**Figura 3** – Máquina Perfiladeira

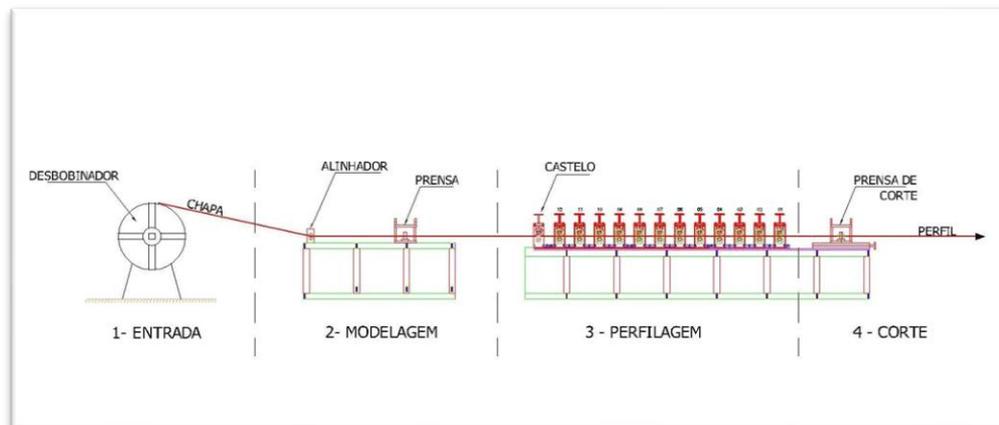


Fonte: Kastro Automação Industrial (2020).

O fluxo de produção de uma máquina perfiladeira proposto por Cavaguti (2005) é composto por quatro etapas principais (Figura 4):

1. Entrada de material;
2. Modelagem ou Alinhamento;
3. Perfilagem ou conformação por rolos;
4. Corte e saída do material.

**Figura 4** – Representação de uma Linha de Conformação por Rolos



Fonte: Almeida (2012).

Diante da figura acima, o funcionamento básico de uma perfiladeira percorre pelas seguintes etapas:

**Etapa 1 – Entrada de matéria prima por desbobinamento:** geralmente a matéria prima é adquirida em forma de bobina de metal e é colocada em um desbobinador o qual desdobra a chapa metálica na medida que é alimentada na máquina.

**Etapa 2 – Modelagem e alinhamento:** o metal é guiado por meio de um sistema de alinhamento que garante que a tira esteja posicionada corretamente para entrar na zona de perfilação.

**Etapa 3 – Perfilação por rolos moldadores:** a parte central da máquina é composta por uma série de conjuntos de rolos dispostos em sequência, com eixos montados em pares e formatos específicos capazes de moldar o metal.

**Etapa 4 – Corte do perfil:** depois de moldado, para atingir o comprimento desejado o perfil pode ser cortado. Este corte é feito por uma guilhotina, serra ou outro mecanismo de corte embutido na máquina. após o estágio de corte, o perfil pode ser

recolhido automaticamente e, no caso da produção para esquadrias, ser encaminhado a outros tratamentos, como montagem, pintura e acabamento, para atingir sua forma final.

Devido a necessidade de se produzir diferentes tipos de perfis para atender os projetos de esquadrias metálicas, uma grande dificuldade encontrada nesse processo consiste na troca e ajuste do ferramental. Nesse sentido, Cavaguti (2005) analisa que para obter um aproveitamento adequado é fundamental trabalhar com a máquina no mínimo 3000 metros de chapa por tipo de perfil.

A regulação da máquina para a obtenção de diferentes seções transversais prejudica o fluxo de produção e influencia na fabricação de peças não conformes, ou seja, sucata em processo. Em razão disso, atualmente as empresas mantêm um mesmo padrão de perfil, ou com pequenas variações na seção geométrica na mesma perfiladeira, permitindo que no momento de ajuste do ferramental ocorra apenas a troca de alguns rolos (Almeida, 2012).

## **2.4 Simulação Computacional**

Para Hollocks (1992), a simulação computacional é descrita como uma técnica de pesquisa operacional que consiste na criação de um programa destinado a representar um sistema real, permitindo que os experimentos conduzidos no modelo simulado exemplifiquem o que acontecerá na realidade.

Belfiore e Fávero (2013) reiteram que a demanda por ferramentas que permitam algum tipo de previsibilidade nos processos tem crescido nos últimos anos, isso porque as mudanças nos processos produtivos podem resultar em altos riscos, custos elevados e incertezas, ocasionando uma certa resistência à mudança de cenário. Com base nessa premissa, surgiu a necessidade de utilizar metodologias mais eficazes, com tempo de resposta mínimo e precisão para embasar a tomada de decisões.

Diante das vantagens da aplicação da simulação, o setor de manufatura pode ser apontado como um grande usuário desse método, isso porque a simulação de eventos discretos configura-se como uma poderosa ferramenta para modelagem e análise de problemas complexos, utilizada para o planejamento e controle de um sistema produtivo (Silva, 2007).

