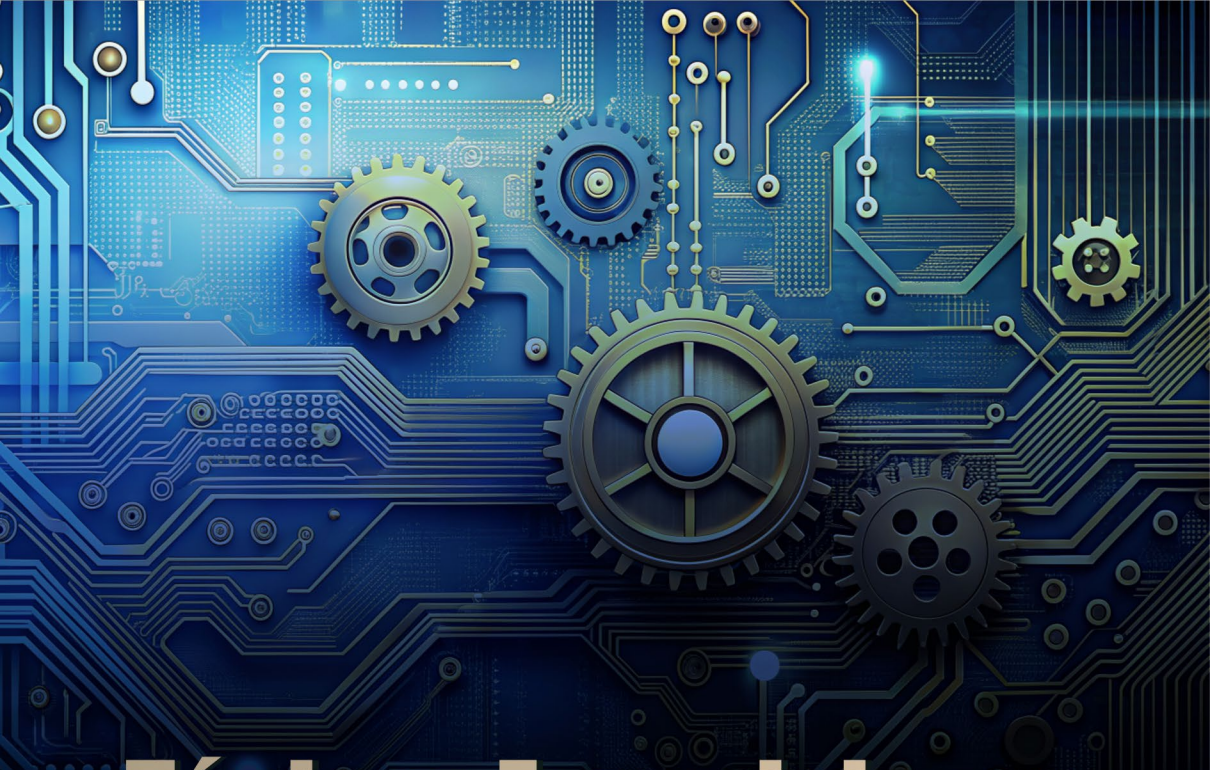


Tópicos Especiais em ENGENHARIA:

inovações e avanços tecnológicos

Vol. 16

Vol. 15

Rômulo Damasclin Chaves dos Santos
(Organizador)

AYA EDITORA
2025

Tópicos Especiais em ENGENHARIA:

inovações e avanços tecnológicos
Vol. 16

Rômulo Damasclin Chaves dos Santos
(Organizador)

Tópicos Especiais em ENGENHARIA:

inovações e avanços tecnológicos
Vol. 16

AYA EDITORA
2025

Direção Editorial
Prof.º Dr. Adriano Mesquita Soares
Organizadoras
Prof.ª Dr. Rômulo Damasclin Chaves dos Santos
Capa
AYA Editora©
Revisão
Os Autores
Executiva de Negócios
Ana Lucia Ribeiro Soares
Produção Editorial
AYA Editora©
Imagens de Capa
br.freepik.com
Área do Conhecimento
Engenharias

Conselho Editorial

Prof.º Dr. Adilson Tadeu Basquerote Silva (UNIDAVI)
Prof.ª Dr.ª Adriana Almeida Lima (UEA)
Prof.º Dr. Aknaton Toczek Souza (UCPEL)
Prof.º Dr. Alaerte Antonio Martelli Contini (UFGD)
Prof.º Dr. Argemiro Midonês Bastos (IFAP)
Prof.º Dr. Carlos Eduardo Ferreira Costa (UNITINS)
Prof.º Dr. Carlos López Noriega (USP)
Prof.ª Dr.ª Claudia Flores Rodrigues (PUCRS)
Prof.ª Dr.ª Daiane Maria de Genaro Chiroli (UTFPR)
Prof.ª Dr.ª Danyelle Andrade Mota (IFPI)
Prof.ª Dr.ª Déa Nunes Fernandes (IFMA)
Prof.ª Dr.ª Déborah Aparecida Souza dos Reis (UEMG)
Prof.º Dr. Denison Melo de Aguiar (UEA)
Prof.º Dr. Emerson Monteiro dos Santos (UNIFAP)
Prof.º Dr. Gilberto Zammar (UTFPR)
Prof.º Dr. Gustavo de Souza Preussler (UFGD)
Prof.ª Dr.ª Helenadja Santos Mota (IF Baiano)
Prof.ª Dr.ª Heloísa Thaís Rodrigues de Souza (UFS)
Prof.ª Dr.ª Ingridi Vargas Bortolaso (UNISC)
Prof.ª Dr.ª Jéssyka Maria Nunes Galvão (UFPE)
Prof.º Dr. João Luiz Kovaleski (UTFPR)
Prof.º Dr. João Paulo Roberti Junior (UFRR)
Prof.º Dr. José Enildo Elias Bezerra (IFCE)
Prof.º Dr. Luiz Flávio Arreguy Maia-Filho (UFRPE)
Prof.ª Dr.ª Maralice Cunha Verciano (CEDEUAM-Unisalento -Lecce - Itália)

Prof.ª Dr.ª Marcia Cristina Nery da Fonseca Rocha Medina (UEA)
Prof.ª Dr.ª Maria Gardênia Sousa Batista (UESPI)
Prof.º Dr. Myller Augusto Santos Gomes (UTFPR)
Prof.º Dr. Pedro Fauth Manhães Miranda (UEPG)
Prof.º Dr. Rafael da Silva Fernandes (UFRA)
Prof.º Dr. Raimundo Santos de Castro (IFMA)
Prof.ª Dr.ª Regina Negri Pagani (UTFPR)
Prof.º Dr. Ricardo dos Santos Pereira (IFAC)
Prof.º Dr. Rômulo Damasclin Chaves dos Santos (ITA)
Prof.ª Dr.ª Silvia Gaia (UTFPR)
Prof.ª Dr.ª Tânia do Carmo (UFPR)
Prof.º Dr. Ygor Felipe Távora da Silva (UEA)

Conselho Científico

Prof.º Me. Abraão Lucas Ferreira Guimarães (CIESA)
Prof.ª Dr.ª Andreia Antunes da Luz (UniCesumar)
Prof.º Dr. Clécio Danilo Dias da Silva (UFRGS)
Prof.ª Ma. Denise Pereira (FASU)
Prof.º Dr. Diogo Luiz Cordeiro Rodrigues (UFPR)
Prof.º Me. Ednan Galvão Santos (IF Baiano)
Prof.ª Dr.ª Eliana Leal Ferreira Hellvig (UFPR)
Prof.º Dr. Fabio José Antonio da Silva (HONPAR)
Prof.ª Ma. Jaqueline Fonseca Rodrigues (FASF)
Prof.ª Dr.ª Karen Fernanda Bortoloti (UFPR)
Prof.ª Dr.ª Leozenir Mendes Betim (FASF)
Prof.ª Dr.ª Lucimara Glap (FCSA)
Prof.ª Dr.ª Maria Auxiliadora de Souza Ruiz (UNIDA)
Prof.º Dr. Milson dos Santos Barbosa (UniOPET)
Prof.ª Dr.ª Pauline Balabuch (FASF)
Prof.ª Dr.ª Rosângela de França Bail (CESCAGE)
Prof.º Dr. Rudy de Barros Ahrens (FASF)
Prof.º Dr. Saulo Cerqueira de Aguiar Soares (UFPI)
Prof.ª Dr.ª Silvia Aparecida Medeiros Rodrigues (FASF)
Prof.ª Dr.ª Sueli de Fátima de Oliveira Miranda Santos (UTFPR)
Prof.ª Dr.ª Tássia Patricia Silva do Nascimento (UEA)
Prof.ª Dr.ª Thaisa Rodrigues (IFSC)

© 2025 - AYA Editora

O conteúdo deste livro foi enviado pelos autores para publicação em acesso aberto, sob os termos e condições da Licença de Atribuição Creative Commons 4.0 Internacional **(CC BY 4.0)**. Este livro, incluindo todas as ilustrações, informações e opiniões nele contidas, é resultado da criação intelectual exclusiva dos autores. Estes detêm total responsabilidade pelo conteúdo apresentado, que reflete única e inteiramente sua perspectiva e interpretação pessoal.

É importante salientar que o conteúdo deste livro não representa, necessariamente, a visão ou opinião da editora. A função da editora foi estritamente técnica, limitando-se aos serviços de diagramação e registro da obra, sem qualquer influência sobre o conteúdo apresentado ou as opiniões expressas. Portanto, quaisquer questionamentos, interpretações ou inferências decorrentes do conteúdo deste livro devem ser direcionados exclusivamente aos autores.

T757 Tópicos especiais em engenharia inovações e avanços tecnológicos [recurso eletrônico]. / Rômulo Damasclin Chaves dos Santos (organizador). -- Ponta Grossa: Aya, 2025. 93 p.

v.16

Inclui biografia
Inclui índice
Formato: PDF
Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader
Modo de acesso: World Wide Web
ISBN: 978-65-5379-800-7
DOI: 10.47573/aya.5379.2.465

1. Engenharia – Estudo e ensino. 2. Engenharia de abastecimento de água. 3.Cinemática. 4. Manutenção produtiva total. I. Santos, Rômulo Damasclin Chaves dos. II. Título

CDD: 620.007

Ficha catalográfica elaborada pela bibliotecária Bruna Cristina Bonini - CRB 9/1347

International Scientific Journals Publicações de Periódicos e Editora LTDA
AYA Editora©

CNPJ: 36.140.631/0001-53
Fone: +55 42 3086-3131
WhatsApp: +55 42 99906-0630
E-mail: contato@ayaeditora.com.br
Site: https://ayaeditora.com.br
Endereço: Rua João Rabello Coutinho, 557
Ponta Grossa - Paraná - Brasil
84.071-150

SUMÁRIO

Apresentação..... IX

01

Schedule Optimization in Industrial Automation Projects with Linear Programming and Risk Classification.....1

Rafael Alencar Sato

DOI: 10.47573/aya.5379.2.465.1

02

Estudo sobre o Potencial da Visão Computacional e do Processamento de Imagens no Aprimoramento da Eficiência Industrial 15

Alexandre Botelho Barbosa
Gabriel Henrique Grala
Emanuel Vedovetto Santos

DOI: 10.47573/aya.5379.2.465.2

03

Manutenção Produtiva Total Aplicado na Engenharia de Manutenção - Desafios e Sucessos.....40

Érica da Silva Barros Goes

Fernando Vieira Maurício
DOI: 10.47573/aya.5379.2.465.3

04

Desenvolvimento da Cinemática Direta do Robô FANUC Modelo M-410: Uma Jornada da Teoria à Simulação 51
Henrique Siqueira Camada de Souza
Camila Fredegoto Santos
Flávio Luiz Rossini
DOI: 10.47573/aya.5379.2.465.4

05

Manual Técnico para Seleção de Medidores Eletromagnéticos e Ultrassônicos em Sistemas de Tratamento e Distribuição de Água 60
Vinicius Barboza dos Santos
DOI: 10.47573/aya.5379.2.465.5

Organizador 76

Índice Remissivo 79

Apresentação

A engenharia moderna encontra-se em constante transformação, impulsionada pelo desenvolvimento de tecnologias que alteram significativamente a dinâmica dos processos produtivos. Neste contexto, o presente volume oferece uma coletânea de estudos que abordam temas de grande relevância técnica, com foco na aplicação prática de soluções computacionais e automação nos ambientes industriais.

Os capítulos reunidos neste livro percorrem distintas áreas da engenharia, entre as quais se destacam a programação linear aplicada à otimização de cronogramas, o uso de visão computacional para inspeção de qualidade e análise de imagens, e o emprego de sensores avançados nos sistemas de monitoramento e controle. Tais abordagens dialogam com os desafios contemporâneos enfrentados pelos profissionais da área, como a redução de riscos operacionais, o aumento da precisão nos processos e a automatização inteligente das tarefas industriais.

Ao integrar conceitos de inteligência artificial, aprendizado de máquina e engenharia de produção, os autores propõem modelos e metodologias que favorecem a análise crítica e a tomada de decisão técnica fundamentada. As contribuições aqui reunidas resultam de investigações teóricas e experimentações práticas que articulam diferentes saberes na busca por soluções mais eficientes e adaptadas às exigências do setor industrial.

A diversidade de enfoques evidencia o esforço em contemplar tanto os aspectos estruturais dos sistemas de engenharia quanto as possibilidades de inovação tecnológica. A comparação entre métodos tradicionais e emergentes revela uma preocupação em atualizar as práticas técnicas frente às novas demandas e capacidades computacionais.

Além disso, os estudos sugerem caminhos para futuras aplicações, especialmente no aprimoramento de processos produtivos, no planejamento estratégico de projetos e na integração de sistemas automatizados com abordagens computacionais robustas. O diálogo entre teoria e prática, presente em cada capítulo, constitui um elemento central desta obra, contribuindo para a formação técnica e acadêmica de seus leitores.

Este volume representa uma oportunidade valiosa de atualização e reflexão para pesquisadores, profissionais e estudantes das engenharias, que encontrarão aqui subsídios para compreender as transformações em curso e desenvolver competências alinhadas às demandas da indústria contemporânea.

Boa leitura!

Capítulo 01

Schedule Optimization in Industrial Automation Projects with Linear Programming and Risk Classification

Otimização de Cronogramas em Projetos de Automação Industrial com Programação Linear e Classificação de Riscos

Rafael Alencar Sato

Abstract: This study presents a methodology for optimizing schedules in industrial automation projects by integrating integer linear programming with risk classification techniques. The objective is to minimize execution time while evenly distributing risks throughout the project to enhance safety and reliability. The approach offers two scheduling options: one prioritizes the shortest execution time, supported by a risk distribution graph, and the other extends the project duration to balance simultaneous risks. Both versions aim to improve decision-making by visualizing the trade-offs between time efficiency and risk exposure. Additionally, the solution includes Gantt charts and S-curves to monitor project progress and accumulated costs over time. The results demonstrate that the proposed methodology effectively reduces execution time and enhances risk management, offering a robust framework for safer and more efficient execution of industrial automation projects.

Keywords: optimization; automation; project management; risk analysis; mathematical programming; schedules.

Resumo: Este estudo propõe uma metodologia para otimizar cronogramas em projetos de automação industrial, integrando programação linear inteira com técnicas de classificação de riscos. O objetivo é minimizar o tempo de execução e distribuir os riscos de forma equilibrada ao longo do projeto, aumentando a segurança e a confiabilidade. A abordagem oferece duas versões de cronogramas: uma foca no menor tempo de execução, apoiada por um gráfico de distribuição de riscos, enquanto a outra estende a duração para equilibrar os riscos simultâneos. Ambas visam melhorar a tomada de decisões, visualizando os compromissos entre eficiência de tempo e exposição ao risco. Além disso, a solução inclui gráficos de Gantt e curvas-S para acompanhar o progresso do projeto e monitorar os custos acumulados ao longo do tempo. Os resultados demonstram que a metodologia proposta reduz efetivamente o tempo de execução e melhora a gestão de riscos, oferecendo uma estrutura robusta para a execução mais segura e eficiente de projetos de automação industrial.

Palavras-chave: otimização; automação; gerenciamento de projetos; análise de riscos; programação matemática; cronogramas.

INTRODUCTION

Schedule management in automation projects faces the challenge of balancing tight deadlines with risk mitigation, which is usually underestimated due to pressure for fast deliveries. This study proposes an innovative scheduling approach that offers project managers two options: one optimized for the shortest possible execution time and another that balances execution time with risk management.

DOI: 10.47573/aya.5379.2.465.1

The solution relies on integer linear programming to optimize resource utilization while respecting project constraints, as highlighted by Pratiwi *et al.* (2021). Techniques such as binary logic ensure logical relationships between decisions, improving activity sequencing. Additionally, the importance of project management tools, emphasized by Flora (2010), reinforces the need for structured solutions.

The literature underscores the relevance of risk and schedule management. Kerzner (2017) states that structured project management practices enhance predictability and project success. Hillson and Simon (2020) highlight the importance of identifying and mitigating risks, while Meredith and Mantel (2018) stress schedule optimization to maximize efficiency and minimize downtime.

Thus, this methodology aims to provide managers with an effective tool for informed strategic decision-making, balancing deadlines and risks in automation projects.

MATERIAL AND METHODS

The research utilized software and secondary data. Key materials included an Excel spreadsheet for input data and Python with libraries: PuLP (linear programming), Pandas (data analysis), Matplotlib (charting), Openpyxl (Excel handling), and xml. etree.ElementTree (XML processing).

The research data was organized in an Excel spreadsheet named “Scheduler_ INPUTS.xlsx,” which contained the input variables for all analyses. Each activity in the project was uniquely identified by a Task ID and described by a Task name. The Duration was recorded in days, indicating the time required for completion. The Predecessors column listed preceding activities, separated by semicolons, to define dependencies. Cost was represented in BRL, with a Daily Cost calculated by dividing the total cost by the duration. Risk factors were assessed using a Risk Impact and Risk Probability scale from 1 to 4, with a Risk Rate calculated using “eq. (1)”.

$$Risk = \frac{(2 \text{ x Impact}) + (3 \times \text{Probability})}{5} \quad (1)$$

Activities were further categorized under a Subcategory for visual organization and grouped into a Main Category for summarized analysis. The Final Delivery field determined whether a task had successors, identifying independent deliverables. Lastly, hexadecimal Color codes were assigned to tasks for representation in the Gantt chart.

