



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE AUTOMAÇÃO E SISTEMAS  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

Leonardo Nunes de Brito

**Implementação de algoritmo de predição de disponibilidade e performance  
aplicado à Indústria 4.0**

Florianópolis  
2022

Leonardo Nunes de Brito

**Implementação de algoritmo de predição de disponibilidade e performance  
aplicado à Indústria 4.0**

Relatório final da disciplina DAS5511 (Projeto de Fim de Curso) como Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Santa Catarina em Florianópolis.

Orientador: Prof. Ricardo José Rabelo, Dr.

Florianópolis  
2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Brito, Leonardo Nunes de  
Implementação de algoritmo de predição de disponibilidade  
e performance aplicado à indústria 4.0 / Leonardo Nunes de  
Brito ; orientador, Ricardo José Rabelo, 2022.  
65 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -  
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,  
Graduação em Engenharia de Controle e Automação,  
Florianópolis, 2022.

Inclui referências.

1. Engenharia de Controle e Automação. 2. Indústria 4.0.  
3. Internet das Coisas. 4. MES. I. Rabelo, Ricardo José .  
II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em  
Engenharia de Controle e Automação. III. Título.

Leonardo Nunes de Brito

**Implementação de algoritmo de predição de disponibilidade e performance  
aplicado à Indústria 4.0**

Esta monografia foi julgada no contexto da disciplina DAS5511 (Projeto de Fim de Curso) e aprovada em sua forma final pelo Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação

Florianópolis, 13 de Dezembro de 2022.

Prof. Hector Bessa Silveira, Dr.  
Coordenador do Curso

**Banca Examinadora:**

Prof. Ricardo José Rabelo, Dr.  
Orientador  
UFSC/CTC/DAS

Paulo Afonso Leal Narciso Filho, Eng.  
Supervisor  
HarboR Informática Industrial

Prof. Rodrigo Castelan Carlson, Dr.  
Avaliador  
UFSC/CTC/DAS

Prof. Eduardo Camponogara, Dr.  
Presidente da Banca  
UFSC/CTC/DAS

Este trabalho é dedicado a minha avó, Maria Nunes.  
Obrigado por ter feito parte da minha vida até aqui.

## **AGRADECIMENTOS**

À minha mãe, Tânia Nunes e à minha avó, Maria Nunes, por serem fundamentais neste processo desde sua concepção. Obrigado por acreditarem em mim e sempre estarem ao meu lado. Dedico, em especial, a minha avó. Espero que, de onde estiver, possa sentir orgulho pela conclusão desta fase. Obrigado por estar presente nos melhores e nos piores momentos, além de todas as lembranças deixadas e todo o amor que levarei comigo até o fim.

Aos colegas e amigos da HarboR, Pâmela Andreani, Túlio Duarte, Paulo Narciso, Bruno Müller e Samir Fiates pela prontidão e paciência ao esclarecer as muitas dúvidas que surgiram no meio deste processo. Por todo o empenho que demonstraram para me dar o apoio necessário, seja ele de cunho técnico ou, ainda, pela força e suporte que me fizeram perseverar até aqui. São exemplos de profissionalismo, colaboração e parceria que tornaram o trabalho em equipe ao longo deste período mais fluido. Suas colaborações foram imprescindíveis para a conclusão deste trabalho.

Aos professores do Departamento de Automação e Sistemas, por sempre estarem dispostos a auxiliar em quaisquer situações.

Ao professor Ricardo Rabelo, por me guiar na introdução ao mundo da Indústria 4.0, com todo seu fascínio e entusiasmo que contagiam. Pelo ensejo de aprender mais sobre avaliação de desempenho de sistemas e me abrir portas como monitor de sua disciplina, oferecendo a oportunidade de ministrar aulas práticas e atizar meu interesse pela vida docente.

Aos meus amigos Victor Karpen, Leopoldo König, Wagner Padilha, Eduardo Rauber, Cristina Luchini, João Tomporoski e Vinícius Gomes pela parceria nos momentos difíceis e pela amizade que, com certeza, foi essencial para a conclusão dessa fase.

*“Aquele que se empenha a resolver as dificuldades resolve-as antes que elas surjam.”*  
*(Sun Tzu)*

## RESUMO

Soluções e serviços de Indústria 4.0 construídos com tecnologias habilitadoras como Internet das Coisas Industrial e Nuvem permitem concentração de dados de processos produtivos que podem ser acessados e processados de qualquer lugar do mundo. Isso possibilita análises seja por inteligência humana, por inteligência artificial ou, ainda, por uma mistura entre estes modelos. À medida em que novas indústrias aderem a estes serviços, empresas prestadoras precisam escalar o serviço de análise de informações. Para tanto, um caminho possível é desonerar o trabalho humano de análises simples ou repetitivas, as substituindo por análises via inteligência artificial, permitindo potencializar a atenção humana para situações mais complexas de cada cliente de diferentes ramos produtivos. Este trabalho inicia a implementação da automação da aquisição de dados industriais e sua aplicação em algoritmos que retornem indicadores de produção, tanto em tempo real quanto em uma análise histórica. Este processo de automação estudou a aplicação de algoritmo para encontrar potenciais gargalos em uma linha de produção com operações sequenciais e balanceada. Esta aplicação será utilizada para indicar à equipe de analistas quais máquinas apresentam perda de performance e comprometem a eficiência da linha como um todo.

**Palavras-chave:** Indústria 4.0. Internet Industrial das Coisas. Sistemas de Execução de Manufatura.



## ABSTRACT

Industry 4.0 solutions and services, which are built with enabling technologies, such as Industrial Internet of Things and Cloud, allow centralization of data from production processes that can be accessed and processed from anywhere in the world. This enables analysis either by human intelligence, artificial intelligence or even a mixture of these models. As new industries embrace these services, service providers need to scale up the information analysis service. A possible way to achieve this is to relieve the human workload of simple or repetitive analyses, replacing them with analyses via artificial intelligence. These would allow enhancement of human efforts so that more complex situations of each client from different productive branches could be achieved. The work starts with the implementation of industrial data acquisition automation and its application in algorithms that return production indicators, both in real time and in a historical analysis. This automation process studied the application of an algorithm to find potential bottlenecks in a production line with sequential and balanced operations. The application will then be used by a team of analysts to indicate the behaviour of a given machine that could be slowing down the production pace and impacting the efficiency of the line as a whole.

**Keywords:** Industry 4.0. Industrial Internet of Things. Manufacturing Execution System.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxo da linha de produção . . . . .	18
Figura 2 – Visualização da tela inicial do LiveMES indicando tamanho da ordem, quantidade produzida e OEE . . . . .	22
Figura 3 – Produção esperada atualizada em tempo real . . . . .	23
Figura 4 – Tempo de ciclo atualizado em tempo real . . . . .	24
Figura 5 – Estratificação de perdas de tempo de produção devido a paradas, performance e qualidade . . . . .	25
Figura 6 – Estratificação dos motivos de parada com maior impacto em tempo de execução . . . . .	26
Figura 7 – Relatório geral de produção com indicadores de desempenho . . . . .	27
Figura 8 – Etapas da metodologia CRISP-DM . . . . .	30
Figura 9 – Períodos ativos e inativos em um centro de trabalho. . . . .	34
Figura 10 – Períodos ativos e inativos em um centro de trabalho. . . . .	36
Figura 11 – Tempo médio de ciclo por centro de trabalho. . . . .	39
Figura 12 – Número de ciclos de cada centro de trabalho. . . . .	40
Figura 13 – Indicador de disponibilidade do centro de trabalho. . . . .	41
Figura 14 – Indicador de performance do centro de trabalho em um dia . . . . .	42
Figura 15 – Indicador de qualidade do centro de trabalho em um dia . . . . .	43
Figura 16 – Duração de paradas por tipo de parada . . . . .	43
Figura 17 – Duração de paradas por centro de trabalho . . . . .	44
Figura 18 – Tempo médio entre falhas (MTBF) por tipo de parada . . . . .	44
Figura 19 – Tempo médio entre falhas (MTBF) por centro de trabalho . . . . .	45
Figura 20 – Tempo médio de reparo (MTTR) de cada tipo de parada . . . . .	45
Figura 21 – Tempo médio de reparo (MTTR) de cada centro de trabalho . . . . .	46
Figura 22 – Número de paradas ocorridas por tipo de parada . . . . .	46
Figura 23 – Número de paradas ocorridas por centro de trabalho . . . . .	46
Figura 24 – Capacidade de produção . . . . .	47
Figura 25 – Quantidade total de peças produzidas . . . . .	48
Figura 26 – Quantidade de peças produzidas . . . . .	49
Figura 27 – Estratificação de quantidade perdida . . . . .	50
Figura 28 – Estratificação de tempo perdido . . . . .	51
Figura 29 – Dados de entrada recebido do banco de dados . . . . .	52
Figura 30 – Períodos ativos (verde) e inativos (vermelho) de cada centro de trabalho da Linha 01 ao longo de 5 dias . . . . .	53
Figura 31 – Períodos ativos (verde) e inativos (vermelho) de cada centro de trabalho da Linha 01 ao longo de 1 dia . . . . .	54

Figura 32 – Períodos ativos (verde) e inativos (vermelho) de cada centro de trabalho da Linha 01 ao longo de 1 hora . . . . .	55
Figura 33 – Dataframe criado em python a partir dos dados de entrada . . . . .	55
Figura 34 – Matriz de estados . . . . .	56
Figura 35 – Matriz de acúmulo de estado . . . . .	57
Figura 36 – Matriz de potenciais bottlenecks . . . . .	57
Figura 37 – Matriz de Shifting bottlenecks . . . . .	57
Figura 38 – Matriz de Sole bottlenecks . . . . .	58
Figura 39 – Representação gráfica da matriz de estados . . . . .	58
Figura 40 – Representação gráfica da matriz de potenciais bottlenecks . . . . .	59
Figura 41 – Representação gráfica da matriz Shifting bottlenecks . . . . .	59
Figura 42 – Representação gráfica da matriz Sole bottlenecks . . . . .	59
Figura 43 – Resultado do algoritmo limitado a 6 minutos . . . . .	60
Figura 44 – Resultado do algoritmo limitado a 10 minutos . . . . .	61
Figura 45 – Resultado do algoritmo limitado a 1 hora . . . . .	62

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Exemplos de períodos ativo e inativo. . . . .	34
--	----

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
1.1	AS EMPRESAS	14
1.2	MOTIVAÇÃO	14
1.3	OBJETIVOS	15
<b>1.3.1</b>	<b>Objetivo Geral</b>	<b>15</b>
<b>1.3.2</b>	<b>Objetivos Específicos</b>	<b>16</b>
1.4	ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO	17
<b>2</b>	<b>A EMPRESA E SEUS PROCESSOS</b>	<b>18</b>
2.1	SEQUÊNCIA PRODUTIVA	18
<b>2.1.1</b>	<b>Prensa</b>	<b>18</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Inside Spray</b>	<b>19</b>
<b>2.1.3</b>	<b>Printer</b>	<b>20</b>
<b>2.1.4</b>	<b>Necker</b>	<b>20</b>
2.2	DESAFIOS	20
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO E CONCEITOS</b>	<b>22</b>
3.1	LIVEMES	22
3.2	KPI	26
<b>3.2.1</b>	<b>Disponibilidade</b>	<b>27</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Qualidade</b>	<b>28</b>
<b>3.2.3</b>	<b>Performance</b>	<b>28</b>
<b>3.2.4</b>	<b>OEE</b>	<b>28</b>
3.3	CROSS INDUSTRY STANDARD PROCESS FOR DATA MINING	29
<b>3.3.1</b>	<b>Entendimento do negócio</b>	<b>30</b>
<b>3.3.2</b>	<b>Entendimento dos dados</b>	<b>31</b>
<b>3.3.3</b>	<b>Preparação de dados</b>	<b>31</b>
<b>3.3.4</b>	<b>Modelagem</b>	<b>31</b>
<b>3.3.5</b>	<b>Avaliação</b>	<b>32</b>
<b>3.3.6</b>	<b>Implementação</b>	<b>32</b>
3.4	BOTTLENECKS	32
3.5	MÉTODOS DE DETECÇÃO DE BOTTLENECKS	33
<b>3.5.1</b>	<b>Período ativo</b>	<b>34</b>
<b>3.5.2</b>	<b>Período inativo</b>	<b>35</b>
<b>3.5.3</b>	<b>Shifting bottlenecks</b>	<b>35</b>
<b>4</b>	<b>DESENVOLVIMENTO</b>	<b>37</b>
4.1	ENTENDIMENTO DO NEGÓCIO	37
4.2	ENTENDIMENTO DOS DADOS	51
4.3	PREPARAÇÃO DOS DADOS E MODELAGEM	54

4.4	AVALIAÇÃO . . . . .	58
5	<b>RESULTADOS</b> . . . . .	<b>60</b>
6	<b>CONCLUSÃO E SUGESTÕES</b> . . . . .	<b>63</b>
7	<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	<b>64</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta o contexto no qual este trabalho foi desenvolvido, breve descrição das empresas envolvidas, bem como a problemática que o fomentou. Apresenta, também, a motivação para definição deste tema, seus objetivos gerais e específicos e, por fim, a estrutura em que se dispõe.

## 1.1 AS EMPRESAS

- **Harbor Informática Industrial**

A HarboR foi fundada em 1996, inicialmente com a prestação de serviços de desenvolvimento de software de MES (Manufacturing Execution Systems). Ao longo do tempo expandiu seu portfólio integrando ao sistema MES tecnologias ERP (Enterprise Resource Planning), CAPP(Computer Aided Process Planning) e APS (Advanced Planning and Scheduling). Contempla, ainda, serviços que atendem as demandas relacionadas a qualidade, monitoramento e controle estatístico de processos (CEP), além da continuidade dos serviços de integração de sistemas e sistemas de execução de manufatura. Atualmente oferece uma ampla gama de serviços com clientes em diversos países.

Em 2017, deu início a plataforma LiveMES, um sistema que gerencia os processos do chão de fábrica, sincronizando o planejamento ao controle da produção através de coletores de dados. Foi idealizado a partir do avanço e importância da Indústria 4.0, visando auxiliar na organização, controle e monitoramento de processos nas fábricas, tendo como objetivos a máxima eficiência e a minimização dos custos;

- **Empresa de Embalagens Metálicas**

A empresa de embalagens utilizada como objeto de estudo no presente trabalho, atua na produção de embalagens de alumínio para distribuição a nível global. A empresa possui produção diária, em uma de suas fábricas, na ordem de uma centena de milhar de embalagens. Objetivo de melhoria contínua mantido pela empresa motivou interesse em pesquisa sobre formas de otimização de sua produção, visando maior sustentabilidade e processos mais enxutos.

## 1.2 MOTIVAÇÃO

O trabalho realizado como *Production Management as a Service* (PMaaS) é um serviço realizado pelo time de Customer Success da plataforma LiveMES que tem como objetivo guiar o cliente no uso do sistema, conduzindo-o em direção a um uso

maduro da plataforma, cuidando desde a qualidade da coleta de dados até o auxílio nas decisões sobre quais problemas detectados devem ser prioritariamente abordados.

A equipe deve estar em sintonia com os operadores dos centros de trabalho que atuam diretamente com a plataforma, pois deve-se garantir o correto apontamento de paradas e demais problemas, a fim de se ter um panorama o mais próximo possível da realidade. As análises partem de informações presentes no LiveMES, geradas a partir de dados coletados dos centros de trabalho sensorizados e conectados a plataforma.

Através do LiveMES, pode-se analisar a produção em tempo real, notando as tendências de qualidade, disponibilidade e performance de cada máquina (centro de trabalho). Também fornece a indicação do OEE (Overall Equipment Effectiveness), ou seja, um indicador de efetividade global do centro de trabalho. O monitoramento do OEE, os registros de paradas, os apontamentos de materiais fora da qualidade possibilitam um panorama melhor em relação as causas de origem das não conformidades associadas aos mais diversos produtos fabricados em ramos distintos. Tal monitoramento em tempo real, em interface gráfica intuitiva, auxiliam em ações corretivas ainda em tempo de produção, melhorando a efetividade das linhas.

A disponibilidade de dados históricos possibilita analisar, compreender, sintetizar, descrever e apresentar aos gestores de empresas clientes como está a evolução de suas linhas produtivas. A plataforma torna possível ações corretivas de curto prazo e preventivas, visando o longo prazo, que abranjam o foco do problema.

A motivação deste trabalho está em construir uma forma de detectar como se comportam os centros de trabalho em seus períodos ativos e inativos, observando-os individualmente e os efeitos sistêmicos que impactam os demais processos anteriores ou posteriores na linha produtiva. O comportamento pode ser de um único centro de trabalho atuando como gargalo, dois ou mais centros de trabalho denotando gargalos concorrentes ou, ainda, o centro de trabalho estar operando normalmente. Estes resultados nortearão ações corretivas e/ou indicarão quais centros de trabalho apresentam tendência para diminuição gradativa de performance.

