

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

**BRUNO GOULART SATO
WILLIAN MESQUITA GASQUES**

**APLICAÇÃO DA CURVA DE APRENDIZADO E ESQUECIMENTO NO
PLANEJAMENTO E PROGRAMAÇÃO DA PRODUÇÃO EM UMA INDÚSTRIA
METALÚRGICA**

**LONDRINA
2023**

**BRUNO GOULART SATO
WILLIAN MESQUITA GASQUES**

**APLICAÇÃO DA CURVA DE APRENDIZADO E ESQUECIMENTO NO
PLANEJAMENTO E PROGRAMAÇÃO DA PRODUÇÃO EM UMA INDÚSTRIA
METALÚRGICA**

**Application of the learning and forgetting curve in the planning and scheduling
of production in a metallurgical industry**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentada como requisito para obtenção do título de Bacharel e Licenciatura em engenharia de produção da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: José Ângelo Ferreira.

Coorientador: Edson Luiz Valmorbida

LONDRINA

2023



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

BRUNO GOULART SATO
WILLIAN MESQUITA GASQUES

**APLICAÇÃO DA CURVA DE APRENDIZADO E ESQUECIMENTO NO
PLANEJAMENTO E PROGRAMAÇÃO DA PRODUÇÃO EM UMA INDÚSTRIA
METALÚRGICA**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel e Licenciatura em Engenharia de Produção
da Universidade Tecnológica Federal do Paraná
(UTFPR).

Data de aprovação: 27 de novembro de 2023

José Angelo Ferreira
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Silvana Rodrigues Quintilhano
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Rogério Tondato
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

LONDRINA
2023

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, expressamos nossa profunda gratidão a Deus, cuja presença fortaleceu nossa resiliência e nos concedeu a capacidade de enfrentar desafios ao longo destes anos. Agradecemos ao Professor José Angelo por depositar confiança em nosso trabalho, proporcionando orientação e direção essenciais para o sucesso deste projeto. Reconhecemos também a valiosa contribuição do Professor Edson Valmorbida, cujo apoio foi fundamental para lidarmos com as complexidades matemáticas intrínsecas a esta pesquisa.

Estendemos nossa gratidão a todo o corpo docente da universidade, cujo comprometimento e dedicação foram fundamentais em nossa jornada acadêmica, desde o primeiro até o último dia de aula. Aos familiares, expressamos nosso sincero agradecimento pelo constante apoio e incentivo, acreditando no poder transformador da educação em nossas vidas.

Aos colegas de faculdade, que compartilharam conosco esta significativa jornada em busca de um objetivo comum, enfrentando juntos os desafios que surgiram ao longo deste período, expressamos nossa admiração e reconhecimento pela união e companheirismo demonstrados.

RESUMO

A curva de aprendizado, fundamental na gestão e produção, visualmente representa a relação temporal com o desempenho em uma tarefa. Este estudo busca ampliar a compreensão ao incorporar o esquecimento, uma dimensão pouco explorada em estudos anteriores. A complexidade inerente ao planejamento e controle da produção resulta da interação de diversas variáveis ao longo do processo produtivo. Com o propósito de revalidar o modelo LFRCM para aprimorar o auxílio ao Planejamento e Controle da Produção (PCP), esta pesquisa propõe a aplicação do modelo, integrando os conceitos de aprendizagem, esquecimento e reaprendizagem, em uma indústria metalúrgica. O modelo LFRCM, por meio do aprendizado e esquecimento, estabelece os tempos de produção pós-interrupção ao aplicar o princípio de reaprendizado. Os resultados evidenciam que o LFRCM emerge como uma ferramenta confiável, capacitando o PCP a realizar uma gestão mais eficiente de recursos, promovendo a otimização operacional. A inclusão do esquecimento como variável relevante proporciona uma visão mais abrangente das dinâmicas temporais, contribuindo para a melhoria da eficiência operacional em ambientes industriais complexos. Esse enfoque integrado na gestão do conhecimento operacional contribui substancialmente para o avanço teórico e prático no campo do PCP.

Palavras-chave: Curva de Aprendizado; Curva de Esquecimento; Aprendizado Esquecimento; Curva de Aprendizado e Esquecimento.

ABSTRACT

The learning curve, essential in management and production, visually represents the temporal relationship with performance in a task. This study aims to broaden understanding by incorporating forgetting, a dimension scarcely explored in previous studies. The inherent complexity in production planning and control results from the interaction of various variables throughout the production process. With the purpose of reaffirming the LFRCM model to enhance support for Production Planning and Control (PPC), this research proposes the application of the model, integrating the concepts of learning, forgetting, and relearning, within a metallurgical industry. The LFRCM model, through learning and forgetting, establishes post-interruption production times by applying the principle of relearning. The results demonstrate that LFRCM emerges as a reliable tool, enabling PPC to conduct more efficient resource management, promoting operational optimization. The inclusion of forgetting as a relevant variable provides a broader view of temporal dynamics, contributing to improved operational efficiency in complex industrial environments. This integrated approach to operational knowledge management substantially contributes to theoretical and practical advancements in the field of PPC.

Keywords: Learning Curve; Forgetting Curve; Learning Forgetting; Learning Forgetting Curve.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Conferência entre o modelo de Plateau	19
Figura 2 - Curva de esquecimento de Ebbinghaus	20
Figura 3 - Comparação dos modelos determinísticos	24
Figura 4 - Fator de esquecimento pelo modelo LFCM	26
Figura 5 - Desempenho do operador 1	32
Figura 6 - Desempenho do operador em cada dia da semana	33
Figura 7 - Aprendizado do operador ao longo da semana	34
Figura 8 - Inclinação e intersecção da reta do operador	36
Figura 9 - Dias analisados x Dias projetados	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados gerais de produção	30
Tabela 2 - Inclinação e interceptação.....	33
Tabela 3 - Fator de esquecimento calculado para o operador em cada parada	35
Tabela 4 - Média dos fatores de esquecimento.....	35
Tabela 5 - Inclinação e intersecção da reta do operador	36
Tabela 6 - Inclinação e interceptação do operador	37
Tabela 7 - Índices de esquecimento calculados.....	38
Tabela 8 - Tempo de retorno projetados	38
Tabela 9 - Cálculo das diferenças das médias.....	39
Tabela 10 - Projeção de Retorno do operador	39
Tabela 11 - Tempo projetado x Tempo observado.....	41

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1 Objetivos	14
1.1.1 Objetivo Geral	14
1.1.2 Objetivos Específicos	14
1.2 Justificativa.....	15
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	16
2.1 Extensões de modelos de curva de aprendizado.....	18
2.2 Curva de esquecimento	20
2.3 Modelos determinísticos	22
2.4 Modelo LFRCM	25
3 METODOLOGIA	28
3.1 Natureza da pesquisa.....	28
3.2 Tipo de pesquisa	28
3.3 Método de pesquisa	28
3.4 Coleta de dados.....	29
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE DADOS	30
4.1 Apresentação do desempenho do operador	32
4.2 Aprendizado do operador.....	33
4.3 Aplicação do modelo Lindeke.....	34
4.3.1 Cálculo das médias dos fatores de esquecimento	35
4.4 Aplicação do modelo LFRCM.....	36
4.4 Reaprendizado do operador.....	38
5. DISCUSSÕES E RESULTADOS	41
6 CONCLUSÃO	43

1. INTRODUÇÃO

O trabalho repetitivo é caracterizado pela execução constante de tarefas similares ou idênticas, aumentando a experiência de trabalho e excelência ao ser executado por parte dos colaboradores, sendo assim, em tarefas repetitivas, a curva de aprendizado pode ser uma ferramenta útil para monitorar o desempenho dos trabalhadores ao longo do tempo para monitorar e prever. (ANZANELLO; FOGLIATTO, 2007).

Este tipo de análise surgiu com a publicação de Wright (1936), engenheiro responsável por produzir aviões, na primeira guerra mundial. Conhecido como “modelo potencial” é a curva pioneira que explica este tipo de relação. De maneira inquestionável, a curva potencial é o modelo de curva de aprendizado mais empregado na previsão da produtividade.

Ao longo dos anos, a curva potencial foi amplamente utilizada, porém diversos pesquisadores notaram a ineficiência em alguns estudos, sendo assim, surge a necessidade de ajustes de alguns parâmetros relevantes na equação proposta, como a limitação prévia do trabalhador, o emprego de processos automatizados, entre outros, desta forma, surge a necessidade de adaptação para cada cenário proposto. (ANZANELLO; FOGLIATTO, 2007).

A tecnologia construtiva baseada na estrutura metálica emergiu no século XVIII, e no Brasil, foi implementada a partir do ferro fundido na segunda metade do século XIX (FERNANDES, 2017). Atualmente, cerca de 65% das construções em países avançados são feitas em estruturas metálicas (SEBRAE, 2023).

O emprego do aço na construção civil é um exemplo de inovação que permitiu grandes avanços no emprego de novas tecnologias que reduzem drasticamente os custos em uma obra, utilizado como um material reciclável, alta durabilidade e um processo produtivo menos agressivo ao meio ambiente.

Diante dessa expansão, é necessário o uso eficiente de capital humano nos processos produtivos, analisar quais fatores que afetam a produtividade. Este estudo tem como objetivo analisar tarefas repetitivas empregadas por trabalhadores em uma indústria metalúrgica situada no norte do Paraná.

Na produção contemporânea, a curva de aprendizado é empregada para estimar custos e produção, no qual o trabalhador é avaliado e feito uma estimativa de desempenho na função exercida. Desta forma, em um cenário com diversas variáveis

a serem controladas, interrupções na produção fazem parte do dia a dia, sendo elas programadas ou não.

Apesar dos inúmeros estudos direcionados à predição das taxas de aprendizagem dos trabalhadores, os frequentes intervalos causados por interrupções no processo de produção têm levado os pesquisadores a concentrarem seus esforços na compreensão do impacto desse esquecimento na organização da produção.

Como o modelo *Learning Forgetting Relearning Curve* (LFRCM) de Ferreira et al. (2021) pode ser aplicado para otimizar a produção de trabalhadores envolvidos na fabricação de um item específico, considerando o impacto das interrupções na aprendizagem, esquecimento e reaprendizagem durante o processo?

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Este estudo tem como objetivo comprovar a aplicação do modelo LFRCM (FERREIRA *et al.*, 2021) em uma indústria de estrutura de aços para construção civil, que será replicado e calculado em uma base de dados de produção, calculando a sua variância de acordo com o modelo, sendo assim, se ocorre o esquecimento, aprendizado e reaprendizado.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Levantar um referencial teórico sobre a curva de aprendizagem e esquecimento e do modelo LFRCM;
- Realizar uma coleta de dados por meio das informações das ordens de produção em um processo produtivo da indústria escolhida;
- Aplicar o modelo escolhido nos dados obtidos;
- Investigar os resultados do modelo escolhido a fim de confirmar sua aplicação.