The results are based on the “Scheduler_INPUTS.xlsx” database, which simulates tasks and phases of an industrial automation project. Cost data were estimated without real prices or currency for testing purposes, while duration values were based on past project experience for realism. Figure 1 displays all tasks of a generic automation project used to test and validate the model.

Figure 1 - Data used from the file "Scheduler_INPUTS.xlsx".

TASK ID	TASK	DURATION	PREDECESSORS	COST	DAILY COST	RISK IMPACT	RISK PROB	RISK RATE	SUB CATEGORY	FINAL DELIVERY	MAIN CATEGORY	COLOR
1	Commercial PO registration	1	0	$ 500,00	$ 500,00	1	1	1,00	PM | KICKOFF	NO	PM	#FF8C00
2	Project planning - WBS	3	1	$ 2.000,00	$ 666,67	1	4	2,80	PM | KICKOFF	NO	PM	#FF8C00
3	Project planning - Financial Matrix	3	1	$ 2.000,00	$ 666,67	1	4	2,80	PM | KICKOFF	NO	PM	#FF8C00
4	Models and joints Matrix	3	1	$ 2.000,00	$ 666,67	1	4	2,80	PM | KICKOFF	NO	PM	#FF8C00
5	Request customer input data	3	1	$ 250,00	$ 83,33	1	2	1,60	PM | KICKOFF	NO	PM	#FF8C00
6	Internal KickOff	2	2;3;4	$ 1.500,00	$ 750,00	1	2	1,60	PM | KICKOFF	NO	PM	#FF8C00
7	Project revision - Schedule	3	6	$ 2.000,00	$ 666,67	1	2	1,60	PM | KICKOFF	NO	PM	#FF8C00
8	Customer KickOff	2	7	$ 4.000,00	$ 2.000,00	1	4	2,80	PM | KICKOFF	NO	PM	#FF8C00
9	Customer Input data (3D data)	7	5	$ 500,00	$ 71,43	1	2	1,60	PM | KICKOFF	NO	PM	#FF8C00
10	Layout	4	8	$ 1.000,00	$ 250,00	2	1	1,40	ENGINEERING | PROCESS	NO	PM	#8A2BE2
11	Process Simulation	4	9;8	$ 400,00	$ 100,00	2	3	2,60	ENGINEERING | PROCESS	NO	PM	#8A2BE2
12	Cycle time diagram	4	9;8	$ 1.000,00	$ 250,00	2	3	2,60	ENGINEERING | PROCESS	NO	PM	#8A2BE2
13	Process Planning Sheets	4	9;8	$ 2.000,00	$ 500,00	2	2	2,00	ENGINEERING | PROCESS	NO	PM	#8A2BE2
14	Mechanical Design RFQ	4	10;11;12;13	$ 1.500,00	$ 375,00	2	2	2,00	PROCUREMENT | NOMINATION	NO	PROCUREMENT	#6495ED
15	Controls Design RFQ	4	10;11;12;13	$ 1.500,00	$ 375,00	2	2	2,00	PROCUREMENT | NOMINATION	NO	PROCUREMENT	#6495ED
16	Robot Programming RFQ	4	10;11;12;13	$ 1.500,00	$ 375,00	2	2	2,00	PROCUREMENT | NOMINATION	NO	PROCUREMENT	#6495ED
17	PLC Programming RFQ	4	10;11;12;13	$ 1.500,00	$ 375,00	2	2	2,00	PROCUREMENT | NOMINATION	NO	PROCUREMENT	#6495ED
18	Mechanical Design Quotations	4	14	$ 500,00	$ 125,00	3	2	2,40	PROCUREMENT | NOMINATION	NO	PROCUREMENT	#6495ED
19	Controls Design Quotations	4	15	$ 500,00	$ 125,00	3	2	2,40	PROCUREMENT | NOMINATION	NO	PROCUREMENT	#6495ED
20	Robot Programming Quotations	4	16	$ 500,00	$ 125,00	3	2	2,40	PROCUREMENT | NOMINATION	NO	PROCUREMENT	#6495ED
21	PLC Programming Quotations	4	17	$ 500,00	$ 125,00	3	2	2,40	PROCUREMENT | NOMINATION	NO	PROCUREMENT	#6495ED
22	Mechanical Design Nomination	3	18	$ 500,00	$ 166,67	3	1	1,80	PROCUREMENT | NOMINATION	NO	PROCUREMENT	#6495ED
23	Controls Design Nomination	3	19	$ 500,00	$ 166,67	3	1	1,80	PROCUREMENT | NOMINATION	NO	PROCUREMENT	#6495ED
24	Robot Programming Nomination	3	20	$ 500,00	$ 166,67	3	1	1,80	PROCUREMENT | NOMINATION	NO	PROCUREMENT	#6495ED
25	PLC Programming Nomination	3	21	$ 500,00	$ 166,67	3	1	1,80	PROCUREMENT | NOMINATION	NO	PROCUREMENT	#6495ED

Source: Original Research Data.

To optimize the project schedule, Integer Linear Programming (ILP) was applied, ensuring efficient task allocation while respecting precedence, duration, and resource constraints, as documented by Wolsey (1998) and Taha (2017).

The objective function has been defined to minimize the total duration of the project. Mathematically, it can be expressed as demonstared in "eq. (2)":

$$Minimize\ Z = max\ (Tend\ i) \quad (2)$$

Z: The objective function value, representing the total project duration.

$Tend\ i$: The completion time of task.

$max\ (Tend\ i)$: The latest completion time among all tasks, determining the total project duration.

The goal is to minimize the variable Z. This variable represents the makespan, which is the total time required to complete all tasks in the schedule and $Tend\ i$ represents the end time of the activity i.

Decision variables were established, representing the start and end times of each task. $Tstart\ i$: Activity start time i.

$Tend\ i$: Activity end time i, calculated as $Tstart\ i + Di$, where Di is the duration of the activity i.

Constraints were incorporated to maintain task precedence and ensure resource availability, with all time-related variables restricted to integer values.

Activities should begin only after the end of their previous ones for all activities that are preceding as demonstrated in "eq. (3)".

$$Tstart, i \geq Tend, j \quad (3)$$

$Tstart, i$: The start time of task i.

$Tend, j$: The end time of task j.

Capacity Constraints: If applicable, limits on the number of resources available at any given point in time have been considered, where $R_{i,k}$is the resource k used by the activity i, and $R_k$is the total availability of the resource k as demonstrated in "eq. (4)".

$$\sum_i R_{i,k} \leq R_k \tag{4}$$

Completeness of Variables: The variables at the beginning and end of the activities were restricted to integer values.

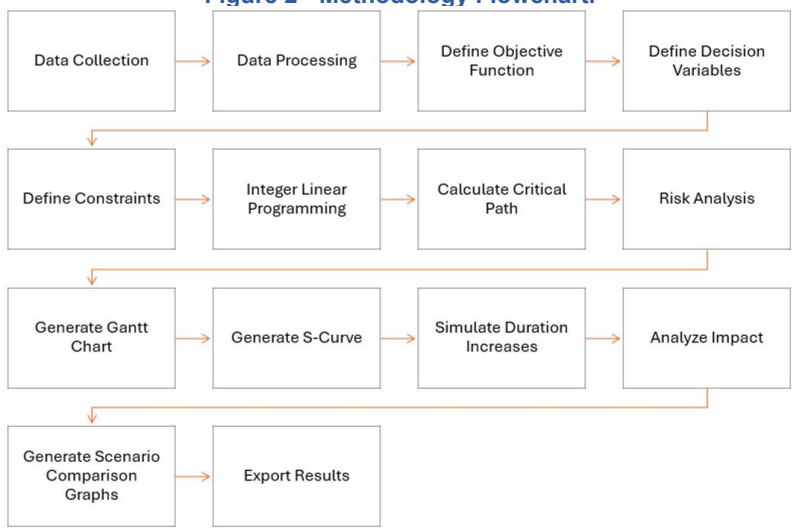
A directed graph was constructed to model the project's task dependencies. Using Linear Programming (LP), the critical path was calculated, determining the minimum project execution time. In parallel, risk analysis was conducted by distributing each task's total risk evenly over its duration. This approach provided a daily risk distribution, which was later visualized for better project assessment.

For enhanced visualization, Gantt charts were generated to illustrate the sequence of activities and their durations, while S-curves depicted accumulated costs over time. The methodology followed established project management visualization techniques, as described by Kerzner (2013).

A key part of the methodology involved simulating task duration increases ranging from 20% to 40% in 1% increments. These simulations helped analyze the impact of extended durations on overall project completion and risk levels. Scenario comparison graphs were generated to illustrate variations in total project duration and average daily risk across different delay levels.

Finally, all results were exported, including tables and graphs detailing project schedules, accumulated costs, and risk evolution over time. A final validation step ensured that daily costs summed correctly to match the total project cost, confirming data accuracy before concluding the process. In figure 2, a detailed flowchart is presented, illustrating the step-by-step process of the applied methodology.

Figure 2 - Methodology Flowchart.



Source: Original Research Data.

Results

The full set of outputs generated by the model can be found in Table 1.

Table 1 - Set of outputs.

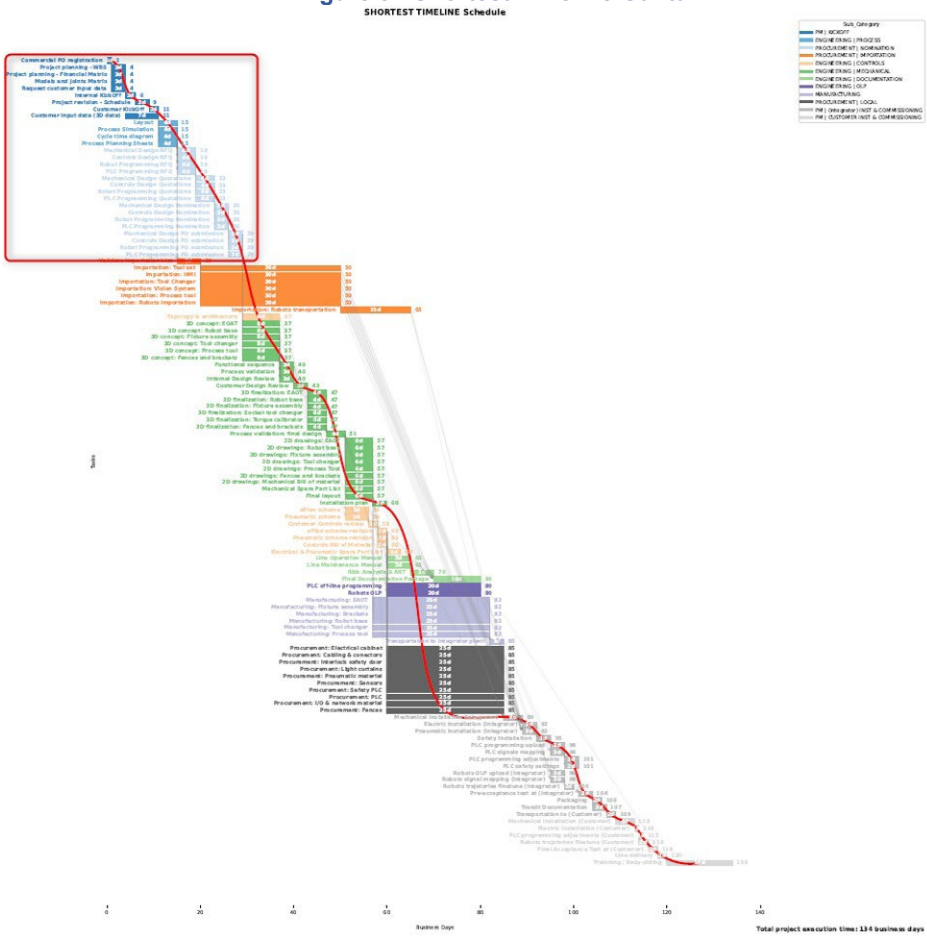
ID	Time Line Concept	Chart Type	Extension
1	Shortest	Timeline Gantt	pdf
2	Shortest	Timeline S-Curve	pdf
3	Shortest	Timeline Risks Chart	pdf
4	Shortest	Timeline Cumulative Risk Chart	pdf
5	Shortest	Timeline Categorized Schedule	pdf
6	Balanced	Timeline Gantt	pdf
7	Balanced	Timeline S-Curve	pdf
8	Balanced	Timeline Risks Chart	pdf
9	Balanced	Timeline Cumulative Risk Chart	pdf
10	Balanced	Timeline Categorized Schedule	pdf
11	Balanced	Timeline Increased Duration Simulation	pdf
12	Balanced	Timeline Risk Average Simulation	pdf

Source: Original Research Data.

Shortest Timeline Gantt

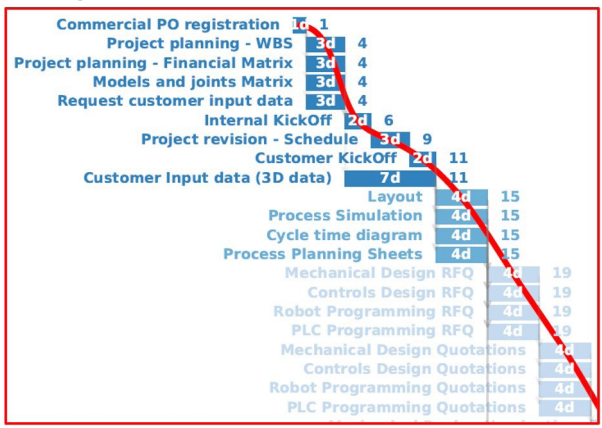
The first result obtained by the code is the Shortest Timeline Gantt, which aims to optimize the execution of the project in the shortest possible time. In the generated Gantt chart (figures 3 and 4), each activity is represented as a horizontal bar, indicating the start, duration, and end time. Activities are organized chronologically and color-coded according to their categories, facilitating workflow visualization. The critical path of the project is highlighted with a red spline curve, showing the sequence of tasks that defines the minimum total project duration.

Figure 3 - Shortest Timeline Gantt.



Source: Original Research Data.

Figure 4 - Shortest Timeline Gantt, Zoom In.

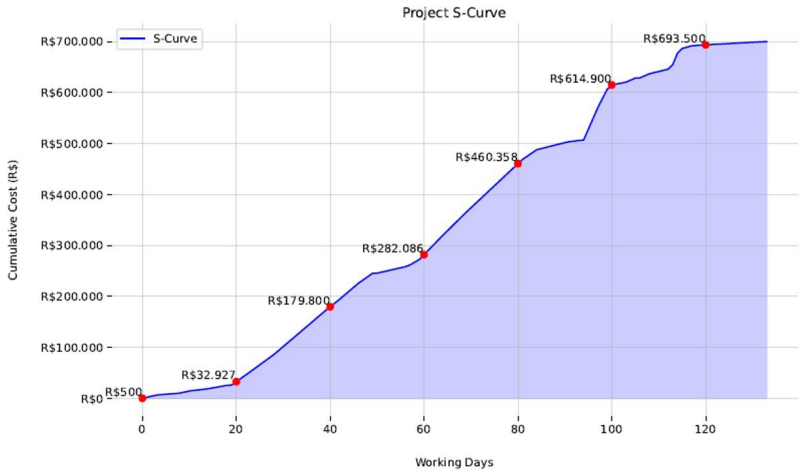


Source: Original Research Data.

Shortest Timeline S-Curve

The financial S-curve (figure 5) visualizes the costs accumulated over time. This chart highlights the points where costs accumulate most quickly, serving as an essential tool for tracking cash flow and ensuring the project stays within budget.

Figure 5 - Financial Shortest Timeline S-Curve.

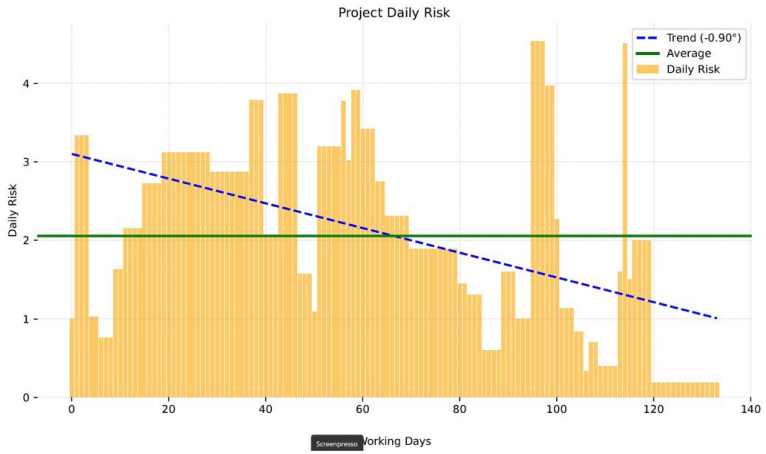


Source: Original Research Data.

Shortest Timeline Risks Chart

Once the “Shortest Timeline” is generated, the model also produces a detailed chart of daily risks throughout the project’s execution (figure 6). This chart compiles the risks associated with each activity and represents the total accumulated risk for each day along the project schedule.

Figure 6 - Shortest Timeline Risks Chart.