Segundo Freitas (2001), a simulação envolve o uso de técnicas matemáticas por meio de computadores para replicar as operações e sistemas presentes no mundo

real. Uma das principais vantagens da simulação é que ela possibilita a análise de um sistema sem interferir diretamente no modelo em estudo e, por conta disso, o processo de tomada de decisão tende a ser mais assertivo.

#### **2.4.1 Software Arena**

O Arena é um *software* de simulação de eventos discretos amplamente utilizado em diversas áreas como logística, manufatura, saúde e telecomunicações. Desenvolvido pela Rockwell Automation, ele permite modelar processos e sistemas complexos, facilitando a análise e a otimização de operações. Através de sua interface gráfica e funcionalidades visuais, o *software* permite a modelagem e a análise dos efeitos de diversas variáveis, como o tempo de espera, o comprimento das filas, o uso de recursos e os pontos de congestionamento no sistema (Rossetti, 2015).

De acordo com Souza *et al.* (2015), o uso de *software* tem desempenhado um papel crucial na simulação de processos. O Arena, em particular, oferece diversas funcionalidades para a análise dinâmica de processos, possibilitando a visualização de filas, identificação de gargalos, utilização de recursos, e avaliação do comportamento geral do sistema. Essas atividades são realizadas por meio de uma interface gráfica intuitiva, com o suporte de planilhas, relatórios detalhados e animações visuais.

A técnica de simulação é amplamente utilizada na modelagem de filas de processos produtivos, sabendo que as filas surgem quando a demanda por recursos excede sua disponibilidade, o Arena oferece ferramentas poderosas para simular diferentes cenários e políticas de atendimento. O uso de simulações no Arena é uma maneira eficaz de prever comportamentos e fazer ajustes antes de implementar mudanças no mundo real, tornando-se uma ferramenta essencial para gestores que buscam melhorar a performance de suas operações em ambientes complexos e dinâmicos (Kelton *et al.*, 2010).

### **3. MÉTODO DE PESQUISA**

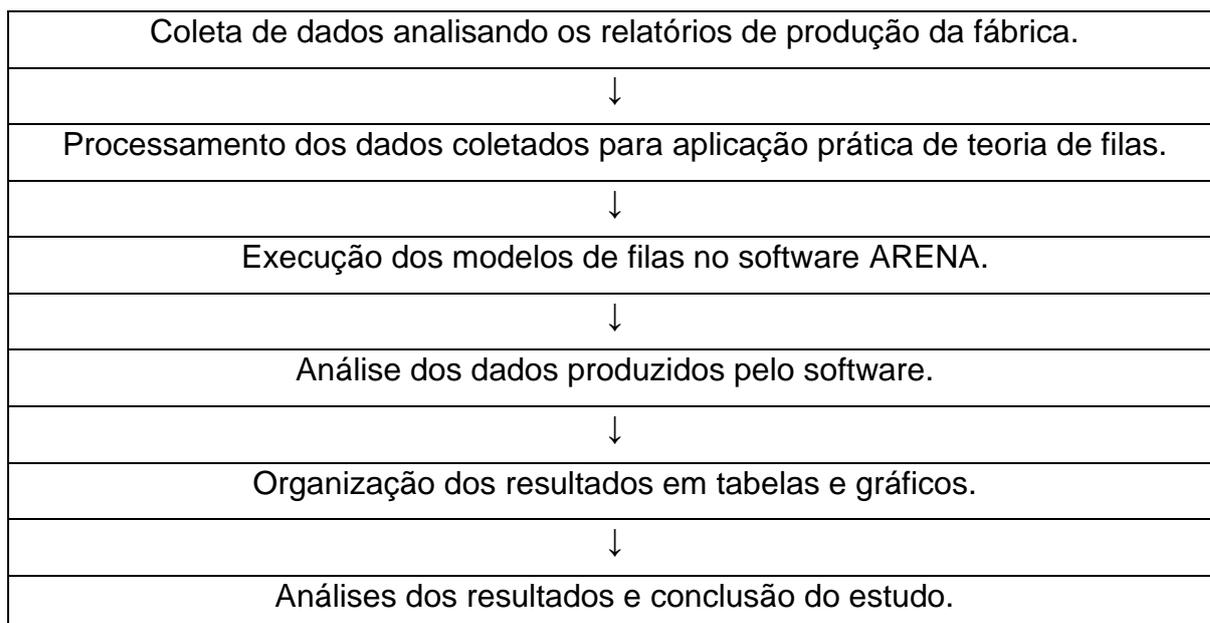
O presente trabalho se caracteriza como um estudo de caso, o qual para Yin (2005) consiste em uma descrição de eventos, passados ou presentes, baseada em múltiplas evidências, que podem incluir dados obtidos por meio de observação direta, entrevistas estruturadas e pesquisas em arquivos. Esse método possibilita a análise

de acontecimentos dentro de seu contexto real, permitindo tanto a implementação de melhorias na instituição quanto seu uso como referência para novas iniciativas.