1.2 Justificativa

Pesquisar sobre a relação existente entre a curva de aprendizado e esquecimento de um processo produtivo no planejamento e programação da produção possui uma tripla relevância: científica, pessoal e social.

Visando corroborar com o entendimento do impacto de interrupções e desenvolvimento do operador, o estudo desta aplicação utiliza-se de conhecimento científico sobre a curva de aprendizagem e esquecimento.

O propósito deste estudo é contribuir com o Planejamento e Controle da Produção (PCP) de uma indústria de aços, a fim de elaborar o tempo necessário para um operador produzir uma certa quantidade de produtos.

Ao ajustar o planejamento e a programação da produção, é possível obter diversos benefícios, tais como a redução de custos e de estoque, o conhecimento da capacidade produtiva da empresa e a obtenção de um *lead time* mais assertivo (KAIHATU; BARBOSA, 2006).

2. REFERENCIAL TEÓRICO

As primeiras investigações sobre aprendizagem se focaram no comportamento de indivíduos isolados, revelando que o tempo necessário para realizar uma tarefa repetitiva diminuiu progressivamente à medida que a experiência com a mesma aumentou, conforme evidenciado por (Thorndike, 1898; Thurstone, 1919).

À medida que repetições são efetuadas, o trabalhador demanda menos tempo para a execução da tarefa, seja pela familiaridade adquirida com os meios de produção, seja pela adaptação às ferramentas utilizadas ou pela descoberta de “atalhos” para realização da tarefa (DAR-EL, 2000, p. 18).

A primeira tentativa de formular relações entre variáveis de aprendizagem de forma quantitativa foi desenvolvida em uma indústria aeronáutica por Wright, e resultou na teoria da curva de aprendizagem, Wright documentou o fenômeno da aprendizagem no processo produtivo de aviões, observando, que o tempo unitário da fabricação de um avião diminuía a uma taxa constante, cada vez que a produção dobrava, afetando diretamente o custo do produto (WRIGHT, 1936).

Esse comportamento foi registrado experimentalmente e os dados foram ajustados a uma equação que descreve de forma precisa a linha de tendência e os pontos dispersos ao seu redor. O modelo pioneiro da curva de aprendizagem desenvolvido por Wright em 1936, conhecido também como modelo potencial (WRIGHT, 1936). Esse ajuste permitiu uma melhor compreensão do fenômeno estudado, além de ter possibilitado a realização de previsões confiáveis para outros casos similares (ANZANELLO; FOGLIATTO, 2007).

As curvas de aprendizado constituem ferramentas amplamente reconhecidas para a estimativa de custos, tendo sido desenvolvida uma diversidade de curvas com o intuito de modelar empiricamente a melhoria decorrente da prática em uma dada tarefa (BAILEY; MCINTYYRE, 2003 *apud* YELLE, 1979).

A utilização das curvas de aprendizagem na análise e programação de tarefas produtivas pode trazer diversos benefícios, como a redução das perdas decorrentes da inexperiência do trabalhador. Essas perdas são mais frequentes nos primeiros ciclos de produção, quando o trabalhador ainda está se adaptando às demandas da tarefa. Ao se basear nas informações fornecidas pelas curvas de aprendizagem, é possível estabelecer metas realistas de desempenho e traçar estratégias para

aprimorar as habilidades do trabalhador ao longo do tempo (ARGOTE, 1999; DAR-EL, 2000).

O fenômeno da curva de aprendizado relatado por Wright implica que o tempo de produção da unidade diminui em uma porcentagem constante (por exemplo, 90%, 80%, etc.) cada vez que a quantidade acumulada produzida dobra (NADLER; SMITH, 1993).

Yelle (1979) sugeriu que as curvas de aprendizado potenciais sejam usadas juntamente com o Modelo do Ciclo de Vida do Produto para gerenciar a produção de um produto ao longo de sua vida útil, proporcionando uma abordagem mais completa e eficaz.

A avaliação do desempenho do trabalhador na realização de uma tarefa pode ser realizada através da análise das seguintes variáveis de resposta: o tempo necessário para produzir uma unidade, a quantidade de unidades produzidas em um intervalo de tempo determinado, redução dos custos por unidade produzida, e a porcentagem de unidades defeituosas em relação ao número de repetições de uma mesma operação. Isso permite uma avaliação mais completa e precisa do desempenho do trabalhador (TEPLITZ, 1991; FRANCESCHINI; GALETTO, 2002).

O modelo pioneiro da curva de aprendizagem é conhecido como modelo potencial, desenvolvido por Wright (1936) é descrito na equação a seguir:

$$T_x = T_1 x^b \quad (1)$$

As variáveis que são percebidas por Wright são: T_x onde caracteriza o tempo médio necessário para produzir x unidades, T_1 o tempo da primeira unidade produzida, e b é a declividade da curva de aprendizagem.

A declividade da curva de aprendizagem do trabalhador, ou também chamado slope de aprendizado (expressa em porcentagem) é calculada matematicamente, e seu valor varia de -1 a 0 (BADIRU, 1992).

Através da equação 2, é possível manipular o modelo de Wright para calcular o tempo total exigido na produção de x unidades:

$$T_{1 \rightarrow x} = T_1 x^{b+1} \quad (2)$$

E através da equação 3 é possível calcular o tempo exigido para produzir uma unidade específica:

$$T_x = T_1 [x^{b+1} - (x-1)^{b+1}] \quad (3)$$

A abordagem do modelo potencial, segundo Globerson e Levin (1987), é útil para descrever com precisão a maioria das tarefas baseadas em procedimentos repetitivos, oferecendo a vantagem de ser matematicamente simples.

Mesmo diante da considerável aplicação do modelo potencial, a sua eficácia é afetada em situações específicas, como em ciclos prolongados de produção, em que pode gerar previsões inexatas de tempo de execução, próximas a zero. Também em situações em que o operador adquire um grau elevado de fadiga, influenciando consideravelmente o tempo de produção, a fim de contornar essas limitações, sugere-se o incremento de parâmetros adicionais ao modelo, visando melhorar sua precisão preditiva (WATERWORTH, 2000; UZUMERI; NEMBHARD, 1998).

Uma outra limitação do modelo de Wright é que ele não leva em consideração a experiência prévia do trabalhador em uma determinada operação, a qual é um fator determinante para que este trabalhador tenha um desempenho superior em relação a outro que nunca executou a mesma tarefa. Portanto, a falta de referência à experiência anterior do trabalhador pode ser considerada uma limitação importante deste modelo (GLOBERSON *et al.*, 1989).

2.1 Extensões de modelos de curva de aprendizado

Para Anzanelo e Fogliatto (2007), o surgimento de modelos diferenciados de curvas univariadas e multivariadas foi impulsionado pela demanda por avaliação do desempenho de trabalhadores. Tais modelos são compostos por funções matemáticas de níveis diversos de complexidade, o que viabiliza a descrição do processo de aprendizagem em variados segmentos e realidades. Dentre as extensões de modelos, alguns se destacam de acordo com os parâmetros adicionados.

O modelo de DeJong avalia o efeito da automação na participação do processo de aprendizagem, seu modelo é representado na equação 4 a seguir:

$$y = C_1[M + (1 - M)x^b] \quad (4)$$

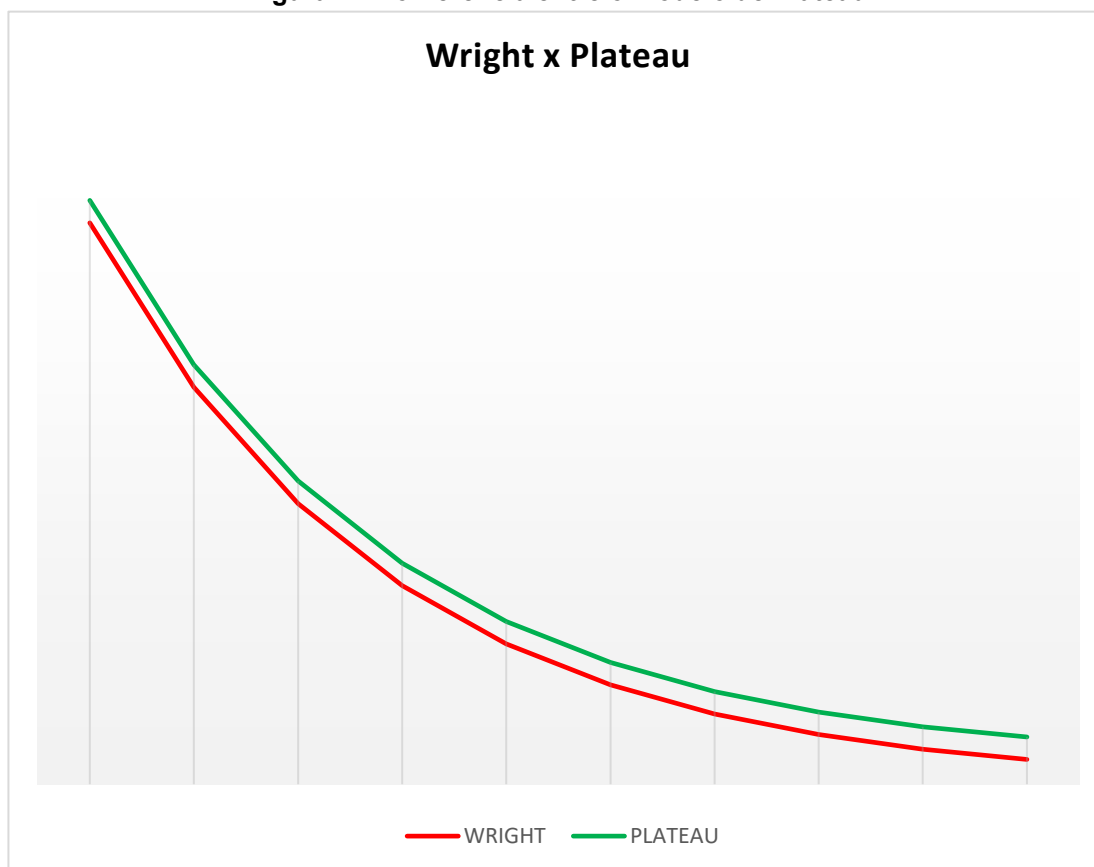
O fator de automação representado por M indica a proporção do tempo total de operação que é dedicada a procedimentos automatizados, que varia de 0 a 1. O nível de automação é avaliado por regressão e quanto mais próximo de 1, maior será sua automação. (YELLE, 1979; BADIRU, 1992).

No modelo de Plateau, foi adicionado uma constante C que é capaz de reproduzir o desempenho do trabalhador em um estado estacionário, seja devido à proximidade da conclusão do processo de aprendizado ou a limitações impostas pelo maquinário que afetam o avanço do trabalhador na execução da tarefa. A constante C é um fator determinante no tempo previsto para a conclusão da tarefa, sendo que sua influência é mais perceptível quando o número de repetições x é elevado (YELLE, 1979; TEPLITZ, 1991).

$$T_x = C + T_1x^b \quad (5)$$

A Figura 1 ilustra a comparação entre o modelo de Wright e o modelo de Plateau, no qual a constante C é mais evidente.