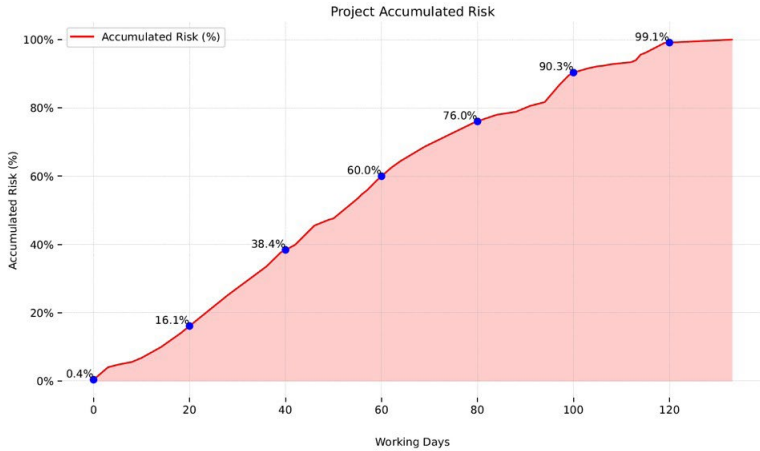


Source: Original Research Data.

Shortest Timeline Cumulative Risk Chart

The cumulative risk chart (figure 7) illustrates the total identified risks over time, providing a clear view of risk evolution during the project's execution.

Figure 7 - Shortest Timeline Cumulative Risk Chart.

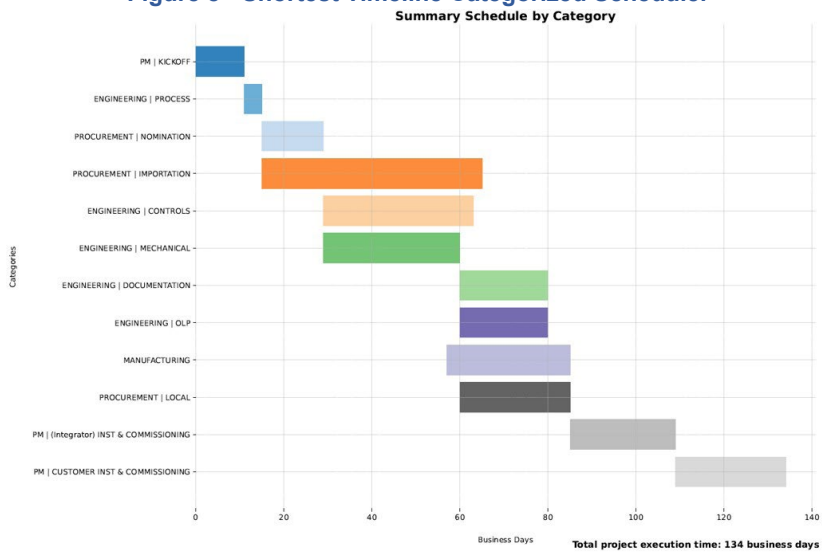


Source: Original Research Data.

Shortest Timeline Categorized Schedule

A categorized schedule (figure 8) offers a macro view of the project, summarizing phases and components for managers, directors, and clients without detailing each activity.

Figure 8 - Shortest Timeline Categorized Schedule.



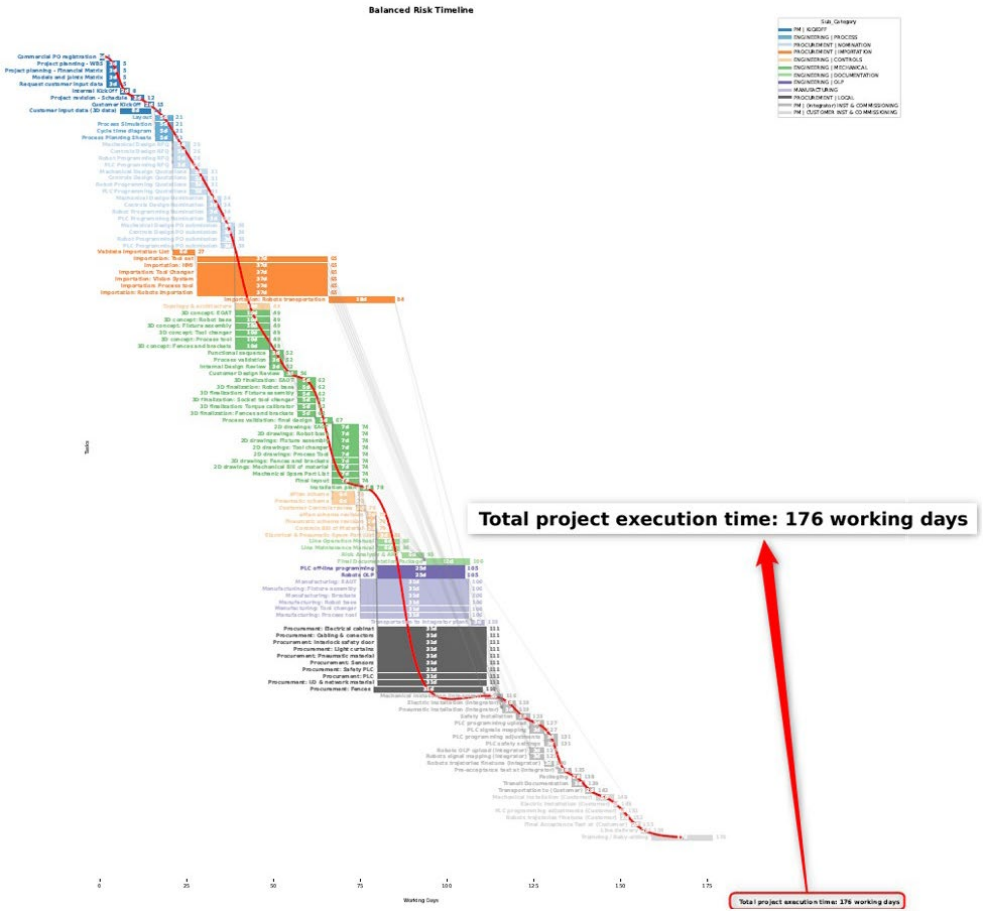
Source: Original Research Data.

After generating the initial analysis package, the model produces a second package, where risks are distributed more efficiently to reduce daily loads. This second set of charts follows the same structure but features a chosen percentage reduction in daily risks, allowing decision-makers to compare a faster, riskier schedule with a more balanced, controlled alternative.

Balanced Timeline Gantt

In figure 9, the total project execution time increased from 134 working days to 176 working days when a 25% risk reduction is applied.

Figure 9 - Balanced Timeline Gantt.

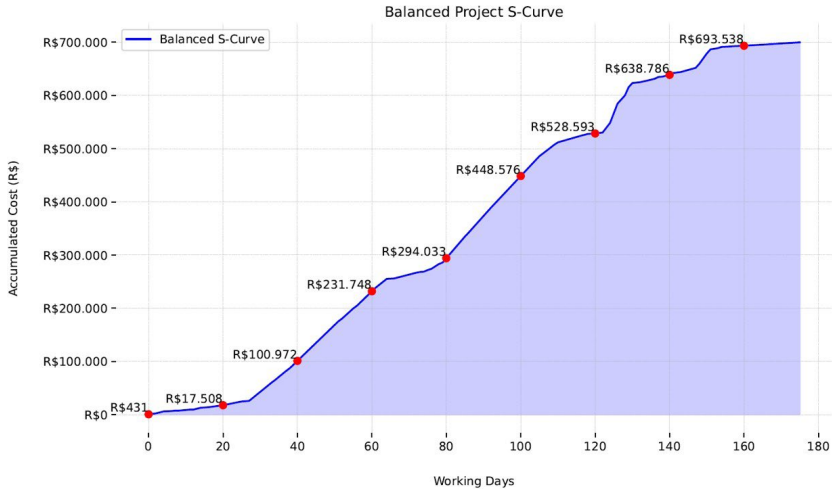


Source: Original Research Data.

Balanced Timeline S-Curve

Figure 10 shows that the adjusted financial distribution positively impacts cash flow.

Figure 10 - Balanced Timeline S-Curve.



Source: Original Research Data.

Balanced Timeline Risks Chart

In figure 11, the risk level never exceeds grade 4, ensuring a safer execution with fewer resources and lower costs.

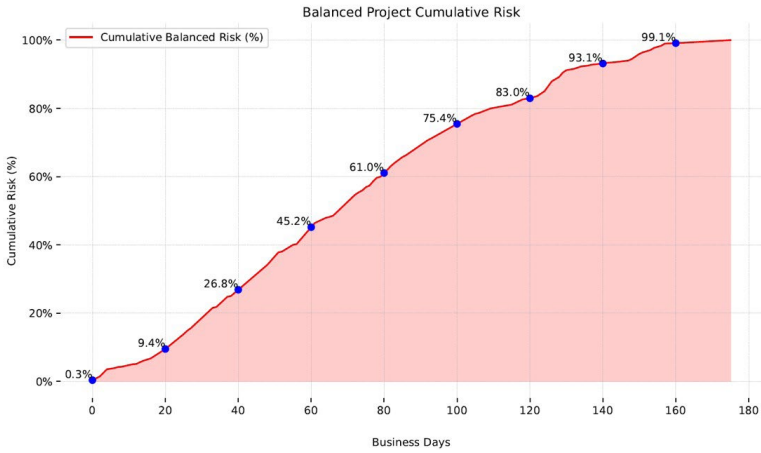
Figure 11 - Balanced Timeline Risks Chart.

Source: Original Research Data.

Balanced Timeline Cumulative Risk Chart

The cumulative risks in this schedule are more evenly distributed compared to the more aggressive approach (figure 12).

Figure 12 - Balanced Timeline Cumulative Risk Chart.

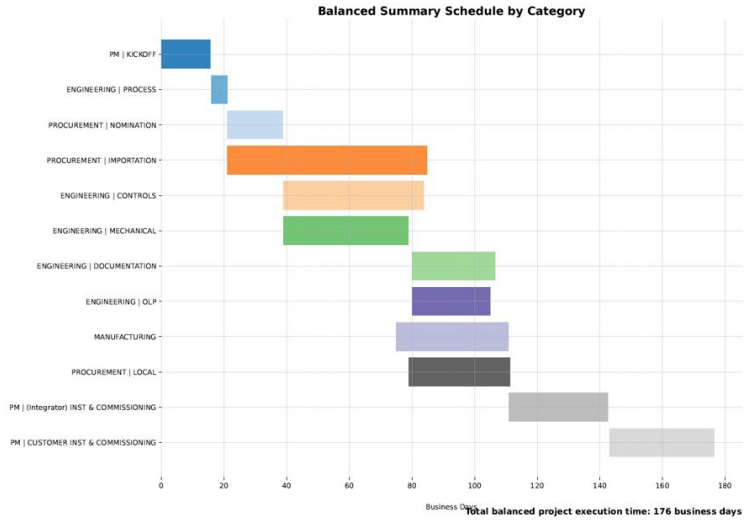


Source: Original Research Data.

Balanced Timeline Categorized Schedule

Figure 13 provides a clearer view of the proportional increase in execution time.

Figure 13 - Balanced Timeline Categorized Schedule.

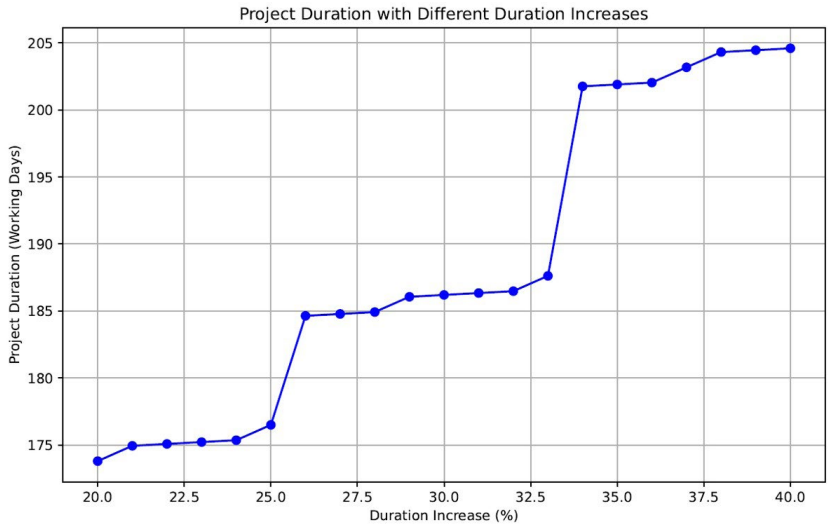


Source: Original Research Data.

Balanced Timeline Increased Duration Simulation

The chart in “Figure 14: Balanced Timeline Increased Duration Simulation” illustrates the impact of various percentage increases in task durations on the total project timeline. It shows how the overall project duration changes as task durations are incrementally extended from 20% to 40%, providing a visual analysis of how different duration increases affect the project’s completion time, helping in decision-making to balance risks and schedule efficiency.

Figure 14 - Balanced Timeline Increased Duration Simulation.

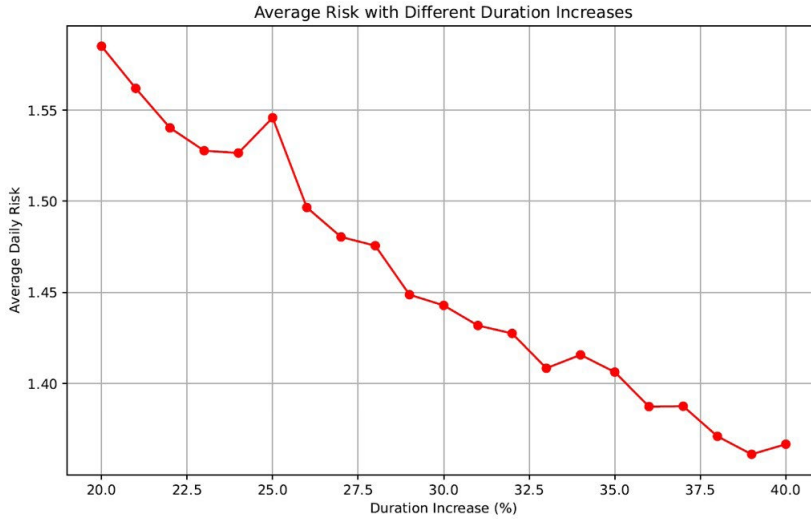


Source: Original Research Data.

Balanced Timeline Risk Average Simulation

The chart in “Figure 15: Balanced Timeline Risk Average Simulation” depicts the average daily risk levels across different scenarios where task durations are increased by varying percentages, ranging from 20% to 40%. It visually demonstrates how the average risk fluctuates with each increment, helping to identify the risk impact associated with extending task durations and assisting in evaluating the best strategy to manage project risks effectively.

Figure 15 - Balanced Timeline Risk Average Simulation.



Source: Original Research Data.

FINAL CONSIDERATION

This work developed a schedule optimization model for industrial automation projects, combining integer linear programming and risk classification. The objective was to provide project managers with different execution strategies, allowing them to choose between a faster schedule or one with better risk distribution. This approach supports decision-making by mapping risk impacts throughout the project.

The results show that the shortest-duration schedule reduced the total execution time to 134 working days but resulted in a higher concentration of daily risks. To mitigate these impacts, a second schedule was generated, extending execution to 176 working days and distributing risks more evenly, eliminating those above level 4 and reducing the occurrence of moderate risks. This model enables safer and more precise project execution, potentially optimizing resource use and reducing costs.

For future work, this model can be applied to different types of projects and clients, expanding its usability. Additionally, it can serve as a reference for preparing commercial proposals, helping define optimized schedules that better align with client needs and project risks.

REFERENCES

Dantzig, G. B. (1963). *Linear programming and extensions.* Princeton, Princeton University Press.

Flora, R. D. (2010). *Proposta para gerenciamento de projetos para desenvolvimento de produtos na PPG Industrial do Brasil Tintas e Vernizes Ltda*. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Administração) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Hillier, F. S.; Lieberman, G. J. (2010). *Introduction to operations research*. 9ed. New York, McGraw-Hill.

Hillson, D.; Simon, P. (2020). *Practical project risk management: The ATOM methodology.* 3ed. Boca Raton, CRC Press.

Kerzner, H. (2017). *Project management: A systems approach to planning, scheduling, and controlling*. 12ed. Hoboken, John Wiley & Sons.

Meredith, J. R.; Mantel, S. J. (2018). *Project management: A managerial approach.* 10ed. Hoboken, John Wiley & Sons.

Pratiwi, M.; Rosyidi, C. N.; Yuniaristanto. (2021). *An optimization model for course scheduling in Undergraduate Industrial Engineering Program of Universitas Sebelas Maret.* IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1072.

Pritsker, A. A. B.; Waiters, L. J.; Wolfe, P. M. (1969). *Multiproject scheduling with limited resources: A zero-one programming approach*. Management Science, 16(1):93–108.

Santos, P. E. C. D. (2023). *Metodologia para gerenciamento das incertezas do cronograma do projeto por indicadores de sensibilidade.* Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

Taha, H. A. (2017). *Operations research: An introduction.* Pearson.

Vanderbei, R. J. (2015). *Linear programming: Foundations and extensions*. 4ed. New York, Springer.

Weglarz, J. (Ed.). (2012). *Project scheduling: A research handbook*. Springer.

Wolsey, L. A. (1998). *Integer programming.* John Wiley & Sons.