A pesquisa foi conduzida por meio de uma abordagem quantitativa com o objetivo de avaliar o processamento de perfis metálicos e identificar acúmulos na linha de produção em uma fábrica de portas e janelas localizada na cidade de São José do Rio Preto – SP. De acordo com Gil (2008), a pesquisa quantitativa é apropriada para coletar informações sobre aspectos observáveis da realidade, proporcionando uma análise objetiva e precisa por meio da medição de variáveis. Além disso, ele destaca que essa metodologia possibilita a testagem de hipóteses, o que facilita a comparação e a generalização dos resultados alcançados.

A Figura 5 a seguir apresenta o fluxograma da metodologia desenvolvida no presente trabalho.

**Figura 5** – Fluxograma da Metodologia



Fonte: A autora (2024).

### 3.1 Objeto de Estudo

A linha de produção escolhida pertence a uma indústria de esquadrias muito importante no cenário brasileiro com mais de 70 anos de mercado produzindo portas e janelas em aço e alumínio. A fábrica conta atualmente com 15 perfiladeiras responsáveis pelo processamento de cerca de 80 tipos distintos de perfis metálicos.

Para a aplicação prática, foram feitas algumas simplificações. Os dados analisados foram fornecidos pela empresa e são referentes à produção do mês de agosto de 2024, considerando apenas três perfis com maior demanda na fábrica, processados em uma única máquina, os quais foram selecionados e ajustados para a simulação de filas. No período analisado, foi calculada a média da demanda (D) e da quantidade produzida (P) de cada perfil, considerando um turno de 8 horas.

No caso em estudo, considerou-se por simplificação que o sistema pode ser classificado como M/M/1 isso porque, os clientes que entram no sistema são representados pela matéria prima e o servidor responsável pelo atendimento, neste caso é a máquina. Vale ressaltar que o presente trabalho considerou todas as etapas de processamento da perfiladeira como um único servidor.

A máquina é capaz de processar diferentes perfis de forma sequencial, primeiro processa um lote de um perfil e, em seguida, depois de uma troca de ferramental pode processar um lote de outro perfil. Esta análise baseou-se no princípio de que ocorre o processamento de um produto por vez e os tempos de *setup* foram desconsiderados, de modo a se adequar ao modelo de filas M/M/1. Cabe frisar que a desconsideração do *setup* impacta nos resultados, uma vez que na prática essas pausas prejudicam a produtividade devido à dificuldade de regulação da máquina a cada lote de um perfil diferente.

### **3.2 Tratamento dos dados**

Para o tratamento inicial dos dados, foi utilizado o *Microsoft Excel* para realizar os primeiros cálculos necessários no estudo de filas. O setor de produção gera relatórios diários, que contém informações como demanda, quantidade de itens defeituosos (sucata) e o volume produzido por item. Para fins do estudo de caso, considerou-se que o número de peças a serem processadas corresponde à demanda (D), enquanto a quantidade produzida representa o número de peças processadas (P). Tais dados foram extraídos dos relatórios de produção, e são referentes a um turno específico do mês analisado. A partir dessas informações, foram calculados os seguintes parâmetros:

$\lambda$ : Peças que chegam (por minuto);

$$\lambda = \frac{D}{8 \times 60}$$

$\mu$ : Peças processadas (por minuto);

$$\mu = \frac{P}{8 \times 60}$$

$\rho$ : Taxa de utilização do sistema;

$\frac{1}{\lambda}$ : Tempo entre chegadas por peça (minutos);

$\frac{1}{\mu}$ : Tempo de processamento por peça (minutos).

A partir destes cálculos iniciais foi possível identificar o comportamento atual do sistema e destacar pontos críticos. Diante disso, o próximo passo do trabalho focou em sugerir cenários para o sistema, com o intuito de melhorar o fluxo de processamento dos perfis de modo a atender a demanda esperada, os quais foram calculados primeiramente pelo *Excel*. O objetivo de organizar esses dados em planilhas é controlar todos os parâmetros do modelo, de forma que seja possível fazer alterações nas configurações de cada cenário, e utilizar as matrizes dessas planilhas como referência para alimentar o modelo no Arena (Oliveira; Corrêa; Nunes, 2014).

Desse modo, o passo seguinte consistiu na simulação dos cenários no Arena utilizando como referência o modelo de fila M/M/1. Para a execução das simulações, o *software* foi configurado para 20 replicações de 480 minutos com tempo de aquecimento de 60 minutos.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Cenário Atual

Inicialmente, os dados de processamento dos perfis estudados foram organizados em uma planilha e os cálculos iniciais estão representados na Tabela 1.

**Tabela 1 - Parâmetros de Filas Cenário Atual**

Perfil	D	P	$\lambda$	$\mu$	$\rho$	$\frac{1}{\lambda}$	$\frac{1}{\mu}$
--------	---	---	-----------	-------	--------	---------------------	-----------------

1	491	605	1,02	1,26	0,81	0,98	0,79
2	152	101	0,32	0,21	1,50	3,16	4,75
3	176	264	0,37	0,55	0,67	2,73	1,82

Fonte: A autora (2024).