### 1.3 OBJETIVOS

Para melhor compreensão do que será abordado neste projeto, a seguir serão apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos do presente trabalho.

#### 1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é indicar quais centros de trabalho de uma linha de produção estão atuando, em dado instante, como gargalos do sistema. A partir dos dados sintetizados através deste trabalho, possibilitam-se análises mais aprofundadas e ainda não abordadas pelo time operacional, as quais agregam valor ao serviço de



Production Management as a Service prestado pela Harbor. Este serviço se propõe a otimizar a produção analisando tanto os dados coletados como também a forma de utilização da plataforma LiveMES pelos operadores. O algoritmo escolhido e implementado indica quais centros de trabalho têm maior probabilidade de atuarem em determinado instante como gargalo, bem como isso afeta, ou não, as máquinas subsequentes.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

A fim de associar o objetivo geral às atividades operacionais, elencam-se os seguintes objetivos específicos:

- compreender o processo produtivo, suas particularidades e restrições;
- buscar, na literatura, informações, estudos e implementações das técnicas de detecção de gargalos já existentes;
- compreender e estratificar as variáveis de maior impacto de performance e disponibilidade dos centros de trabalho;
- estudar o estado atual do sistema e registros históricos para melhor compreensão do impacto ao longo do tempo;
- identificar potenciais problemas causados pelo mau uso da plataforma, os quais possam comprometer a análise;
- acessar tanto os dados coletados no chão de fábrica em tempo de execução como os dados históricos armazenados;
- tratar os dados de produção a fim de adequá-los e disponibilizá-los para análises estatísticas;
- implementação de algoritmo de detecção de gargalos em linha produtiva, considerando as idiosincrasias de cada equipamento e da linha como um todo;
- Identificar máquinas que se comportam como gargalos únicos;
- Identificar máquinas que se comportam como gargalos móveis;
- Identificar quais máquinas não atuam como gargalo;
- validação da viabilidade e aplicabilidade do algoritmo proposto utilizando dados reais.

O método aplicado utiliza dados reais de produção coletados pelo MES, substituindo a modelagem do sistema em métodos de simulação. Neste caso, será implementado algoritmo que processe os dados a fim de quantificar e classificar centros de trabalho que comportem-se como gargalos momentâneos ou gargalos móveis ao longo da linha produtiva. Utilizam-se conceitos de períodos ativos e inativos de cada célula de trabalho, considerando os tipos de paradas apontados pelos operadores de cada recurso.

A metodologia de desenvolvimento seguida ao longo deste estudo seguiu os passos do Cross-Industry Standard Process for Data Mining (Pete et al., 2000), conhecido como CRISP-DM. Estes passos orientaram a compreensão do negócio, o entendimento dos dados e, conseqüentemente sua limpeza e estruturação, visando construir e implementar um modelo, seguido da avaliação dos resultados obtidos. Por falta de tempo para a implementação em ambiente de produção, a etapa relativa a sua implementação não foi abordada. Esta metodologia é primordial para a compreensão dos processos a fim do levantamento de um modelo e, não menos importante, a análise dos resultados, ponderando a forma como refletem a realidade do domínio avaliado.

A avaliação dos resultados utilizou critérios de verificação pelos valores apresentados pelo algoritmo e se satisfazem os requerimentos (Lengyel, 2015).

#### 1.4 ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO

No capítulo 2 é feita uma descrição da empresa e seus processos para melhor compreensão do modelo de negócio do qual partirão as análises, considerando seus requisitos e restrições de projeto e limitações de coleta.

No capítulo 3 é apresentada a fundamentação teórica, nela será explanado, em linhas gerais, as ferramentas, metodologias e teorias aplicadas no desenvolvimento do trabalho.

No capítulo 4 são expostas as etapas do desenvolvimento, desde a compreensão do domínio estudado, a análise e processamento dos dados coletados e sua aplicação em um modelo, o qual forneça resultados que indiquem os potenciais centros de trabalho operando como gargalo do sistema.

No capítulo 5 serão discutidos os resultados obtidos após o processamento dos dados e implementação do algoritmo escolhido, bem como a satisfação dos objetivos, dos critérios de sucesso de negócio e dos critérios de sucesso de mineração.

No capítulo 6 é realizada a conclusão, estabelecendo quais objetivos foram cumpridos e quais restrições e obstáculos são impostos para a correta reprodução deste trabalho. Neste capítulo, também, são consideradas propostas para trabalhos futuros.

## 2 A EMPRESA E SEUS PROCESSOS

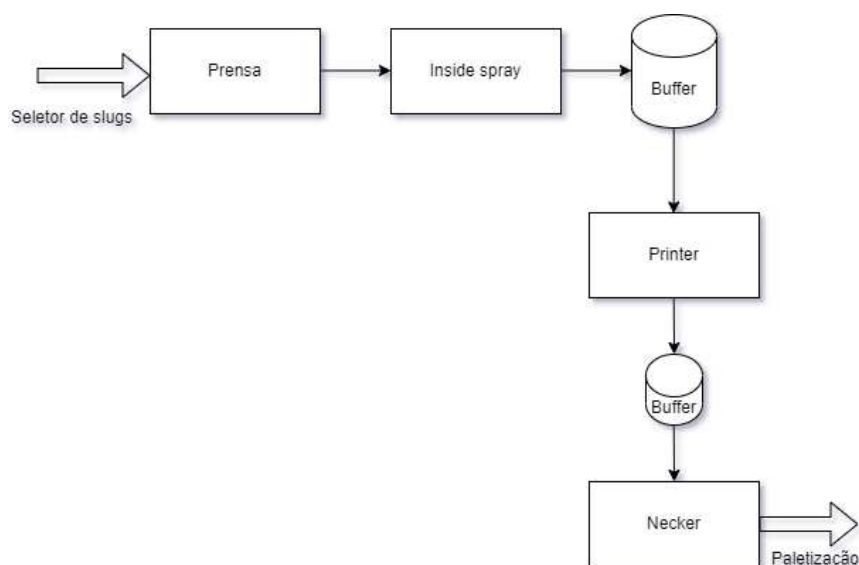
Para melhor entendimento do desenvolvimento do trabalho e suas análises no estado atual e posteriores discussões de resultado, é de extrema importância compreender quais seus processos, como estão dispostos, seu funcionamento e seus principais desafios. A finalidade desta implementação é encontrar possíveis gargalos em centros de trabalho de uma linha de produção.

### 2.1 SEQUÊNCIA PRODUTIVA

A Empresa de Embalagens Metálicas analisada possui 6 linhas de produção com 4 centros de trabalho em cada. O produto final será uma embalagem de desodorante feita de alumínio.

Este processo inicia com a chegada da matéria prima, chamada de *slugs* de alumínio, onde em estado inicial são semelhantes a uma moeda. Este slug passará por 4 etapas: prensa, inside spray, printer e necker, como apresentado na Figura 1.

Figura 1 – Fluxo da linha de produção



Fonte: Acervo pessoal.

#### 2.1.1 Prensa

A prensa é alimentada com slugs via esteira, os slugs seguem para a etapa de tamboreamento onde ocorre a adição de lubrificantes, o processo seguinte é o posicionamento onde os slugs precisam estar virados para o lado correto para passar pela extrusão, caso estejam invertidos no próprio posicionador o slug cairá e será

considerado como sucata. Na extrusão o slug é transformado em cilindro, seguindo para o corte (trimmer). Algumas amostras são tiradas para testes de qualidade com o acionamento manual de uma botoeira. Além disso, existe um sensor de recusa na prensa, após o trimmer, que expulsa latas fora do tamanho de especificação.

### 2.1.2 Inside Spray

A etapa de Inside Spray inicia com a passagem das latas pela lavadora constituída por 5 banhos:

- o primeiro banho é realizado com detergente ácido em uma alta concentração;
- no segundo banho este mesmo detergente é utilizado, mas é reaplicado numa concentração inferior a fim de garantir a qualidade da superfície;
- o terceiro banho é realizado com água pura para eliminar os resíduos de detergente;
- o quarto banho é repetido o enxágue com água pura a fim de garantir a eliminação de quaisquer resquícios de detergente que possam comprometer a qualidade da pintura;
- o quinto e último banho é feito com água deionizada, ou seja, livre de minerais, a fim de eliminar resíduos menores e tornar a superfície de alumínio eletricamente favorável, aumentando a superfície de contato, mitigando o efeito de quaisquer partículas indesejáveis que comprometam a correta aplicação e fixação das camadas de verniz.

Entre a lavadora e a aplicação do verniz interno propriamente dito existe uma estufa mantida a uma temperatura de 120°C a fim de evaporar a água, além de um acumulador de latas. Após ter seu interior devidamente tratado, a embalagem segue para a etapa seguinte, ou seja, a aplicação das camadas de verniz.

Para a aplicação deste verniz interno tem-se disponível 9 agulhas que trabalham em conjuntos de 3 unidades cada com os seguintes propósitos:

- 1, 2 e 3 - aplicação da primeira camada de verniz
- 4, 5 e 6 - aplicação da segunda camada de verniz
- 7, 8 e 9 - aplicação do verniz no fundo

A aplicação do verniz pode ser total ou parcial, na aplicação parcial não se utiliza o conjunto de agulhas 7, 8 e 9. A aplicação total é um pouco mais delicada, visto que existem maiores chances de formar bolhas entre o verniz da parede e do fundo, caso fique mais espesso que o especificado.

Após a aplicação do verniz interno as latas seguem para o forno de secagem, onde ficam entre 7 a 10 minutos a uma temperatura média de 250 °C e, em seguida, são resfriadas seguindo para um segundo acumulador (pulmão). É preciso ter cuidado com a temperatura do forno, caso seja muito alta a lata pode ficar escura.

Este processo apresenta variações sazonais, visto que no verão o verniz tende a ficar muito líquido, o que pode levar a um peso da lata superior ao especificado. Não é possível atuar sobre essa temperatura por limitações da empresa.

### **2.1.3 Printer**

A primeira etapa da printer é a aplicação de um esmalte externo, o tempo deste processo varia de acordo com o tipo de esmalte utilizado para cada modelo específico, variando consideravelmente seu tempo. Esta aplicação se dá através de um rolo com tinta que toca a superfície da lata enquanto esta rotaciona, o número de rotações deste rolo ao redor da lata é configurável e varia de acordo com o tipo de esmalte. Em seguida ocorre a secagem desta pintura.

A etapa seguinte da printer é a impressão da arte desejada pelo cliente, a qual pode utilizar até 8 cores distintas. Na saída da impressora existe uma câmera responsável por verificar a impressão e qualquer alteração no esmalte, gerando uma expulsão da lata defeituosa e de 4 latas antes e 4 depois da mesma para respeitar a garantia da qualidade.

Na sequência ocorre uma nova aplicação de verniz externo e a secagem.

### **2.1.4 Necker**

Por fim, o Necker é responsável por dar o formato característico de cada embalagem, torneando-a nas conformidades especificadas.

Após a aplicação do formato característico, existe uma nova câmera responsável por verificar o ombro e a virola, características da embalagem, ambos formados no Necker. Caso ocorra alguma inconformidade, as latas são descartadas.

Na etapa seguinte são verificadas possíveis presenças de micro furos. Além disso, são formados os ninhos utilizando-se uma fita PET a fim de deixar as latas bem firmes para a última etapa que é a paletização. O fluxo está ilustrado na Figura 1.

## **2.2 DESAFIOS**

A contagem de peças nesta última etapa reflete a quantidade produzida pela linha. O que foi requisitado pelo cliente é saber quais desses processos estão gerando gargalos. Devido à sensorização da fábrica, temos informações de ausência de produção e, eventualmente, a estratificação dos motivos de parada, apontados pelos trabalhadores da fábrica.

O algoritmo aplicado neste projeto, apresentado no próximo capítulo, visa encontrar quais centros de trabalho tem maior probabilidade, em dado instante, de ser um gargalo da linha produtiva. Essa abordagem é utilizada por montadoras como a Toyota, a fim de otimizar ações de manutenção nos equipamentos. O desafio é adaptá-lo a este processo característico da Empresa de Embalagens e ao modelo de coleta de dados, aliado à ação humana de apontar motivos de paradas. Utilizar estas informações extras para clusterizar os principais motivos de parada. Alguns destes, após algumas análises, percebe-se que formam um padrão que indica potenciais efeitos nos centros de trabalho que comportam-se como gargalos.

O desafio é utilizar as informações disponíveis a fim de minimizar outliers, ou seja, eventualidades que não, necessariamente, refletem as condições do centro de trabalho ou da linha como um todo e, por fim, melhorar a acurácia dos resultados.

O próximo passo é realizar uma análise das informações geradas antes e depois destes tratamentos dos dados coletados e apontar, no desenvolvimento do projeto, como estas mudanças de percepção impactaram no resultado final, levando mais confiança aos clientes.

Embora este desenvolvimento seja feito com apenas uma empresa, ele pode ser adaptado para os demais clientes, respeitando as particularidades de cada tipo de processo. Um importante parâmetro são os apontamentos de motivo de parada. Embora alguns sejam automáticos, outros dependem da inserção manual por parte do operador, o que acaba sendo um fator que pode, posteriormente, ser avaliado e quantificado, como e quanto isso impacta nos resultados.

Dentre todos os clientes, há quem seja mais rígido nos apontamentos, para isso há um desenvolvimento em paralelo que poderá avaliar o quão bem um cliente tem utilizado a plataforma, bem como através da percepção da equipe operacional, a qual atua mais próxima aos clientes.

Com um uso mais consistente dos apontamentos é possível, ao final, obter um template de relatório informando, em certo período, quais os motivos de parada mais frequentes e o quanto impactaram nos demais processos. Embora a empresa já possua essas estatísticas, elas ainda não foram tratadas e avaliadas por essa perspectiva. Aliando os valores de saída do algoritmo aos apontamentos, consegue-se exibir como, quanto, onde e, talvez, porquê, a máquina comportou-se como gargalo em determinado período com determinada duração. No entanto, esta abordagem exige tempo para validação e maturação do uso deste algoritmo.

### 3 FUNDAMENTAÇÃO E CONCEITOS

A fundamentação teórica é de suma importância ao se abordar um novo desafio. Segundo Oakley (2014), a compreensão da sistemática do problema, suas variáveis, seus conceitos e teorias relacionadas, auxiliam a diminuir eventuais empecilhos acarretados por interpretações equivocadas. A literatura existente oferece um norte apresentando estudos em situações similares, os quais servem como auxílio para elaborar um plano de ação e a construção de uma metodologia a ser seguida visando facilitar as tomadas de decisão ao longo das próximas etapas do projeto. Para tanto, foi conduzido um estudo cuidadoso acerca das abordagens teorizadas, testadas e personalizadas em outras obras derivadas, desde conceitos pioneiros até estudos recentes considerados o estado da arte deste campo de pesquisa.

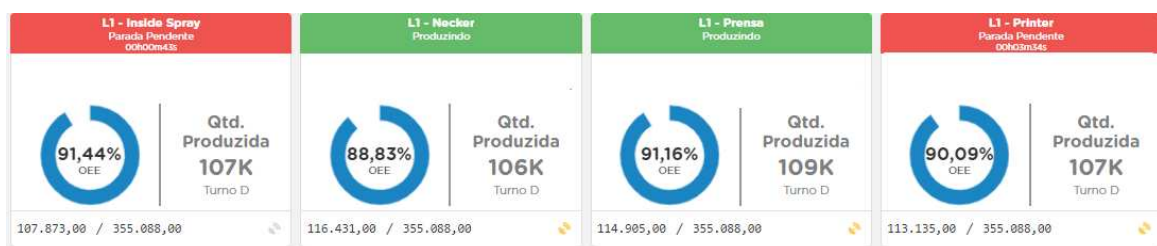
Pirsig (1974), alerta que inferências baseadas na observação e na presunção de conhecimento conduzem, geralmente, ao erro. Para evitar equívocos de interpretação, deve-se seguir um método científico que contemple as etapas de observação, questionamento, construção de hipóteses, experimentação, análise das hipóteses e conclusão. Seguindo o método científico, as chances de erros é atenuada, além de possibilitar a reprodução, verificação e validação do trabalho realizado, atribuindo-lhe maior credibilidade e confiança.

A fim de seguir estes passos, este capítulo devota atenção em apresentar, de forma geral, as ferramentas, tecnologias e metodologias utilizadas no desenvolvimento do projeto.

#### 3.1 LIVEMES

Para começar, o contato inicial com os dados foi através da plataforma LiveMES, ilustrada na Figura 2, a qual possibilitou diversas análises para o entendimento do negócio. Tal entendimento é de extrema importância, visto que é a primeira etapa da metodologia CRISP-DM, abordada na próxima seção.