Capítulo 02

Estudo sobre o Potencial da Visão Computacional e do Processamento de Imagens no Aprimoramento da Eficiência Industrial

Study on the Potential of Computer Vision and Image Processing in Enhancing Industrial Efficiency

Alexandre Botelho Barbosa

Engenheiro Mecatrônico, Universidade Paranaense – Unipar

Gabriel Henrique Grala

Engenheiro Eletricista, Universidade Paranaense – Unipar

Emanuel Vedovetto Santos

Engenheiro Eletricista, Instituto Federal do Paraná – IFPR

Resumo: Este trabalho explora a importância da Visão Computacional em diversos setores, com foco em automação industrial, medicina e segurança. A Visão Computacional, uma subárea da inteligência artificial, busca imitar a visão humana por meio da integração de tecnologias ópticas e algoritmos avançados de processamento de imagens, tais como segmentação e detecção de objetos, permitindo que sistemas automatizados extraiam informações essenciais para a tomada de decisões. A pesquisa compara o desempenho da Visão Computacional em ambientes estáticos e dinâmicos, abordando a aplicação de câmeras e algoritmos para monitorar processos industriais, como a extrusão de materiais e a inspeção de produtos em tempo real. Para isso, são utilizados sistemas que detectam defeitos em peças, como parafusos, baseados em critérios de forma e cor, destacando a eficácia de algoritmos visuais no controle de qualidade. Também é explorado o uso de dispositivos como o Neural Computer Stick (NCS), o qual acelera o processamento de dados. Além disso, técnicas como Deep Learning têm um papel crucial na análise de imagens, sendo eficazes em setores como a agricultura, onde são aplicadas para identificar pragas. A tecnologia de imagem hiper espectral é destacada por sua capacidade de detectar defeitos invisíveis a câmeras convencionais, ampliando as possibilidades de controle de qualidade. Por fim, conclui-se que a Visão Computacional, ao integrar sensores e algoritmos avançados, pode melhorar a eficiência e segurança nos processos industriais, apesar de desafios como custos e a necessidade de mão de obra qualificada para sua implementação eficaz.

Palavras-chave: visão computacional; processamento de imagens; machine learning; deep learning; eficiência industrial; inteligência artificial.

Abstract: This study explores the significance of Computer Vision across various sectors, with a focus on industrial automation, medicine, and security. Computer Vision, a subfield of artificial intelligence, seeks to emulate human vision through the integration of optical technologies and advanced image processing algorithms, such as segmentation and object detection, enabling automated systems to extract essential information for decision-making. The research compares the performance of Computer Vision in static and dynamic environments, addressing the application of cameras and algorithms to monitor industrial processes such as material extrusion and real-time product inspection. Systems used for defect detection in components, such as screws, based on shape and color criteria, are employed, highlighting the effectiveness of visual algorithms in quality control. The study also explores the use of devices such as the Neural Compute Stick (NCS), which accelerates

DOI: 10.47573/aya.5379.2.465.2

data processing. Additionally, techniques such as Deep Learning play a crucial role in image analysis and are effective in sectors like agriculture, where they are applied to pest identification. Hyperspectral imaging technology is highlighted for its ability to detect defects invisible to conventional cameras, expanding the possibilities of quality control. Finally, it is concluded that Computer Vision, through the integration of sensors and advanced algorithms, can enhance efficiency and safety in industrial processes, despite challenges such as cost and the need for skilled labor for effective implementation.

Keywords: computer vision; image processing; machine learning; deep learning; industrial efficiency; artificial intelligence.

INTRODUÇÃO

O processamento de imagens é um dos aspectos fundamentais das diversas inovações tecnológicas da robótica, responsável por permitir que máquinas entendam e interpretem informações visuais coletadas de ambientes ao seu redor. Através de habilidades técnicas como a melhoria visual, o recondicionamento e a segmentação de imagens, máquinas automatizadas são capazes de extrair informações úteis das imagens coletadas e usá-las para tomar decisões estratégicas e, consequentemente, realizar tarefas pré-estabelecidas (DataScientest - Image Processing: Fundamental Principles and Practical Uses, 2023).

A visão computacional é uma das áreas da Inteligência Artificial que busca simular a habilidade visual humana por meio da extração de elementos do mundo real coletados de imagens e vídeos. Isso envolve a integração de tecnologias óticas, mecânicas e elétricas, além de hardware e software de computadores, abrangendo informática, processamento de imagens, reconhecimento de padrões, inteligência artificial e processamento de sinais, bem como a união de áreas relacionadas à óptica, mecânica e elétrica, entre outras. Esse processo inclui diversas tarefas com diferentes objetivos, como a classificação de imagens, a detecção de objetos, o rastreamento de objetos, a segmentação semântica, a segmentação de instâncias, entre outras aplicações.

As capacidades visuais humanas são caracterizadas pela estrutura e funcionalidade do córtex visual, que é uma ferramenta incrivelmente admirável e de difícil reprodução, capaz de reconhecer o que os humanos veem em relação a cores, formas, limites e muito mais, até mesmo em casos de variações significativas. O computador, por sua vez, possui uma capacidade completamente diferente de lidar com a informação visual, pois interpreta o mundo físico como uma imensa coleção de números correspondentes a cores e intensidades de pixels. Ele trata imagens como arrays multidimensionais que consistem em um ou mais canais, de acordo com o uso de uma escala cromática como referência, ou seja, uma escala colorida ou monocromática em tons de cinza (Awouda, 2021).

Na linha de montagem automatizada, este processo é controlado automaticamente por computadores, que são responsáveis por coletar, processar e dar um feedback sobre vários tipos de informações necessárias para o resumo das operações de processamento e transporte. Além disso, o controle hierárquico

das unidades individuais e dos equipamentos de transmissão são feitos através de computadores industriais e outros dispositivos de controle (Yuan, 2021).

Nos últimos anos, uma série de pesquisas e investigações tem sido o foco de implementações de técnicas de detecção em tempo real de um objeto alvo dentre um grupo de outros objetos e, consequentemente, o cálculo de vetores de distância relacionados a tal objeto. Uma das considerações a serem feitas durante esse processo, de acordo com a pesquisa realizada por William Freet, em sua tese de doutorado pela *California State University de Long Beach* de 2019, é a precisão dessa detecção versus os custos computacionais de processar uma transmissão de vídeo, aliado a uma captura de imagens contínua, que sejam capazes de serem constantemente otimizadas para a obtenção de resultados cada vez mais eficazes.

A integração de um sistema de visão robótica, modelos combinados e um sistema de reconhecimento é crucial para os sistemas de inspeção em fábricas industriais. A visão computacional desempenha um papel essencial na produção automatizada e não-humanizada dentro de uma fábrica. O controle de qualidade visual e sua aplicação automatizada são realizados por câmeras instaladas na linha de montagem da indústria moderna. O produto finalizado é analisado por um sistema de reconhecimento de imagens, que o classifica como “satisfatório” ou “não satisfatório” com base em técnicas de aprendizado profundo voltadas ao controle de qualidade.

De acordo com a empresa alemã IDS, especializada em soluções estratégicas automatizadas para diversos setores — como equipamentos industriais, fábricas, engenharia mecânica, tecnologias médicas, agricultura, transporte e logística —, a integração de inovações computacionais, inteligência artificial e câmeras possibilita a criação de soluções personalizadas para cada necessidade específica. A junção de mecanismos compactos e design eficiente, voltados para uma relação custo-benefício sustentável, aliada a uma visão analítica de sustentabilidade e redução de impactos ambientais, viabiliza processos inteligentes. Esses processos utilizam câmeras e computadores com o objetivo de desenvolver equipamentos tecnológicos, flexíveis e inovadores.

OBJETIVOS

Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é a explorar como as tecnologias de Visão Computacional e Processamento de Imagens podem contribuir para um melhor desempenho de processos automatizados, através de pesquisas bibliográficas com ênfase nos resultados obtidos durante a implementação de tais tecnologias nos amplos setores industriais. Especificamente, aqueles que se propuseram a fazer a migração de tecnologias anteriores para as novas técnicas de automação através do reconhecimento e processamento de imagens no intuito de otimizar os processos e, dessa forma, gerar resultados com uma relação custo-benefício mais vantajosa, considerando também a relação qualidade-tempo do produto final.

Objetivos Específicos

Comparar os estudos de Visão Computacional com foco no reconhecimento baseado em ambiente estático e dinâmico e suas características;

a) Analisar a integração de Visão Computacional e Processamento de imagens como sendo o ponto chave da transformação de processos manuais para processos automatizados inteligentes que obtenham resultados superiores quando implementados de maneira correta e correspondente aos objetivos previamente estipulados por setores específicos;

b) Investigar os sensores mais utilizados nos setores industriais e seus potenciais;

c) Explorar a tecnologia de processamento de imagens, ponderando sobre suas diferentes técnicas e distinções para a obtenção de resultados mais eficientes em processos automatizados de diferentes áreas.

JUSTIFICATIVA

Na era da revolução digital e da inteligência artificial, discute-se os benefícios que essas inovações trazem ao facilitar tarefas com maior precisão e eficiência. No entanto, seu uso inadequado pode gerar prejuízos à sociedade. A visão computacional, que permite que máquinas interpretem conteúdos visuais como os humanos, é fundamental para a inovação em setores como automação industrial, medicina, segurança e análise de dados.

HIPÓTESE

Estima-se que o conhecimento contínuo de tecnologias de Visão Computacional e Processamento de Imagens podem se tornar um elemento fundamental no empoderamento de agentes inteligentes que, em tese, operariam no mundo real de forma autônoma. Máquinas robóticas necessitam constantemente de aprendizado, testes, falhas e, por fim, especialização, a fim de aprimorar seus comportamentos de maneira eficiente e adaptada ao contexto.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA / DESENVOLVIMENTO

As técnicas de Visão Computacional continuam ganhando importância relevante em nossas aplicações diárias. Ainda assim, de acordo com o último *Gartner Hype Cycle* de 2023, em especial quando se trata de ferramentas de Inteligência Artificial (IA), a Visão Computacional está atingindo níveis de produtividade extraordinários. Atualmente, a visão computacional tem um papel importante no setor industrial, particularmente ao proporcionar capacidade de inspeção de qualidade automática como parte dos processos de controle de qualidade.

Entretanto, o mundo da automação está se tornando cada vez mais complexo. A indústria 4.0, a “Internet das Coisas”, a tecnologia de nuvem, a IA, a ciência de ML, e muitas outras tecnologias têm apresentado desafios extremos aos usuários e desenvolvedores de sistemas de visão em relação a escolha do sistema correto e mais apto para suas respectivas aplicações (Rahman, *et al.,* 2023).

De fato, com o desenvolvimento acelerado acontecendo em muitas áreas, as técnicas de *Machine Vision (MV)*, os sensores CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*), MV embutido, ML, *Deep Learning (DL)*, as interfaces robóticas, os padrões de transmissão de dados, e as capacidades de MV, oferecem benefícios ao setor industrial das mais variadas formas.

Uma breve introdução a *Computer Vision* (CV) e *Machine Vision* (MV)

CV é uma das áreas da Inteligência Artificial que permite que computadores e sistemas extraiam informações significativas de imagens digitais ou fotos, vídeos e muitos outros tipos de *input* visuais, para que então, os mesmos sejam capazes de atuarem ou fazerem recomendações com base nessas informações. Além disso, a área de CV utiliza uma grande quantidade de dados para executar análises que levam a distinção e, logo, o reconhecimento das imagens.

Para realizar tal tarefa, a CV utiliza um dos tipos mais eficazes de algoritmos de ML, que é DL; mais especificadamente, *Convolutional Neural Networks* (CNNs). Contudo, MV é uma subárea de CV, referente ao estudo de técnicas e métodos através dos quais sistemas de visão artificial possam ser construídos e implementados em aplicações práticas de maneira útil. A introdução de MV em processos industriais é geralmente motivado pelo desejo de reduzir custos ao aumentar a eficiência (e consequentemente, a produtividade), reduzir os erros (e então aumentar a produtividade) ou coletar dados.

É importante destacar que a visão computacional (CV) pode se tornar uma alternativa para a escassez de trabalhadores com habilidades específicas ou para evitar que operários sejam expostos a atividades perigosas, exigentes e que geram fadiga no setor industrial. Já a técnica de MV tem sido compreendida como uma percepção prática da compreensão de imagens com o objetivo de ajudar a resolver problemas industriais de forma prática envolvendo um componente visual significante.

Aplicações Industriais de Visão Computacional

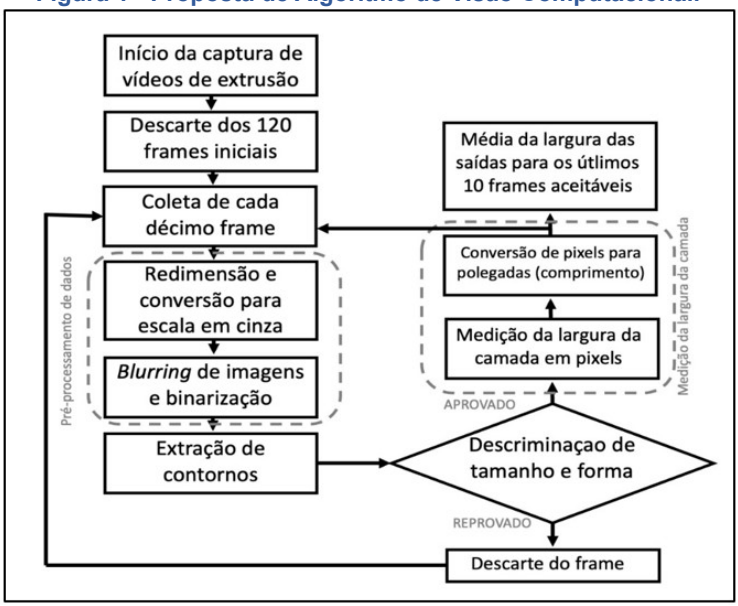
A monitoração em tempo real de qualidade durante a construção robótica de um projeto

Em um experimento em laboratório, uma impressora de concreto é usada para avaliar a performance das técnicas propostas através de experimentos, a coleta de dados e o processamento dos mesmos. Utilizando uma câmera Logitech

720p capaz de capturar vídeos de extrusão, a qual é conectada firmemente ao extrusor usando um montante impresso em 3D, que está posicionado na direção da superfície da camada impressa. A distância das lentes da câmera da superfície da camada extraída é uma distância fixa de 40cm.

Os vídeos de extrusão são processados em tempo real por um Raspberry Pi 3 modelo B. O algoritmo proposto por Kazemian (*et al.,* 2019) (figura 1) mede a largura da camada recentemente extraída e a compara com a largura esperada da camada final, para detectar excesso de extrusão ou extrusão não suficiente. O excesso de extrusão pode ser identificado pelo simples aumento de largura da camada, comparada a largura esperada a ser obtida. A extrusão classificada como não suficiente, por outro lado, poderia resultar em três diferentes condições: a redução da largura da camada, a ruptura e descontinuidade da camada extraída ou deposição zero.

Figura 1 - Proposta de Algoritmo de Visão Computacional.



Fonte: adaptado de Kazemian *et al.* 2019.

Figura 2 - Imagem do processo de extrusão preparado visto da parte superior da superfície: (a) imagem em tempo real com a camada extrudada (extruded layer) e a cama de impressão (printing bed); (b) a mesma imagem é demonstrada de forma binária correspondente.

(a) (b)

Fonte: Kazemian *et al.* 2019.

Em relação ao algoritmo de processamento de vídeo, um procedimento baseado em forma é adotado ao invés de procedimentos baseados em cor e textura, os quais, geralmente, não proporcionam resultados confiáveis para a detecção de objetos mais finos, com os desse estudo de caso. A detecção baseada em forma produz uma série de processos que tendem a gerar um processamento mais adequado ao estudo pela sua capacidade de comunicar-se com a rede de dados de forma mais rápida.

Entretanto, a detecção por cor e textura é também muito utilizada em processos em que cor e textura são definidos como parâmetros de detecção para diferentes finalidades pré-estabelecidas. Ambos processos de detecção possuem a capacidade de obter resultados igualmente eficazes, apesar do fato de que a detecção por cor e textura tende a passar por um maior processamento de imagens e conexões com a rede de dados, o que gera uma maior complexidade no processo de visão computacional e processamento de imagens como um todo.

Para cada teste de extrusão, a gravação de vídeo e o processamento começam simultaneamente com o processo de extrusão. O objetivo é preparar uma melhor imagem para o próximo passo do processamento e, depois, a imagem é "borrada" utilizando um filtro Gaussiano. A imagem é convertida através de um método de limitação binário utilizado para separar o fundo (a cama de impressão) e a camada extrudada. Então, uma imagem binária é produzida, na qual a "camada extrudada" é apresentada na cor branca e o fundo é preto. O próximo passo é detectar o contorno da imagem através do método de discriminação de forma, após encontrar e verificar o contorno da camada, a largura da camada é medida.

Para demonstrar uma aplicação dessa técnica, o algoritmo de visão computacional proposto por Kazemian (*et al.,* 2019) é utilizado para implementar um sistema com feedback de controle de extrusão para o processo de *"Contour Crafting"*, traduzido de forma grosseira como a "manufatura de contorno". O objetivo é desenvolver um sistema de extrusão capaz de ajustes automáticos dos parâmetros de extrusão tal qual a camada com a largura alvo seja continuamente extrudada utilizando qualquer mistura necessária para a impressão, sem a necessidade de calibração prévia, apesar de algumas variações no material de impressão.

Estudos ainda são necessários para melhorias de performance nessas técnicas e a constante atualização dos estudos do algoritmo para a eficácia total do processo deve ser mantido como prioridade. Mesmo assim, em se tratando de um estudo relativamente novo, os resultados obtidos têm provado que o desenvolvimento de uma tecnologia de extrusão baseada em visão que possa imprimir automaticamente camadas de dimensões específicas, usando qualquer mistura passível de ser impressa sem a necessidade de calibração prévia, é viável.

Sistemas de Visão Computacional são sempre uma melhor solução, já que suas tecnologias integradas de MV as permitem reagir e adaptar ao que está acontecendo em torno e dentro do processo como um todo. Os resultados obtidos (figura 2) revelam a alta precisão e responsividade do sistema de monitoramento da extrusão desenvolvido sob condições experimentais. O uso de um computador de placa única poderia limitar a performance do sistema implementado. Os conectores,

que são geralmente a causa de problemas, estão presentes em números pequenos nesses sistemas. Esse processo aumenta a confiabilidade, mas torna as reparações difíceis ou até impossíveis.

Com o uso de computadores embutidos, talvez seja possível obter resultados melhores em menos tempo, bem como realizar cálculos que poderiam melhorar a qualidade da extrusão ao aumentar o tamanho da amostra implementada. Um sistema embutido, normalmente, controla as operações físicas da máquina na qual ele se encontra. É comum que tais sistemas possuam restrições computacionais em tempo real. Sistemas embutidos controlam muitos equipamentos de uso comum hoje em dia. Além disso, para uma melhor qualidade da renderização da visão em tempo real, é preciso considerar a técnica de *splatting* tridimensional (3D) Gaussiana para a renderização de campo de radiação em tempo real desenvolvida por Bernhard Kerbl (2023).