A partir dessa primeira análise, verificou-se que o perfil 2 apresenta uma taxa de utilização ( $\rho$ ) superior a 1. De acordo com a teoria de filas, isso é caracterizado como uma “fila infinita”, ou seja, a máquina não será capaz de atender a demanda considerando o desempenho atual do sistema. Nesse sentido, o perfil 2 pode ser apontado como o gargalo do processo e as alternativas propostas para os modelos de simulações buscaram, principalmente, reduzir o número/tempo de peças em fila do perfil em questão.

O próximo passo do estudo consistiu na alimentação do *software* a fim de obter os fatores: Tempo médio de permanência no sistema ( $W$ ), tempo médio de espera em fila ( $Wq$ ), número médio de peças no sistema ( $L$ ), número médio de peças em espera na fila ( $Lq$ ), quantidade média de peças sendo processadas ( $Ls$ ), tempo médio processamento por peça ( $Ws$ ) e quantidade média de peças processadas nos 480 minutos ( $P$ ). Tais fatores podem ser observados na Tabela 2.

**Tabela 2 – Relatório de Simulação Cenário Atual**

Produto	Tempo médio de permanência no sistema ( $W$ )	Tempo médio de espera na fila ( $Wq$ )	Tempo médio Processamento por peça ( $Ws$ )	Número médio de peças no sistema ( $L$ )	Número médio de peças em espera na fila ( $Lq$ )	Quantidade média de peças sendo processadas ( $Ls$ )	Quantidade média de peças processadas em 480 minutos ( $P$ )
<b>Perfil 1</b>	3,90 minutos	3,11 minutos	0,79 minutos	4,10 por minuto	3,28 por minuto	0,82 por minuto	438,50
<b>Perfil 2</b>	85,52 minutos	80,79 minutos	4,73 minutos	26,99 por minuto	26 por minuto	0,99 por minuto	89,50
<b>Perfil 3</b>	5,21 minutos	3,40 minutos	1,81 minutos	1,99 por minuto	1,30 por minuto	0,68 por minuto	158,45

Fonte: A autora (2024).

Depois de rodar a simulação foi possível constatar de forma mais clara os acúmulos gerados no sistema pelo perfil 2, uma vez que comparado aos demais casos seus parâmetros  $Wq$  e  $Lq$  apresentaram índices expressivos. Diante dos resultados obtidos, na tentativa de diminuir tais índices foram propostos os seguintes cenários para as simulações:

- Cenário 1: Aumentar a capacidade de processamento da máquina em 10%;
- Cenário 2: Aumentar a capacidade de processamento da máquina em 15%;
- Cenário 3: Diminuir a taxa de chegada em 20%;
- Cenário 4: Diminuir a taxa de chegada em 50% (Apenas para o perfil 2).

## 4.2 Simulação de Cenários Propostos

### 4.2.1 Análise Perfil 1

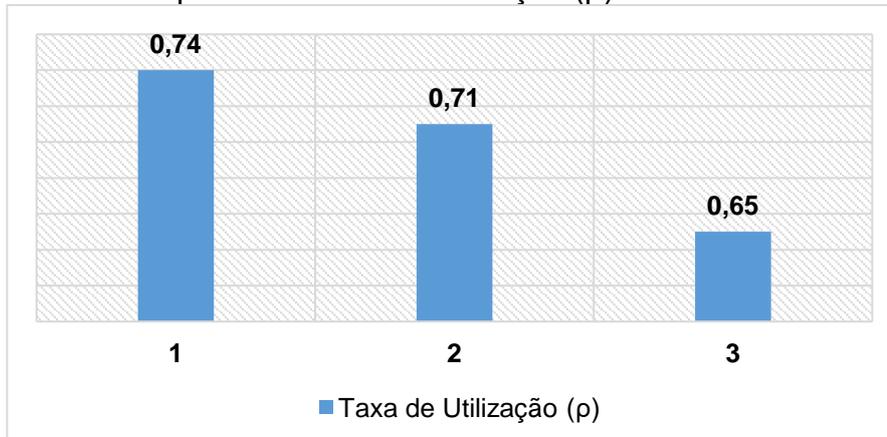
Antes de alimentar a simulação do primeiro perfil, a planilha de controle dos dados foi atualizada de acordo com os cenários para identificar as mudanças de capacidade de processamento da máquina, como mostra a Tabela 3.

**Tabela 3** – Parâmetros de Filas Cenários Propostos Perfil 1

Perfil 1	D	P	$\lambda$	$\mu$	P	$\frac{1}{\lambda}$	$\frac{1}{\mu}$
Cenário 1	491	665,5	1,02	1,39	0,74	0,98	0,72
Cenário 2	491	695,75	1,02	1,45	0,71	0,98	0,69
Cenário 3	392,8	605	0,82	1,26	0,65	1,22	0,79

Fonte: A autora (2024).