Figura 1 - Conferência entre o modelo de Plateau

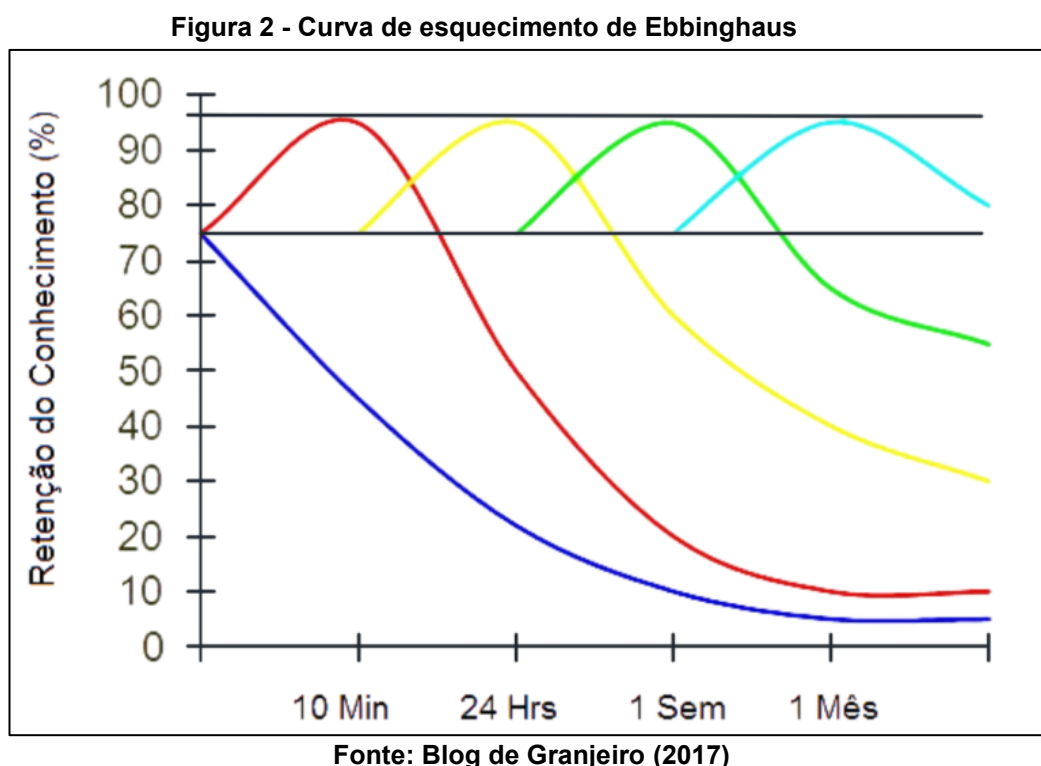


Fonte: Adaptado de Anzanello e Foglia (2023, p. 116)

2.2 Curva de esquecimento

No ano de 1880, o psicólogo Hermann Ebbinghaus iniciou as primeiras investigações sobre os temas da memória e esquecimento, elaborando a curva de esquecimento. A partir deste trabalho, foram desenvolvidos métodos de investigação com o objetivo de minimizar o efeito da curva de esquecimento (DA COSTA RIOS, 2021).

A Figura 2 ilustra a primeira curva de esquecimento elaborado por Ebbinghaus.



As diversas teorias sobre a curva de aprendizado, tiveram um impacto significativo na compreensão do fenômeno da aprendizagem humana, que é resultado da repetição de uma atividade e de como isso afeta o processo produtivo. No entanto, essas teorias não abordam o fenômeno do esquecimento, que é semelhante à aprendizagem na medida em que aumenta com a interrupção voluntária ou involuntária da tarefa, como férias, rotatividade de pessoal, mudança

de setup, entre outras, e pode ter um impacto negativo na produtividade (JABER, 2006).

Segundo Globerson (1996) uma das principais razões pelas quais o esquecimento não foi implementado em modelos pioneiros foi provavelmente devido às dificuldades práticas na obtenção de dados sobre o nível de esquecimento como função do tempo é difícil, ou mesmo impossível, para obter mais de um conjunto de pontos de dados relacionados à quantidade de esquecimento ao comprimento de interrupção.

Segundo Ferreira

As curvas de esquecimento que modelam esquecimento de um trabalhador, tem se mostrado, quando utilizadas em complemento as curvas de aprendizagem, uma ferramenta importante para a programação da produção, por permitirem a predição de entrega dos lotes de fabricação, ao computarem a perda de aprendizagem de um trabalhador, provocadas pelas interrupções no processo de fabricação (FERREIRA *et al.* 2022, p. 7).

Uma teoria possível para explicar o esquecimento é a do desuso, que afirma que a falta de uso da informação leva ao esquecimento, o que significa que esse processo é afetado pelo tempo decorrido. No entanto, descobertas mostram que essa teoria não é suficiente e ao mesmo tempo não poderia ser invalidada, pois as atividades realizadas durante o intervalo também afetam o esquecimento (JABER; GIVI; NEUMANM, 2013).

Quando as tarefas são mais similares entre si, há uma tendência de ocorrer um menor grau de esquecimento da tarefa principal. Isso pode ser explicado pelo fato de que a similaridade entre as tarefas pode levar a uma maior facilidade de recuperação da informação, bem como a uma maior eficiência na utilização dos recursos cognitivos, reduzindo assim a interferência entre as tarefas. Dessa forma, pode-se inferir que a similaridade entre as tarefas desempenha um papel importante no processo de retenção de informações (HOEDT *et al.*, 2019).

A consideração do esquecimento e de outros fatores que afetam os ganhos de produtividade pode permitir que os gerentes tomem decisões mais assertivas com um número maior de informações sobre a programação de produção (CHAND; TEYARACHAKU; WARD, 2011).

Conforme Shtub, Levin e Globerson (1993) o esquecimento pode ser mensurado através de uma função da quantidade que o operador já aprendeu até o momento e a duração da interrupção, e quanto maior for a interrupção maior será o esquecimento, conseqüentemente o tempo necessário para produzir os próximos produtos serão.

Para iniciar um novo ciclo de aprendizagem, é necessário retomar a partir do ponto final da curva de esquecimento, visto que esse representa o momento em que ocorre uma redução significativa no nível de retenção de conhecimento adquirido previamente. Em alguns modelos, a inclinação da curva de esquecimento é representada pelo conhecimento do operador no início da interrupção (HOEDT, 2018).

Diversos modelos matemáticos foram desenvolvidos de maneira empírica a fim de considerar o esquecimento, há uma categoria de equações chamadas modelos determinísticos nessa categoria foram incluídos os modelos *Variable Regression to Invariant Forgetting* (VRIF), *The Variable Regression to Variable Forgetting* (VRVF), e o modelo *Learn–Forget Curve Model* (LFCM) (NEMBHARD & OSOTHSILP, 2001).

2.3 Modelos determinísticos

Os três modelos determinísticos preveem o tempo de produção da primeira unidade após cada pausa, igualando o tempo na curva de aprendizado para o tempo na curva de esquecimento no ponto de início da pausa e no ponto de previsão. Para prever o tempo de produção da primeira unidade, são necessárias as seguintes informações dos episódios anteriores: inclinação da aprendizagem, número de unidades produzidas, comprimento da interrupção e interceptação da aprendizagem (JABER; BONNEY, 1997).

Embora a equação a seguir represente os três modelos baseados em determinismo, é importante destacar que em cada modelo os parâmetros T_1 e f se distinguem entre constantes e variáveis:

$$T_x = T_1 x^f \quad (6)$$

Onde: T_x é o tempo necessário para produzir n unidades após a interrupção, T_1 é o tempo necessário para produzir a primeira peça, x o número de unidades que seriam produzidas caso não houvesse a interrupção e f o slope de esquecimento. Para Nembhard & Osothsilp (2001) esses modelos têm a vantagem de não ser necessário aplicar ferramentas estatísticas como a regressão prever a produção, portanto são classificados como determinísticos.

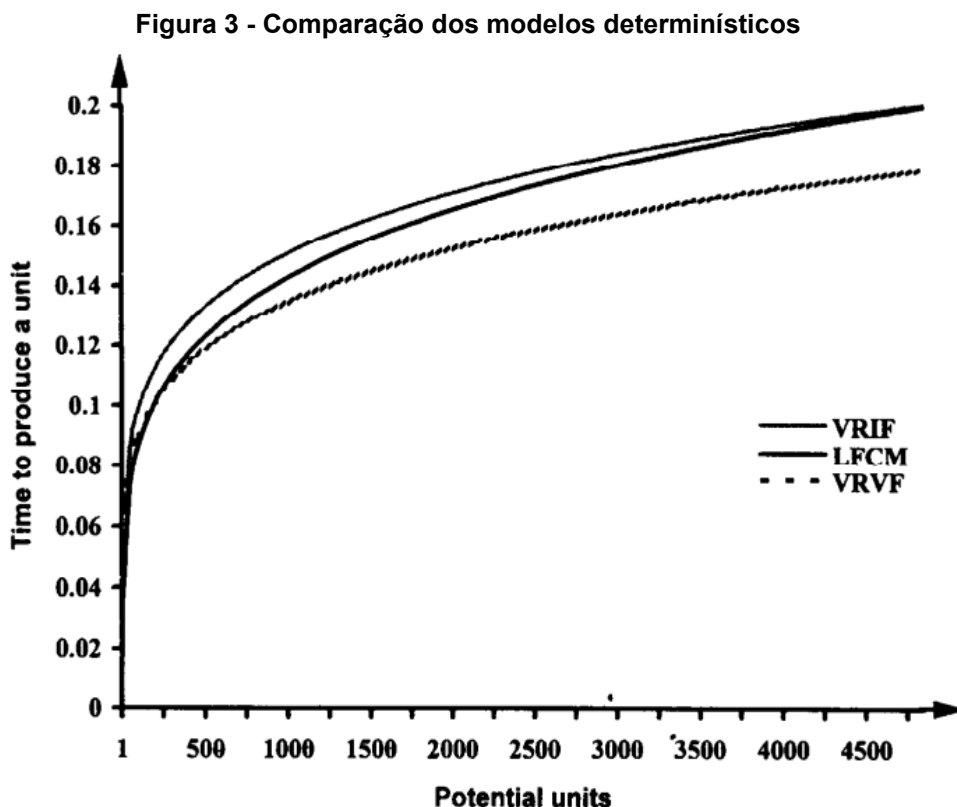
Para Elmaghraby (1990) que se baseou nos conceitos de esquecimento propostos por Sule, diz que o modelo VRIF assume que T_1 e f são constantes para qualquer interrupção, conseqüentemente a primeira unidade produzida após uma interrupção e seu slope de esquecimento não variam.