Inspeção de parafusos em linha de produção baseada em Visão Computacional

Aqui, utilizaremos o estudo da aplicação de CV na inspeção de parafusos tipo *bolt* e *screw* desenvolvido por Rajan (*et al.,* 2021). Utilizando câmeras com Inteligência Artificial, uma foto do objeto, que seria sujeito a um sistema de inspeção através de tecnologia de visão, foi tirada. Uma “imagem analógica” foi transformada em uma “imagem digital” através de amostragem e quantização. A próxima fase é o pré-processamento, que prepara a foto para um processamento subsequente. A foto pré-processada foi utilizada como ponto inicial para o processo de segmentação que transmite a representação da imagem para um formato mais aceitável para processamento.

Um NCS (*Neural Computer Stick*) da Intel para processamento de borda foi o hardware de aceleração utilizado durante a investigação. As linguagens de programação voltadas para orientação de objetos Python e C++ foram usadas em combinação para criar a linguagem de códigos já que a Python foi criada para esse objetivo. Um módulo de câmera com diodos de emissão de luz infravermelha, foi usado para identificar os defeitos no item. Embora o software SolidWorks tenha sido usado para criar o *outcasing* necessário.

Os dados de *input* da câmera foram traduzidos para dados binários para processamento subsequente e são similares aos dados visuais, que são tipicamente reconhecidos pelos olhos humanos. Todo o procedimento aconteceu utilizando uma máquina equipada com um NCS Intel, um sensor de visão e um microcontrolador para armazenar dados e desempenhar a tarefa de identificar defeitos.

“O microcontrolador é ativado por tarefas IoT (*Internet of Things*) que possam ser desenvolvidas baseadas no defeito”, constatou Rajan (*et al.,* 2021). Além do mais, os parafusos da linha de fabricação são reconhecidos pela câmera quando os mesmos passam por baixo dela e, posteriormente, são analisados de forma mais detalhada pelo sistema. Os parafusos defeituosos são identificados e eliminados. Dessa forma, é possível dividir os defeitos em três categorias: defeito de cor, defeito de orientação e defeito de ruptura.

Na verdade, problemas no processo de produção ou deterioração do fluxo de dados quando se utiliza um modelo neural para descobrir o defeito de cor no parafuso quando ele está em movimento na área de teste de qualidade é o que, em sua maioria, causa defeitos de cor. Os contornos são criados e um sinal é entregue pelo microcontrolador buscando separá-lo quando a falha é confirmada como um valor superior a marca limite (figura 3).

Porém, um dos mais frequentes defeitos encontrados em parafusos do tipo *bolt* é o defeito em sua orientação. Os erros nas orientações desses parafusos podem ser descobertos utilizando técnicas CNN. Os defeitos nesses parafusos são as desorientações. Os parafusos problemáticos são identificados por terem um problema de orientação quando são retirados da linha de montagem.

Algumas rupturas são particularmente difíceis de serem encontradas utilizando técnicas tradicionais, o que vem a ser o terceiro defeito: os defeitos de ruptura. O fluxo de dados deve ser contínuo enquanto a foto do parafuso é enviada através de um modelo neural para detectar a fratura enquanto ele está em movimento na região de teste de qualidade. Para reduzir distorção visual, a imagem é convertida em escala-de-cinza. Aplica-se a função de borrar (*blurring*) para facilitar a visualização do parafuso. Também é utilizada a detecção de bordas para localizar os contornos e fazer a combinação com os dados comuns. A identificação do defeito de ruptura é uma consequência da alteração de dados ou incompatibilidade.

Figura 3 - Amostra de identificação de área de defeito através de comparação por cor.

Fonte: Rajan *et al.* 2021.

Deep Learning revolucionando a análise de imagens

Calcular os recursos identificáveis de imagens e alimentá-los a um algoritmo de *Machine Learning* tem sido visto como o procedimento padrão na área de CV por muitos anos. Esse cálculo de aspectos relevantes das imagens requerer uma maior atenção, já que os mesmos devem ser representados pela aplicação e calculados de maneira precisa e robusta para cada objeto na imagem. Já que o cálculo apropriado de aspectos importantes elimina a complexidade da classificação essencial ou do modelo previsível, algoritmos relativamente simples, contendo um número limitado de parâmetros a serem ajustados, são desejáveis.

O método de visão computacional clássico adotado inclui um primeiro passo onde características são extraídas de uma imagem através de uma operação manual/humana e essas características são então transmitidas para um algoritmo de *Machine Learning*. Já a visão computacional através de *Deep Learning* é um

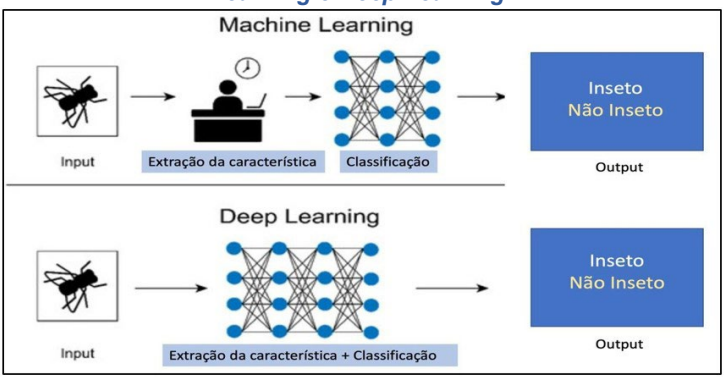
processo de um único procedimento durante o qual o próprio algoritmo extrai as características relevantes e as processa em um desejado resultado. Como exemplo ilustrativo, podemos analisar a classificação automática de insetos voadores baseada em imagens (figura 4).

Essa tecnologia é extremamente relevante na agricultura, especialmente no monitoramento de insetos prejudiciais às plantações. Em ambos os casos, a prática comum é capturar esses insetos em equipamentos pegajosos, que são então coletados e inspecionados manualmente por uma equipe treinada. Esse exemplo ilustra bem a funcionalidade da tecnologia de visão computacional (CV), que utiliza computadores para analisar e interpretar imagens digitais. Em contraste com o procedimento clássico, o uso de tecnologia *Deep Learning* envolve utilizar uma arquitetura que engloba muitas camadas intermediárias (daí o termo *deep* - profundo) ao invés de apenas algumas camadas e, ainda assim, treinando-a de maneira supervisionada. Utiliza-se CNNs como base, tais CNNs possuem uma arquitetura de multicamadas, o que reduz gradualmente os dados de entrada (por exemplo, a imagem) até a representação mais relevante.

Em sua essência, CNNs consistem na aplicação de um filtro matemático gerando um *input* para produzir uma ativação. Quando este filtro é aplicado repetidamente a diferentes partes desse *input*, o resultado é um mapa de diferentes ativações. Essas ativações denotam as localizações e pontos altos de uma característica detectada no *input*. A vantagem de arquiteturas de *Deep Learning* complexas é que elas conseguem lidar tanto com a extração da característica quanto com a classificação final ou a fase preditiva.

Esse processo simplifica a tarefa para o usuário que não tem mais que definir e extrair características relevantes da imagem. Entretanto, esta flexibilidade tem o preço de um modelo mais complexo e que pode ser mais difícil de compreender. Portanto, é necessário um grande volume de dados para ajustar corretamente o modelo, considerando o extenso número de parâmetros envolvidos na escolha de um sistema de *Deep Learning*.

Figura 4 - Representação comparativa do processo de extração da característica e classificação de insetos nas tecnologias de *Machine Learning* e *Deep Learning*.



Fonte: Adaptado de Ketelaere *et al.* 2022.

Sistema de Imagem Hiper Espectral que Permite Ver o Invisível

Uma segunda grande tendência na área da visão computacional é a disponibilidade de sistemas de imagens avançados que vão além da pancromática ou Red (vermelho), Green (verde) e Blue (azul), o chamado RGB – um esquema de cores que imita o olho humano, onde as células cone são sensíveis a luzes vermelhas, verdes ou azuis, proporcionando uma percepção de cores. Ao imitar padrões humanos, padrões que são invisíveis para nós, serão invisíveis para o sistema de visão computacional também. Como muitas aplicações de visão computacional buscam substituir a inspeção visual humana, isso é aceitável para muitas aplicações.

Entretanto, para outras aplicações essa limitação não é desejável. Um exemplo disso é visto na Figura 5. À esquerda, uma embalagem comum impressa em cores contendo fatias de queijo é mostrada, vista por uma câmera RGB clássica. Na parte inferior, parte de uma fatia de queijo está prendida na área de selagem, levando a embalagem a perder sua tão desejada apreensão de ar para conservação do produto. Considerando que o material da embalagem é impresso, torna-se praticamente impossível detectar a presença de material indesejado na área de selagem do produto. Dessa forma, a tecnologia de sistemas de visão computacional com câmera tradicional é inapropriada para essa aplicação.

Figura 5 - (a): imagem de uma embalagem comum de alimentos tirada com uma câmera RGB; (b): a mesma imagem sendo vista através de uma câmera hiper espectral, possibilitando a detecção de uma anomalia na região de selagem da embalagem.

(a) (b)

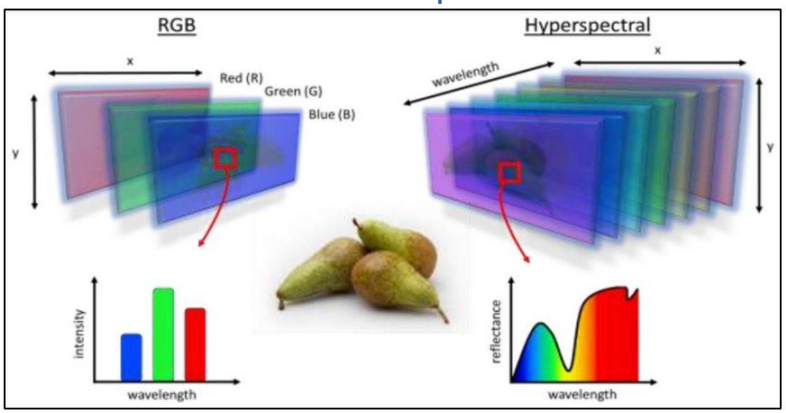
Fonte: Ketelaere *et al.* 2022.

Para aumentar o âmbito da visão computacional, o interesse em sistemas que nos permitam “ver” mais do que o olho humano tem crescido exponencialmente nas últimas décadas. Uma das direções mais promissoras é o desenvolvimento de sistemas de imagens multiespectral e hiper espectral. Sua ideia principal é construir sistemas de imagens que expandam os princípios de funcionamento de câmeras RGB em duas direções. Primeiramente, esses sistemas separam o alcance do

comprimento de onda coberto em um número extenso de bandas de cores mais estreitas. Abaixo temos um exemplo, figura 6.

Na imagem à esquerda, o princípio de funcionamento de uma câmera RGB é apresentado de forma esquemática. Para cada pixel na imagem, três valores diferentes são gerados, representando as quantidades de luz vermelha (R), verde (G) e azul (B). No lado direto, temos a contraponto a representação hiper espectral. Ao invés de ter valores R, G e B para cada pixel, um grande número de intensidades é obtido, resultando em uma impressão digital espectral. A imagem hiper espectral resultante consiste então de duas dimensões espaciais (x e y), e uma dimensão espectral que, juntas, constroem o chamado hipercubo.

Figura 6 - (a): em imagens RGB, cada pixel contém três intensidades, uma para o vermelho, uma para o verde e uma para o azul; (b): em imagens hiper espectrais, uma impressão digital espectral completa para cada pixel na imagem é gerada. Essa estrutura de dados complexa é chamada de hipercubo.



(a) (b)

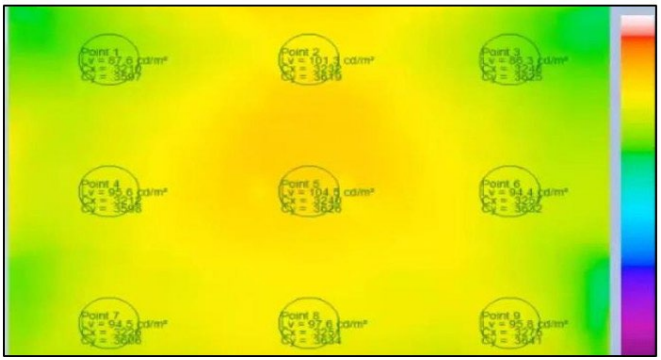
Fonte: Ketelaere *et al.* 2022.

A razão para o aumento expressivo da tecnologia hiper espectral é o fato de que o hardware tem melhorado de forma drástica e tem se tornado mais acessível. Câmeras hiper espectrais na região do silício, por exemplo, até 1000nm, estão disponíveis atualmente através de múltiplos fornecedores, o que reduz a barreira de entrada para adoção delas na indústria. Além disso, nos últimos anos a variação de comprimento de onda de 1700nm e até 2500nm tem se tornado disponível para o uso rotineiro industrial.

Quanto maior a onda de impressão digital, mais oportunidades de existir o estabelecimento de métricas a serem adotadas como parâmetros específicos de identificação para cada necessidade particular, como visto na figura 7. Essa disponibilidade tem aumentado o interesse das empresas em querer desempenhar medidas de qualidade em uma variedade extensa de produtos para os quais a tecnologia de visão computacional não era possível no passado. Um outro fator é que a aquisição, análise e interpretação dos dados gerados por câmeras hiper espectrais passou por uma revolução, com espaço de armazenamento praticamente

ilimitado, computadores com potência que continuam a aumentar e algoritmos novos que permitem uma análise mais precisa das imagens hiper espectrais.

Figura 7 - Representação de uma onda de impressão digital demonstrado a possibilidade de pontos específicos sendo adotados como parâmetros de identificação para finalidades específicas.



Fonte: Radiant Vision Systems, 2024.

Portanto, como visto na Figura 5, a imagem da mesma embalagem selada de alimento é vista por um comprimento de onda bem específico através de uma câmera hiper espectral que é sensitiva fora da parte visível do espectro eletromagnético. O material da embalagem impressa em colorido é muito mais transparente no espaço de onda, o que permite "ver" através dele na onda dada. Fica claro que, baseado na imagem, os algoritmos de visão computacional serão capazes de detectar esses tipos de defeitos.

A Tecnologia de Processamento de Imagens

A tecnologia de processamento de imagem digital

O método de deslocamento de medida no processamento digital é um método de monitoração de deslocamento sem contato e seu custo é menor do que o deslocamento métrico, o GPS, uma estação eletrônica total ou por interferômetro. Os métodos de monitoração de deslocamento baseados no processamento de imagens digitais são geralmente divididos em duas categorias: o método de correlação de imagem digital e o método de monitoramento de um alvo específico.

O método de correlação de imagem digital, ou também conhecido como método de correlação da posição digital, é um método importante para monitorar a distorção no campo do processamento de uma imagem digital. O princípio básico é tirar imagens pontuais antes e após a estrutura ser deformada e dividir as imagens pontuais antes da deformação em sub-regiões menores. Após isso, para cada sub-região, ao selecionar uma função de correlação específica para o cálculo, encontrar a região na imagem distorcida com o maior coeficiente de correlação com a sub-região e tratá-la como a nova posição da sub-região após a deformação e, dessa forma, realizar a substituição.

Se for preciso calcular o deslocamento de todo o campo, será possível calcular a correlação de todas as sub-regiões. As vantagens desse método são: o algoritmo é simples e fácil de ser implementado, o campo de visão é amplo, o método de monitoração de distorção sem contato é adotado e o nível de precisão da monitoração é alto contrapartida, uma desvantagem desse método é que sua essência consiste em realizar um grande número de cálculos iterativos. Além disso, a complexidade do cálculo é elevada, especialmente quando os pixels da imagem são grandes, o que resulta em uma quantidade enorme de cálculos de correlação da imagem, podendo não atender aos requisitos de velocidade de monitoração.

No método de monitoração de um alvo específico, como o próprio nome sugere, a monitoração do alvo busca localizar um alvo específico em cada *frame* de uma imagem no intuito de criar um trajeto do alvo. Uma placa de calibração é colocada no alvo a ser medido para compensar o efeito chamado de *offset*. Após realizar uma amostragem do deslocamento da placa de calibração com uma câmera digital, é possível identificar o deslocamento nesse momento.

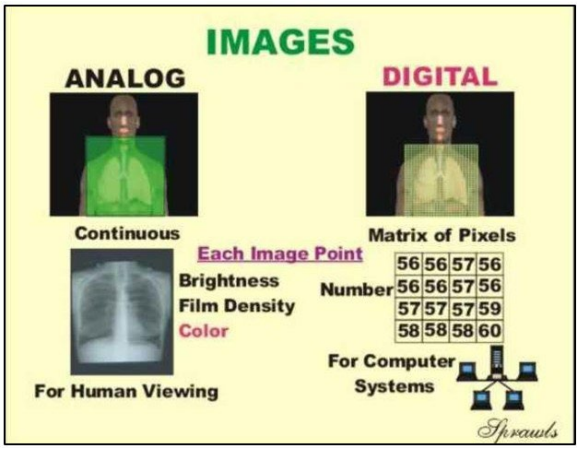
Comparado com a tecnologia de imagem digital, essa tecnologia de monitoração de alvo é mais adequada para monitorar a migração da estrutura. É importante ressaltar que essa tecnologia possui um ponto baixo: a estruturação irracional de monitorar os alvos. Alguns pesquisadores utilizam lasers e outras fontes de luz como alvos de monitoração, o que não só demandam uma extensa lista de requisitos para o ambiente de monitoração, como também causam um maior impacto ao meio ambiente.