Figura 2 – Visualização da tela inicial do LiveMES indicando tamanho da ordem, quantidade produzida e OEE



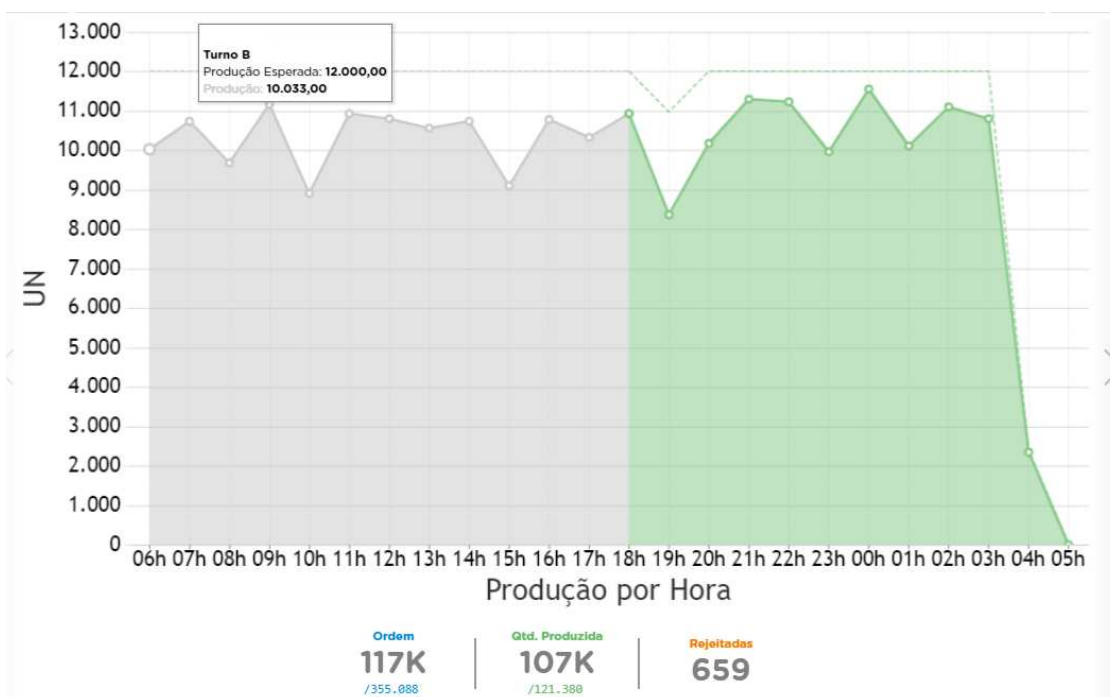
Fonte: Acervo pessoal.

A tela inicial fornece informações atualizadas a cada 5 segundos. Elas são coletadas da fábrica a partir de coletores que leem o estado da máquina, ou seja, produzindo ou não produzindo. Essas informações são enviadas via MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) por protocolo TCP/IP ao banco de dados hospedado na nuvem em um servidor AWS.

O dashboard organiza as principais informações em cards a fim de apresentar como está a produção no momento atual. Traz informações como a quantidade de peças produzidas, o tamanho da ordem de produção e o indicador de efetividade geral de cada centro de trabalho. Além disso, informa se a máquina está produzindo ou encontra-se parada, caso parada, indica que há uma parada pendente, requerendo-se a ação de um operador que aponte qual o motivo da parada.

O LiveMES oferece, além dos cards apresentados na Figura 2, três outras informações gráficas complementares, encontradas no *cockpit* do operador, apresentadas pelas Figura 3, Figura 4 e Figura 5. Estes gráficos são específicos para cada centro de trabalho.

Figura 3 – Produção esperada atualizada em tempo real



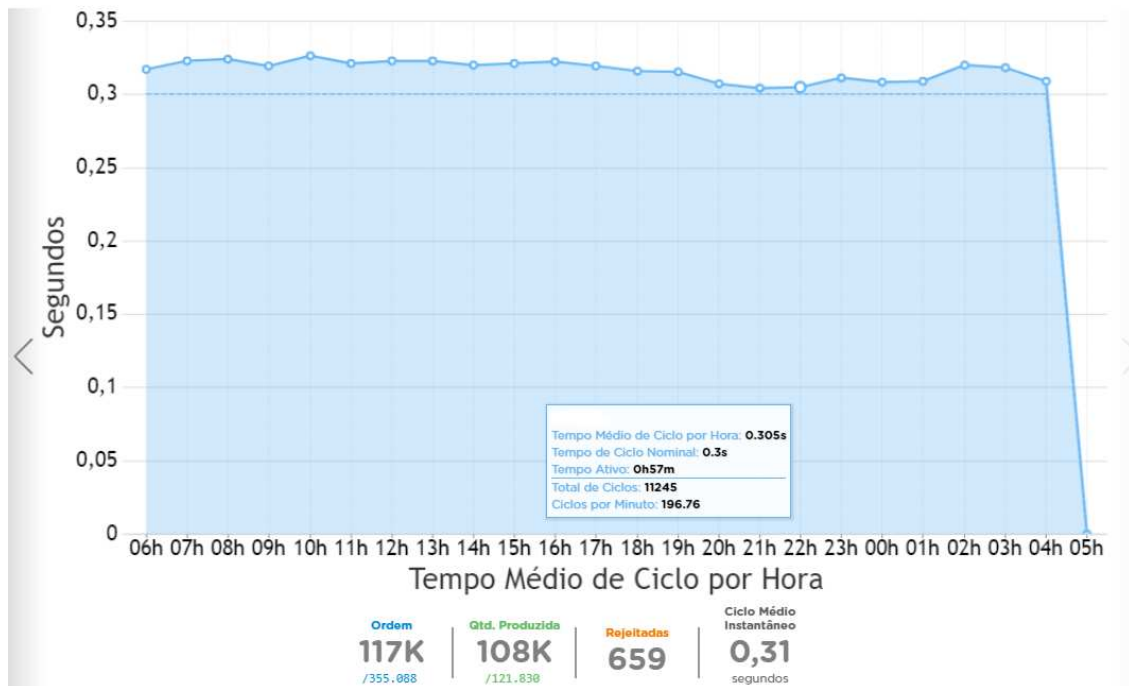
Fonte: Acervo pessoal.

Na Figura 3 encontramos as informações de produção esperada, considerando a capacidade da máquina, e a produção real de peças boas (que não foram para sucata, tendo reprovado nos testes de qualidade), o gráfico exibe o histórico e momento atual para análise de tendências. São discriminados, ainda, o número de peças boas e o número de peças rejeitadas.



Na Figura 4 encontramos o tempo de ciclo real da máquina hora a hora, com atualização do momento atual a cada 5 segundos.

Figura 4 – Tempo de ciclo atualizado em tempo real



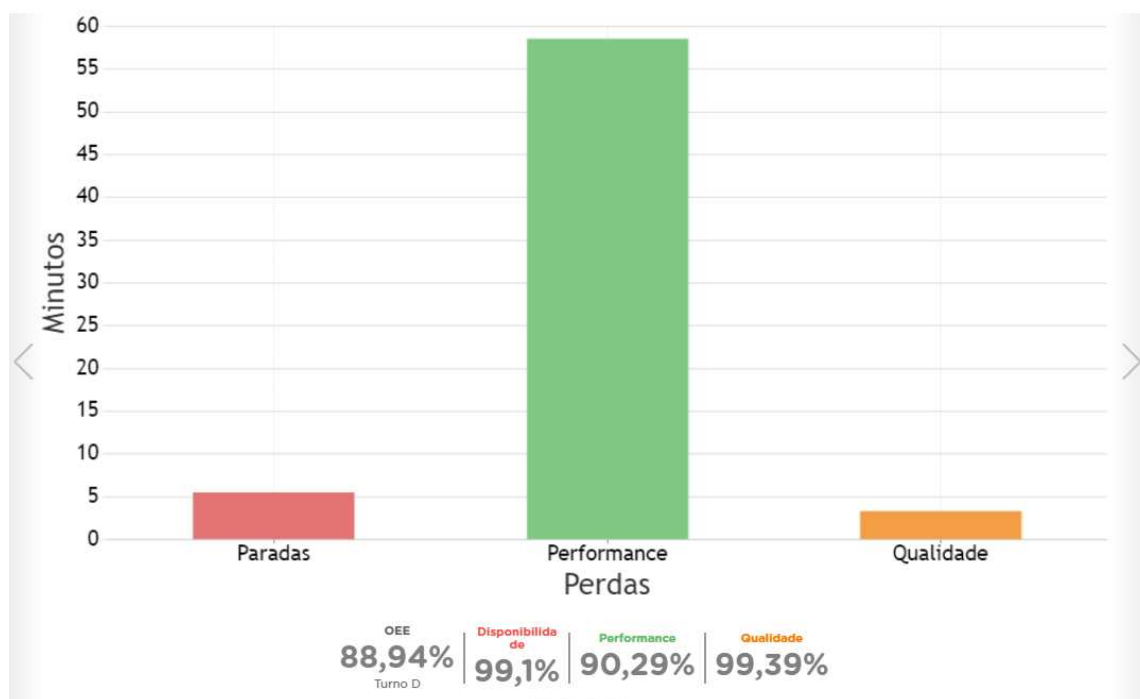
Fonte: Acervo pessoal.

Este gráfico de tempo de ciclo indica o ciclo médio instantâneo do centro de trabalho. Além disso, trás o total de ciclos executados no período e seu tempo ativo, sem paradas planejadas ou não planejadas. A análise de tempos de ciclo em cada uma das máquinas é de grande valia para este trabalho, visto que podem ser utilizados para avaliar potenciais gargalos indicados por esta funcionalidade desenvolvida e discutida no presente documento.

No último gráfico oferecido pela tela do operador, ilustrado na Figura 5, encontramos os principais motivos de perda de tempo produtivo.

Neste gráfico encontramos o impacto que as paradas fornecem ao tempo de produção, bem como o tempo perdido por perda de performance ao longo do período. Os tempos perdidos por paradas e qualidade, neste momento, são menores, visto que os indicadores de disponibilidade e qualidade do centro de trabalho estão elevados (mais detalhes sobre estes indicadores encontram-se na seção 3.5).

Figura 5 – Estratificação de perdas de tempo de produção devido a paradas, performance e qualidade



Fonte: Acervo pessoal.

A Figura 6 traz a estratificação das paradas de maior impacto neste centro de trabalho. Essa tela é uma funcionalidade do modo analítico do LiveMES, o qual oferece toda sorte de ferramentas de filtro e ordenação, possibilitando análises em outros períodos, complementando a análise traçando paralelos em outras sazonalidades e circunstâncias.

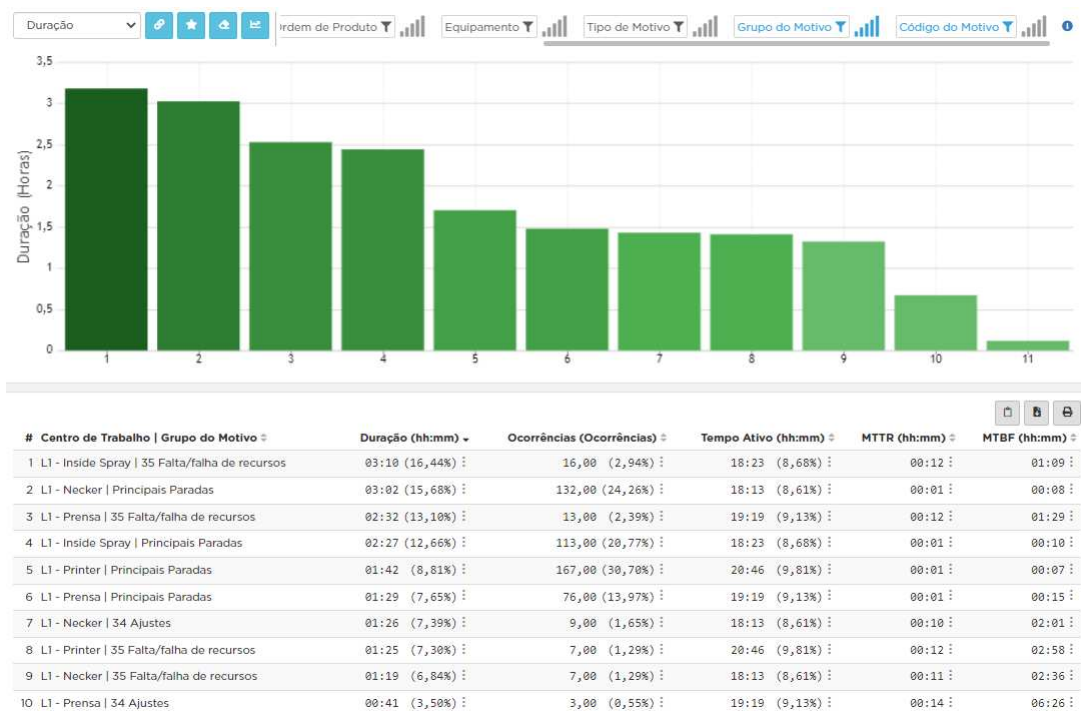
O relatório exibido na Figura 7 é um resumo da produção diária, possibilitando a análise por turnos produtivos.

Nele encontramos a síntese da quantidade de peças produzidas, as peças que voltaram para retrabalho e as que reprovaram no teste de qualidade e foram descartadas como refugo. Ao fim, contabiliza o total de peças produzidas no dia, sejam boas ou descartes.

Na seção de Hora, o sistema traz a duração das paradas planejadas e das paradas não planejadas. Oferece, também, o total de horas em que o centro de trabalho passou ativo.

A Produção Planejada informa o número de peças esperadas para aquele dia, considerando a taxa de produção teórica, este dado que, por sua vez, é fornecido pela empresa baseado em testes experimentais. Em contrapartida, temos a taxa de produção real, ou seja, a taxa de produção efetivamente executada pela máquina. A tabela de OEE indica a efetividade geral do sistema naquele dia, levando em conta

Figura 6 – Estratificação dos motivos de parada com maior impacto em tempo de execução



Fonte: Acervo pessoal.

os indicadores de disponibilidade, performance e qualidade, discutidos em maiores detalhes na seção posterior.

### 3.2 KPI

Key Performance Indicator, comumente conhecido como KPI, representa um indicador de desempenho que seja de grande relevância para um modelo de negócio, podendo variar qual KPI pode ser melhor empregado em cada circunstância distinta.

Um KPI pode ser representado tanto por um número ou alguma taxa proporcional. Algumas métricas de fácil aferição podem ser utilizadas como KPI, caso se mostrem relevantes para análises de curto a longo prazo, visto que uma métrica sozinha pode não revelar o seu contexto. Podem ser utilizadas em conjunto com outras métricas ou modificadores numéricos a fim de elucidar uma incógnita, seja ela uma projeção futura ou uma análise de outro íterim.

Há KPIs específicos que, por sua vez, fornecem informações suficientes para analisar uma tendência, ao futuro, ou o progresso, ao passado. Esses indicadores devem ser mensuráveis. A avaliação da seleção de indicadores é particular de cada

Figura 7 – Relatório geral de produção com indicadores de desempenho

16-05-2022		
Turno B Turno D		
2022-05-16 06:00 - 2022-05-17 06:00		
Produção		
Qtd. Produzida	159.392,00 UN	97,89%
Qtd. Retrabalhada	0,00 UN	0,00%
Qtd. Refugo	3.429,00 UN	2,11%
<b>Qtd. Total</b>	<b>162.821,00 UN</b>	
Hora (hh:mm)		
Duração Total	24:00	
(-) Paradas Planejadas	00:56	
<b>Tempo Planejado</b>	<b>23:04</b>	
(-) Paradas Não Plan.	01:58	
<b>Tempo Produzindo</b>	<b>21:06</b>	
Prod. Planejada		
Prod. Planejada	253.787,33 UN	
Tx. Prod. Teórica	10.999,43 UN/h	
Tx. de Prod. Real	7.715,31 UN/h	
OEE 62,81%		
Disponibilidade	91,47%	
Performance	70,14%	
Qualidade	97,89%	

Fonte: Acervo pessoal.

modelo de negócio e devem ser escolhidos em sincronia aos objetivos traçados.

### 3.2.1 Disponibilidade

A disponibilidade se trata de uma razão simples, apresentada na Equação (1) entre o tempo em que o equipamento passou produzindo dividido pelo tempo de produção planejado para aquele período. A diminuição do indicador de disponibilidade pode denotar vários períodos inativos, o que pode sinalizar a necessidade de manutenção ou atenção aos demais processos, sejam antecessores ou sucessores a ele.

$$Disponibilidade = \frac{TempoProduzido}{TempoPlanejado} \quad (1)$$

### 3.2.2 Qualidade

A qualidade é um indicador de produção que leva em conta a quantidade total de material produzido em relação à quantidade de material realmente aproveitada, desconsiderando qualquer descarte, a Equação (2) explicita essa razão. O indicador de qualidade quando está com valores abaixo de um valor pré-estabelecido como padrão (ou meta), pode indicar necessidade de manutenção ou atenção ao processo operacional.

$$Qualidade = \frac{QuantidadeProduzida}{(QuantidadeTotal)} \quad (2)$$

### 3.2.3 Performance

O indicador de performance, denotado pela Equação (3), leva em consideração a quantidade total produzida pelo produto da taxa de produção teórica do sistema com o tempo produzindo. Ele indica se o sistema está abaixo do esperado, podendo ter um tempo produzindo aumentado, o que evidencia uma tendência de queda de performance. A queda deste tempo, no entanto, mostra um aumento desse indicador.