Os resultados iniciais mostraram que o perfil 1 apresenta capacidade de acompanhar o fluxo pretendido pela fábrica, uma vez que tende a produzir um volume de peças maior que a demanda, com uma taxa de processamento ( $1/\mu$ ) de aproximadamente 0,79 peças por minuto. Além disso, ao avaliar as variações da taxa de utilização ( $\rho$ ) pode-se perceber que a cada cenário testado o tempo de ocupação da máquina diminuía, demonstrando sua capacidade de produzir os perfis esperados com tempos satisfatórios, assim como mostra a Figura 6.

**Figura 6 – Comparativo Taxa de Utilização ( $\rho$ ) – Cenários Simulados**

Fonte: A autora (2024).

Para visualizar o desempenho do primeiro perfil estudado de forma mais clara, a análise seguiu para a etapa de simulações. Os resultados encontrados estão organizados na Tabela 4.

**Tabela 4 – Relatório de Simulação Perfil 1**

Perfil 1	Tempo médio de permanência no sistema (W)	Tempo médio de espera na fila (Wq)	Tempo médio de Processamento por peça (Ws)	Número médio de peças no sistema (L)	Número médio de peças em espera na fila (Lq)	Quantidade média de peças sendo processadas (Ls)	Quantidade média de peças processadas em 480 minutos (P)
<b>Cenário 1</b>	2,40 minutos	1,70 minutos	0,70 minutos	2,50 por minuto	1,78 por minuto	0,73 por minuto	434,30
<b>Cenário 2</b>	2,16 minutos	1,47 minutos	0,68 minutos	2,26 por minuto	1,55 por minuto	0,71 por minuto	435,65
<b>Cenário 3</b>	2,48 minutos	1,68 minutos	0,80 minutos	2,12 por minuto	1,45 por minuto	0,68 por minuto	357,70

Fonte: A autora (2024).

A partir da execução das simulações, constatou-se que o fluxo de processamento do perfil 1 percorre o sistema de maneira tranquila, sem grandes acúmulos de peças e com a capacidade de atender a demanda esperada pela fábrica. Cabe destacar ainda, que em todos os cenários os índices Wq e Lq diminuíram, evidenciando que ambos seriam satisfatórios para o perfil em questão.

#### 4.2.2 Análise Perfil 2

Os cálculos fundamentais para a simulação, assim como nos demais casos foram inicialmente avaliados no *Excel* e estão expostos na Tabela 5.

**Tabela 5** – Parâmetros de Filas Cenários Propostos Perfil 2

Perfil 2	D	P	$\lambda$	$\mu$	P	$\frac{1}{\lambda}$	$\frac{1}{\mu}$
Cenário 1	152	111,1	0,32	0,23	1,37	3,16	4,32
Cenário 2	152	116,15	0,32	0,24	1,31	3,16	4,13
Cenário 3	121,6	101	0,25	0,21	1,20	3,95	4,75
Cenário 4	76	101	0,16	0,21	0,75	6,32	4,75

Fonte: A autora (2024).

O perfil 2 em particular, foi considerado o ponto crítico da máquina estudada dado que nas três sugestões iniciais o processamento não conseguiu atingir a demanda prevista, sendo necessário sugerir um quarto cenário para alcançar resultados favoráveis. Como pode ser visto na Figura 7, os três cenários não foram suficientes para descaracterizar a classificação de fila infinita para este perfil ( $\rho > 1$ ). Nesse sentido, no quarto cenário optou-se por supor uma máquina extra para processar apenas o perfil gargalo.

Ao avaliar a taxa de utilização ( $\rho$ ), constatou-se que este se qualifica como um cenário viável para conter o acúmulo de peças do produto gargalo no sistema, uma vez que ao dividir a demanda em duas fontes de atendimento o sistema conseguiria processar 25 peças a mais que a demanda definida, com  $\rho=0,75$ .

**Figura 7 – Comparativo Taxa de Utilização ( $\rho$ ) – Cenários Simulados**



Fonte: A autora (2024).

Para exemplificar de maneira mais clara as características do perfil 2, foram realizadas as simulações com base nos dados obtidos no *Excel*. As informações do relatório do Arena estão apresentadas na Tabela 6.

**Tabela 6 – Relatório de Simulação Perfil 2**

Perfil 2	Tempo médio de permanência no sistema (W)	Tempo médio de espera na fila (Wq)	Tempo médio Processamento por peça (Ws)	Número médio de peças no sistema (L)	Número médio de peças em espera na fila (Lq)	Quantidade média de peças sendo processadas (Ls)	Quantidade média de peças processadas em 480 minutos (P)
<b>Cenário 1</b>	87,02 minutos	82,54 minutos	4,48 minutos	28,43 por minuto	27,43 por minuto	1 por minuto	94,65
<b>Cenário 2</b>	67,04 minutos	62,93 minutos	4,11 minutos	21,54 por minuto	20,55 por minuto	0,99 por minuto	101,60
<b>Cenário 3</b>	63,73 minutos	58,91 minutos	4,82 minutos	15,82 por minuto	14,85 por minuto	0,97 por minuto	85,25
<b>Cenário 4</b>	16,06 minutos	11,14 minutos	4,92 minutos	2,58 por minuto	1,82 por minuto	0,75 por minuto	63,75

Fonte: A autora (2024).