A pesquisa conduzida por Carlson, J.G e Rowe (1976), pioneiros no desenvolvimento de modelos matemáticos de previsão de produção que consideram o esquecimento e criadores do modelo VRVF, revela duas importantes conclusões. Primeiramente, eles destacam que o parâmetro T_1 apresenta variação individual para cada interrupção, enquanto o parâmetro f mantém-se constante.

Além disso, foi observado que em períodos de interrupção de curta ou média duração não resultam em um esquecimento total das informações. Essa constatação sugere a existência de algum mecanismo de retenção de conhecimento durante tais intervalos, reforçando a importância de investigar como essas informações são preservadas e afetam os processos de previsão de produção em pesquisas futuras (CARLSON; JG; ROWE; 1976).

O modelo LFCM diferente dos anteriores, T_1 e f variam para cada interrupção. Duas hipóteses foram testadas: a primeira que quando há o esquecimento total o valor necessário para produzir a primeira peça após a interrupção é igual ao mesmo tempo em que não havia nenhuma experiência no processo e a segunda hipótese propõe que o tempo necessário para a execução de tarefas na curva de aprendizado é igual ao tempo de esquecimento no ponto de interrupção (NEMBHARD; OSOTHSILP, 2001).

Na figura 3, é projetado o tempo necessário para as três curvas determinísticas ocorra o esquecimento total



Fonte: Jabber; Bonney (1997, p. 7)

Desenvolvedor do modelo LFCM, Jabber e Bonney (1997) concluem que de acordo com o teste realizado, as estimativas do tempo necessário para produzir a primeira unidade após um período de interrupção, utilizando o modelo LFCM, encontraram-se dentro das faixas de estimativas fornecidas pelo VRIF e o VRVF.

O LFCM revelou um desempenho satisfatório, validando sua eficácia como uma ferramenta promissora. A implementação também se mostrou viável, devido à sua simplicidade em relação aos cálculos de baixo nível e à sua notável flexibilidade. Essas características, somadas ao sucesso observado, posicionam o LFCM como uma base para o desenvolvimento de modelos futuros, abrindo caminho para avanços adicionais nesta área de pesquisa (HOELT, 2019 *apud* JABBER; GIBBI, 2015).

O uso do modelo LFCM em uma série de produção mista onde o operário sofre uma interrupção de uma tarefa para realizar outra tarefa, sem interrupção real na montagem, revela que o esquecimento não é ocasionado apenas pela

interrupção do aprendizado, mas também pela interrupção durante a execução de outras tarefas (HOELT, 2019).

2.4 Modelo LFRCM

Com o objetivo de estimar os processos iniciais de aprendizagem, esquecimento e a estimativa de reaprendizagem após intervalos de interrupções de médio e longo prazo, como, por exemplo, uma pausa para férias, são utilizados os dados de desempenho prévios à interrupção para calcular o reaprendizado (FERREIRA et al., 2021).

A regressão linear é uma técnica estatística amplamente empregada para modelar um relacionamento linear entre duas variáveis por meio de uma equação matemática. Essa abordagem, como descrita por Curral (1994), busca estabelecer uma relação quantitativa entre as variáveis em estudo, visando compreender e prever seu comportamento com base em um modelo linear. O modelo LFRCM é baseado em uma regressão linear apresentado a seguir:

$$y = ax + b \quad (7)$$

Para calcular o esquecimento em cada número de dias, este método utiliza o algoritmo desenvolvido por Lindeke (2001), que é equacionado a seguir:

$$F = 1 - \frac{Y_{cn+1} - Y_{cn}}{Y_{fn} - Y_{cn}} \quad (8)$$

Onde F é o fator de esquecimento, Y_{cn} a quantidade de tempo da primeira peça produzida antes da interrupção, Y_{cn+1} a quantidade de tempo que o operador produziu a primeira peça após a interrupção e Y_{fn} o último tempo necessário para produzir a última peça antes da interrupção.

Com o conjunto de dados de esquecimento, os coeficientes do modelo de regressão para o cálculo de esquecimento são encontrados por meio da seguinte formulação:

$$F(d) = a\sqrt{\ln(d)} + b \quad (9)$$

Onde d é o número de dias interrompidos, a e b são coeficientes de aprendizagem e esquecimento do modelo.

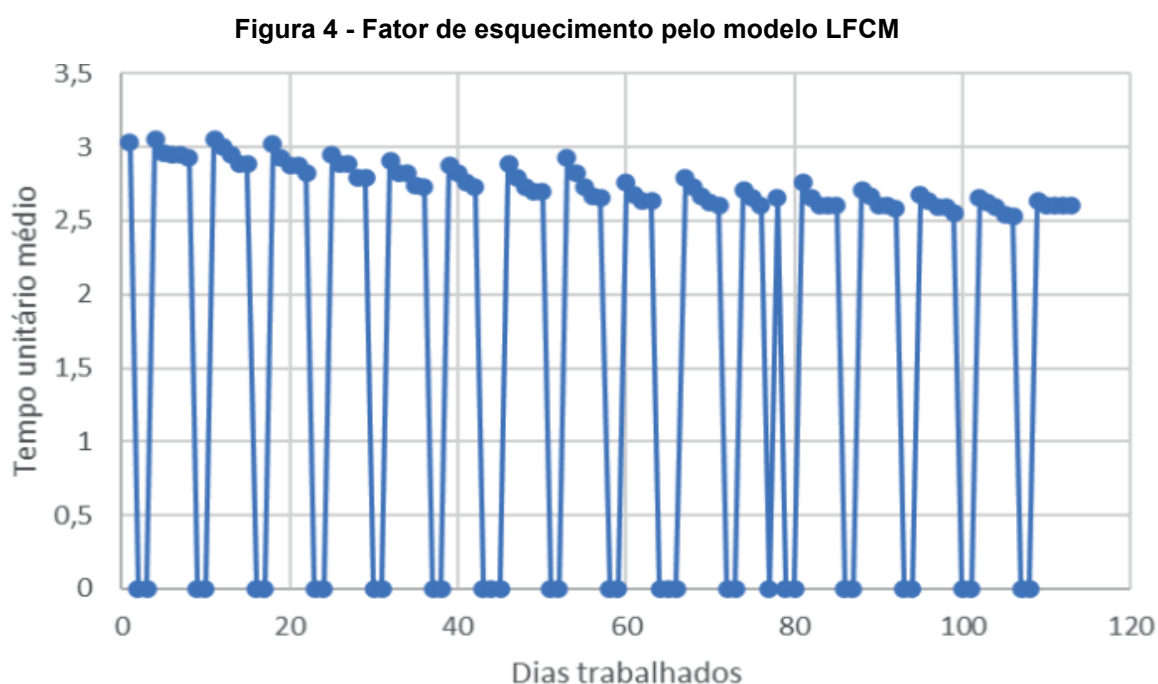
Por fim, utilizando o coeficiente angular comum às linhas de regressão e o desempenho estimado, são determinados os coeficientes lineares para os ajustes das estimativas de tempo após a interrupção no processo.

Sobre experiências empíricas utilizando o modelo

Os resultados evidenciam a aplicabilidade do modelo LFCM para se estimar a performance dos trabalhadores de maneira mais acurada e individualizada, permitindo ao departamento de PCP das empresas conseguir analisar melhor o tempo necessário para a fabricação de um lote de produtos, tanto individualmente por um operador, como para um setor, podendo ser extrapolado para toda a empresa (FERREIRA et al., 2021, p.8).

Esta mesma experiência concluiu que este modelo obteve uma acurácia de 98,32% entre o tempo projetado do modelo e o tempo real ocorrido após uma interrupção planejada (OZÓRIO *et al.*, 2021).

A figura 4 exemplifica o procedimento de cálculo do fator de esquecimento utilizando o modelo LFCM. É importante ressaltar que os dias em que a produção é igual a zero correspondem aos dias em que os operadores não estão realizando suas atividades laborais.



Fonte: Ferreira et al. (2021, p. 9)

Desta forma,

Este modelo permite a predição do tempo de fabricação de um item por um trabalhador, após as interrupções no processo de fabricação, ao estimar a aprendizagem pelo modelo de Wright (1936), o esquecimento pelo modelo de Lindeke (2010) e taxa de reaprendizagem pelo método de (FERREIRA *et. al*, 2022, p. 25).

3 METODOLOGIA

3.1 Natureza da pesquisa

Quanto a natureza da pesquisa é quanti-qualitativa pois foi feito um levantamento de dados para interpretação da eficiência do modelo da curva de aprendizagem e esquecimento LFRCM em relação ao tempo realizado.

A pesquisa quantitativa, que tem suas raízes no pensamento positivista lógico, tende a enfatizar o raciocínio dedutivo, as regras da lógica e os atributos mensuráveis da experiência humana. Por outro lado, a pesquisa qualitativa tende a salientar os aspectos dinâmicos, holísticos e individuais da experiência humana, para apreender a totalidade no contexto daqueles que estão vivenciando o fenômeno (POLIT *et.al.*, 2004, p. 201).

3.2 Tipo de pesquisa

Quanto ao objetivo da pesquisa, foi uma pesquisa exploratório pois o objetivo foi auxiliar e colaborar na descoberta de novos enfoques e estudos para a compreensão da curva de aprendizagem e esquecimento.

Segundo Gehardt e Silveira (2009, *apud* Gil, 2007) O objetivo deste tipo de pesquisa foi adquirir uma melhor compreensão e familiaridade com o problema em questão, visando torná-lo mais explícito e/ou desenvolver hipóteses a respeito dele. A maioria dessas pesquisas consiste em levantamento bibliográfico, entrevistas com indivíduos que possuem experiência prática com o problema em questão, e análise de exemplos que promovam a compreensão.

3.3 Método de pesquisa

Quanto ao método de pesquisa adotado foi aplicada, pois se concentra em resolver problemas práticos e aplicar conhecimentos teóricos a situações reais.

A pesquisa aplicada foi orientada para a investigação de questões e desafios inerentes às operações de instituições, organizações, grupos ou entidades sociais. Seu objetivo primordial reside na elaboração de diagnósticos, na identificação de problemas específicos e na busca ativa por soluções correspondentes. Essa abordagem metodológica é pautada pela responsividade a demandas previamente

articuladas por partes interessadas, sejam elas entidades, atores sociais ou instituições (Thiollent, 2009).

3.4 Coleta de dados

Este estudo foi conduzido no departamento de conformação de aço de uma indústria metalúrgica dedicada à fabricação de componentes para a construção civil. A empresa é especializada na produção de estruturas para casas e edifícios, utilizando uma máquina específica para a conformação de perfis de aço, denominada como dobradeira, que possui uma capacidade nominal de conformar produtos com comprimento de até 6 metros. A produção desta máquina desempenha um papel fundamental nas operações subsequentes do departamento, devido à eficiência na produção da peça em estudo e à sua significativa contribuição para a montagem de outras estruturas fabricadas.