Tanto a disponibilidade e a performance do equipamento tem relação às análises e estudos performados neste documento, visando agregar o ferramental necessário para elaborar um modelo que aponte centros de trabalho se comportando como gargalo ou, ainda, o vislumbre do comportamento móvel dos gargalos, os quais norteiam percepções em relação ao maquinário anterior e posterior a um equipamento mostrando eventuais características de gargalo do sistema, o que será discutido no Capítulo 4.

$$Performance = \frac{QuantidadeTotal}{(txProducaoTeorica \times TempoProduzindo)} \quad (3)$$

### 3.2.4 OEE

O indicador de eficiência global do equipamento ou, do original Overall Equipment Effectiveness, indica se o equipamento está produzindo de acordo com o es-

timado. Valores baixos de OEE denotam perdas de eficiência em algum dos três indicadores supracitados. Podendo ocorrer perdas de performance, disponibilidade de equipamento ou qualidade, presentes na Equação (4).

Por consequência, o OEE abrange possíveis problemas na manutenção do equipamento, o deixando mais lento, indica desperdícios através do número de peças descartadas e, também, possíveis problemas operacionais vinculados aos colaboradores da empresa.

$$OEE = Disponibilidade \times Performance \times Qualidade \quad (4)$$

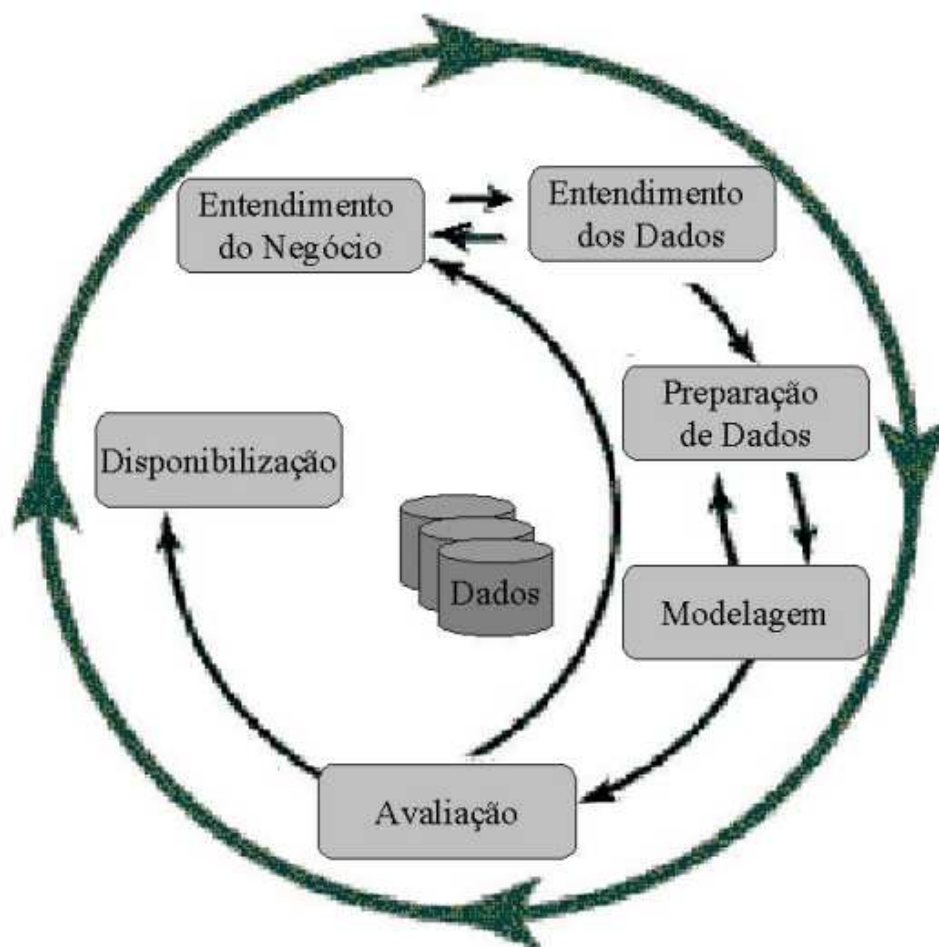
### 3.3 CROSS INDUSTRY STANDARD PROCESS FOR DATA MINING

Cross Industry Standard Process for Data Mining, ou simplesmente CRISP-DM, é um método dividido em seis etapas sequenciais e cíclicas, como ilustrado na Figura 8. Este padrão segue uma sequência de etapas e fica predisposto a retornar as fases anteriores caso o projetista sinta a necessidade de reavaliar alguns processos de seu desenvolvimento.

Basicamente, são divididos nas três primeira etapas, voltadas para a compreensão do domínio, ou seja, quais as variáveis relevantes para testar sua hipótese e alcançar seus objetivos propostos; a compreensão do que significam os dados e quais influências oferecem ao sistema; e a preparação desses dados em uma estrutura que possibilite atingir os objetivos da forma mais confiável e acurada possível.

As três últimas etapas consistem em construir um modelo, este com atributos bem definidos após estudos cuidadosos das etapas anteriores. O modelo é responsável por executar uma análise estatística de novos dados de entrada, os quais devem reproduzir, com baixa taxa de erro, uma tendência a ser observada com dados reais, oferecendo um resultado probabilístico. A etapa de avaliação deve avaliar os resultados fornecidos pelo modelo e compará-los às expectativas. Caso o resultado seja demasiadamente discrepante da realidade, retorna-se a etapas anteriores, seja uma reavaliação do negócio para melhor compreensão, seja para realizar uma nova e mais abrangente análise das variáveis tidas como atributos, observando se faltam informações ou há atributos que podem levar o modelo a resultados distantes da realidade. Caso o modelo esteja desempenhando seu papel com resultados mais acurados ao que se estima, pode-se partir para a fase de implementação em ambiente de produção.

Figura 8 – Etapas da metodologia CRISP-DM



Fonte: Acervo pessoal.

### 3.3.1 Entendimento do negócio

Na primeira etapa do CRISP-DM, deve-se identificar o problema a ser resolvido, os objetivos a serem alcançados, os requerimentos e as restrições do projeto. Deve-se traçar os objetivos de sucesso do negócio.

Para isso, pode-se considerar quais recursos estão disponíveis, como se relacionam aos requerimentos, quais as limitações e custos de operação, por exemplo. Além disso, deve-se traçar os objetivos da mineração de dados, tendo como base o acesso às variáveis necessárias para montar um modelo próximo às projeções estimadas.

Ainda nessa etapa, selecionam-se as tecnologias, ambientes de desenvolvimento, ferramentas e bases de dados necessárias, além de traçar um plano para as próximas etapas do CRISP-DM. A compreensão do domínio do problema serve de base para avançar sem obstáculos para as próximas fases.

### 3.3.2 Entendimento dos dados

A etapa de entendimento dos dados é onde se identificam as variáveis, suas fontes de coleta de dados e sua disponibilidade.

Nesta fase serão coletados e descritos os dados, a fim de identificar pontos de possíveis intervenções na fase de limpeza de dados. Observar a dimensionalidade, formato, coesão e alinhamento aos objetivos para, posteriormente, estruturá-los. É de grande ajuda na análise exploratória elaborar perguntas acerca dos dados apresentados e, a partir deles, buscar extrair correlações e informações que melhor orientem sobre a sua relação com o domínio do problema.

O processo de preparação de dados avaliará melhor a qualidade e a possibilidade de gerar novas informações a partir dos dados já coletados.

### 3.3.3 Preparação de dados

A fase de preparação de dados envolve a seleção dos dados, quais serão realmente importantes para se atingir o objetivo. Costuma-se documentar os motivos da inclusão ou da exclusão de dados ou variáveis, o que auxilia caso essa etapa demande retrabalho.

Dos dados selecionados, deve-se homogeneizá-los para evitar problemas de incompatibilidade dimensional ou entre seus tipos de dado. Faz parte da limpeza, também, eliminar campos vazios ou valores fora do domínio, visando preservar a integridade das informações a serem extraídas.

A partir dos dados limpos e organizados, é possível criar novos atributos correlacionando os dados existentes, auxiliando no processo posterior, de modelagem.

### 3.3.4 Modelagem

Após os processos de entendimento do negócio e dos dados, bem como sua estruturação, limpeza e adição de novos atributos correlatos, pode-se iniciar a fase da escolha do algoritmo que processará os dados, visando atingir os objetivos de negócio e mineração traçados nas etapas anteriores. O algoritmo, ou modelo estatístico, deve estar em consonância com os resultados esperados e estar relacionado ao domínio dos dados, buscando valores de saída condizentes com o esperado.

Teste o modelo com os dados selecionados. Nesta fase pode-se dividir a base de dados para teste e treino do modelo, dependendo do algoritmo escolhido.

Após os testes, deve-se interpretar a coerência dos resultados em relação ao domínio analisado. Avaliando retornar a fases anteriores para reestruturar os dados ou, então, testar outros algoritmos para a comparação da fase de avaliação dos modelos gerados, o que será explanado na próxima etapa.



### 3.3.5 Avaliação

A etapa de avaliação consiste em analisar os resultados obtidos dos diferentes modelos levantados, questionando quais modelos melhor se adequem aos critérios de sucesso. A avaliação requer sólidos conhecimentos acerca do domínio do problema a fim de avaliar a consistência dos resultados e critérios de acurácia e exatidão dos resultados obtidos.

Ao fim do processo de análise, deve-se considerar voltar aos passos anteriores para rever os critérios ou, então, partir para a implementação do modelo encontrado em ambiente de produção.

Na próxima seção serão abordados alguns dos algoritmos testados na fase de modelagem.

### 3.3.6 Implementação

No processo de implementação, por fim, desenvolve-se um plano de implementação, bem como a documentação necessária para sua reprodução. Deve-se atentar ao monitoramento e a manutenção do modelo enquanto estiver em ambiente de produção, encontrando erros, notificando e traçando estratégias de resolução.

A fase de implementação não será discutida neste documento, haja vista da dificuldade de implementar a solução no produto da empresa sem demais testes e validações em ambiente de desenvolvimento.

## 3.4 BOTTLENECKS

Após a definição da metodologia a ser seguida para desenvolver o projeto, nesta seção serão introduzidos conceitos relacionados a detecção de gargalos. A fim de seguir a literatura e evitar traduções literais, optou-se por manter alguns termos como *bottlenecks* e *shifting bottlenecks*. As próximas subseções descrevem, brevemente, alguns métodos de detecção de *bottlenecks* considerados neste trabalho, a começar pela sua definição em si.

Define-se como *bottleneck*, a etapa do processo produtivo que tem maior contribuição na perda de performance da linha (Li et al, 2009), aumentando o tempo de produção. Além disso, outras máquinas podem ficar ociosas devido a falta de material a ser processado, ou bloqueadas pelo centro de trabalho subsequente, não podendo dar continuidade ao seu trabalho.

Este fenômeno é descrito por (Roser et al, 2001), denominando *starvation* o momento em que o recurso está ocioso devido a falta de material, por sua vez represado

em processos anteriores. Por outro lado, se o recurso não pode produzir devido ao equipamento subsequente persistir ocupado.

Devido a uma presença constante em processos de manufatura, vários métodos de detecção de gargalos foram implementados ao longo dos anos, utilizando diversas abordagens objetivando suprir as particularidades de cada caso. A correta implementação destes algoritmos tendem a orientar gestores às ações necessárias, seja em manutenções corretivas ou preventivas, dando maior atenção aos equipamentos que se destacam por sua perda de performance (Uzsoy e Wang, 2000). A seguir, serão apresentadas algumas metodologias de detecção.

### 3.5 MÉTODOS DE DETECÇÃO DE BOTTLENECKS

Por ter grande impacto na performance, logo, na produção final, várias metodologias surgiram ao longo dos anos visando resolver toda sorte de problemas distintos presentes nas empresas. Especialmente após a apresentação da teoria de restrições, metodologia desenvolvida por Goldratt (1992), a qual auxilia na identificação do que está impedindo maior performance em linhas produtivas, diminuindo, assim, a produção final. Em sua teoria, aponta que ao identificar fatores limitadores de performance e atuar sobre eles a fim de mitigar o problema. Ainda, Goldratt afirma que sempre há ao menos uma restrição que impeça o sistema de atingir melhores taxas de performance.

Além da teoria de restrições, outras formas de detecção de gargalos foram pesquisadas, sejam elas utilizando métodos analíticos (Betterton et al, 2012), de simulação (Law e Kelton, 2000), utilizando dados históricos (Li et al, 2009) e, por fim, validações de modelos com dados reais (Moss et al, 1999).

A detecção de bottlenecks auxilia na otimização de qualquer sistema produtivo. Haja vista de que a otimização do processo de um equipamento tido como gargalo proverá melhora da produção como um todo. Há métodos que, ainda, discriminam os equipamentos como *sole bottleneck*, referido-se a uma máquina que atue como único gargalo do sistema; *shifting bottlenecks*, são gargalos móveis, os quais se deslocam de uma máquina para outra ao longo do tempo; e máquinas *non-bottlenecks*, que não se comportam como gargalo, operando normalmente, sem perdas persistentes de performance e disponibilidade.

A seguir, apresenta-se os conceitos de período ativo e inativo do equipamento, como isso afeta o sistema e como utilizar tais informações a fim de mitigar seu impacto.

### 3.5.1 Período ativo

O método de período ativo agrupa o estado do equipamento como **ativo** e **inativo**. O primeiro indica que o recurso está atuando como esperado, seja produzindo, sendo preparado para a produção, como uma troca de ferramenta ou mesmo em paradas agendadas.

Entende-se como período inativo o tempo em que o recurso passou ocioso, aguardando para atuar. O Quadro 1 traz exemplos de tais períodos comuns em uma fábrica.

Quadro 1 – Exemplos de períodos ativo e inativo.

Recurso	Ativo	Inativo
Máquina	Produzindo, manutenção, setup, parada agendada.	Aguardando recebimento de peças, aguardando liberação da célula seguinte
Operador	Produzindo, parada agendada	Aguardando

Fonte: Adaptado de (Roser et al, 2001).

Analisando a trajetória e características de permutação entre ambos os tipos de estado, a Figura 9 ilustra a alternância entre eles em dado período de tempo.

Figura 9 – Períodos ativos e inativos em um centro de trabalho.



Fonte: Adaptado de (Roser et al, 2001).

Nota-se, no exemplo exposto na Figura 9, que os estágios inativos são descritos como bloqueado, quando há espera para desocupação da próxima célula de trabalho, ou aguardando, quando espera por material para processamento, ficando, assim, em período inativo.

Em contrapartida, atua em período ativo nos eventos de produção, setup e manutenção, ou seja, realizando alguma tarefa vinculada ao processo, como uma troca de ferramenta específica para produção de determinado produto. Neste caso, mesmo parada, ainda desempenha uma etapa esperada para aquela atividade.

Este método é preferível em cenários reais, visto que possibilita avaliação histórica em quaisquer períodos de tempo registrado. Desta forma, contempla a indicação

tanto de gargalos momentâneos, como também uma média destes ao longo do tempo, indicando se o equipamento comporta-se esporadicamente como gargalo ou se está prejudicando a performance do sistema em repetidos momentos no tempo.

A utilização destes estados, quando combinados a comparação entre os estados dos demais recursos da linha, torna possível encontrar shifting bottlenecks, abordados ainda neste capítulo, o que amplia a percepção sobre possíveis causas de gargalos, observando a dinâmica ao longo do tempo e como tais eventos movem-se ao longo da linha produtiva. Isto incorre em eventos onde determinado recurso atua como gargalo momentaneamente, mas, a seguir, normaliza sua performance, no entanto, o gargalo é encontrado no equipamento seguinte.

Esta análise torna-se possível quando há disponível apenas informações sobre o estado da máquina, não tendo dados, por exemplo, sobre quantidade de peças estocadas em um buffer. No caso da empresa de embalagens analisada, existem pequenos buffers entre os processos, além de um com maior capacidade antecedendo um dos processos. Como não há informações acerca da quantidade estocada, métodos como de análise do tamanho de fila tornam-se inviáveis.

Aproveitando os dados de estado, outra abordagem pode ser seguida através da avaliação dos períodos inativos do recurso.