A partir da análise dos resultados das replicações realizadas no *software* Arena, ficou claro o congestionamento causado pelo perfil 2 no sistema. Vale ressaltar que, conforme os cenários foram testados, houve uma redução nos tempos de espera e no número de peças na fila. No entanto, devido aos índices elevados apresentados por

esse perfil no cenário atual, as três alternativas iniciais não foram suficientes para promover uma alteração significativa no fluxo de processamento das peças.

Dessa maneira, com o objetivo de assegurar um resultado favorável foi testada a possibilidade de uma máquina extra apenas para processar este perfil, levando em consideração que a demanda (D) seria dividida entre duas máquinas. Com base no resultado alcançado cabe destacar que este cenário seria o mais viável para o sistema estudado, visto que ao adicionar uma fonte de atendimento o tempo médio de espera (Wq) caiu de 80,79 minutos para 11,14 minutos e o número médio de peças em espera (Lq) caiu de 26 por minuto para 1,82 por minuto.

#### 4.2.3 Análise Perfil 3

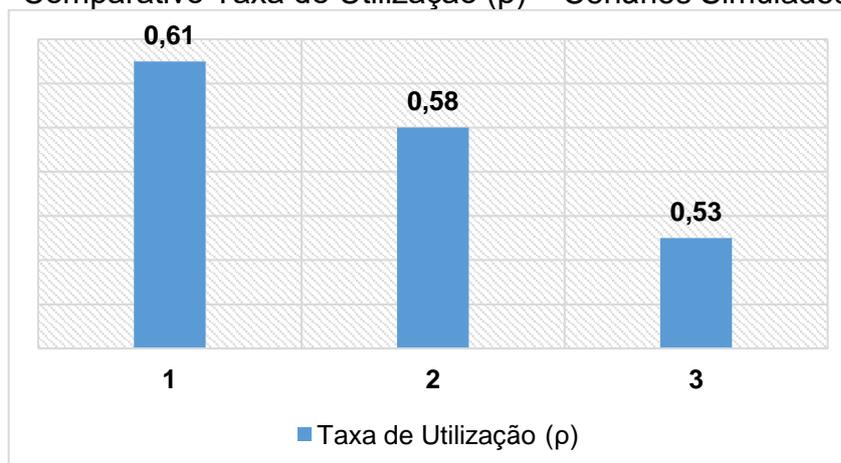
Por fim, para a última análise foram calculados os parâmetros base necessários para alimentar o *software* em cada um dos cenários. A Tabela 7 expressa os dados alcançados.

**Tabela 7 – Parâmetros de Filas Cenários Propostos Perfil 3**

Perfil 3	D	P	$\lambda$	$\mu$	P	$\frac{1}{\lambda}$	$\frac{1}{\mu}$
Cenário 1	176	290,4	0,37	0,61	0,61	2,73	1,65
Cenário 2	176	303,6	0,37	0,63	0,58	2,73	1,58
Cenário 3	140,8	264	0,29	0,55	0,53	3,41	1,82

Fonte: A autora (2024).

Ao avaliar a tabela acima pode-se salientar que assim como visto no atual sistema, esse perfil consegue ser atendido de maneira eficiente sem geração de acúmulos em ambos os cenários, visto que a perfiladeira estudada é capaz de processar uma quantidade a mais do que a pretendida pela fábrica sem gerar filas significativas. Isso pode ser visto na Figura 8 que evidencia os dados de taxa de utilização conseguidos com as simulações, os quais se mostraram positivos pois quando comparado com o cenário real a ocupação da máquina caiu de 67% (Cenário real) para 53% (Cenário 3).

**Figura 8 – Comparativo Taxa de Utilização ( $\rho$ ) – Cenários Simulados**

Fonte: A autora (2024).

Com o intuito de entender melhor o comportamento desse perfil no sistema, foram realizadas as simulações e os registros podem ser observados na Tabela 8.

**Tabela 8 – Relatório de Simulação Perfil 3**

Perfil 3	Tempo médio de permanência no sistema (W)	Tempo médio de espera na fila (Wq)	Tempo médio de Processamento por peça (Ws)	Número médio de peças no sistema (L)	Número médio de peças em espera na fila (Lq)	Quantidade média de peças sendo processadas (Ls)	Quantidade média de peças processadas em 480 minutos (P)
<b>Cenário 1</b>	4,52 minutos	2,85 minutos	1,67 minutos	1,76 por minuto	1,12 por minuto	0,64 por minuto	161,25
<b>Cenário 2</b>	4,04 minutos	2,44 minutos	1,60 minutos	1,55 por minuto	0,94 por minuto	0,61 por minuto	161
<b>Cenário 3</b>	3,88 minutos	2,06 minutos	1,82 minutos	1,16 por minuto	0,62 por minuto	0,54 por minuto	124,80

Fonte: A autora (2024).