O objeto analisado foi uma chapa de aço com dobras para dar rigidez a estrutura, utilizado para fixar as estruturas metálicas dos telhados, cada peça tem 6 metros de largura, assim a máquina é capaz de dobrar apenas uma peça de uma só vez. Devido à alta demanda, a empresa produz diariamente essa peça.

O centro de trabalho investigado consiste em um operador e um auxiliar de produção, ambos com apenas 4 meses de experiência prévia no setor. Com uma jornada de 540 minutos diários, operador é responsável por registrar de forma manual o tempo de início e término da produção, assim como a quantidade de peças produzidas, utilizando o relógio oficial da fábrica.

Os dados utilizados neste estudo foram obtidos por meio das ordens de produção. Cada ordem registra o tempo exato de início e término da produção, juntamente com a quantidade peças dobradas. A partir dessas informações, foi possível calcular a taxa de produção, expressa em peças por minuto. O estudo englobou um período de 119 dias de produção, durante os quais 83 ordens de produção foram processadas. Notavelmente, essas ordens resultaram na fabricação de 12.201 produtos.

Os dados abrangem a produção durante o final do mês de março de 2023 até, o mês de julho de 2023. Para construir a Curva de Aprendizagem, foram calculadas a taxa e a inclinação de aprendizagem de apenas um unico operador responsável por realizar a tarefa de acordo com a demanda fabril, possibilitando uma análise e a

existência do padrão da curva de esquecimento e aprendizado, desta forma, o planejamento e programação da produção pode utilizar-se de artefatos numéricos para a previsão de produção do mesmo item e um dado intervalo de tempo futuros.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE DADOS

Com base nos dados apresentados na Tabela 1, observa-se que durante períodos de produção contínua diária, ocorre um processo de aprendizado por parte do operador. Isso sugere que o operador consegue manter e aprimorar suas habilidades ao longo do tempo, o que resulta em uma produção de peças por minuto mais eficiente. No entanto, quando há interrupções na produção que duram um dia ou mais, verifica-se um fenômeno de esquecimento por parte do operador. Esse esquecimento leva a uma redução na produção de peças por minuto, em comparação com o último dia de produção contínua.

Tabela 1 - Dados gerais de produção

Dias parados	Dia semana	Data de produção	Peças por minuto
0	quinta-feira	30/03/2023	1,175
0	sexta-feira	31/03/2023	1,175257732
0	Sábado	01/04/2023	1,186956522
1	segunda-feira	03/04/2023	1,180645161
0	terça-feira	04/04/2023	1,183333333
0	quarta-feira	05/04/2023	1,183333333
0	quinta-feira	06/04/2023	1,185
0	sexta-feira	07/04/2023	1,188888889
2	segunda-feira	10/04/2023	1,166666667
0	terça-feira	11/04/2023	1,177558
0	quarta-feira	12/04/2023	1,182666667
0	quinta-feira	13/04/2023	1,183244
0	sexta-feira	14/04/2023	1,18402223
2	segunda-feira	17/04/2023	1,18005881
0	terça-feira	18/04/2023	1,18102452
0	quarta-feira	19/04/2023	1,18302788
0	quinta-feira	20/04/2023	1,18402975
0	sexta-feira	21/04/2023	1,18501587
2	segunda-feira	24/04/2023	1,18069998
0	terça-feira	25/04/2023	1,18146873
0	quarta-feira	26/04/2023	1,18347786

0	quinta-feira	27/04/2023	1,18488756
0	sexta-feira	28/04/2023	1,18558756
3	terça-feira	02/05/2023	1,1817889
0	quarta-feira	03/05/2023	1,1827889
0	quinta-feira	04/05/2023	1,1838795
0	sexta-feira	05/05/2023	1,1847789
2	segunda-feira	08/05/2023	1,1826687
0	terça-feira	09/05/2023	1,1838779
0	quarta-feira	10/05/2023	1,184489
0	quinta-feira	11/05/2023	1,185668
0	sexta-feira	12/05/2023	1,1869791
2	segunda-feira	15/05/2023	1,1830038
0	terça-feira	16/05/2023	1,185335
0	quarta-feira	17/05/2023	1,1858158
0	quinta-feira	18/05/2023	1,1866879
3	segunda-feira	22/05/2023	1,1826687
0	terça-feira	23/05/2023	1,1849976
0	quarta-feira	24/05/2023	1,1869772
0	quinta-feira	25/05/2023	1,1869772
0	sexta-feira	26/05/2023	1,1871586
2	segunda-feira	29/05/2023	1,1856798
0	terça-feira	30/05/2023	1,1869798
0	quarta-feira	31/05/2023	1,1871887
0	quinta-feira	01/06/2023	1,189134
0	sexta-feira	02/06/2023	1,1899978
0	Sábado	03/06/2023	1,1900245
1	segunda-feira	05/06/2023	1,1899907
0	terça-feira	06/06/2023	1,1901258
0	quarta-feira	07/06/2023	1,1909977
1	sexta-feira	09/06/2023	1,1905887
2	segunda-feira	12/06/2023	1,1899995
0	terça-feira	13/06/2023	1,1911587
0	quarta-feira	14/06/2023	1,1928779
0	quinta-feira	15/06/2023	1,19299135
0	sexta-feira	16/06/2023	1,1935578
2	segunda-feira	19/06/2023	1,1929778
0	terça-feira	20/06/2023	1,1929936
0	quarta-feira	21/06/2023	1,1930158
0	quinta-feira	22/06/2023	1,1935028
0	sexta-feira	23/06/2023	1,1944788
2	segunda-feira	26/06/2023	1,1938897
0	terça-feira	27/06/2023	1,1941078
0	quarta-feira	28/06/2023	1,1951105
0	quinta-feira	29/06/2023	1,1957087
0	sexta-feira	30/06/2023	1,1961178
2	segunda-feira	03/07/2023	1,1956607

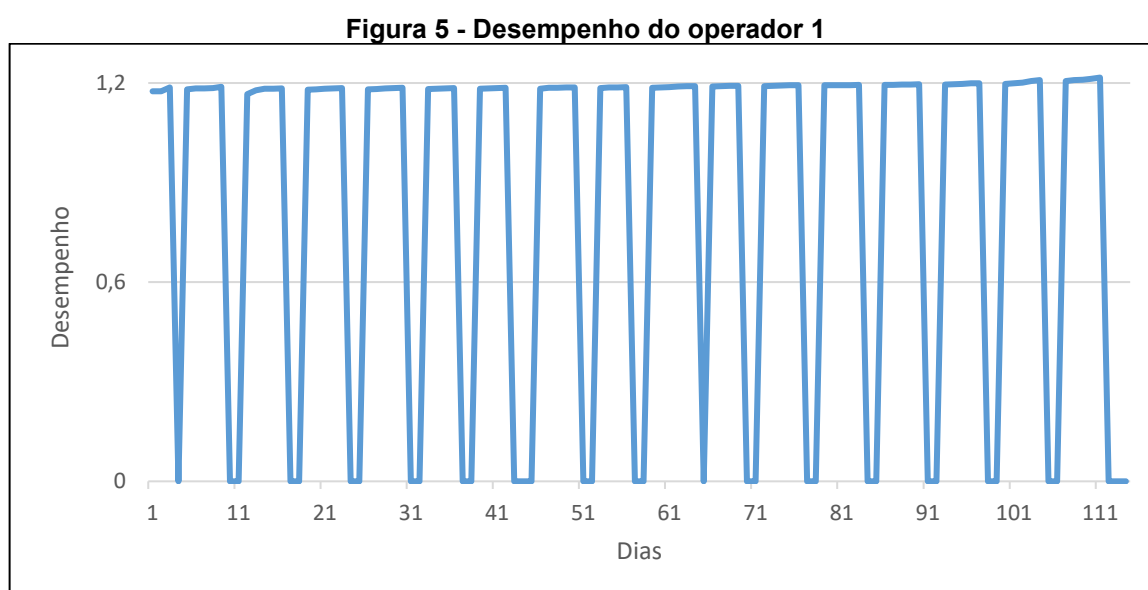
0	terça-feira	04/07/2023	1,1962092
0	quarta-feira	05/07/2023	1,1970155
0	quinta-feira	06/07/2023	1,198711
0	sexta-feira	07/07/2023	1,198993
2	segunda-feira	10/07/2023	1,197569
0	terça-feira	11/07/2023	1,199332
0	quarta-feira	12/07/2023	1,201474
0	quinta-feira	13/07/2023	1,205811
0	sexta-feira	14/07/2023	1,20836
2	segunda-feira	17/07/2023	1,205551
0	terça-feira	18/07/2023	1,20878
0	quarta-feira	19/07/2023	1,21005
0	quinta-feira	20/07/2023	1,21301
0	sexta-feira	21/07/2023	1,21632

Fonte: Autoria própria (2023)

4.1 Apresentação do desempenho do operador

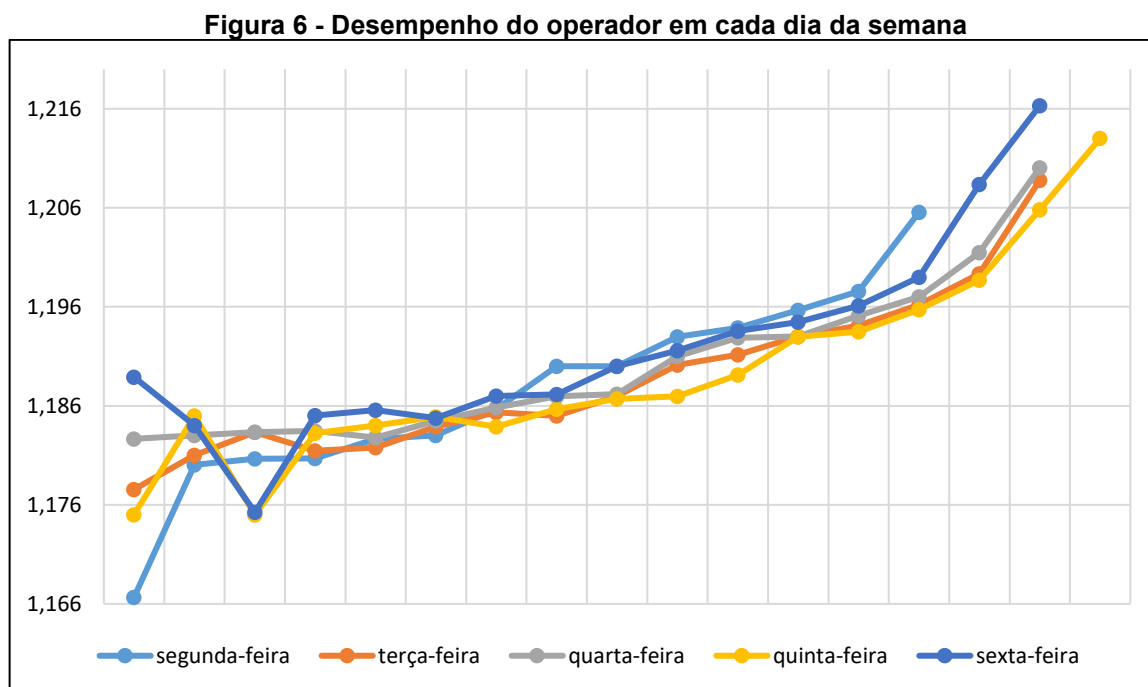
De acordo com a Figura 5, é possível notar uma melhoria progressiva no desempenho do operador ao longo dos dias, medida em peças por minuto. No entanto, quando ocorre uma interrupção no processo de produção, o desempenho do operador é menor em comparação com o último dia de produção contínua.