A tecnologia de processamento de imagem analógica

O processamento de imagem analógica inclui o processamento de lentes óticas, a fotografia e uma produção de TV, que são classificados como tipos de processamento em tempo real. Na Figura 8, é apresentado um exemplo de processamento de imagem analógica. À esquerda, observa-se a imagem analógica sendo processada de forma contínua para a obtenção de pontos na imagem com base no brilho, na densidade do filme e na cor, com o objetivo de possibilitar a visualização humana. À direita, apresenta-se o mesmo exemplo de processamento, agora em formato digital, no qual o processo é similar, porém uma matriz de pixels é extraída da imagem, e os dados numéricos resultantes são transmitidos para sistemas computacionais.

A velocidade de processamento de imagens analógicas é consideravelmente rápida, podendo trabalhar de forma paralela. Em teoria, o processamento de imagem analógica pode atingir a velocidade da luz, no entanto as desvantagens são inquestionáveis nos dias atuais. Na era da revolução digital, fatores como a baixa precisão, a quase inexistência de funções críticas e o método de processamento não linear, tornam-se extremamente evidentes, resultando em um nível de aceitação cada vez menor diante da demanda por resultados eficazes, rápidos e inteligentes.

Figura 8 - Figura representando um exemplo de processamento de imagem analógica e digital.



Fonte: Sprawls, s.d.

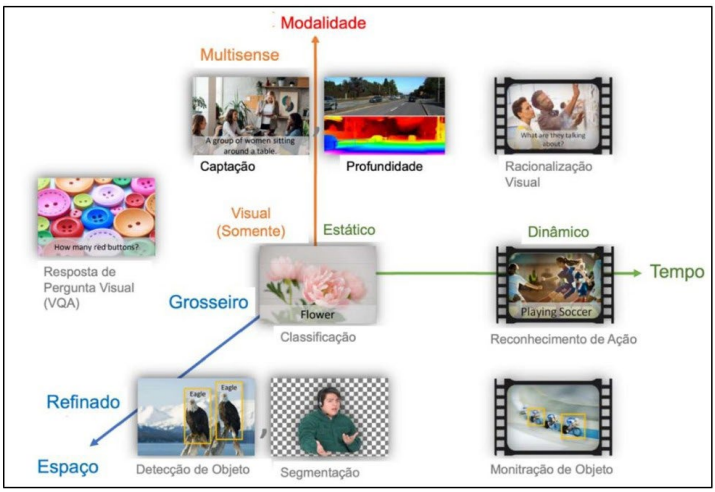
Estudo Comparativo de Visão Computacional com Foco no Reconhecimento Baseado em Ambiente Estático e Dinâmico

A compreensão visual automatizada, do chamado open world, exige modelos de visão computacional que generalizem de forma eficaz o mínimo de personalização para tarefas específicas, parecido com a visão humana. Os modelos que servem como base para a visão computacional são treinados numa configuração de dados em larga escala e diversa, além de conterem a capacidade de adaptação a uma ampla gama de tarefas que exigem download consideravelmente baixas. Esses modelos são cruciais para resolverem aplicações de visão computacional no mundo real.

Os modelos mais conhecidos como base são o CLIP (Radford, 2021), ALIGN (Jia, 2021) e Wu Dao 2.0 (Wud). Esses modelos focam principalmente no mapeamento de imagens e representações textuais para um modelo cruzado de representação compartilhada. Um novo modelo base de visão computacional é o Florence.

O modelo Florence propõe expandir desde o grosseiro (uma cena) ao refinado (um objeto), do estático (imagens) ao dinâmico (vídeos) e de RGB à múltiplas modalidades (captação, profundidade, etc.). Através da incorporação de representações de uma linguagem visual universal de dados textuais em escala da web, o modelo Florence pode ser facilmente adaptado para várias tarefas de visão computacional, como por exemplo a classificação, a coleta, a detecção de objetos, VQA, processo de perguntar e responder visualmente (tradução nossa), a captação de imagem, a coleta de vídeo e o reconhecimento de ação.

Figura 10 - Demonstração de como tarefas de visão computacional comuns são mapeadas em um ambiente contendo a modalidade tempo-espaço. Uma visão computacional base deve servir como um sistema de visão com um propósito geral para todas essas tarefas.

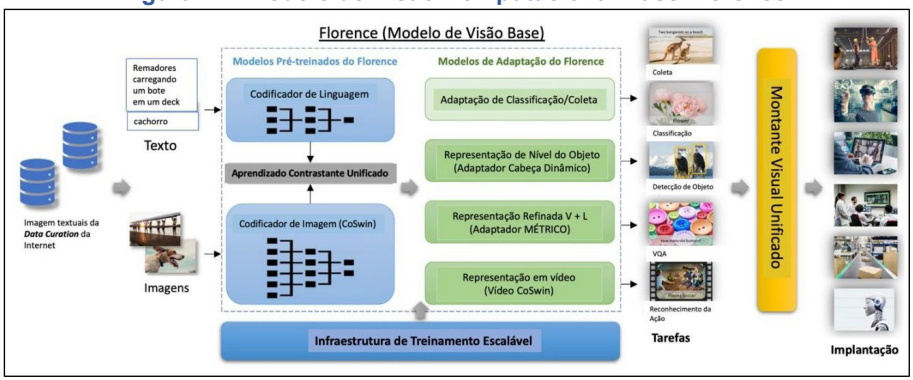


Fonte: Adaptado de Yuan *et al.* 2021.

O modelo Florence reorganiza essas tarefas de uma forma mais prática e com resultados superiores. Ele consiste na organização de dados, aprendizado unificado, conta com uma arquitetura transformadora e possibilita constante adaptações. O modelo pode ser ajustado a diversos tipos de tarefas conhecidas como downstream, que podem finalmente ser integradas a um sistema de visão computacional poderoso para uma melhor performance da visão do mundo real e aplicações multimídia.

Comparado aos modelos existentes de pré-treino de imagem textual, em sua grande maioria limitados na representação compartilhada no modelo cruzado para a classificação e coleta (ilustrado em verde no módulo verde na figura 10), o sistema Florence expande a representação no intuito de suportar o nível do objeto, a modalidade múltipla e vídeos respectivamente (figura 11).

Figura 11 - Modelo de Visão Computacional Base Florence.



Fonte: Adaptado de Yuan *et al.* 2021.

Estudo de Sensores mais Utilizados nos Setores Industriais e seus Potenciais

Sistemas avançados industriais requerem uma performance cada vez mais aprimorada, principalmente devido à necessidade de controle de qualidade durante a etapa de produção. Entretanto, defeitos como arranhões, marcas pontuais ou até buracos na superfície do produto, afetam não somente a estética do produto e o conforto de seu uso, mas também sua performance. A detecção de defeito é um método efetivo de reduzir impactos resultantes de defeitos no produto. A inspeção visual é um método tradicional de desempenho do controle de qualidade em produtos industriais.

Machine Vision (MV) é uma das tecnologias principais para adquirir uma fabricação inteligente no setor industrial por ser um sistema que recebe e processa automaticamente objetos reais através de equipamentos óticos e sensores de não-contato. A visão é uma das percepções humanas mais elevadas, as imagens têm um papel muito relevante na percepção humana. Porém, a percepção humana é limitada a faixa visível do espectro eletromagnético.

Já a tecnologia de inspeção visual através de MV é capaz de cobrir todo o espectro eletromagnético, desde os raios gama até ondas de rádio. Através de sensores visuais poderosos, métodos de transmissão ótica excepcionais e algoritmos de processamento de imagem. A tecnologia MV consegue desempenhar muitas funções que não podem ser desempenhadas apenas por uma simples visão artificial.

Com o desenvolvimento de equipamentos computacionais e da inteligência artificial, a *Machine Vision* tem sido empregada como tecnologia de medição e julgamento. O setor industrial tem usado amplamente essa combinação para obtenção de resultados mais eficientes. A tecnologia de sensores de detecção é capaz de aprimorar a eficiência de detecção e o grau de automação, aumentar a performance e precisão da detecção em tempo real e reduzir a necessidade de trabalho manual, especialmente em casos de processos de produção industrial em larga escala.

Um sistema de inspeção visual típico do setor industrial consiste normalmente em três módulos: iluminação ótica, aquisição e processamento de imagens e detecção de defeitos. Primeiramente, com base nas características do produto e os parâmetros de inspeção pré- estabelecidos, uma plataforma de iluminação ótica é projetada. Após isso, câmeras ou outro tipo de hardware de aquisição são usados para converter os objetos-alvo, dispostos no campo de luz, em imagens e transmiti-las para um computador.

Como um tipo de transportador de informações, as imagens que são capazes de refletir os detalhes dos objetos tornando-se o elemento crucial da inspeção visual, portanto, sua qualidade é extremamente importante. Os pré-requisitos para esse processo são plataformas excelentes de iluminação ótica e hardware de aquisição, característicos de cada função a ser executada, dessa forma imagens de alta qualidade são obtidas.

Assim, baseadas em alguns algoritmos tradicionais de processamento de imagens e de *Deep Learning*, várias operações são desempenhadas nas imagens para extrair características específicas e realizar a classificação, localização, segmentação e outras operações.

O desenvolvimento e as inovações dos sensores estão em constante evoluçã. Porém, dentre os diversos tipos de sensores óticos disponíveis, os sensores CCD (*Charge Coupled Device*) e CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*) continuam sendo os mais escolhidos pelo setor industrial em razão da sua performance de alta qualidade e a obtenção de resultados eficientes e positivos.

Em suas essências, ambos os sensores CCD e CMOS aproveitam o efeito fotoelétrico ao transformarem luz em sinais elétricos. Embora ambas essas tecnologias compartilhem do mesmo objetivo, seus métodos de captura, quantificação e recriação das imagens diferem consideravelmente. Os sensores CCD tendem a produzir imagens com maior qualidade e com menos ruído por causa de suas camadas chamadas de epilayers mais grossas.

Já os sensores CMOS oferecem uma maior sensibilidade a ondas infravermelhas e um consumo de energia menor, tornando- os uma escolha mais popular em sistemas de *Machine Vision* e outras aplicações que exijam processamento rápido. A distinção principal entre sensores CCD e CMOS consiste no método de geração de uma imagem vindos de sinais elétricos. Enquanto o chip CMOS incorpora um amplificador em cada pixel, os sensores CCD não.

Tecnologia do sensor CCD

Os sensores CCD são equipamentos analógicos que trabalham através de um processo de transferência de carga para capturar imagens. Cada pixel em um sensor CCD consiste em um fotodiodo e uma fonte de potência, que atuam como um receptor de fotoelétrons. A velocidade de aquisição de imagem é limitada à conversão de fotoelétrons em sinais (voltagem) em uma única porta.

Apesar dessa limitação, o CCD é amplamente reconhecido por sua capacidade de gerar imagens de alta qualidade com baixo nível de ruído, característica que o tornou inicialmente uma escolha preferida para diversas aplicações, como visão computacional e sistemas de visão embarcados. A frequência, ou seja, o quanto por segundo o sensor é capaz de transportar a carga através de um pixel, é chamada de "*pixel clock*" (relógio de pixel). As frequências nas quais os sensores CCD operam hoje em dia são de aproximadamente 25 a 50 MHz.

Os sensores CCD geralmente podem ser classificados em três layouts, que podem ser descritos subsequentemente: sensor de transferência do tipo *interline*, sensor de transferência do tipo *full frame* e sensor de transferência do tipo *frame* – o sensor do tipo *interline* tem sido o mais usado em *Machine Vision*.

Sensor do tipo *interline*

Apenas esse tipo de sensor pode captar frames muito rápidos através de uma função de ativação eletrônica e é, portanto, usado em 90% das câmeras industriais CCD para *Machine Vision*.

Os modelos modernos que representam a alta sensibilidade e boa qualidade de imagem são, por exemplo, o sensor de 1.4 megapixel Sony CCD ICX285, Sony ICX625 (5 megapixels), Sony ICX694 (6 megapixels), Kodak TrueSense KAI-08050 (8 megapixels) e KAI-29050 (29 megapixels).

Sensor do tipo *full frame*

Nesse tipo de sensor, toda a superfície do dispositivo é iluminada de forma ativa (o fator de preenchimento é de até 100%), portanto este sensor é ideal para a sensibilidade a brilhos máximos. Dessa forma, ele é muito usado em aplicações científicas e astronômicas com o intuito de detectar as menores quantidades de luz durante um período longo, por vários minutos, e resfriado de maneira eficaz.

O design desse sensor não contém nenhum registro de movimentos verticais e, então, a carga do pixel deve ser mudada através de estruturas de pixel vizinhas para um registro de pixel horizontal. Os pixels mantêm suas luzes ativadas mesmo durante a leitura.

Sensor do tipo *frame*

Primeiramente, a imagem é capturada na parte clara do sensor, em seguida ela é rapidamente alternada para a parte escura. Essas estruturas são fisicamente iguais aos pixels com luzes ativadas, elas são cobertas mecanicamente para evitar luz incidente. Após isso, linha após linha é lida via o registrador de movimento horizontal, depois amplificada e digitalizada. A principal vantagem dessa tecnologia é seu alto fator de cobertura, próximo de 100%. No entanto, ela exige o dobro da superfície de silício, o que resulta em um sensor mais caro.

Após alternar para a área escura, o sensor pode capturar uma nova imagem. Contudo, esse tipo de tecnologia é menos adequado para tempos de exposição mais curtos, já que um efeito maior, chamado de *smear* (borrão), poderia aparecer durante a mudança da parte clara para a parte escura. Esse problema pode ser solucionado através de um ativador mecânico ou através da captura de foto utilizando flash. Atualmente, este tipo de sensor é raramente utilizado na área de *Machine Vision*.

Tecnologia do sensor CMOS

Em contraste com os sensores CCD, os sensores CMOS já incorporam um amplificador em cada pixel, resultando em um consumo de energia menor e um processamento de sinais mais rápido.

Entretanto, a presença de amplificadores adicionais e um conversor de analógico para digital (ADC) no circuito gera mais ruído na imagem de saída. Apesar dessa desvantagem, os sensores CMOS têm ganhado popularidade por causa da eficácia de custo na linha de fabricação e sua aplicabilidade para o uso em equipamentos móveis, cuja aplicação é a mais comum em se tratando de sensores de imagem globalmente.

Com o contínuo avanço da tecnologia CMOS, seus sensores estão destinados a desempenhar um papel significativo em diversas aplicações de imagem. A tecnologia CMOS também ofereceu a possibilidade de integrar monoliticamente chips eletrônicos e, dessa forma, reduzir custos. Em outras palavras, a tecnologia CMOS é considerada mais integrativa, pois possibilita a integração de interfaces digitais com outras partes fundamentais para a satisfação de cada aplicação e suas necessidades.

Os sensores CMOS desempenham sua performance através de um obturador (shutter) que captura a luz através de lentes e, assim como os sensores CCD, é convertida em informação eletrônica para formar a imagem digital. A luz chegará ao sensor apenas quando o obturador for acionado. A velocidade desse movimento irá impactar na quantidade de luz que entra e, consequentemente, em sua qualidade. Esse obturador é classificado em duas categorias, de acordo com seu modo de funcionamento: *Rolling Shutter e Global Shutter*. A categoria *Rolling Shutter* também é conhecida como sensor linear, pois processa uma linha de células fotoelétricas de cada vez, enquanto o restante das linhas de células fotoelétricas continua recebendo informação luminosa da imagem, ou seja, nem todas as partes da imagem são gravadas exatamente no mesmo instante.

Na categoria *Rolling Shutter* é possível haver uma distorção espacial, principalmente em condições extremas de movimento ou *flahes* rápidos de luz. Já o modo Global Shutter, retrata o oposto do modo de funcionamento do *Rolling Shutter*. Todo o quadro é capturado no mesmo instante, permitindo uma captura "congelada" de objetos em movimento (Droneng, 2024).

Com a evolução da tecnologia de sensores CMOS, o ruído tem sido progressivamente reduzido, enquanto a resolução e a velocidade continuam a aumentar de forma constante. Atualmente, a maioria dos smartphones utilizam a tecnologia de sensores CMOS. No passado, era comum utilizar pixels de 320 x 240, contudo, hoje em dia, esse número cresceu para mais de 20 milhões de pixels.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A conclusão do trabalho ressalta a importância crescente da Visão Computacional e do Processamento de Imagens no cenário tecnológico atual, destacando sua natureza dinâmica e a exigência de um conhecimento multidisciplinar. A pesquisa evidenciou o papel fundamental de sensores como CCD e CMOS, cada qual com aplicações específicas — desde o uso em medicina e fotografia profissional até dispositivos móveis — demonstrando a versatilidade dessas tecnologias.

Também foram abordados os desafios enfrentados na implementação da Visão Computacional na Europa, como a carência de infraestrutura, a escassez de profissionais qualificados e as barreiras culturais e éticas, especialmente em áreas como vigilância. Esses obstáculos indicam a necessidade de políticas e estratégias voltadas à capacitação profissional e à aceitação social das novas tecnologias.

Por fim, o estudo enfatiza o impacto positivo da Visão Computacional em setores como agricultura, medicina e indústria automotiva, além de seu papel central na transformação digital impulsionada pela Inteligência Artificial. A integração com técnicas de aprendizado de máquina tem potencializado a automação e a precisão nos processos, reforçando a necessidade de preparo contínuo para garantir sua adoção eficaz e promover um desenvolvimento tecnológico sustentável.

REFERÊNCIAS

AWOUDA, M. A. E. **Face recognition system for service robotics applications with deep learning at the edge.** Tese de Doutorado. Politecnico di Torino. 2021. Disponível em:<https://webthesis.biblio.polito.it/secure/21020/1/tesi.pdf>. Acesso em: 30 mar. 2024.

CMOS SENSORS INC. CCD vs CMOS: **A review of sensor technology**. 2024. Disponível em:<https://www.csensor.com/ccd-vs-cmos>. Acesso em: 27 jun. 2024.