Após avaliar as características do terceiro perfil com base nas simulações, pode-se interpretar que todos os cenários seriam positivos para a fábrica, já que nas situações simuladas os parâmetros W e Wq por exemplo, foram reduzidos. Além disso, outros fatores importantes como L e Lq também resultaram em índices mais baixos.

Diante disso, a escolha de incorporar um dos cenários fica a critério do responsável pelo planejamento de produção dos perfis, sendo necessário análises

detalhadas dos prós e contras de aumentar a capacidade de produção ou reduzir o número de peças por ordem de produção para garantir a melhor gestão dos recursos disponíveis.

Um ponto importante de citar, é que a operação estudada pode ser entendida como uma das etapas mais complexas do processo de produção de esquadrias metálicas. Em vista disso, existem diversos fatores que podem influenciar a capacidade de produção dos perfis, tais como falta de matéria prima, geração de peças não conforme (sucata), dificuldade de regulagem da máquina, entre outros. Por simplificação do estudo, tais fatores não foram pontuados nas análises.

## 5. CONCLUSÃO

Diante do que foi demonstrado, pode-se afirmar que o presente estudo alcançou seu objetivo principal de identificar a existência de gargalo no fluxo do processo de fabricação dos perfis, utilizando os conceitos de teoria de filas e simulações no *software* Arena. Os cenários simulados, foram essenciais para obter uma visão detalhada do comportamento das peças ao longo do turno, fornecendo diretrizes práticas para a otimização do processo.

Ao avaliar o sistema atual, detectou-se o perfil 2 como o principal gargalo do processo, isso porque a máquina não consegue processá-lo sem gerar congestionamentos na linha. Na tentativa de mitigar esse problema, a solução mais viável apresentada foi a adição de uma nova máquina dedicada ao processamento desse perfil. Os resultados indicaram que essa medida reduziria o volume de peças em espera como também o tempo em fila. Nesse sentido, a utilização de um *software* de simulação mostrou-se vantajoso para o estudo, pois permitiu testar diferentes contextos sem causar impacto no sistema real, além de fornecer ao gerente uma base sólida para decisões que aprimorem o fluxo do processo.

Na prática, com base nos resultados de cada cenário a fábrica deve considerar o impacto financeiro de possíveis investimentos em seu fluxo de caixa, sendo necessária uma análise mais aprofundada da viabilidade da adição de uma máquina, considerando o *trade off* entre os custos e a melhoria na fluidez do processo.

Perante a complexidade da operação, uma proposta relevante para estudos futuros é analisar o sistema incluindo os tempos de *setup* para avaliar a programação e sequenciamento da produção, verificando se os perfis atualmente processados na mesma perfiladeira estão agrupados de forma eficiente para atender à demanda

estimada. Uma programação adequada contribui para a redução de custos, minimiza a ociosidade dos recursos e aumenta a capacidade de resposta da empresa às demandas do mercado, além de estruturar o fluxo de trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABENSUR, Eder Oliveira. **Pesquisa operacional para cursos de engenharia de produção**. São Paulo, SP: Blucher, 2018. *E-book*.

**ABIE realizou pesquisa de mercado para 2023 - Associação Brasileira de Indústrias de Esquadrias**. Disponível em: <https://abie.com.br/pesquisa-abie-esquadrias-2023/>. Acesso em: 1 dez. 2024.

ALMEIDA, M. S. **CONFORMABILIDADE: análise de inconformidades no processo de conformação de chapas metálicas por rolos moldadores**. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso, Centro Universitário do Sul de Minas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Varginha, MG. Disponível em: <http://192.100.247.84:8080/handle/prefix/95?mode=full>. Acesso em: 13 set. 2024.

AQUINO, G. F. **Avaliação do processo de perfilar (Roll Forming) na indústria automobilística brasileira**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade de Taubaté, Faculdade de Engenharia Mecânica, Taubaté, SP. Disponível em: <http://repositorio.unitau.br/jspui/bitstream/20.500.11874/4814/1/Gilmar%20Ferreira%20de%20Aquino.pdf>. Acesso em: 14 set. 2024.

ARENALES, M.; ARMENTANO, V.; MORABITO, R.; YANASSE, H. **Pesquisa operacional: para cursos de engenharia**. Rio de Janeiro: Elsevier Brasil, 2007.

BELFIORE, P., FÁVERO, L. P. **Pesquisa operacional: para cursos de engenharia**. Rio de Janeiro: ELSEVIER. 2013.

BOFF, R; CORSO, L.L. **A Teoria das Filas como Objeto de Estudo no Encontro Nacional de Engenharia De Produção: 1996-2017**. Anais do XXXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Maceió, Alagoas, Brasil, 16 a 19 de outubro de 2018. Disponível em: [https://abepro.org.br/biblioteca/TN\\_WIC\\_263\\_512\\_35896.pdf](https://abepro.org.br/biblioteca/TN_WIC_263_512_35896.pdf). Acesso em: 11 out. 2024.

CAVAGUTI, Marcelo. **Simulação numérica do processo de perfilação de chapas para minimizar o enrugamento**. 2005. 181p. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, SP. Disponível em: <https://hdl.handle.net/20.500.12733/1602499>. Acesso em: 13 set. 2024.