### **3.5.2 Período inativo**

Este método, por sua vez, utiliza os tempos em estado inativo. Neste caso, é considerado gargalo o recurso que impede o funcionamento de outro (Sengupta et al, 2008), seja em etapa anterior ou posterior na linha produtiva. Como no método anterior, este também analisa os períodos ativos e inativos do recurso. Caso o equipamento encontre-se inativo, é investigado o motivo de seu bloqueio. Visto que a máquina pode estar aguardando o recebimento de material ou a liberação para a continuidade de sua produção, bloqueada por uma máquina posterior. A avaliação é realizada, então nos recursos anteriores e posteriores ao equipamento tido como gargalo, visando encontrar e atuar sobre a causa de sua ociosidade, sendo esta, então a restrição para a plena performance do recurso apontado como gargalo por este método.

### **3.5.3 Shifting bottlenecks**

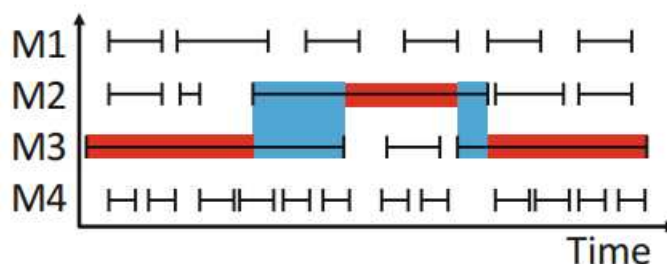
Poucos métodos desenvolvidos foram capazes de encontrar shifting bottlenecks em uma linha produtiva. O método de análise de período ativo, no entanto, aliado a comparação da alternância entre estados de outros equipamentos, tornou possível a observação do comportamento dos gargalos, apontando longos períodos ativos passando de uma máquina para a próxima ou, ainda, para etapas anteriores a sua. Esse deslocamento foi chamado, então, de shifting bottlenecks (Roser et al, 2001),

ou seja, gargalos não atrelados necessariamente a um recurso, mas sim a dinâmica entre eles dentro do sistema ao qual pertencem.

Este tipo de análise decorre da observação de como os gargalos momentâneos agem ao longo do tempo (Lawrence e Buss, 1994). Analisando os momentos ativos dos recursos da linha, procura-se atentar aos intervalos onde dois ou mais recursos tem período ativo prolongado por tempo suficiente para se sobrepor ao período ativo prolongado concorrente. Esta sobreposição é, geralmente, indicada em máquinas adjacentes, onde o gargalo pode estar se movendo para a máquina anterior ou para a próxima.

A Figura 10, adaptada de (Roser et al, 2001), ilustra a sobreposição de longos períodos ativos, de forma sequencial, entre M2 e M3.

Figura 10 – Períodos ativos e inativos em um centro de trabalho.



Fonte: (Roser et al, 2001).

O exemplo exposto na Figura 10 apresenta, em linhas contínuas, os momentos de estado ativo da máquina. Eventos como este, observados com maior tempo ativo, são classificados como bottlenecks. Observa-se, em vermelho, que o recurso atua como único gargalo do sistema, chamado, então, de sole bottleneck, onde ele é responsável pela perda de performance da linha em dado período de tempo. O período marcado em azul, em contrapartida, indica o intervalo em que ambos os recursos adjacentes atuam como gargalo. A sobreposição destes estados indica o deslocamento do gargalo de M3 para M2, o que também ocorre, na sequência, de M2 para M3.

No exemplo, M1 e M4 não mantêm a duração em estado ativo por tempo suficiente para serem considerados gargalos, logo, são classificados como non-bottlenecks.

No próximo capítulo utilizaremos tais métodos para o desenvolver de uma solução em que indique as probabilidades dos centros de trabalho estarem atuando como gargalos dentro de um intervalo determinado de tempo.

## 4 DESENVOLVIMENTO

Seguindo a metodologia CRISP-DM, inicia-se explorando o domínio do problema a fim de compreender o processo, variáveis relacionadas e demais particularidades para ampliar o panorama acerca do assunto. Serão utilizadas ferramentas de análise contidas no LiveMES para observar comportamentos históricos, sejam eles no âmbito de produção, paradas, qualidade, performance e tendências de seus demais indicadores.

Ainda neste capítulo, serão apresentadas métricas e indicadores que auxiliam na compreensão das características de cada máquina, como isso pode influenciar no seu comportamento e como isso pode afetar a linha como um todo. Para isso, apresenta-se características como duração das paradas, tempo médio para reparo (MTTR), tempo médio entre as falhas (MTBF), tempo de ciclo, tempo ativo, entre outros.

Ao ampliar a visão sobre o domínio, analisar-se-ão os dados coletados a fim de estabelecer uma relação clara visando os objetivos estabelecidos de sucesso do negócio e cumprimento de objetivos. Partindo da análise exploratória, é realizada limpeza nos dados coletados, removendo campos vazios e possíveis outliers, que podem levar o modelo a imprecisões futuramente.

Por fim, será escolhido e implementado algoritmo que possa garantir o critério de sucesso do negócio. Será discutido o motivo da escolha, tendo em vista os pontos contemplados pelo modelo no que concerne o respeito às idiossincrasias da linha de produção real, com suas restrições de sensorização ou restrições operacionais.

### 4.1 ENTENDIMENTO DO NEGÓCIO

Na primeira etapa do CRISP-DM, ou seja, no entendimento do negócio, deve-se identificar o problema a ser resolvido, os objetivos a serem alcançados, os requerimentos e as restrições do projeto, além de se traçar os objetivos de sucesso do negócio.

O requisito funcional deste trabalho é indicar quais os centros de trabalho da linha são mais prováveis de estarem atuando como gargalos. Serão utilizados dados históricos a fim de ter um panorama amplo o suficiente para encontrar os gargalos através de sua média dentro de um intervalo de tempo determinado, bem como quando se comportam como sole bottlenecks ou shifting bottlenecks. Para isso, pode-se considerar quais recursos estão disponíveis, como se relacionam aos requerimentos, quais as limitações e custos de operação, por exemplo. Além disso, deve-se traçar os objetivos da mineração de dados, tendo como base o acesso às variáveis necessárias para montar um modelo próximo às projeções estimadas.

Seus requisitos não funcionais, no entanto, apresentam a restrição de não possuir informações sobre a capacidade utilizada dos buffers, o que possibilitaria melhor

compreensão e, possivelmente, maior confiabilidade de rastreamento de gargalos. São disponibilizados como variáveis o estado de produção (ativo ou inativo) e apontamentos realizados pelos operadores dos centros de trabalho, indicando a natureza de eventuais paradas e eventuais problemas.

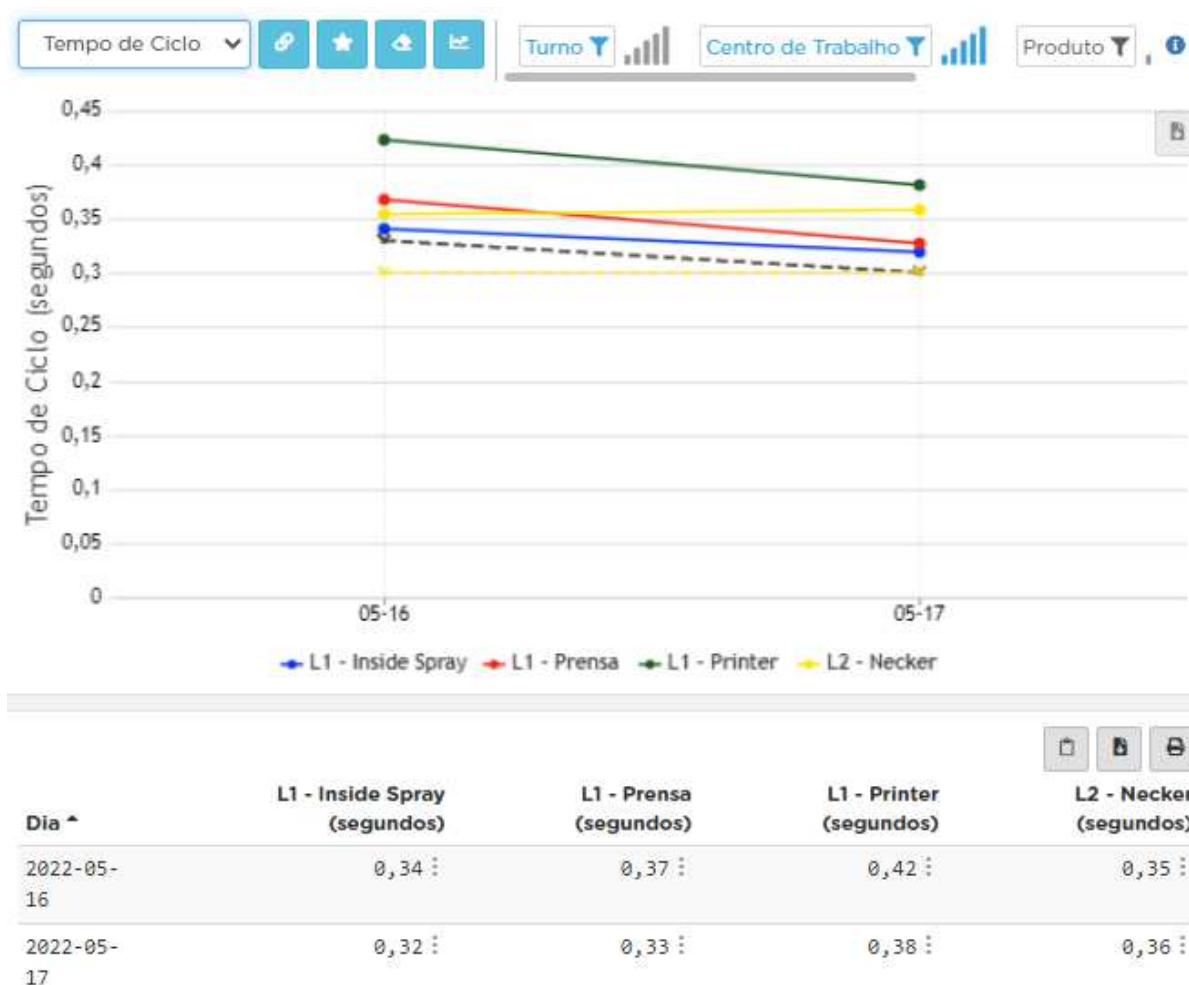
Os dados serão adquiridos do banco de dados e pré-processados através de scripts utilizando a linguagem de programação Python, a qual oferece ferramentas simples de manipulação e visualização de dados. O entendimento dos dados, estudado através de análise exploratória, será realizado nesta seção utilizando a ferramenta analítica do LiveMES. Essa análise é de extrema importância para elucidar a dinâmica dos recursos tanto individualmente como seu impacto no sistema. Através da observação das diferentes métricas e indicadores oferecidos pela estratificação de informações do LiveMES, serão selecionadas as variáveis a serem utilizadas como entradas do algoritmo implementado.

A seguir, serão realizadas análises sobre métricas e indicadores com auxílio do modo analítico do LiveMES. A Figura 11 apresenta o tempo médio de ciclo de cada centro de trabalho. Na prática, o tempo de ciclo representa o tempo em que a máquina leva para processar uma peça.

Vemos, na Figura 11 que todos os centros de trabalho levam, em média, entre 0,3 e 0,5 segundos para completar uma tarefa. O aumento deste tempo implica na diminuição da performance, refletindo na produção total da linha. Este é um dos primeiros fatores de diagnóstico de gargalos, caso não seja possível atuar sobre eles, assim como definido por Goldratt (1992) na teoria das restrições, há outros elementos prejudicando a performance do sistema.

Como análise complementar ao tempo médio de ciclo, a Figura 12 informa o número de ciclos performados em cada máquina durante o período.

Figura 11 – Tempo médio de ciclo por centro de trabalho.



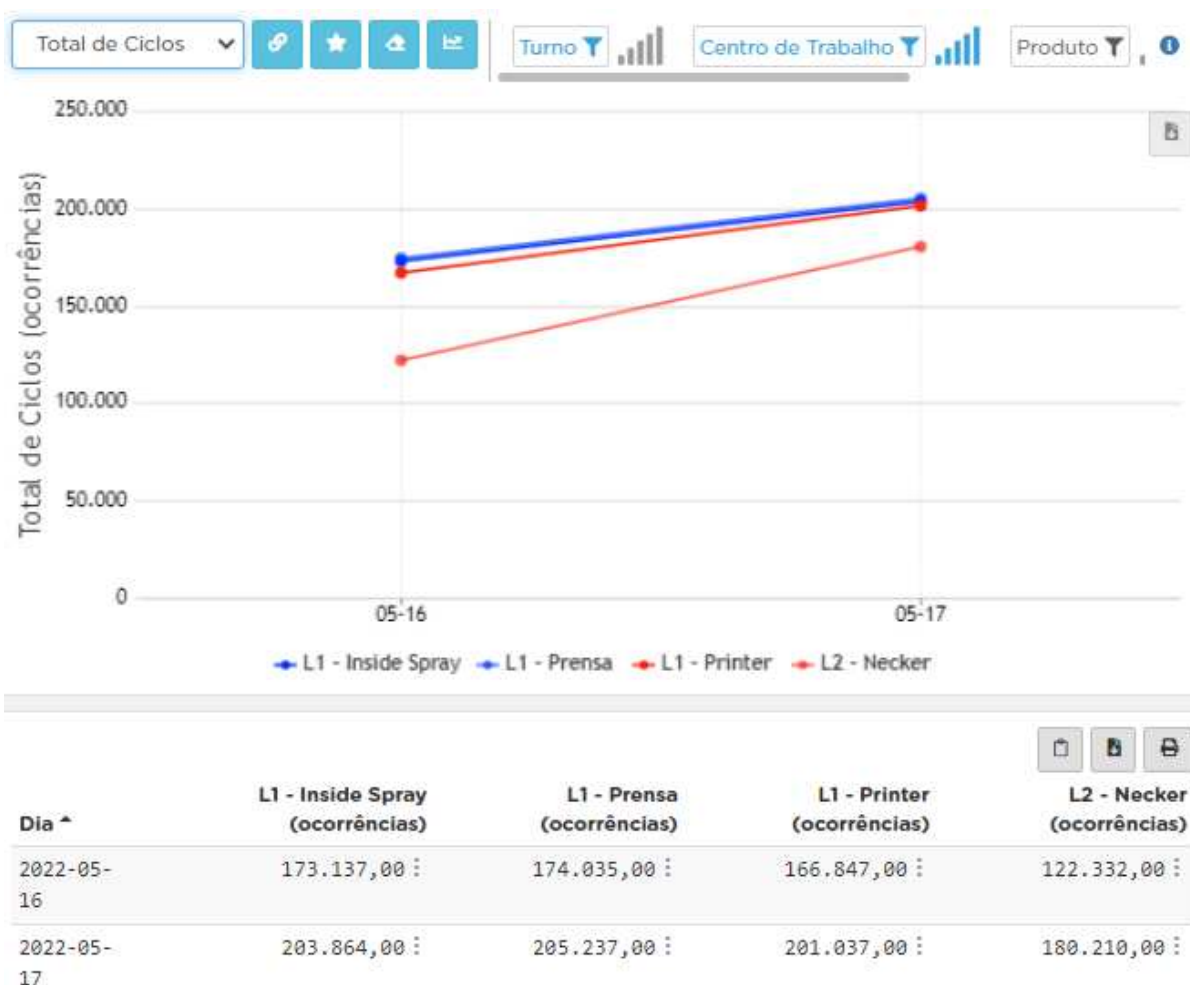
Fonte: Acervo pessoal.

Percebe-se, na Figura 12 um decréscimo de ocorrências. Elas ocorrem de forma gradual ao longo da linha, seguindo a forma em que as máquinas estão dispostas na fábrica. Como visto no Capítulo 2, a ordem das máquinas no fluxo de trabalho tem como entrada a Prensa, seguindo para Inside Spray, Printer e, por fim, Necker. Comparando a ordenação dos centros de trabalho a gradatividade do número de ocorrências de ciclos, constatamos que há um certo represamento de peças a cada etapa. Além disso, cada centro de trabalho tem uma taxa de descarte, analisados mais a fundo posteriormente, a fim de avaliar seu fator de impacto na produção.

A seguir, na Figura 13, temos o indicador de disponibilidade de cada centro de trabalho. Este indicador apresenta o percentual de tempo em que o centro de trabalho passou produzindo, efetivamente, em comparação ao seu tempo de produção planejado.



Figura 12 – Número de ciclos de cada centro de trabalho.