DAC.digital. **What is Computer Vision and what are its practical applications in different industries**? 2024. Disponível em: < https://dac.digital/what-is-computer-vision-and-what-are-its- practical-applications-in-different- industries/#:~:text=Computer%20vision%20systems%20can%20process,security%20surveillance% 2C%20and%20autonomous%20systems.>. Acesso em: 14 set. 2024.

DATASCIENTEST. **Image Processing: fundamental principles and practical uses. 2023**. Disponível em: <https://datascientest.com/en/image-processing-fundamental-principles-and- practical-uses>. Acesso em: 24 ago. 2024.

DRONENG: **Drones e Engenharia**. Sensores: Rolling Shutter e Global Shutter. 2024. Disponível em: <https://blog.droneng.com.br/sensores-rolling-shutter-e-global-shutter/>. Acesso em: 27 set.2024.

ETTALIBI, A.; ELOUADI A.; MANSOUR A. **AI and computer vision-based real time quality control: A review of industrial applications**. 2024. Disponível em:<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187705092302207X?via%3Dihub>. Acesso em: 04 abr. 2024.

FREET, W. **Image recognition and object manipulation for use in autonomous vehicles**. Tese de graduação em Engenharia de Computação e Ciência de Computação. California State University, Long Beach. 2019. Disponível em: < https://scholarworks.calstate.edu/downloads/12579z816>.Acesso em: 30 mar. 2024.

GARTNER. **What's New in Artificial Intelligence from the 2023 Gartner Hype Cycle**. 2023. Disponível em: <https://www.business-reporter.co.uk/industrial-innovations/computer-vision-eyes- on-innovation-and-productivity>. Acesso em: 24 ago. 2024.

IDS. Products: Aplications. **From smart city to smart farming: how cameras can shape the future.** 2024. Disponível em: <https://en.ids-imaging.com/applications.html>. Acesso em: 04 abr. 2024.

JIA C.; *et al.* **Scaling up visual and vision-language representation learning with noisy text supervision**. 2021. Disponível em: <https://arxiv.org/pdf/2102.05918>. Acesso em: 04 mai. 2024.

KAZEMIAN, A; *et al.* **Computer vision for real-time extrusion quality monitoring and control in robotic construction. Automation in Construction**. 2019. Disponível em: <https://en.ids- imaging.com/applications.html>. Acesso em: 04 abr. 2024.

KERBL B.; KOPANAS G.; LEIMKUEHLER T.; DRETTAKIS G. **3D gaussian splatting for real- time radiance field rendering**. Association for Computer Machinery: Volume 42, Issue 4. 2023. Disponível em: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3592433>. Acesso em: 04 abr. 2024.

KETELAERE, B. D.; *et al.* **A fresh look at computer vision for industry quality control**. Quality Engineering: Taylor & Francis Group. Vol. 34. 2022. Departamento de Biociência. MeBios, Leuven, Belgium. Disponível em:<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/08982112.2021.2001828>. Acesso em: 11 abr. 2024.

MAZZA, D.; *et al.* **Remote sensing monitoring of the pietrafitta earth flows in southern Italy: an integrated approach based on multi-sensor data.** 2023. MPDI, Switzerland. Disponível em:<https://www.researchgate.net/publication/368709110_Remote_Sensing_Monitoring_of_the_Pietra fitta_Earth_Flow_in_Southern_Italy_An_Integrated_Approach_Based_on_Multi- Sensor_Data/link/6579e7ffcbd2c535ea21eaa4/download>. Acesso em: 10 abr. 2024.

PANASONIC CONNECT. **European Research – Visions of the Future: How Computer Vision Technology is Transforming Industries**. 2024. Disponível em:<https://eu.connect.panasonic.com/fi/en/computer-vision>. Acesso em: 04 set. 2024.

RADFORD A.; *et al.* **Learning transferable visual models from natural language supervision. 2021**. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2103.00020>. Acesso em: 04 mai. 2024.

RAHMAN, S.; *et al.* **Machine learning and internet of things in industry 4.0: A review**. Elsevier. 2023. Disponível em:<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2665917423001587>. Acesso em: 24 ago. 2024.

RAJAN, A. J.; *et al.* **Development of computer vision for inspection of bolt using convolutional neural network. Elsevier**. 2021. Disponível em:<https://www.researchgate.net/publication/349578740_Development_of_computer_vision_for_insp ection_of_bolt_using_convolutional_neural_network>. Acesso em: 04 abr. 2024.

SPRAWLS EDUCATION FOUNDATION. **Digital Image Characteristics.** (s.d.) Disponível em:<http://www.sprawls.org/resources/DICHAR/module.htm>. Acesso em: 10 abr. 2024.

TARANTOLA, A. **China's gigantic multi-modal AI is no one-trick pony: Sporting 1.75 trillion parameters, Wu Dao 2.0 is roughly ten times the size of Open AI's GPT-3**. Engadget, Yahoo 2021. Disponível em: <https://www.engadget.com/chinas-gigantic-multi-modal-ai-is-no-one-trick-pony- 211414388.html>. Acesso em: 08 jul. 2024.

VISION DOCTOR: **Solutions for Industrial Machine Vision.** CCD Sensors. 2024. Disponível em:<https://www.vision-doctor.com/en/camera-technology-basics/ccd-sensors.html>. Acesso em: 27 jun. 2024.

XIANG, Y.; ALAHI A.; SAVARESE S. **Learning to track: online multi-object tracking by decision making**. Stanford University, University of Michigan at Ann Arbor. 2015. Disponível em:<https://cvgl.stanford.edu/papers/xiang_iccv15.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2024.

YUAN L; *et al.* Florence: **A new foundation model for computer vision**. 2021. Disponível em:<https://arxiv.org/pdf/2111.11432>. Acesso em: 30 mar. 2024.

Figura 1 – Fonte: KAZEMIAN, A.; *et al.* Figura adaptada. Disponível em:<https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.x-mo630000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved=0CBEQjRxqFwoTC LDVg8GdjocDFQAAAAAdAAAAABAE>. Acesso em: 04 de jul. 2024.

Figura 2 – Fonte: KAZEMIAN, A.; *et al.* Disponível em:<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580518307751>. Acesso em: 04 de jul. 2024.

Figura 3 – Fonte: RAJAN, A. J.; *et al.* Disponível em:<https://www.researchgate.net/publication/349578740_Development_of_computer_vision_for_insp ection_of_bolt_using_convolutional_neural_network>. Acesso em: 04 de jul. 2024.

Figura 4 – Fonte: KETELAERE, B.; *et al.* Figura adaptada. Disponível em:<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/08982112.2021.2001828#>. Acesso em: 04 de jul. 2024.

Figura 5 – Fonte: KETELAERE, B.; *et al.* Disponível em:<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/08982112.2021.2001828#>. Acesso em: 04 de jul. 2024.

Figura 6 – Fonte: KETELAERE, B.; *et al.* Disponível em:<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/08982112.2021.2001828#>. Acesso em: 04 de jul. 2024.

Figura 7 – Fonte: RADIANT VISION SYSTEMS. Disponível em:<https://www.radiantvisionsystems.com/>. Acesso em: 24 de ago. 2024.

Figura 8 – Fonte: TAMPERE UNIVERSITY. Digital Image Correlation. 2024. Figura adaptada. Disponível em: < https://research.tuni.fi/impact/equipment/digital-image-correlation/>. Acesso em: 24 de ago. 2024.

Figura 9 – Fonte: XIANG Y.; ALAHI A.; SAVARESE S. Disponível em:<https://cvgl.stanford.edu/projects/MDP_tracking/>. Acesso em: 04 de jul. 2024.

Figura 10 – Fonte: SPRAWLS ORGANIZATION. Disponível em:<http://www.sprawls.org/resources/DICHAR/module.htm>. Acesso em: 04 de jul. 2024.

Figura 11 – Fonte: YUAN, L.; *et al.* Figura adaptada. Disponível em:<https://arxiv.org/pdf/2111.11432>. Acesso em: 04 de jul. 2024.

Figura 12 – Fonte: YUAN, L.; *et al.* Figura adaptada. Disponível em:<https://arxiv.org/pdf/2111.11432>. Acesso em: 04 de jul. 2024.

Figura 13 – Fonte: CMOS SENSOR INC. Disponível em: <https://www.csensor.com/ccd-vs- cmos>. Acesso em: 04 de jul. 2024.

Figura 14 – Fonte: VISION DOCTOR. Disponível em: <https://www.vision- doctor.com/en/camera-technology-basics/ccd-sensors.html>. Acesso em: 04 de jul. 2024.

Figura 15 – Fonte: VISION DOCTOR. Disponível em: <https://www.vision- doctor.com/en/camera-technology-basics/ccd-sensors/full-frame-transfer-ccd.html>. Acesso em: 04 de jul. 2024.

Figura 16 – Fonte: VISION DOCTOR. Disponível em: <https://www.vision- doctor.com/en/camera-technology-basics/ccd-sensors/frame-transfer-ccd.html>. Acesso em: 04 de jul. 2024.

Figura 17 – Fonte: MOSAIC. Figura adaptada. Disponível em:<https://www.mosaic51.com/technology/rolling-vs-global-shutter-camera-effects-explained/>. Acesso em: 04 de jul. 2024.

Figura 18 – Fonte: OEMCAMERAS. Disponível em:<https://www.youtube.com/watch?v=9c3VvsJ0X7w>. Acesso em: 10 out. 2024.

Figura 19 – Fonte: PANASONIC CONNECT. Figura adaptada. Disponível em:<https://eu.connect.panasonic.com/fi/en/computer-vision>. Acesso em: 04 set. 2024.

Figura 20 – Fonte: PANASONIC CONNECT. Figura adaptada. Disponível em:<https://eu.connect.panasonic.com/fi/en/computer-vision>. Acesso em: 04 set. 2024.

Figura 21 – Fonte: PANASONIC CONNECT. Figura adaptada. Disponível em:<https://eu.connect.panasonic.com/fi/en/computer-vision>. Acesso em: 08 set. 2024.

Figura 22 – Fonte: PANASONIC CONNECT. Figura adaptada. Disponível em:<https://eu.connect.panasonic.com/fi/en/computer-vision>. Acesso em: 09 set. 2024.

Figura 23 – Fonte: ALTEXSOFT. Disponível em: < https://www.altexsoft.com/blog/computer- vision-healthcare/>. Acesso em: 14 set. 2024.

Figura 24 – Fonte: VISO.AI. Disponível em: <https://viso.ai/applications/computer-vision- applications/>. Acesso em: 15 set. 2024.

Figura 25 – Fonte: DAC.digital. Disponível em: < https://dac.digital/what-is-computer-vision-and- what-are-its-practical-applications-in-different- industries/#:~:text=Computer%20vision%20systems%20can%20process,security%20surveillance% 2C%20and%20autonomous%20systems.>. Acesso em: 14 set. 2024.

Figura 26 – Fonte: DAC.digital. Disponível em: < https://dac.digital/what-is-computer-vision-and- what-are-its-practical-applications-in-different- industries/#:~:text=Computer%20vision%20systems%20can%20process,security%20surveillance% 2C%20and%20autonomous%20systems.>. Acesso em: 14 set. 2024.

Figura 27 – Fonte: DAC.digital. Disponível em: < https://dac.digital/what-is-computer-vision-and- what-are-its-practical-applications-in-different-industries/#:~:text=Computer%20vision%20systems%20can%20process,security%20surveillance% 2C%20and%20autonomous%20systems.>. Acesso em: 15 set. 2024.

Figura 28 – Fonte: VISO.AI. Disponível em: <https://viso.ai/applications/computer-vision- applications/>. Acesso em: 15 set. 2024.

Capítulo 03

Manutenção Produtiva Total Aplicado na Engenharia de Manutenção - Desafios e Sucessos

Total Productive Maintenance Applied in the Maintenance Engineering - Challenges and Successes

Érica da Silva Barros Goes

Faculdade de Tecnologia Prof. José Arana Varela – Araraquara – São Paulo – Brasil

Fernando Vieira Maurício

Faculdade de Tecnologia Prof. José Arana Varela – Araraquara – São Paulo – Brasil

Resumo: Este estudo visa promover uma revisão da literatura acerca da implementação da Total *Productive Maintenance* (TPM) no âmbito da engenharia de manutenção, ressaltando suas vantagens, dificuldades e impactos nas operações. A investigação une análise teórica a um estudo de caso em uma pequena empresa do setor metalúrgico situada em Araraquara/SP. A implementação do TPM revelou avanços significativos na disponibilidade dos maquinários, na eficiência das operações e na diminuição dos custos gerados por falhas inesperadas. No entanto, a resistência à transformação organizacional e a falta de uma cultura de prevenção se mostraram desafios importantes. A avaliação dos dados coletados demonstra melhorias notáveis em métricas como OEE (Eficiência Global de Equipamentos), MTBF (Tempo Médio entre Falhas) e MTTR (Tempo Médio para Reparo), confirmando o papel do TPM como uma ferramenta fundamental para incrementar a competitividade no setor industrial. A conclusão aponta que o sucesso da implementação do TPM está atrelado ao envolvimento da equipe, ao treinamento contínuo e a uma liderança proativa que incentive uma cultura de aprimoramento constante.

Palavras-chave: manutenção produtiva total; TPM; engenharia de manutenção; eficácia operacional; setor metalúrgico.

Abstract: This study aims to review the literature on the implementation of Total Productive Maintenance (TPM) in the field of maintenance engineering, highlighting its advantages, difficulties and impacts on operations. The research combines theoretical analysis with a case study in a small company in the metalworking sector located in Araraquara/SP. The implementation of TPM revealed significant advances in machinery availability, operational efficiency and reduced costs generated by unexpected failures. However, resistance to organizational transformation and the lack of a prevention culture proved to be important challenges. The evaluation of the collected data shows notable improvements in metrics such as OEE (Overall Equipment Effectiveness), MTBF (Mean Time Between Failures) and MTTR (Mean Time To Repair), confirming the role of TPM as a fundamental tool for increasing competitiveness in the industrial sector. The conclusion indicates that the success of TPM implementation is linked to team involvement, continuous training and proactive leadership that encourages a culture of constant improvement.

Keywords: total productive maintenance; TPM; maintenance engineering; operational effectiveness; metalworking sector.

DOI: 10.47573/aya.5379.2.465.3

INTRODUÇÃO

Esse modelo de administração destaca-se por sua abordagem integrada e sistêmica, onde os ativos produtivos são vistos como fundamentais para a empresa. Nesse contexto, a responsabilidade pela conservação não fica apenas a cargo do setor técnico, mas é dividida entre as equipes de operação e manutenção, promovendo uma maior colaboração e sentimento de pertencimento.

Conforme mencionado por (Nakajima,1998) a meta principal do TPM é alcançar a inexistência de falhas e defeitos. Ao eliminar avarias e problemas, a eficiência operacional dos equipamentos se eleva, os custos diminuem, o nível de estoque pode ser reduzido e, como resultado, a produtividade dos trabalhadores cresce. Portanto, é claro que uma implementação bem-sucedida do TPM está intimamente ligada à formação de um ambiente organizacional favorável, onde os fatores críticos para o sucesso, como o envolvimento da alta administração, a formação contínua dos colaboradores, a definição precisa de objetivos e métricas de desempenho, além da promoção de uma cultura colaborativa, tornam-se fundamentais.

A combinação do TPM com outras estratégias de gestão da produção, como o *Lean Manufacturing e o Six Sigma*, intensifica os resultados obtidos. Essa colaboração é enfatizada por autores como (Womack, Jones 2004), que observam que a união dessas metodologias facilita a melhoria contínua dos processos, a redução de desperdícios e o aprimoramento da qualidade. Entretanto, é fundamental levar em conta as particularidades de cada ambiente industrial, pois diferentes contextos podem enfrentar desafios únicos, como resistência a mudanças e dificuldades para alinhar metas de curto e longo prazo.

Com base no que foi apresentado, este estudo sugere uma investigação detalhada sobre os conceitos e métodos associados ao TPM, destacando os desafios que podem prejudicar sua implementação eficaz. Assim, pretende-se ressaltar a importância da engenharia de manutenção como um catalisador para a inovação, a eficiência operacional e o crescimento da produtividade nas indústrias.

Objetivo Geral e Específicos

Este trabalho visa, de maneira geral, efetuar uma revisão da literatura acerca da utilização do Total *Productive Maintenance* (TPM) na área de engenharia de manutenção, buscando entender como ele pode contribuir para a melhoria da eficiência operacional, diminuição de falhas e fomento a uma cultura de aprimoramento contínuo nas indústrias.

Os objetivos específicos que se almeja são:

- Identificar as principais vantagens e aprimoramentos resultantes da adoção do TPM no contexto industrial.
- Levantar as principais dificuldades e obstáculos que costumam surgir ao implementar o sistema.
- Verificar a relevância da administração da qualidade através da implementação do TPM, centrando-se na redução de equívocos, falhas e desperdícios, favorecendo uma manutenção eficiente e coesa.

A partir desse estudo, pretende-se fornecer uma análise minuciosa e completa das práticas mais eficazes e das experiências exitosas em instituições que utilizam o TPM como pilar fundamental em sua gestão de manutenção. O objetivo é auxiliar na difusão de conhecimentos que promovam a utilização eficiente dessa abordagem, reforçando a engenharia de manutenção como um elemento estratégico para o desempenho e a competitividade no setor industrial.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Conceitos e Evolução Histórica do TPM

A Total *Productive Maintenance* (TPM) é uma estratégia moderna no setor de manutenção industrial, focada em otimizar a eficiência dos equipamentos através da participação ativa de todos os membros da equipe. Essa abordagem possibilita a diminuição de interrupções inesperadas, o crescimento da produtividade e a elevação da qualidade nos processos industriais.

O conceito de TPM surgiu no Japão na década de 1950, durante o período de reconstrução do país após a Segunda Guerra Mundial. Nesse cenário, as indústrias japonesas começaram a procurar alternativas que não só recuperassem sua capacidade produtiva, mas também melhorassem os padrões de qualidade e eficiência. De acordo com (Nakajima,1998), os produtos do Japão se destacaram no cenário internacional devido à sua alta qualidade, resultado de práticas gerenciais inovadoras, como o TPM, que se basearam em técnicas de manutenção de influência americana adaptadas à cultura japonesa.