FERREIRA, Y. da S.; BARBOSA, T. A.; ARAÚJO, J. L. de; RIBEIRO, K. C.; SANTOS, Y. B. I. **Teoria das filas aplicada em um supermercado na cidade de Belém-PA / Queuing theory applied in a supermarket in the city of Belém-PA**. Brazilian Journal of Business, [S. l.], v. 2, n. 2, p. 783–799, 2020. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BJB/article/view/8981>. Acesso em: 27 out. 2024.

FOGLIATTI, M. C.; MATTOS, N. M. C. **Teoria de filas**. 1. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2006. *E-book*.

FREITAS, P. J. **Introdução à Modelagem e Simulação de Sistemas**. Florianópolis, 2001.

GIL, A. C. **Métodos e Técnicas de Pesquisa Social**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

GROSS, D. E HARRIS, C. **Fundamentos da Teoria de Filas**. 3ª Edição, John Wiley, Chichester, 1998.

HALMOS, George T. **Roll Froming Handbook**: Editora Taylor & Francis Group LLC. USA, ed.1, 2006.

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. **Introdução à Pesquisa Operacional**, 9a. ed. AMGH, 2013.

HOLLOCKS, B. A **well-kept secret: Simulation in manufacturing industry review**. OR Insight 5(4) 12-17. 1992.

KELTON, W. D., SADOWSKI, R. P., & ZUPICK, N. B. **Simulation with Arena**. McGraw-Hill, 2010.

OLIVEIRA, G. D. **Análise do desempenho de terminais ferroviários utilizando teoria de filas e simulação de eventos discretos – Um estudo de caso na MRS Logística S/A**. VI, 53 p. 29,7 cm (UFJF, Engenharia de Produção, 2006).

OLIVEIRA, R. B. M. de; CORRÊA, V. A.; NUNES, L. E. N. do P. Mapeamento do fluxo de valor em um modelo de simulação computacional. **Revista Produção Online**, [S. l.], v. 14, n. 3, p. 837–861, 2014. DOI: 10.14488/1676-1901.v14i3.1461. Disponível em: <https://www.producaoonline.org.br/rpo/article/view/1461>. Acesso em: 2 nov. 2024.

REVISTA ALUMÍNIO & CIA. **Planejamento aumenta credibilidade em obras**. São Paulo, ed. 33, mar./abr. 2014.

ROMERO, C. M. *et al.* Aplicação da teoria das filas na maximização do fluxo de paletes em uma indústria química. **Revista Eletrônica Pesquisa Operacional para Desenvolvimento, Rio de Janeiro, v.2, n.3, p. 226-231, 2010**. Disponível em: <https://www.podesenvolvimento.org.br/podesenvolvimento/article/view/46>. Acesso em: 11 out. 2024.

ROSSETTI, M. D. **Simulation Modeling and Arena**. John Wiley & Sons, 2015.

SHANNON, R. E. **Introduction to the art and science of simulation**. In: 1998 winter simulation conference. Proceedings. Washington, USA, 1998. p. 7-14.

SILVA, A. K. **Método para avaliação e seleção de softwares de simulação de eventos discretos aplicados à análise de sistemas logísticos**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Logísticos) - Escola Politécnica, Universidade

de São Paulo, São Paulo, 2007. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3148/tde-09052007-160956/pt-br.php>. Acesso em: 14 set. 2024.

SILVA, M. R. F. *et al.* Proposta de otimização dos processos logísticos do porto de Itajaí utilizando simulação e indicadores da teoria das filas. **Revista Produção Online**. Florianópolis, SC, v. 21, n. 1, p. 231-258, 2021. Disponível em: <https://www.producaoonline.org.br/rpo/article/view/4214>. Acesso em: 11 out. 2024.

SOUZA, A. C. *et al.* Estudo de filas em caixas rápidos de um supermercado utilizando simulação computacional. **Revista Latino-Americana de Inovação e Engenharia de Produção**, 3(4), 203-222, 2015. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/307702070\\_Estudo\\_de\\_filas\\_em\\_caixas\\_rapidos\\_de\\_um\\_supermercado\\_utilizando\\_simulacao\\_computacional](https://www.researchgate.net/publication/307702070_Estudo_de_filas_em_caixas_rapidos_de_um_supermercado_utilizando_simulacao_computacional). Acesso em: 11 out. 2024.

TAHA, H. A. **Pesquisa operacional**. 8. ed. São Paulo, SP: Pearson, 2007. *E-book*.

TICIANI, Klisman *et al.* Aplicação da teoria das filas em uma linha de produção crítica de uma empresa metal-mecânica. **Revista Tecnológica** / ISSN 2358-9221, [S.l.], v. 7, n. 1, p. 135 - 146, may 2018. ISSN 2358-9221. Disponível em: <https://uceff.edu.br/revista/index.php/revista/article/view/258>. Acesso em: 12 oct. 2024.

YIN. R. K. **Estudo de caso: Planejamento e Métodos**. 3.ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.