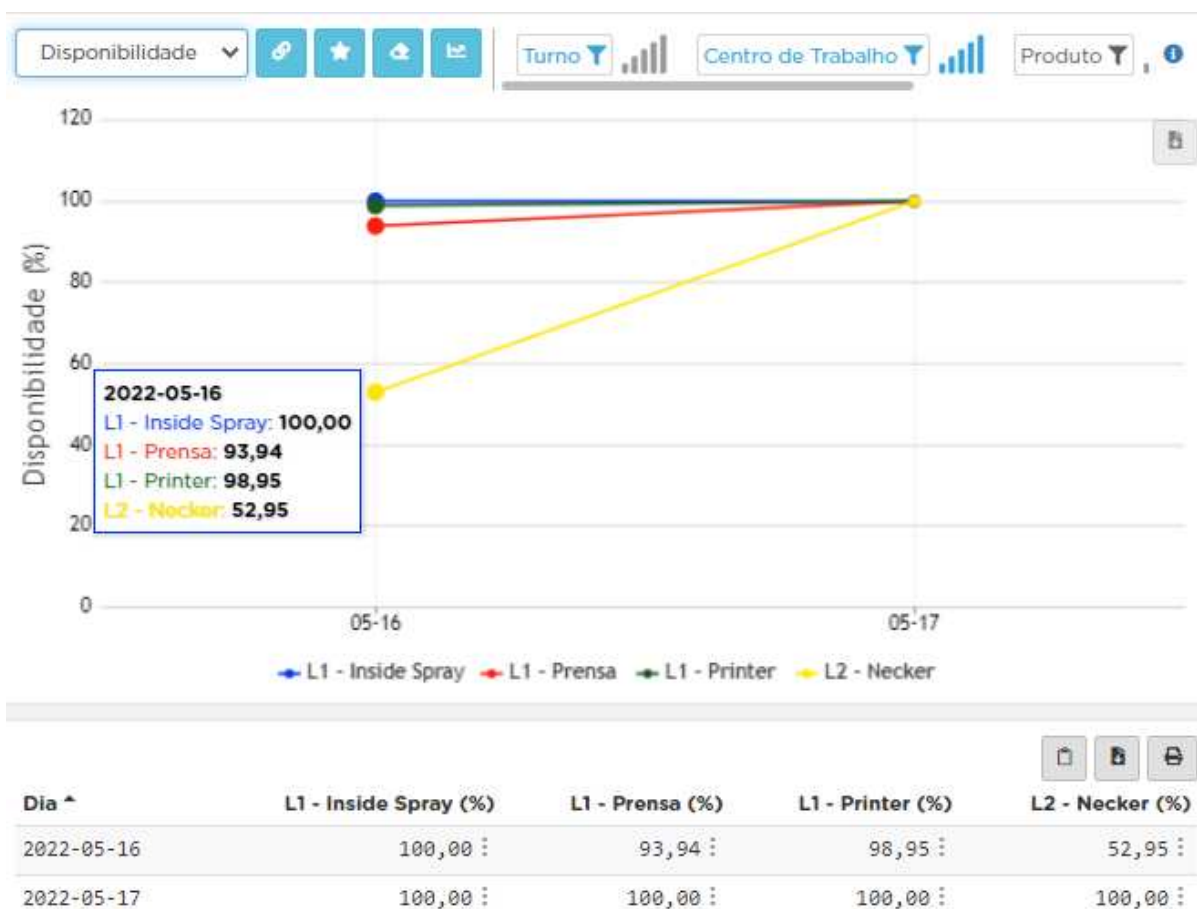
Fonte: Acervo pessoal.

Contata-se, após observação do indicador de disponibilidade, que o Necker esteve por, aproximadamente, metade do seu tempo de produção planejada sem efetivamente processar alguma peça. Este indicador exibe a disponibilidade de cada máquina, no entanto, não traz informações necessárias para concluir qual recurso está impedindo a realização de seu trabalho. Por este indicador, neste exemplo, não se pode ter certeza da causa da diminuição da disponibilidade, pois pode tanto se tratar de alguma ocorrência no Necker ou em algum processo anterior.

Um indicador complementar a disponibilidade é o que se segue na Figura 14, o indicador de performance julga a quantidade total produzida em relação a taxa de produção teórica atribuída ao recurso, pelo seu tempo de produção efetiva.

Com o auxílio da Figura 14, percebemos uma certa gradualidade, novamente, seguindo o fluxo de trabalho, sugerindo, novamente, que o gargalo se alastra pela linha de produção afetando, principalmente a produção efetiva da última máquina do fluxo.

Figura 13 – Indicador de disponibilidade do centro de trabalho.



Fonte: Acervo pessoal.

Além dos indicadores de disponibilidade e performance, temos acesso ao indicador de qualidade, exibido na Figura 15. Este indicador, por sua vez, oferece uma perspectiva das perdas de tempo relacionadas aos problemas de qualidade das peças. Observando este indicador, percebe-se sua alta taxa de qualidade. Posteriormente, nesta seção, analisaremos a quantidade de peças perdidas por defeitos de qualidade para maior noção do impacto desta característica no sistema.

Visto que o sistema opera com alto nível de qualidade, gerando, proporcionalmente, um número baixo de peças perdidas, pode-se dar continuidade à análise observando as características, apontadas pelos colaboradores da empresa, que têm maior impacto na performance do sistema. A seguir, analisam-se as paradas, seus tempos médios de atividade e frequência de suas ocorrências.

Figura 14 – Indicador de performance do centro de trabalho em um dia



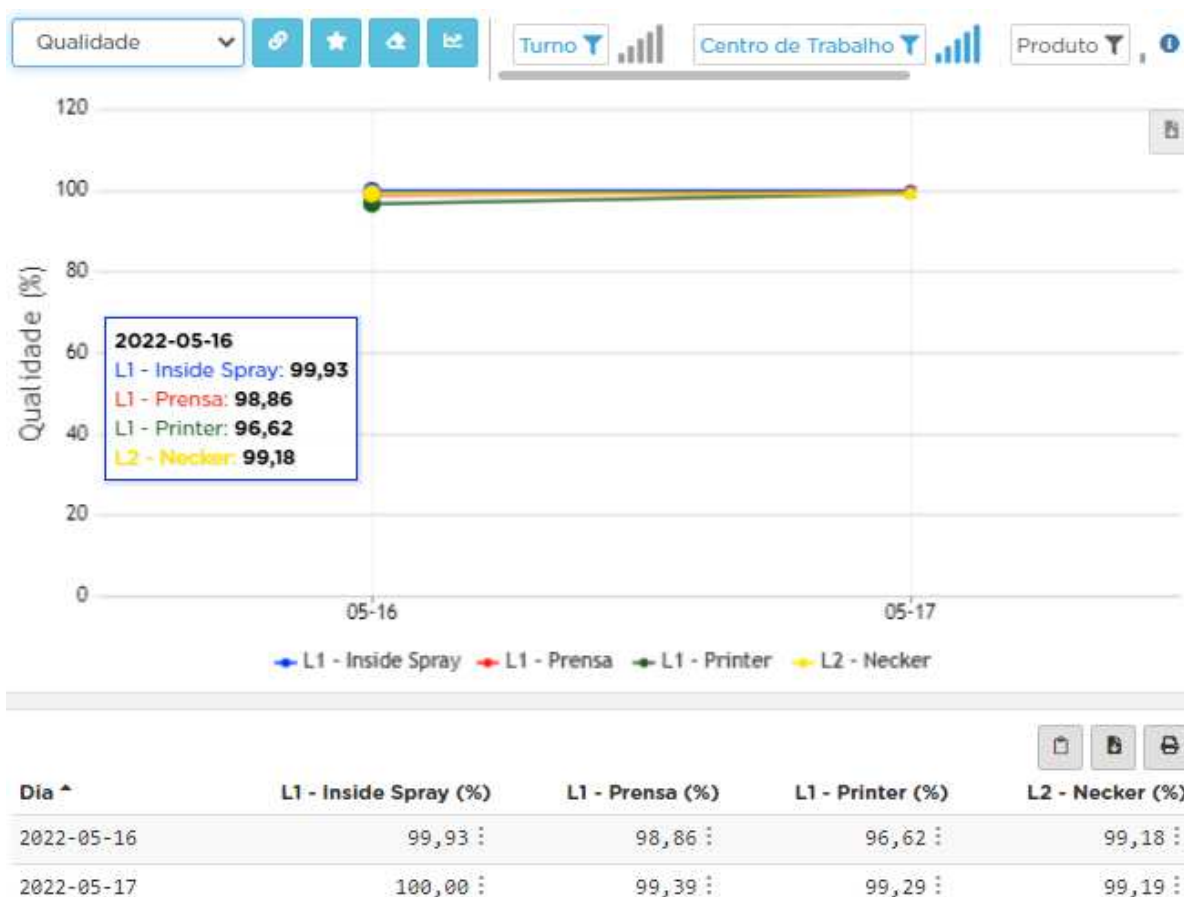
Fonte: Acervo pessoal.

A Figura 16 traz informações relevantes sobre as paradas de maior duração. Nela, observa-se a magnitude da duração de cada parada ao longo do dia e seu impacto no tempo total de produção. Além da duração, são discriminados os tipos de paradas, como as relacionadas a qualidade, ou seja, o tempo perdido com produtos descartados ou coletados para testes manuais.

Na Figura 16, tem-se com valor elevado a parada chamada "Outra célula parada", a qual indica que o centro de trabalho está impedido de executar uma tarefa devido a outra máquina, seja anterior ou posterior ao seu processo. Isto denota, como visto anteriormente, o estado de starvation no centro de trabalho, onde este aguarda o recebimento de novo material para continuidade de suas operações.

As micro paradas também têm alto valor de duração, embora sejam paradas menores e consideradas pela gestão da empresa como parte do processo, geram impacto na performance do sistema de forma geral. Estas paradas são apontadas automaticamente, não necessitando o apontamento manual por parte do operador do centro de trabalho, como em paradas maiores.

Figura 15 – Indicador de qualidade do centro de trabalho em um dia



Fonte: Acervo pessoal.

Figura 16 – Duração de paradas por tipo de parada

Dia ^	302 Rótulo (hh:mm)	342 Qualidade/Scrap (hh:mm)	353 Outra célula parada (hh:mm)	Micro Paradas (hh:mm)
2022-05-16	00:07 (1,13%)	01:35 (14,74%)	04:12 (39,16%)	04:49 (44,94%)

Fonte: Acervo pessoal.

A Figura 17 traz o tempo em que cada centro de trabalho passou parado. Nele, nota-se que as maiores paradas foram no Inside Spray e no Necker. Avaliando em termos do processo, na Prensa ocorrem maiores paradas quando está aguardando recebimento de slugs para dar início ao seu processo, o que pode ocasionar parada na célula seguinte, a Inside Spray, que fica parada por starvation.

O processo da Printer é menos afetado por máquinas anteriores, pois sua entrada é suprida pelo maior buffer da linha, o qual é capaz de manter sua demanda por, aproximadamente, 10 minutos, segundo informação do operador do centro de trabalho.

Figura 17 – Duração de paradas por centro de trabalho

Dia ^	L1 - Inside Spray (hh:mm)	L1 - Necker (hh:mm)	L1 - Prensa (hh:mm)	L1 - Printer (hh:mm)
2022-05-16	03:05 (28,83%)	03:24 (31,72%)	02:31 (23,46%)	01:43 (15,98%)

Fonte: Acervo pessoal.

Embora algumas paradas tenham grande contribuição no tempo de produção, também deve-se analisar a periodicidade em que ocorrem. A Figura 18 exibe a estratificação do tempo médio entre as principais paradas.

Figura 18 – Tempo médio entre falhas (MTBF) por tipo de parada

Dia ^	302 Rótulo (hh:mm)	342 Qualidade/Scrap (hh:mm)	353 Outra célula parada (hh:mm)	Micro Paradas (hh:mm)
2022-05-16	37:18	04:40	02:04	00:07

Fonte: Acervo pessoal.

Percebe-se, na Figura 18, que o maior tempo entre paradas é para o setup da máquina, ocorrido na troca de ordem de produção, onde as configurações para outro produto devem ser ajustadas.

O tempo médio entre paradas de qualidade também é, relativamente, alto, dentro de um universo de, aproximadamente, uma centena de milhar de produtos sendo processados por dia.

O tempo entre as paradas do tipo "outra célula parada", se mostra frequente, visto que esta parada tem maior impacto no detrimento do tempo de produção.

As micro paradas, no entanto, ocorrem frequentemente, a uma média de 7 minutos entre elas e têm duração máxima de 5 minutos cada. No entanto, são resolvidas rapidamente, como pode ser visto na Figura 20 tratando sobre o MTTR.

A Figura 19 apresenta o tempo médio entre a ocorrência de paradas em cada centro de trabalho. Tais paradas distribuem-se em um intervalo entre 5 a 9 minutos e pode ser complementada analisando a Figura 23, a qual informa o número de paradas por centro de trabalho.

Figura 19 – Tempo médio entre falhas (MTBF) por centro de trabalho

Dia ^	L1 - Inside Spray (hh:mm)	L1 - Necker (hh:mm)	L1 - Prensa (hh:mm)	L1 - Printer (hh:mm)
2022-05-16	00:08 :	00:07 :	00:09 :	00:05 :

Fonte: Acervo pessoal.

A comparação entre os valores apresentados de tempo médio entre falhas e sua respectiva frequência de ocorrências sugerem análise das máquinas com mais paradas, a fim de averiguar qual a origem das falhas, sendo nos próprios equipamentos ou em processos adjacentes. Essas informações complementarão a avaliação dos resultados obtidos a ser desenvolvido, fundamentando os critérios de sucesso de negócio propostos.

Outro indicador de desempenho, exposto pela Figura 16, é o tempo médio entre reparos (MTTR), ou seja, o tempo entre a parada e a retomada ao seu tempo ativo.

Figura 20 – Tempo médio de reparo (MTTR) de cada tipo de parada

Dia ^	302 Rótulo (hh:mm)	342 Qualidade/Scrap (hh:mm)	353 Outra célula parada (hh:mm)	Micro Paradas (hh:mm)
2022-05-16	00:07 :	00:12 :	00:14 :	00:01 :

Fonte: Acervo pessoal.

As paradas com maior tempo médio de reparo são justamente as paradas causadas devido a falhas em outras células, indicando possível gargalo gerado por starvation. O abordagem presente no algoritmo de shifting bottlenecks pode indicar com maior precisão a influência desse processo no desempenho da linha.

As paradas de qualidade também têm impacto significativo, visto que pode haver intervenção manual de parada para retirada de uma peça durante o período produtivo a fim de realizar testes de qualidade. O setup da máquina, embora tenha valor menor que os dois anteriores, é contabilizado como tempo ativo na abordagem proposta por Roser e Nakano (2001), pois é considerada parte do processo produtivo. As micro paradas, além de terem curta duração, são resolvidas rapidamente, com média de tempo para reparo menor que 1 minuto.

A Figura 16 exhibe como os tempos médios para reparos (MTTR) estão distribuídos entre os centros de trabalho.

Figura 21 – Tempo médio de reparo (MTTR) de cada centro de trabalho

Dia ^	L1 - Inside Spray (hh:mm)	L1 - Necker (hh:mm)	L1 - Prensa (hh:mm)	L1 - Printer (hh:mm)
2022-05-16	00:03	00:03	00:03	00:01

Fonte: Acervo pessoal.

Pode-se observar que a Printer tem suas paradas resolvidas mais rapidamente que as demais. No entanto, o tempo médio de reparo máximo para a linha é de 3 minutos. Essa média, porém, pode ser influenciada pela duração e número de ocorrências de micro paradas, requerendo avaliação de outros indicadores complementares.

A Figura 22 pode auxiliar na interpretação do indicador MTTR, pois traz a magnitude do número de paradas discriminadas de acordo com seu tipo, bem como o número de paradas por centro de trabalho, indicado pela Figura 23.

Figura 22 – Número de paradas ocorridas por tipo de parada

Dia ^	302 Rótulo (Ocorrências)	342 Qualidade/Scrap (Ocorrências)	353 Outra célula parada (Ocorrências)	Micro Parada (Ocorrências)
2022-05-16	1,00 (0,30%)	8,00 (2,44%)	18,00 (5,49%)	300,00 (91,46%)

Fonte: Acervo pessoal.

Naturalmente, como o setup tem valor alto de MTBF, também possui o menor número de ocorrências. Diferente do setup, as micro paradas são, de longe, as mais frequentes, embora de menor duração, tem grande impacto no valor total de paradas, como visto anteriormente na Figura 16.

A Figura 23 apresenta como as paradas estão distribuídas ao longo dos centros de trabalho, indicando a Printer com o maior número de casos. Isto já foi inferido através do indicador MTBF, visto anteriormente na Figura 19.