Quando o desempenho é registrado como 0, isso sinaliza a ausência de produção naquele dia. Assim, é nesses dias que ocorre o fenômeno do esquecimento.



Fonte: Autoria própria (2023)

Na Figura 6 abaixo, é apresentado o desempenho diário do operador ao longo da semana. Nota-se que o operador exibe seu menor desempenho na segunda-feira, devido ao retorno após a interrupção. Ao mesmo tempo, verifica-se que o desempenho do operador atinge seu ápice na sexta-feira, indicando que o aprendizado é acumulado progressivamente desde a segunda-feira.



Fonte: Autoria própria (2023)

4.2 Aprendizado do operador

Com os dados em mãos, conforme a Figura 7, o aprendizado do operador foi medido em relação a cada dia da semana, obtendo o valor de a e b da equação da reta para cada dia da semana, demonstrado na Tabela 2 abaixo.

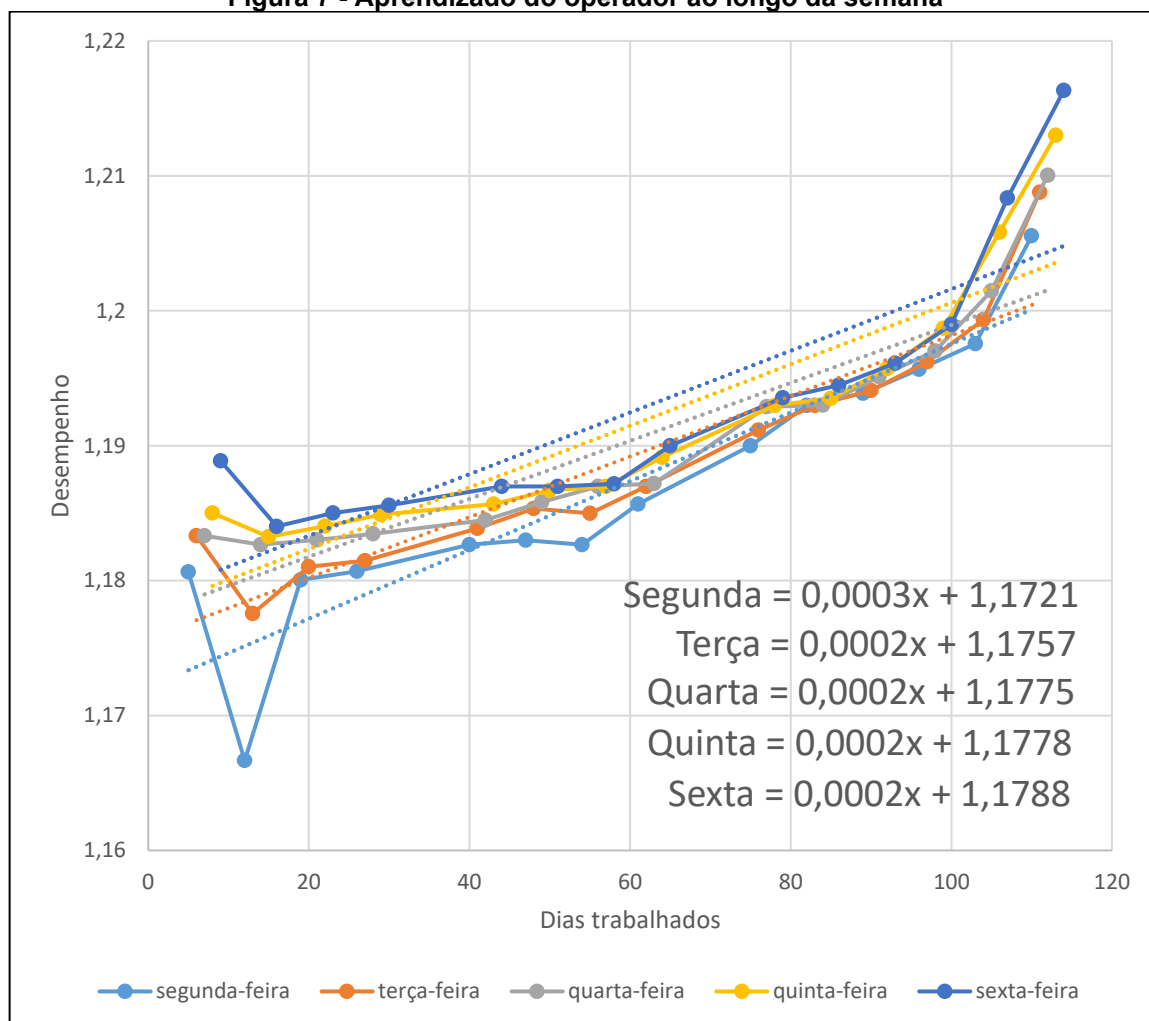
Tabela 2 - Inclinação e interceptação

Pontos	Segunda-feira	Terça-feira	Quarta-feira	Quinta-feira	Sexta-feira
a	0,000254606	0,000224588	0,000214751	0,000228067	0,00022851
b	1,172086957	1,175719572	1,177473317	1,177855558	1,17875089

Fonte: Autoria Própria (2023)

As linhas de tendências encontradas podem ser visualmente entendidas de acordo com o a Figura 3, sendo assim, cada inclinação e interceptção será utilizada para calcular o reaprendizado do operador posteriormente.

Figura 7 - Aprendizado do operador ao longo da semana



Fonte: Autoria própria (2023)

4.3 Aplicação do modelo Lindeke

Antes da aplicação do modelo LFRCM, é necessário implementar o modelo de Lindeke, conforme descrito na Equação 8, com o propósito de determinar o fator de esquecimento do operador.

Para um dia de interrupção:

$$F = 1 - \frac{1,1905887 - 1,1899907}{1,1909977 - 1,1899907}$$

$$F = 0,406156902$$

Para dois dias de interrupção periodo obteve-se:

$$F = 1 - \frac{1,1826687 - 1,1817889}{1,1847789 - 1,817889}$$

$$F = 0,705752508$$

Para três dias de interrupção obteve-se:

$$F = 1 - \frac{1,1826687 - 1,1830038}{1,1866879 - 1,1830038}$$

$$F = 1,090958443$$

Tabela 3 - Fator de esquecimento calculado para o operador em cada parada

Dias parados	Operador
1	0,527859238
2	2,695652174
2	0,228365967
2	0,870655187
3	0,777206716
2	0,705752508
2	0,922257795
3	1,090958443
2	0,329361456
1	0,007779594
1	0,406156902
2	0,985284281
2	0,162999185
2	0,392471686
2	0,205152372
2	0,427332473
2	0,260309517

Fonte: Autoria Própria (2023)

4.3.1 Cálculo das médias dos fatores de esquecimento

Com os dados sequenciados, na Tabela 3 resumiu-se a média aritmética dos intervalos de paradas, com dois intervalos de 1 dia de parada, doze intervalos de 2 dias de paradas e dois intervalos de 3 dias de parada da produção.

A média dos valores obtidos resumem-se na Tabela 3

Tabela 4 - Média dos fatores de esquecimento

Dias parados	Esquecimento operador
1	0,313931911
2	0,682132883
3	0,934082579

Fonte: Autoria própria (2023)

4.4 Aplicação do modelo LFRCM

Com os fatores de esquecimento dos dias de parada é possível encontrar os coeficientes do modelo de regressão através da Equação 9. Gerou-se um gráfico representado pela Figura 4 onde o eixo x é o valor de $F(d) = a\sqrt{\ln(d)} + b$ e y é F.

Para a interrupção de 1 dia, o eixo x foi de:

$$\sqrt{\ln(1)} = 0$$

Para a interrupção de 2 dias, o eixo x foi de:

$$\sqrt{\ln(2)} = 0,83255$$

Para a interrupção de 3 dias, o eixo x foi de:

$$\sqrt{\ln(3)} = 1,04815$$

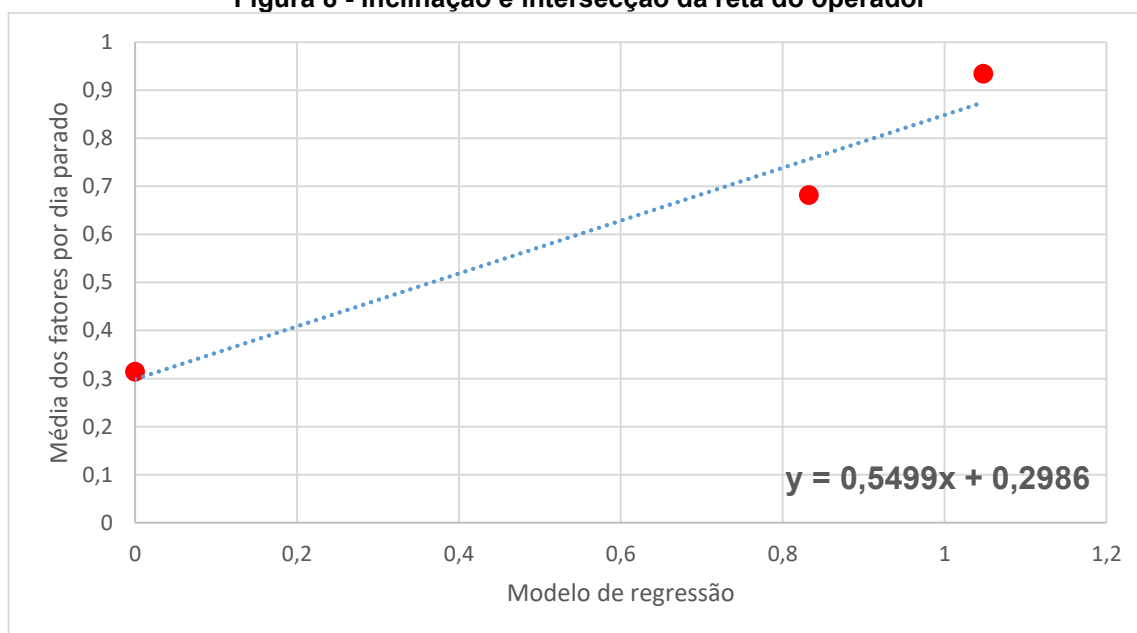
Com os valores de x e y encontrandos, a Tabela 4 e a Figura 8

Tabela 5 - Inclinação e intersecção da reta do operador

Dias parados	$\sqrt{\ln(d)}$	$F(d)$
1	0	0,313931911
2	0,83255	0,682132883
3	1,04815	0,93482579

Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 8 - Inclinação e intersecção da reta do operador



Fonte: Autoria própria (2023)

Após a realização do cálculo dos coeficientes no contexto do modelo de regressão, os valores de inclinação (a) e interceptação (b) foram identificados e estão documentados na Tabela 5.