Figura 23 – Número de paradas ocorridas por centro de trabalho

Dia ^	L1 - Inside Spray (Ocorrências)	L1 - Necker (Ocorrências)	L1 - Prensa (Ocorrências)	L1 - Printer (Ocorrências)
2022-05-16	67,00 (20,43%)	77,00 (23,48%)	60,00 (18,29%)	123,00 (37,50%)

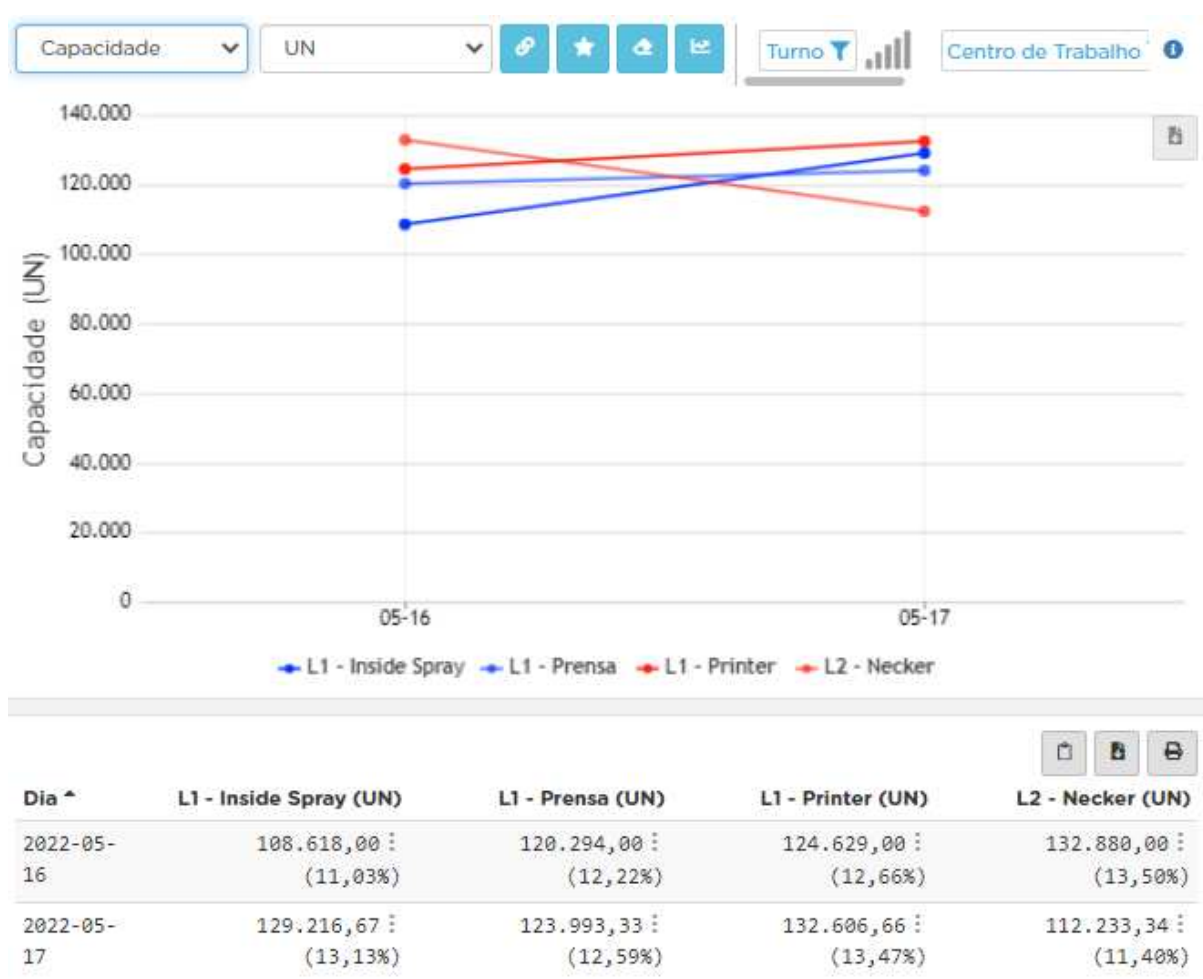
Fonte: Acervo pessoal.

A seguir será analisada relação da capacidade produtiva de cada máquina, sua produção total, a produção de peças boas, descontando os descartes e apresenta uma

estimativa da produção perdida, devido às paradas e demais perdas de performance ao longo da linha.

A Figura 24 apresenta a capacidade total de produção estimada para cada centro de trabalho.

Figura 24 – Capacidade de produção

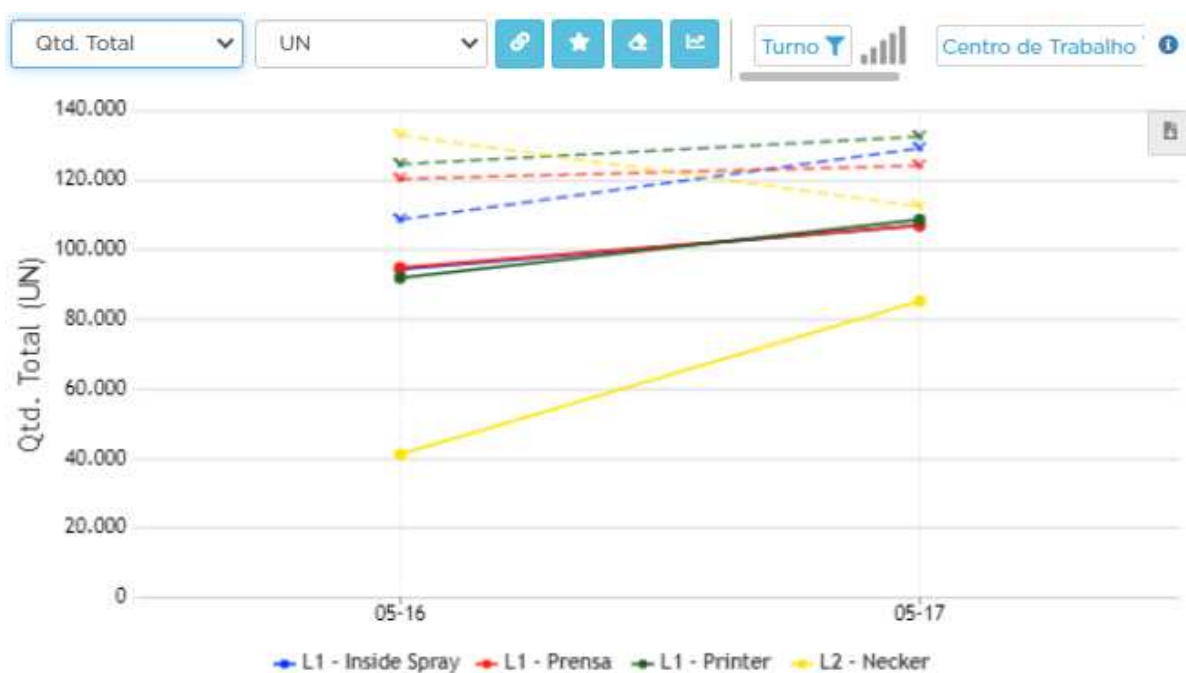


Fonte: Acervo pessoal.

A Figura 25 indica, em linha tracejada, a capacidade de produção e, em linha contínua, a produção total. Percebe-se que o Necker teve baixa produção no período. É esperado, no entanto, que o último centro de trabalho apresente a menor produção, pois deve-se considerar as perdas por qualidade ao longo dos demais processos.



Figura 25 – Quantidade total de peças produzidas

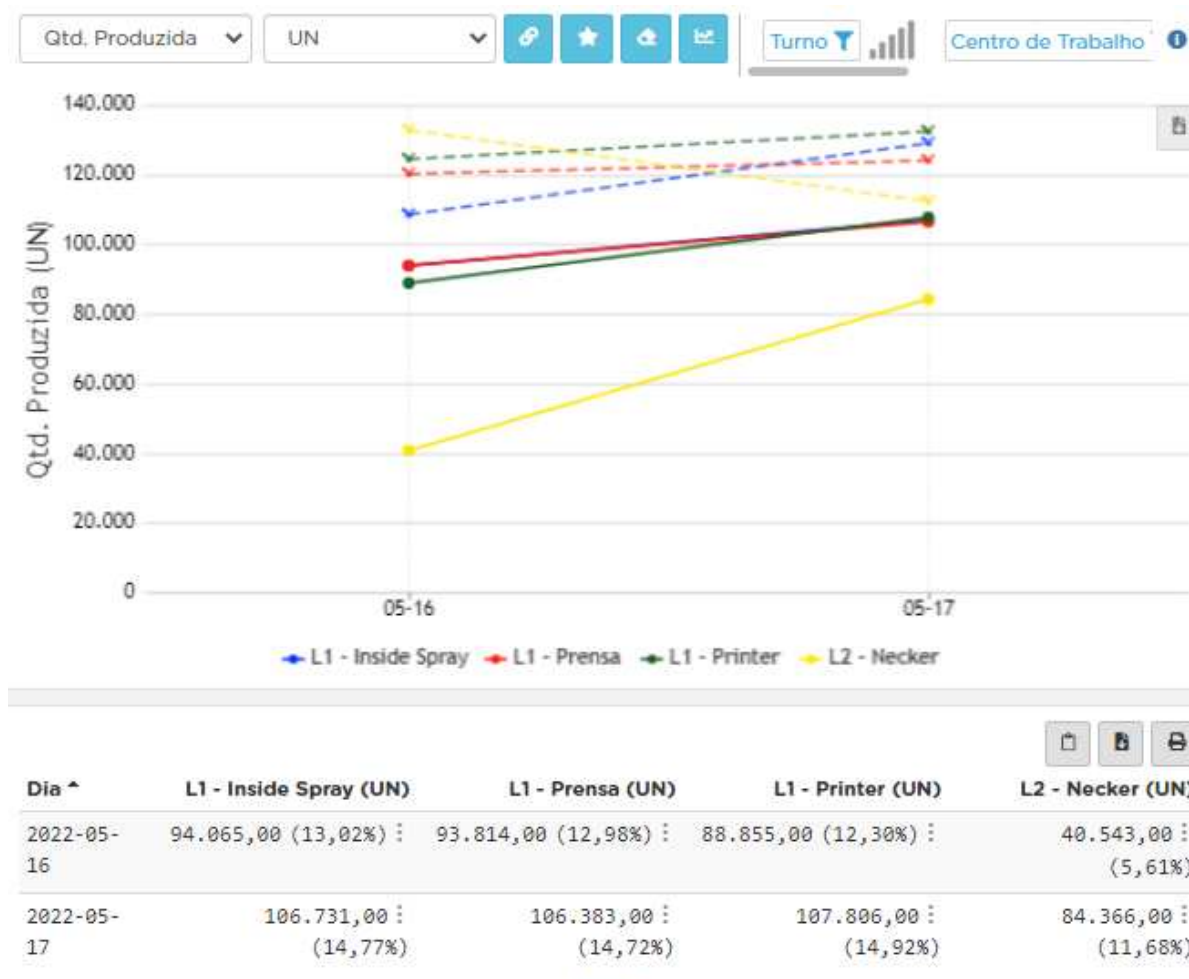


Dia ^	L1 - Inside Spray (UN)	L1 - Prensa (UN)	L1 - Printer (UN)	L2 - Necker (UN)
2022-05-16	94.133,00 (12,91%)	94.895,00 (13,01%)	91.961,00 (12,61%)	40.877,00 (5,61%)
2022-05-17	106.731,00 (14,64%)	107.036,00 (14,68%)	108.582,00 (14,89%)	85.054,00 (11,66%)

Fonte: Acervo pessoal.

Na Figura 26, observa-se o número de peças boas produzidas. O último centro de trabalho, o Necker, possui uma quantidade significativamente menor de peças boas produzidas, sugerindo investigação do motivo do alto valor de descarte ocorrido entre o processo da Printer e do Necker em si. As perdas nas demais células, embora existentes, têm menor discrepância se comparadas a capacidade de produção total.

Figura 26 – Quantidade de peças produzidas



Fonte: Acervo pessoal.

A Figura 27 traz o número de peças descartadas por problemas de qualidade. O Necker teve um valor elevado de perdas no dia 16-05, em uma análise histórica percebe-se que foi um dia atípico, embora este último centro de trabalho se mantenha persistente como a célula onde ocorrem as maiores perdas.

Figura 27 – Estratificação de quantidade perdida



Fonte: Acervo pessoal.

Além da perda de material em peças descartadas, também deve-se considerar o tempo perdido produzindo algo que não será comercializado. A Figura 28 mostra que, a partir do dia 16-05 o Necker sofreu alto impacto em seu tempo de produção, bem como no número de peças descartadas o que, no dia seguinte, retomou um valor menor, tanto de tempo como de quantidade de peças.

Figura 28 – Estratificação de tempo perdido



Fonte: Acervo pessoal.

A partir do maior entendimento das métricas e indicadores disponíveis, parte-se para a seleção dos dados recebidos, bem como visualização dentro da perspectiva abordada pelo algoritmo implementado.

## 4.2 ENTENDIMENTO DOS DADOS

A etapa de entendimento dos dados é onde se identificam as variáveis, de onde os dados serão coletados, sua periodicidade e disponibilidade. Será feita uma análise

gráfica a fim de compreender como os dados coletados podem ser utilizados dentro do modelo desenvolvido na sequência.

Também, nesta etapa, será discutida a qualidade dos dados, a fim de identificar pontos de possíveis melhorias na fase de limpeza. Nela, observar-se-ão a dimensionalidade, formato, coesão e alinhamento aos critérios de sucesso da mineração e sucesso de negócio.

A partir das análises na etapa de entendimento do negócio e, tendo em vista a aplicação do método de período ativo e shifting bottlenecks na fase de modelagem, foram selecionados alguns dados a serem requisitados do banco de dados. A Figura 29 representa o arquivo CSV (comma separated values) recebido do servidor.

Figura 29 – Dados de entrada recebido do banco de dados

L1-E1,2022-05-16 00:00:48,2022-05-16 00:23:58,Uptime,0		
L1-E1,2022-05-16 00:22:42,2022-05-16 00:23:58,Unplanned Downtime,353		
L1-E1,2022-05-16 00:23:58,2022-05-16 00:24:07,Uptime,0		
L1-E1,2022-05-16 00:24:07,2022-05-16 00:24:09,Unplanned Downtime,353		
L1-E1,2022-05-16 00:24:09,2022-05-16 00:24:22,Uptime,0		
L1-E1,2022-05-16 00:24:22,2022-05-16 00:24:51,Unplanned Downtime,353		
L1-E1,2022-05-16 00:24:51,2022-05-16 00:25:02,Uptime,0		
L1-E1,2022-05-16 00:25:02,2022-05-16 00:25:56,Unplanned Downtime,342		

Fonte: Acervo pessoal.

O arquivo traz os dados separados por vírgula, dispostos na seguinte ordem:

- Linha e equipamento
- Data de início do evento
- Data de fim do evento
- Estado
- Motivo

Neste caso, o evento representa o início ou fim de uma parada, seja ela parada planejada ou não planejada, ou o início do período de produção. Vale ressaltar que alguns motivos relacionados a paradas planejadas foram contabilizados como período ativo, de acordo com Roser e Nakano (2001).

Os centros de trabalho estão definidos como:

- **L1-E1:** Prensa
- **L1-E2:** Inside Spray
- **L1-E3:** Printer
- **L1-E4:** Necker

A Figura 30 ilustra a distribuição dos períodos de tempo ativo e inativo ao longo de uma semana.

Figura 30 – Períodos ativos (verde) e inativos (vermelho) de cada centro de trabalho da Linha 01 ao longo de 5 dias



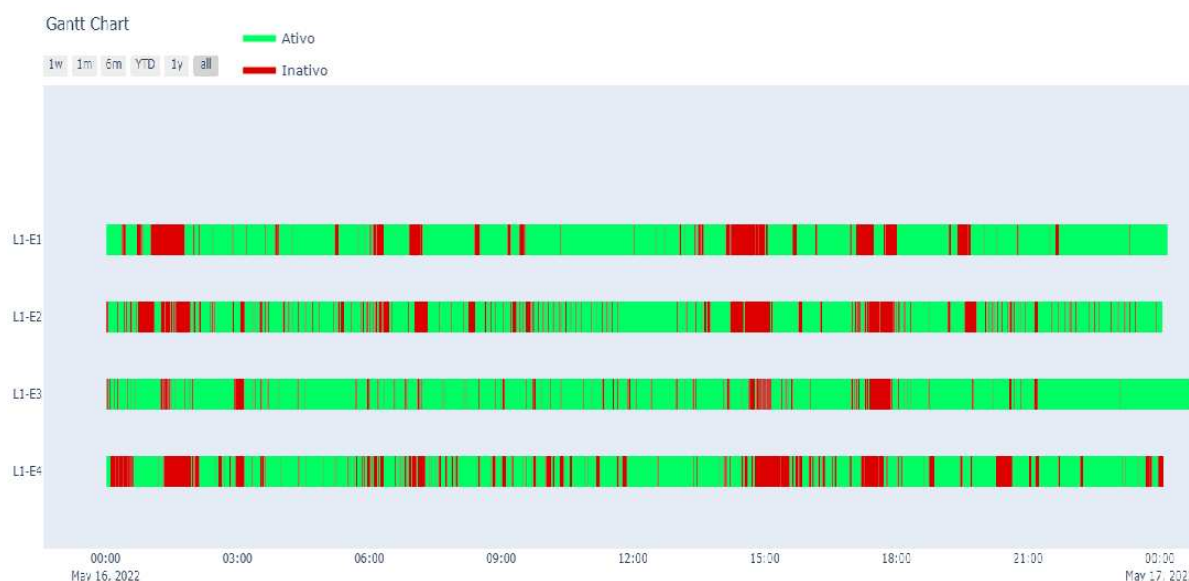
Fonte: Acervo pessoal.