Tabela 6 - Inclinação e interceptação do operador

Coeficientes	Valor
Inclinação a	0,5499
Intercepção b	0,2986

Fonte: Autoria Própria (2023)

A seguir, a Equação 8 é reaplicada, utilizando as inclinações e interceptações previamente obtidas como variáveis na equação, a fim de identificar a taxa de esquecimento para cada intervalo de interrupção. O procedimento de cálculo referente ao operador é detalhadamente descrito abaixo:

$$F(d) = a\sqrt{\ln d} + b$$

Para o intervalo 1 dia:

$$F(1) = 0,5499\sqrt{\ln 1} + 0,2986$$

$$F(1) = 0,2986$$

Para o intervalo de 2 dias:

$$F(2) = 0,5499\sqrt{\ln 2} + 0,2986$$

$$F(2) = 0,75642$$

Para o intervalo de 3 dias:

$$F(3) = 0,5499\sqrt{\ln 3} + 0,2986$$

$$F(3) = 0,87498$$

Para o intervalo de 4 dias:

$$F(4) = 0,5499\sqrt{\ln 4} + 0,2986$$

$$F(4) = 0,94606$$

Na Tabela 6 são apresentados os índices encontrados para todos os intervalos para o operador.

Tabela 7 - Índices de esquecimento calculados

Dias parados	Esquecimento
1	0,2986
2	0,75642
3	0,87498
4	0,94606

Fonte: Autoria Própria (2023)

Com os índices de esquecimento, é possível calcular o tempo projetado de retorno após uma interrupção, é necessária uma manipulação algébrica para isolar o $Y_{c,n+1}$ da Equação 8, a equação manipulada e isolada é apresentada a seguir:

$$Y_{c,n+1} = Y_{c,n} + (1 - F)(Y_{f,n} - Y_{c,n})$$

$$Y_{c,n+1} = 1,205551 + (1 - 0,94606) (1,21632 - 1,205551)$$

$$Y_{c,n+1} = 1,20613188$$

Utilizando a equação em todos os intervalos, obtém-se o tempo projetado após uma interrupção de 4 dias na Tabela 7 a seguir.

Tabela 8 - Tempo de retorno projetados

Intervalos	4 dias
Tempo projetado (min)	1,20613188

Fonte: Autoria Própria (2023)

4.4 Reaprendizado do operador

Diante de tais resultados calculados na fase de aprendizado do operador, é possível prever o desempenho ao passar das semanas, com o ajuste das curvas foi possível angariar o valor da inclinação e da interceptação.

Para o primeiro dia de retorno após a parada de 4 dias, na quarta feira dia 119 de trabalho, encontrou-se o valor de 1,20613188, para a projeção dos próximos dias é necessário um rearanjo algébrico da equação da reta $y = ax + b$, isolando o b obtém-se:

$$b' (novo) = y (projetado) - ax + b (aprendizado)$$

A média das diferenças foi utilizada como referência para realizar este cálculo, tomando como base quarta-feira que foi o dia de retorno do operador após a parada de quatro dias, os dados obtidos estão apresentados na Tabela 9 a seguir.

Tabela 9 - Cálculo das diferenças das médias

Dias da semana	Segunda-feira	Terça-feira	Quarta-feira	Quinta-feira	Sexta-feira
Média	1,18698138	1,189082585	1,190465724	1,191811661	1,19303261
Diferença das médias	-0,003484344	-0,00138314	0	0,001345937	0,00256689

Fonte: Autoria Própria (2023)

Para a nova interceptação que foi utilizada como referência para as quartas feiras foi realizado o cálculo demonstrado:

$$b' = 1,206131273 - 0,000214751 * 119 + 0$$

$$b' = 1,180575959$$

O valor de 1,206131273 representa o desempenho do operador medido na volta após os quatro dias de parada, 0,000214751 é a inclinação da reta do aprendizado para o dia mensurado, 119 é o dia de trabalho referência e 0 é a diferença das médias.

Os valores de inclinação da reta da quarta feita foi usado novamente para calcular um novo valor de b para o reaprendizado do operador, junto com o tempo de retorno de 1,206131273 no dia 119 de trabalho, a próxima quarta-feira foi projetada conforme demonstrado na equação a seguir:

$$y (126) = 0,000214751 * 126 + 1,180575959$$

$$y (126) = 1,207634527$$

Sendo assim, a projeção para as próximas semanas de trabalho, obteve-se conforme a Tabela 10 abaixo.

Tabela 10 - Projeção de Retorno do operador

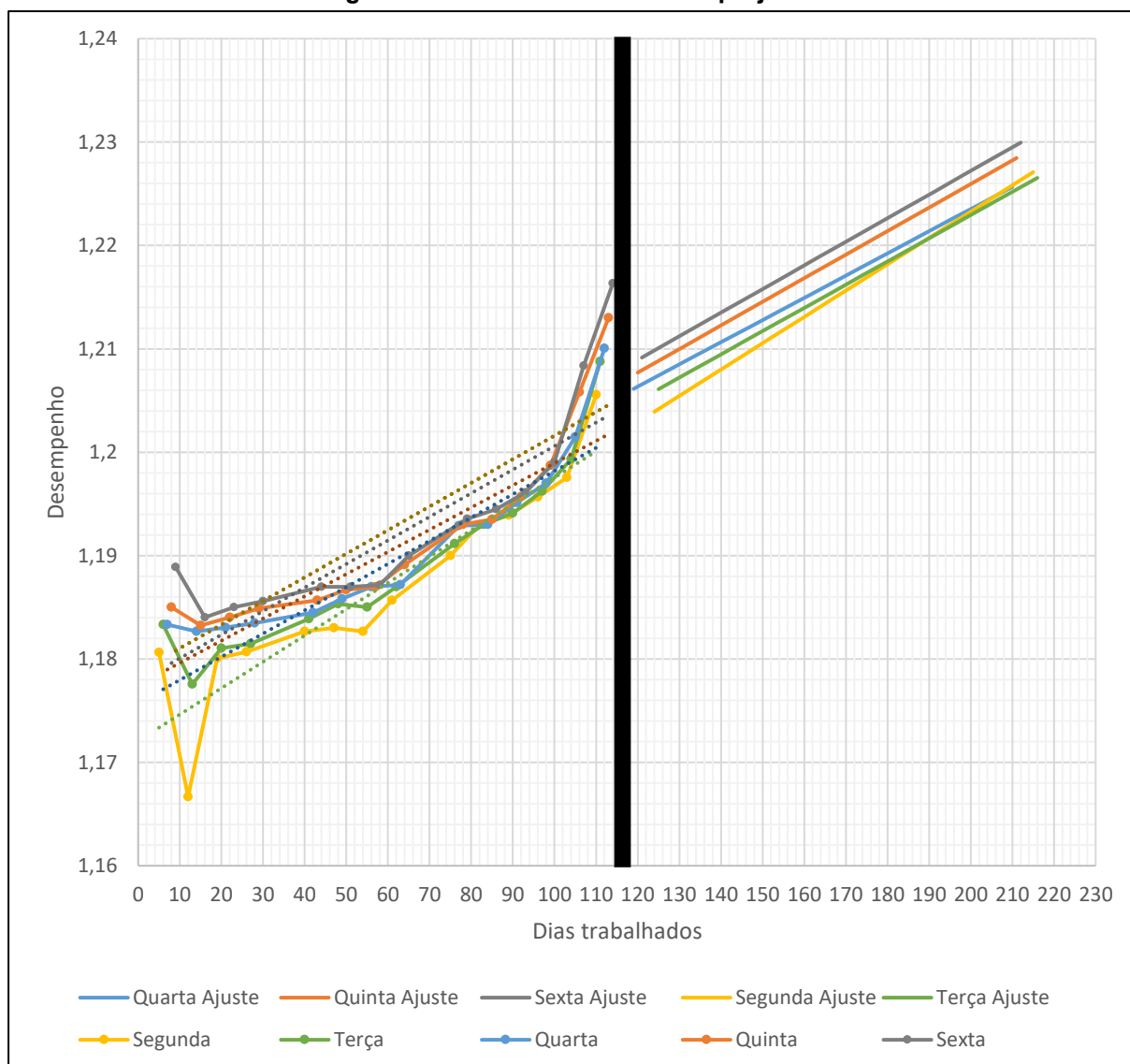
Dia	Quarta	Dia	Quinta	Dia	Sexta	Dia	Sábado	Dia	Domingo	Dia	Segunda	Dia	Terça
119	1,20613127	120	1,20770528	121	1,209155	122	0	123	0	124	1,20391996	125	1,206096
126	1,20763453	127	1,20930174	128	1,210755	129	0	130	0	131	1,2057022	132	1,207668
133	1,20913778	134	1,21089821	135	1,212354	136	0	137	0	138	1,20748443	139	1,20924
140	1,21064103	141	1,21249468	142	1,213954	143	0	144	0	145	1,20926667	146	1,210812
147	1,21214429	148	1,21409115	149	1,215553	150	0	151	0	152	1,21104891	153	1,212384
154	1,21364754	155	1,21568761	156	1,217153	157	0	158	0	159	1,21283115	160	1,213956
161	1,2151508	162	1,21728408	163	1,218752	164	0	165	0	166	1,21461339	167	1,215528
168	1,21665405	169	1,21888055	170	1,220352	171	0	172	0	173	1,21639563	174	1,2171
175	1,2181573	176	1,22047701	177	1,221952	178	0	179	0	180	1,21817787	181	1,218673
182	1,21966056	183	1,22207348	184	1,223551	185	0	186	0	187	1,2199601	188	1,220245
189	1,22116381	190	1,22366995	191	1,225151	192	0	193	0	194	1,22174234	195	1,221817
196	1,22266706	197	1,22526642	198	1,22675	199	0	200	0	201	1,22352458	202	1,223389

203	1,22417032	204	1,22686288	205	1,22835	206	0	207	0	208	1,22530682	209	1,224961
210	1,22567357	211	1,22845935	212	1,229949	213	0	214	0	215	1,22708906	216	1,226533

Fonte: Autoria Própria (2023)

Após a aplicação da técnica de reaprendizagem para projetar as próximas semanas, foi elaborado um gráfico abrangendo o período total de análise, juntamente com as semanas projetadas após a interrupção. Observa-se na Figura 9 que, após o incidente, o tempo projetado exibe uma tendência linear, sugerindo uma relação coerente e previsível nos dados.