A observação de um período mais longo, como uma semana, auxilia na compreensão de como cada centro de trabalho opera regularmente. Em uma análise temporal nota-se, em algumas células, uma maior uniformidade entre períodos ativos e inativos. Em contrapartida, principalmente na Linha 2, representadas pelas quatro últimas barras horizontais no diagrama de Gantt da Figura 30, que possui maiores períodos inativos.

A decisão por escolher a Linha 1 como foco deste estudo foi tomada após conversa com operadores da fábrica, os quais apontaram maior estabilidade de produção e consistência de apontamentos para esta linha.

Para uma análise pouco mais aprofundada, utiliza-se o recorte de um dia, exposto na Figura 31.

Figura 31 – Períodos ativos (verde) e inativos (vermelho) de cada centro de trabalho da Linha 01 ao longo de 1 dia



Fonte: Acervo pessoal.

Ao longo do dia, percebe-se períodos inativos em certa sincronicidade em determinados momentos, seguidos de períodos de atividade. Alguns centros de trabalho apresentam períodos ativos mais extensos, o que sugere a possibilidade de serem considerados como bottlenecks. Deve-se realizar uma observação em intervalos de tempo menores a fim de vislumbrar, graficamente, potenciais bottlenecks e qualificá-los como sole-bottlenecks ou shifting bottlenecks.

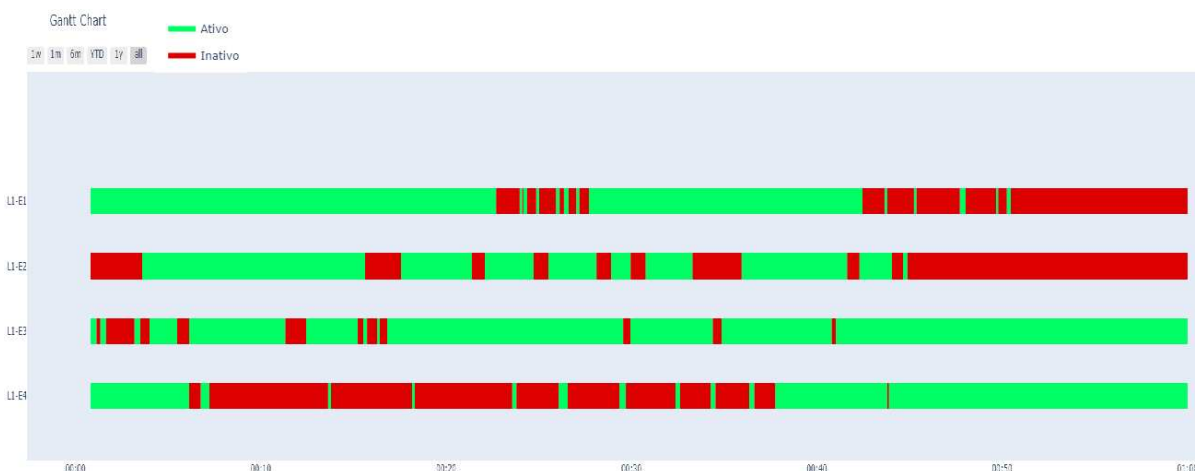
Através do gráfico de uma hora, presente na Figura 32 pode-se ter melhor panorama de possíveis gargalos, observando onde há maior concentração de períodos ativos ininterruptos. Pode-se estimar, empiricamente, onde podem estar ocorrendo shifting bottlenecks. Na próxima seção será iniciada a implementação do algoritmo capaz de apontar quais as maiores probabilidades de encontrar sole bottlenecks e shifting bottlenecks em cada centro de trabalho.

Vale ressaltar que a sequência de vários períodos ativos, porém de menor duração, são considerados como potenciais máquinas non-bottlenecks, o que será verificado posteriormente.

### 4.3 PREPARAÇÃO DOS DADOS E MODELAGEM

Nesta etapa, utilizam-se os dados adquiridos do banco de dados a fim de separar os atributos a serem usados na implementação do algoritmo.

Figura 32 – Períodos ativos (verde) e inativos (vermelho) de cada centro de trabalho da Linha 01 ao longo de 1 hora



Fonte: Acervo pessoal.

A partir dos dados recebidos, foram necessárias algumas etapas de limpeza.

Primeiramente, a verificação e adequação da dimensionalidade de cada coluna. Foi necessária a exclusão de algumas linhas que extrapolaram o intervalo a ser analisado, limitando-as e garantindo o mesmo número de amostras em cada caso.

A seguir, criou-se o atributo de estado, classificado como Ativo ou Inativo, como visto no dataframe exposto na Figura 33. Esta coluna representa os instantes em que o recurso operou em Uptime ou alguma parada prevista, a fim de adequar os dados ao exigido pela fundamentação teórica do algoritmo de período ativo e de shifting bottlenecks.

Figura 33 – Dataframe criado em python a partir dos dados de entrada

index	line	start	end	state	duration
0	0	L1-E1 2022-05-16 00:00:48	2022-05-16 00:22:42	Ativo	1314.0
1	1	L1-E1 2022-05-16 00:22:42	2022-05-16 00:23:58	Inativo	76.0
2	2	L1-E1 2022-05-16 00:23:58	2022-05-16 00:24:07	Ativo	9.0
3	3	L1-E1 2022-05-16 00:24:07	2022-05-16 00:24:09	Inativo	2.0
4	4	L1-E1 2022-05-16 00:24:09	2022-05-16 00:24:22	Ativo	13.0

Fonte: Acervo pessoal.

O dataframe gerado conta com mais um atributo criado a partir das datas de início e fim do evento, possibilitando saber qual a duração, em segundos, de cada evento. Devido a durações extensas, foram realizadas experiências com diferentes quantificações do que representa um instante de tempo. Logo, cada elemento das matrizes









Figura 40 – Representação gráfica da matriz de potenciais bottlenecks



Fonte: Acervo pessoal.

A matriz representada graficamente na Figura 41 indica os instantes em que cada máquina comportou-se como gargalo móvel do sistema.

Figura 41 – Representação gráfica da matriz Shifting bottlenecks



Fonte: Acervo pessoal.

Na Figura 42, encontram-se os instantes de tempo onde os centros de trabalho operaram normalmente.

Figura 42 – Representação gráfica da matriz Sole bottlenecks



Fonte: Acervo pessoal.

No próximo capítulo serão discutidos os resultados obtidos através da aplicação deste algoritmo aos estados de cada centro de trabalho e como foram classificados e quantificados.

## 5 RESULTADOS

Após a implementação do algoritmo e sua valoração a partir dos dados de entrada, são analisados os resultados obtidos. Na análise dos valores de saída foram avaliados os centros de trabalho com diferentes intervalos de tempo, a fim de elucidar como a classificação do comportamento muda para cada período.

Como o algoritmo utiliza a média dos estados dentro do intervalo, percebeu-se que a avaliação em períodos menores que 6 minutos não representaram corretamente a realidade. Para 6.7 minutos, como mostra a Figura 43 foram utilizadas 60 amostras, cada amostra contendo a duração de 5 segundos. Menos amostras implicaram em erros de simulação.

Figura 43 – Resultado do algoritmo limitado a 6 minutos

```
Time interval: 6.7 min
Shifting bottlenecks E1 = 100.00%
Shifting bottlenecks E2 = 87.50%
Shifting bottlenecks E3 = 55.00%
Shifting bottlenecks E4 = 57.50%
Sole bottlenecks E1 = 12.50%
Sole bottlenecks E2 = 0.00%
Sole bottlenecks E3 = 8.75%
Sole bottlenecks E4 = 17.50%
```

Fonte: Acervo pessoal.

Comparando os resultados obtidos a análise ilustrada na Figura 32, percebe-se a consistência dos valores obtidos.

Neste caso, a Prensa apresenta durante todo o período o comportamento de shifting bottleneck, distribuído ao longo da linha, diminuindo sua presença nas máquinas subsequentes. Embora a primeira célula da linha esteja durante todo o período como ativa, as outras máquinas também oferecem sua contribuição, ou seja, observando a distinção dos resultados indicados como sole bottlenecks, nota-se que em apenas 12.5% do tempo a primeira célula atuou como único gargalo do sistema, tendo contribuição, também, e com maior parcela, o Necker, embora não esteja tão distante do tempo como gargalo da Prensa.

A Figura 44 representa a ampliação do intervalo de análise para 10 minutos, o que começa a mudar a característica de onde se encontram os gargalos, evidenciando, assim, o comportamento dinâmico deste fenômeno.

Neste caso, a Prensa e a Printer apresentam-se com maior proporcionalidade

Figura 44 – Resultado do algoritmo limitado a 10 minutos

```
Time interval: 10.0 min
Shifting bottlenecks E1 = 100.00%
Shifting bottlenecks E2 = 58.33%
Shifting bottlenecks E3 = 70.00%
Shifting bottlenecks E4 = 71.67%
Sole bottlenecks E1 = 41.67%
Sole bottlenecks E2 = 0.00%
Sole bottlenecks E3 = 39.17%
Sole bottlenecks E4 = 11.67%
```

Fonte: Acervo pessoal.

como gargalos únicos do sistema, embora a avaliação sugira maior disseminação da característica de shifting bottleneck ao longo do sistema.

Tanto na Figura 43 e na Figura 44, a Inside Spray, denotada na figura como E2, apresenta 0% de característica de gargalo único. Embora tenha sido um gargalo momentâneo, aparecendo, então, como shifting bottleneck, ela não apresenta o comportamento de atuação como gargalo único em nenhum dos instantes de tempo analisados, o que a torna um centro de trabalho non-bottleneck.

Aumentando o intervalo de análise para 60 minutos, como ilustrado na Figura 45, o algoritmo apresenta um panorama do sistema dissolvido em outros momentos, indicando uma visão mais ampla do que está ocorrendo na fábrica. Esta observação torna-se importante a fim de eliminar dúvidas sobre o comportamento em um curto período, onde quaisquer eventualidades não comumente observadas podem ocorrer.

Figura 45 – Resultado do algoritmo limitado a 1 hora

```
Time interval: 60.0 min
Shifting bottlenecks E1 = 65.28%
Shifting bottlenecks E2 = 50.83%
Shifting bottlenecks E3 = 88.89%
Shifting bottlenecks E4 = 54.58%
Sole bottlenecks E1 = 42.78%
Sole bottlenecks E2 = 28.33%
Sole bottlenecks E3 = 43.33%
Sole bottlenecks E4 = 4.86%
```

Fonte: Acervo pessoal.

Com uma análise mais ampla, pode-se descartar a possibilidade de algum centro de trabalho estar apresentando problemas. Caso a proporcionalidade da célula classificada como sole bottleneck se mantenha elevada em todas as análises com diferentes intervalos de tempo, deve-se considerar um diagnóstico em outros indicadores e métricas presentes no LiveMES ou uma avaliação *in loco* de possíveis problemas que estejam comprometendo a performance da linha.

Por fim, após avaliação em outros períodos utilizando os dados históricos presentes no LiveMES, constatou-se que o algoritmo implementado é capaz de oferecer uma forma complementar para guiar a gestão da empresa na tomada de decisões em relação a manutenção dos centros de trabalho ou, mesmo, o diagnóstico de possíveis falhas operacionais que estejam comprometendo a disponibilidade e a performance da célula de trabalho.

Após a conclusão e demais validações no chão de fábrica, pode-se avaliar a implementação deste algoritmo como um indicador presente na interface do LiveMES para alguns clientes. Essa implementação, no entanto, está sujeita a restrições do modelo de negócio da empresa, visto que a implementação exige dados de estado de máquina, apontamentos de parada feitos de forma consistente pelos operadores, haja vista da importância de alguns apontamentos para classificação do estado como ativo ou inativo. Além disso, os centros de trabalho devem estar em sequência, a fim de observar o critério de shifting bottlenecks de um processo para o outro.

## 6 CONCLUSÃO E SUGESTÕES

O estudo foi realizado em empresa com uma linha de produção sequencial e balanceada, a qual está comprometida com a melhora de seus processos. Tal comprometimento incentiva que os operadores façam bom uso da plataforma LiveMES e mantenham os apontamentos de paradas atualizado. O uso correto do sistema é imprescindível para resultados mais acurados por parte do algoritmo implementado.

Portanto, a reprodução deste trabalho em outras empresas com modelos de negócio distintos deve-se atentar ao modo de uso da plataforma. A reprodução deste trabalho deve levar em conta o número de paradas apontadas pelo número de paradas sem um apontamento de motivo, visto que a falta destes dados comprometer os resultados e, conseqüentemente, induzir a erros de interpretação, caso os resultados sejam analisados de forma individual.

Este estudo busca ser um indicador complementar, a fim de auxiliar na tomada de decisões partindo das métricas, indicadores e tendências analisadas na ferramenta analítica do LiveMES. Desta forma, pode oferecer aos gestores um panorama sobre a dinâmica dos gargalos ao longo do sistema produtivo, indicando quando, onde ou mesmo se devem realizar alguma ação de manutenção, seja ela do âmbito corretivo ou preventivo.

Os objetivos a que este trabalho se propôs foram contemplados. Após validação dos resultados em ambiente de desenvolvimento, pode-se partir para o ambiente de produção, visando complementar análises de governança de recursos por parte dos gestores da empresa.

Para a reprodução deste trabalho em momentos futuros, indica-se uma avaliação dos dados gerados pela empresa de interesse, para que tenham apontamentos de paradas de forma consistente e que sejam bem definidos os motivos de paradas considerados como em período ativo e período inativo.

A avaliação deste modelo em tempo real utiliza os dados históricos compreendidos dentro de um intervalo de análise, de seis minutos a uma hora. O último instante de tempo analisado, o qual possua maior valor acumulado pela matriz B, é apresentado como gargalo atual do sistema. Em trabalhos futuros, esta informação pode ser utilizada na interface da plataforma, visível aos operadores da fábrica, visando indicar qual máquina está, atualmente, comportando-se como um gargalo momentâneo, bem como qual(is) centros de trabalho apresentam características de sole, shifting e non-bottlenecks.



## 7 REFERÊNCIAS

- BETTERTON, C. E.; SILVER, S. J. **Detecting bottlenecks in serial production lines—a focus on interdeparture time variance**. International Journal of Production Research, 2012.
- BLACKSTONE, J. H. **Theory of constraints - a status report**. International Journal of Production Research, 2001. 1053p.
- CABENA, Peter et al. **Discovering data mining: from concept to implementation**. New Jersey: Prentice Hall, 1997.
- CHIANG, S.Y.; KUO, C.T.; MEERKOV, S. M. **Bottlenecks in Serial Production Lines: Identification and Application**. Mathematical Problems in Engineering, 2002.
- GOLDRATT, E. M. **The Goal: A Process of Ongoing Improvement**. North River Press, 1992.
- LAW, A. M.; KELTON, D. W. **Simulation Modeling & Analysis**. McGraw Hill, 2000.
- LAWRENCE, R. S.; BUSS, A. H. **Shifting production bottlenecks: Causes, cures and conundrums**. Production and Operations Management, p21–37, 1994.
- LENGYEL, L. **Validating rule-based algorithms**. Acta Polytechnica, 2015.
- LI, L.; CHANG, Q.; NI, J. **Data driven bottleneck detection of manufacturing systems**. International Journal of Production Research, 47, 5019–5036, 2009.
- MOSS, H. K.; YU, W. B. **Toward the Estimation of Bottleneck Shiftiness in a Manufacturing Operation**. Production and Inventory Management Journal, p53-58, 1999.
- OAKLEY, B. **A mind for numbers: how to excel at math and science (even if you have flunked algebra)**. 1. Ed. Londres: Penguin, 2014.
- PIRSIG, R. M. **Zen e a arte da manutenção de motocicletas: uma investigação sobre os valores**. 2. ed. São Paulo: M. Fontes, 2009.
- PETE, C.; JULIAN, C.; RANDY, K.; THOMAS, K.; THOMAS, R.; COLIN, S.; WIRTH, R. **Crisp-Dm 1.0**. CRISP-DM Consortium (CRISPMWP-1104). Chicago, IL, 2000.
- ROSER, C.; NAKANO, M.; TANAKA, M. **A practical bottleneck detection method**. Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference, p949-951, 2001.
- ROSER, C.; LORENTZEN, K.; LENZE, D.; DEUSE, J.; KLENNER, F.; RICHTER, R.; SCHMITT, J.; WILLATS, P. **Bottleneck Prediction Using the Active Period Method in Combination with Buffer Inventories**. IFIP Advances in Information and Communication Technology, 2017.
- SENGUPTA, S.; DAS, K.; VANTIL, R. P. **A new method for bottleneck detection**. Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference, p1741–1745, 2008.
- UZSOY, R.; WANG, C. S. **Performance of decomposition procedures for**

---

**job shop scheduling problems with bottleneck machines.** International Journal of Production Research, p1271-1286, 2000.