Figura 9 - Dias analisados x Dias projetados



Fonte: Autoria Própria (2023)

5. DISCUSSÕES E RESULTADOS

Após a implementação do modelo Lindeke, calculou-se a média dos fatores de esquecimento para interrupções de 1, 2 e 3 dias. Esses resultados forneceram a base para a aplicação do modelo LFRCM, que foi utilizado para projetar o tempo de retorno após uma interrupção de 4 dias. Destaca-se que o modelo Lindeke desempenha um papel na representação do esquecimento dentro do contexto do modelo LFRCM.

Para avaliar a eficiência do modelo, empregou-se a métrica de acurácia de estimativa MAPE (Mean Absolute Percentage Error). Essa métrica é fundamental, uma vez que sua proximidade a zero sugere uma precisão mais elevada no cálculo. Os resultados comparativos do tempo projetado com o tempo observado são apresentados na Tabela 11 a seguir

Intervalos	4 dias
Tempo observado (min)	1,188281128
Tempo projetado (min)	1,20613188
Erro Abs	1,5022%

Fonte: Autoria Própria (2023)

O resultado revela um erro absoluto de 1,5002%, indicando uma notável precisão do modelo. A discrepância entre o tempo observado e o tempo projetado é mínima, totalizando apenas 0,017850752 minutos por peça.

Para ser aplicado o conceito de reaprendizagem do modelo, foi necessário calcular a aprendizagem do operador para cada dia da semana, aplicando uma linha de tendência foi encontrando a inclinação e interceptação da aprendizagem do operador, apresentado na Figura 7. A aprendizagem do operador serviu-se de base para aplicar a reaprendizagem do modelo.

A reaprendizagem do modelo é empregada como um procedimento para projetar o desempenho futuro do operador nas semanas subsequentes a uma interrupção, por meio de um reajuste de curvas. Como último estágio na implementação integral do modelo LFRCM, é necessário possuir dados prévios referentes ao aprendizado e esquecimento. A reaprendizagem, nesse contexto, fundamenta-se na utilização desses dois parâmetros, sendo essencial sua disponibilidade prévia para a projeção futura.

Posterior a aplicação de reaprendizagem, os resultados foram apresentados na Tabela 10 e observados graficamente na Figura 9, é notável também que após algumas semanas a segunda feira apresenta um desempenho maior que na terça feira, isso é consequência que a inclinação da segunda feira é menor que o da terça feira, entretanto a interceptação da terça feira é maior que o da segunda feira, isso resulta que a longo prazo o dia de segunda feira será de maior eficiência produtiva.

Durante a aplicação do modelo proposto, identificou-se a viabilidade de ampliar seu escopo além da mera previsão de desempenho de produções futuras. Para aprimorar investigações subsequentes nesse domínio, uma abordagem promissora consiste em incorporar análises de custo, permitindo otimizar de maneira mais abrangente os recursos envolvidos. Esta expansão metodológica não apenas aprofundaria a compreensão do fenômeno em estudo, mas também ofereceria diretrizes práticas para a eficiência e economia de recursos, destacando a relevância e aplicabilidade do modelo proposto em contextos práticos.

Para melhorias adicionais, considera-se fundamental a inclusão de métodos de análise de sensibilidade e robustez no modelo, proporcionando uma avaliação mais abrangente e precisa de seu desempenho diante de variáveis críticas e possíveis cenários. Além disso, explorar técnicas de validação cruzada e aumentar a variedade de dados utilizados podem fortalecer a robustez e generalização do modelo, conferindo maior confiança em suas projeções e conclusões.

6 CONCLUSÃO

Este estudo emprega o modelo LFCRM para projetar o tempo médio de produção de uma peça em uma indústria metalúrgica, considerando uma interrupção de 4 dias. Além disso, o modelo é utilizado para antecipar o tempo médio de produção nas semanas subsequentes à interrupção.

Os desdobramentos desta pesquisa consolidam a evidência de que o modelo LFCRM possui uma aplicabilidade expressiva nas operações industriais, configurando-se como uma ferramenta eficaz para apoiar o Planejamento e Controle da Produção (PCP). A destacada habilidade do modelo LFCRM em realizar projeções precisas do tempo necessário para atender às demandas específicas ou produzir lotes determinados emerge como uma contribuição substancial para otimizar os processos produtivos.

A aplicação prática deste modelo tem o potencial de aprimorar consideravelmente a eficiência operacional das indústrias, proporcionando uma gestão mais acurada e efetiva dos recursos disponíveis. Assim, o modelo LFCRM se delinea como uma ferramenta promissora para aprimorar as estratégias de planejamento e controle na indústria, capacitando-a a responder de maneira mais ágil e eficiente às dinâmicas e demandas do mercado.

REFERÊNCIAS

- ANZANELLO, Michel José; FOGLIATTO, Flávio Sanson. **Curvas de aprendizado: estado da arte e perspectivas de pesquisa**. Gestão & Produção, v. 14, p. 109-123, 2007.
- ARGOTE, Linda et al. **Knowledge transfer in organizations: Learning from the experience of others**. Organizational behavior and human decision processes, v. 82, n. 1, p. 1-8, 2000.
- BADIRU, Adedeji B. **Computational survey of univariate and multivariate learning curve models**. IEEE transactions on Engineering Management, v. 39, n. 2, p. 176-188, 1992.
- BAILEY, Charles D.; MCINTYRE, Edward V. **Using parameter prediction models to forecast post-interruption learning**. IIE Transactions, v. 35, n. 12, p. 1077-1090, 2003.
- CARLSON, J. G. AND ROWE, R. G. **“How much does forgetting cost?”** Industrial Engineering 8: p. 40 – 47, 1976.
- CURRAL, James. **Statistics packages: A general overview**. Universidade de Glasgow, p. 32, 1994.
- DA COSTA RIOS, Álvaro Júnio Machado. **A Importância da Prática Distribuída na Aprendizagem: Efeito de Espaçamento e Efeito de Teste**. 2021. Tese de Doutorado. Universidade da Beira Interior (Portugal).
- DA FONSECA, João José Saraiva. **Apostila de metodologia da pesquisa científica**. João José Saraiva da Fonseca, 2002.
- ELM'AGHRABY, SALAH E. **Economic manufacturing quantities under conditions of learning and forgetting (EMQ/LaF)**. Production Planning & Control, v. 1, n. 4, p. 196-208, 1990.
- FERREIRA, José Ângelo et al. **Modelo de estimativa para esquecimento total sob a perspectiva da curva de aprendizagem**.
- FERREIRA, José Ângelo; SATO, Bruno Goulart; FUENTES, Bruno Pontes. **Modelos de Curva de Esquecimento e sua Aplicação na Produção**.
- FRANCESCHINI, Fiorenzo; GALETTO, Maurizio. **Asymptotic defectiveness of manufacturing plants: an estimate based on process learning curves**. International Journal of Production Research, v. 40, n. 3, p. 537-545, 2002.
- GERHARDT, Tatiana Engel; SILVEIRA, Denise Tolfo. **Métodos de pesquisa**. Plageder, 2009.
- GINZBURG, S.; DAR-EL, E. M. **Skill retention and relearning—a proposed cyclical model**. Journal of Workplace Learning, v. 12, n. 8, p. 327-332, 2000.
- GIVI, Z. S.; JABER, Mohamad Y.; NEUMANN, W. Patrick. **Modelling worker reliability with learning and fatigue**. Applied Mathematical Modelling, v. 39, n. 17, p. 5186-5199, 2015.
- GLOBERSON, Shlomo; LEVIN, Nissan; SHTUB, Avraham. **The impact of breaks on forgetting when performing a repetitive task**. IIE transactions, v. 21, n. 4, p. 376-381, 1989.
- HOEDT, Steven et al. **Countering the forgetting effect in mixed-model manual assembly**. IFAC-PapersOnLine, v. 51, n. 11, p. 856-861, 2018.
- HOEDT, Steven et al. **The effect of job similarity on forgetting in multi-task production**. Procedia manufacturing, v. 39, p. 983-990, 2019.
- JABER, Mohamad; BONNEY, Maurice. **Jaber and Maurice Bonney production quality**. Appl. Math. Modelling, 20, 1996.

JABER, Mohamad Y. **Learning and forgetting models and their applications**. Handbook of industrial and systems engineering, v. 30, n. 1, p. 30-127, 2006.

JABER, Mohamad Y.; GIVI, Z. S.; NEUMANN, W. Patrick. **Incorporating human fatigue and recovery into the learning–forgetting process**. Applied Mathematical Modelling, v. 37, n. 12-13, p. 7287-7299, 2013.

KAIHATU, Rodrigo; BARBOSA, Reginaldo. **A utilização adequada do planejamento e controle da produção (pcp), em uma indústria**. Revista científica eletrônica de administração, Ano VI, n. 10, 2006.

LINDEKE, Richard. **Lean automated manufacturing**. Assembly Automation, 30(2):117-123, 2010.

NADLER, G.; SMITH, W. D. **Manufacturing progress functions for types of processes**. The International Journal of Production Research, v. 2, n. 2, p. 115-135, 1963.

NEMBHARD, David A.; OSOTHSILP, Napassavong. **An empirical comparison of forgetting models**. IEEE Transactions on Engineering Management, v. 48, n. 3, p. 283-291, 2001.

NEMBHARD, David A.; UZUMERI, Mustafa V. **Experiential learning and forgetting for manual and cognitive tasks**. International journal of industrial ergonomics, v. 25, n. 4, p. 315-326, 2000.

OZÓRIO, Arthur Kreling et al. **Aplicação do método Learning-Forgetting-Relearning Curve Model (LFRCM) para projeção da produção**.

POLLIT, Denise F.; BECK, Cheryl T.; HUNGLER, Bernadette P. **Fundamentos de pesquisa em enfermagem: métodos, avaliação e utilização**. Porto Alegre: Artmed, 2004.

Sebrae. **Estruturas Metálicas no Setor da Construção Civil**. Disponível em: <https://sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/artigos/estruturas-metalias-no-setor-da-construcao-civil,c9f23084b5907810VgnVCM1000001b00320aRCRD>. Acesso em: 13 de junho de 2023.

SHTUB, Avraham; LEVIN, Nissan; GLOBERSON, Shlomo. **Learning and forgetting industrial skills: an experimental model**. International Journal of Human Factors in Manufacturing, v. 3, n. 3, p. 293-305, 1993.

TEPLITZ, Charles J. **The learning curve deskbook: A reference guide to theory, calculations, and applications**. Praeger, 1991.

TEYARACHAKUL, Sunantha; CHAND, Suresh; WARD, James. **Effect of learning and forgetting on batch sizes**. Production and Operations Management, v. 20, n. 1, p. 116-128, 2011.

THIOLLENT, Michel. **Metodologia da Pesquisa-ação**. 17ª. ed. São Paulo: Cortez, 2009.

THORNDIKE, Edward L. **Animal intelligence: An experimental study of the associative processes in animals**. The Psychological Review: Mon.