A formalização do TPM é creditada à Toyota, que implementou práticas que uniam os operadores às tarefas de manutenção, resultando na ideia de manutenção autônoma. Assim, os operadores assumem responsabilidades por atividades rotineiras de manutenção, como limpeza e inspeções básicas, melhorando a colaboração entre as áreas de produção e manutenção. (Nakajima,1998) ressalta que abordagens como Zero Defeitos (ZD) foram cruciais para que as montadoras japonesas atingissem altos níveis de produtividade.

A propagação do TPM em nível mundial começou na década de 1980, quando organizações em diversas partes do planeta passaram a compreender as vantagens de implementar uma estratégia de manutenção proativa e integrada. Segundo (Womack, Jones 2004) esse crescimento coincidiu com o desenvolvimento de métodos como o *Lean Manufacturing e o Six Sigma*, que partilham princípios como a redução de desperdícios e a busca pela melhoria contínua.

Hoje em dia, o TPM é visto como uma abordagem fundamental em indústrias como a metalúrgica, química, alimentícia e automotiva, pois não só impulsiona à eficiência financeira, mas também fomenta a criação de uma cultura organizacional orientada para a excelência nas operações.

Conceitos 5S e os Pilares do TPM

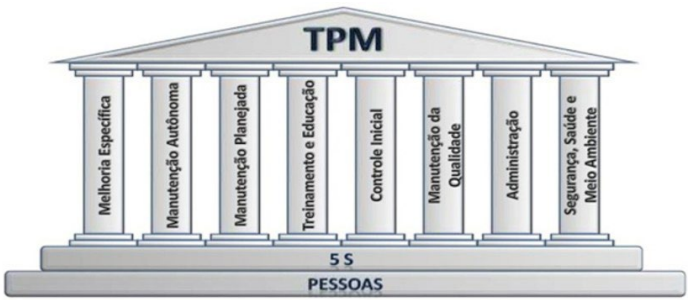
No contexto atual das indústrias, as empresas estão constantemente se esforçando para melhorar sua produtividade e a qualidade de seus produtos. Entre as metodologias mais conhecidas para alcançar esses resultados, destacam-se o 5S e a Total *Productive Maintenance* (TPM). O 5S é voltado para à organização, a normatização e à implantação de disciplina no local de trabalho, enquanto o TPM foca na maximização da eficiência dos equipamentos, envolvendo a colaboração de todos os funcionários.

A metodologia 5S, originária do Japão, é baseada em cinco conceitos: Seiri (Senso de Utilização), Seiton (Senso de Ordenação), Seiso (Senso de Limpeza), Seiketsu (Senso de Padronização) e Shitsuke (Senso de Disciplina). Esses conceitos têm como objetivo criar um espaço de trabalho limpo, organizado e eficiente, servindo como alicerce para outras abordagens de gerenciamento da qualidade e aumento da produtividade (Chiavenato, 2011).

De acordo com (Pinto; Xavier, 2012) a fundamentação do TPM se apoia em oito pilares essenciais, que têm como objetivo engajar todos os níveis hierárquicos da empresa na busca pela melhoria contínua na operação.

A Figura 1 a seguir apresenta, à estrutura dos oito pilares do TPM, evidenciando como estão conectados aos objetivos da organização e fundamentam-se na contribuição ativa dos funcionários.

Figura 1- Pilares do TPM.



Fonte: Abecom, 2025.

Essa representação é fundamental para entender a maneira como os pilares se conectam e sustentam a filosofia do TPM em sua totalidade.

1. Melhorias específicas: ações destinadas à eliminar desperdícios e à otimizar à eficiência global dos dispositivos.
2. Manutenção autônoma: atividades executadas pelos próprios operadores, incluindo higienização, verificação e consertos simples.
3. Manutenção planejada: abordagens proativas elaboradas pelas equipes de engenharia visando garantir a confiabilidade dos recursos.
4. Treinamento e educação: aprimoramento incessante das habilidades dos funcionários, que se torna fundamental diante das inovações tecnológicas.

5. Controle inicial: utilização do conhecimento adquirido para a obtenção de novos equipamentos e produtos que tornem a manutenção mais eficiente.
6. Manutenção da qualidade: ações direcionadas assegurar à excelência do produto através da confiabilidade das máquinas.
7. Administração: implementação dos fundamentos do TPM nos setores administrativos para reduzir desperdícios e promover a sinergia com a produção.
8. Segura, saúde e meio ambiente: criação de um espaço laboral que seja seguro, saudável e ecologicamente responsável.

Quando esses fundamentos são implementados de maneira organizada, ocorre uma mudança na cultura da empresa, na qual todos os funcionários passam a compartilhar a responsabilidade pela manutenção dos equipamentos e pela melhoria dos processos produtivos.

DESAFIOS NA IMPLEMENTAÇÃO DO TPM

A implementação do Total *Productive Maintenance* (TPM) em fábricas metalúrgicas encontra diversos desafios que podem impactar sua efetividade e aceitação. Um dos principais entraves é a resistência à mudança, que frequentemente surge quando os empregados se sentem inseguros ou céticos em relação a novas práticas operacionais. Essa resistência pode estabelecer uma cultura organizacional rígida, dificultando o envolvimento dos trabalhadores nas iniciativas do TPM. Para enfrentar esse problema, é fundamental que a liderança da empresa estabeleça uma comunicação eficaz sobre os benefícios esperados e demonstre seu compromisso com o processo, promovendo um ambiente que incentive a inovação e a melhoria contínua.

Um outro desafio importante diz respeito à carência de formação apropriada. O treinamento dos funcionários em técnicas e ferramentas do TPM é essencial para alcançar as metas de desempenho e eficiência. Sem a educação técnica necessária, os empregados podem ter dificuldades em reconhecer problemas de manutenção e implementar soluções eficazes.

Conforme apontam (Tahashi e Osada, 1993) as seis perdas mais significativas que as indústrias enfrentam são:

- Parada devido a falhas;
- Modificações na trajetória e correções;
- Execução sem peso e breves interrupções;
- Diminuir a velocidade;
- Defeitos no processo de produção;
- Prejuízos no começo das operações ou devido a um rendimento abaixo do esperado.

As falhas nas operações, aliadas à ausência de treinamento adequado, podem resultar em uma utilização inadequada das metodologias do TPM, provocando descontentamentos e avaliações negativas do sistema. Portanto, é essencial que as organizações direcionem recursos para treinamentos permanentes, incorporando workshops, exercícios supervisionados e assistência de especialistas na área (Silva; Santos, 2021).

O investimento inicial necessário para a adoção do TPM pode desestimular, principalmente, empresas de menor porte. A mudança para um novo sistema de manutenção requer aportes em maquinário, tecnologias e formação da equipe. Entretanto, esses gastos precisam ser valorizados, considerando os benefícios a médio e longo prazo, como a diminuição de interrupções imprevistas, a ampliação da durabilidade dos ativos e o aumento da eficiência operacional (Felice; Pellicelli, 2008). É crucial desenvolver um plano estratégico fundamentado em análises de viabilidade e previsões de retorno para justificar os investimentos e assegurar a continuidade do processo.

Dessa maneira, ao abordar de maneira organizada e coesa essas dificuldades, as empresas do setor metalúrgico conseguem seguir uma trajetória sólida em direção à implementação eficaz do TPM, resultando em avanços notáveis na performance industrial.

Resistência à Mudança

A resistência às transformações representa um dos principais obstáculos para a implementação eficaz do Total *Productive Maintenance* (TPM) nas indústrias. De acordo com (Kotter e Schlesinger, 2008) essa resistência pode manifestar-se em diferentes camadas da organização, sendo impulsionada por aspectos humanos, culturais e estruturais. Funcionários muitas vezes receiam a diminuição de seu controle, o acréscimo de responsabilidades e as alterações em suas rotinas diárias, principalmente quando não têm uma compreensão clara das metas da mudança.

Ademais, a cultura empresarial vigente pode intensificar essa resistência. Em organizações com hierarquias estritas, a inovação tende a ser vista como uma ameaça, dificultando a adoção de novas práticas (Machado; Martins, 2015). O modelo de TPM requer um envolvimento conjunto, abrangendo desde os colaboradores da linha de produção até a alta administração, o que demanda uma alteração de perspectiva: a melhoria contínua deve ser vista como uma responsabilidade coletiva.

Para lidar com esse desafio, é fundamental que os líderes tenham uma atitude envolvente, promovendo uma comunicação transparente e valorizando as ideias dos membros da equipe. Essa metodologia ajuda a fomentar um sentimento de pertencimento e comprometimento, que é crucial para o êxito de qualquer mudança (Chiavenato, 2011).

Uma comunicação efetiva, junto com formação contínua, é uma ferramenta valiosa para esclarecer o TPM. Atividades como oficinas, conferências e práticas manuais são eficazes em evidenciar os resultados tangíveis dessa abordagem, como a elevação da eficiência e a minimização de erros. (Liker e Meier, 2007) ressaltam que

a participação dos funcionários em grupos dedicados ao aprimoramento contínuo auxilia na superação de resistências, promovendo uma cultura organizacional focada em aprendizado e inovação.

Assim, a resistência à transformação não deve ser encarada como um impedimento insuperável, mas sim como uma chance de reforçar a cultura organizacional, adequando-a para a efetiva aplicação do TPM e para enfrentar os desafios da concorrência industrial.

PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este estudo utiliza uma abordagem metodológica híbrida, integrando uma análise teórica dos conceitos com um estudo de caso prático, o que possibilita uma melhor compreensão da aplicação do TPM. A revisão da literatura baseou-se em livros e artigos acadêmicos especializados que delineiam os princípios e as consequências da implementação do TPM em variados contextos industriais. O estudo de caso foi realizado em uma pequena empresa do ramo metalúrgico, envolvendo observações diretas e a coleta de dados qualitativos.

Estudo de Caso: Implementação do TPM em uma Pequena Empresa do Setor Metalúrgico

A pesquisa de campo focou na implementação do TPM em uma metalúrgica de pequeno porte localizada na área de Araraquara/SP. Criada em 1985, a empresa possui aproximadamente 50 funcionários e é voltada para a produção de peças metálicas destinadas ao uso doméstico e pessoal. Seu processo de produção inclui equipamentos de corte, soldagem e estampagem, muitos dos quais demonstram sinais de deterioração.

O maior obstáculo observado foi a falta de um processo estruturado para a manutenção, que se caracterizava pela ênfase em ações corretivas. A organização lidava com constantes interrupções nas operações das máquinas, resultando em uma eficiência produtiva diminuída e altos custos de operação. As primeiras estimativas indicaram que a disponibilidade média dos maquinários estava abaixo de 70%, e o intervalo médio entre falhas encontrava-se aquém dos parâmetros aconselhados.

Nesse contexto, elaborou-se uma estratégia de ação para a implementação das práticas iniciais do TPM, priorizando a formação da equipe, a uniformização dos procedimentos de inspeção e limpeza, e o treinamento de líderes operacionais. Também foi estabelecido um sistema de vigilância de falhas para garantir um controle visual e estimular a realização de ações corretivas regulares.

Diagnóstico Inicial e Levantamento de Necessidades

A avaliação preliminar concentrou-se em identificar as deficiências nos processos de manutenção em vigor, evidenciando a falta de um plano de manutenção

preventiva bem estruturado e uma grande dependência de intervenções corretivas. Para identificar os principais pontos críticos operacionais, foram conduzidas entrevistas e reuniões com operadores, técnicos e gerentes, mapeando as questões mais comuns nas linhas de produção. Entre os principais relatos, destacaram-se falhas recorrentes em equipamentos essenciais, como prensas e tornos, além de períodos prolongados de paradas das máquinas, o que afetava de maneira significativa a produtividade.

Esses desafios resultavam em efeitos diretos na eficiência da produção. O índice de eficiência geral dos equipamentos (OEE) permanecia abaixo de 60%, um patamar considerado insatisfatório em termos industriais. A elevada taxa de falhas das máquinas, estimada em cerca de 25% por mês, ocasionava entre 4 a 6 horas de interrupções não planejadas por linha de produção a cada semana. Além disso, a falta de um controle abrangente sobre os registros de falhas dificultava a análise de causas repetitivas, o que levava à repetição de erros e ao desperdício de recursos. Como resultado, ocorriam atrasos nas entregas, aumento dos custos operacionais e sobrecarga nas equipes de manutenção.

A partir das necessidades identificadas, foi desenvolvido um plano de ação voltado para as etapas iniciais da implementação do TPM. Dentre as ações tomadas, destacou-se a formação da equipe nas práticas de manutenção autônoma e preventiva, por meio da realização de workshops que enfatizaram a conscientização e a responsabilidade compartilhada dos operadores em relação aos equipamentos. Os procedimentos de inspeção e limpeza foram uniformizados, e roteiros foram elaborados para a execução de manutenções periódicas. Para fortalecer a aplicação das práticas, foram escolhidos líderes de equipe responsáveis por supervisionar as atividades e promover a filosofia do TPM no local de trabalho. Simultaneamente, foi criado um sistema de monitoramento de falhas, que possibilitou o controle visual dos indicadores de desempenho e incentivou o envolvimento dos colaboradores nas iniciativas de melhoria contínua.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A adoção do TPM na organização avaliada ocorreu entre 2023 e 2024, trazendo resultados favoráveis, mas também desafios a serem enfrentados. A pesquisa constatou que a implementação dos princípios do TPM resultou em melhorias significativas no desempenho da empresa, evidenciadas por uma maior eficiência nas operações e pela diminuição de paradas imprevistas. A avaliação dos indicadores de manutenção evidenciou uma redução nas taxas de falhas, além de um uso mais eficaz dos recursos humanos e materiais. Contudo, a ausência de uma cultura de manutenção preventiva e a resistência inicial dos funcionários às mudanças apontam para a necessidade de esforços constantes para firmar as práticas do TPM.

A implementação do TPM trouxe melhorias significativas para a produtividade da organização. O tempo de inatividade das máquinas foi consideravelmente

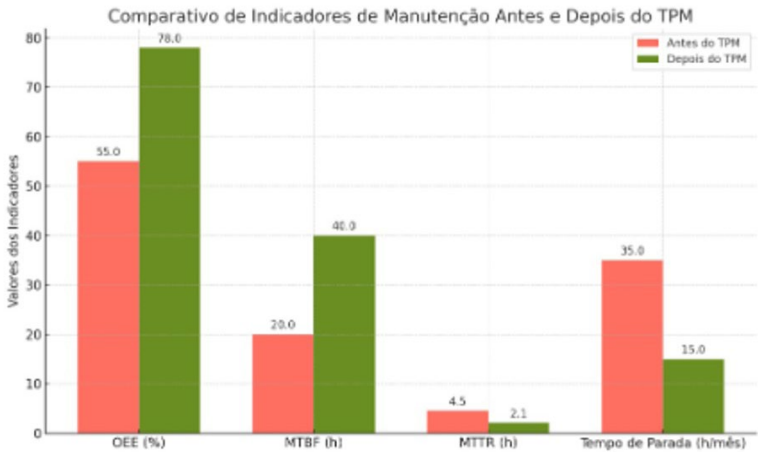
reduzido, possibilitando um aumento na disponibilidade operacional e, por consequência, uma elevação na produção mensal. Ademais, os custos operacionais foram menores devido à otimização das operações de manutenção preventiva, que ajudaram a evitar incidentes dispendiosos causados por falhas inesperadas.

A figura 2 ilustra os principais indicadores de manutenção antes e após a adoção do TPM. O OEE subiu de 55% para 78%, enquanto o MTBF passou de 20 para 40 horas, o MTTR diminuiu de 4,5 para 2,1 horas, e o tempo de inatividade mensal reduziu de 35 horas para 15 horas. Esses dados mostram avanços consideráveis em eficiência, confiabilidade e disponibilidade dos equipamentos, destacando a eficácia do TPM como abordagem de manutenção.

A avaliação dos resultados após a implementação do TPM na organização revelou um avanço significativo em vários indicadores fundamentais. As melhorias foram claramente percebidas na diminuição do tempo médio entre falhas e no aumento do tempo médio entre consertos, indicando uma maior eficiência nos processos de manutenção.

Segue o gráfico que compara os principais indicadores de manutenção antes e após a adoção do TPM:

Figura 2 – Comparativo dos Indicadores de Manutenção Antes e Depois da Implementação do TPM.



Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

- A eficiência total dos equipamentos (OEE) subiu de 55% para 78%.
- O MTBF (Média de Tempo entre Falhas) aumentou, passando de 20 horas para 40 horas.
- O Tempo Médio de Reparo (MTTR) caiu de 4,5 horas para 2,1 horas.
- O tempo de inatividade mensal reduziu de 35 horas para 15 horas.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A implementação da abordagem da Manutenção Produtiva Total (TPM) demonstrou ser eficaz na melhoria das operações e estratégias da empresa analisada. A avaliação dos dados e dos indicadores de desempenho indicou um progresso considerável na eficiência operacional e na confiabilidade dos equipamentos, fatores essenciais para a competitividade na indústria. O estudo de caso destacou a possibilidade de aplicar o TPM em empresas menores, contanto que seja suportado por um planejamento bem estruturado, formação contínua dos funcionários e comprometimento da liderança.

Embora os resultados tenham sido favoráveis, a implementação do processo encontrou desafios significativos, principalmente no que diz respeito à resistência a novas abordagens e à falta de uma cultura estabelecida de manutenção preventiva. Esses elementos ressaltam a necessidade de estratégias de gestão de mudanças claramente delineadas, comunicação aberta e estímulo à participação engajada dos colaboradores em todas as fases da transformação.

Chega-se à conclusão de que o TPM, ao ser combinado com outras abordagens como *Lean Manufacturing e Six Sigma*, tem a capacidade de maximizar os resultados das organizações, fomentando uma cultura de excelência nas operações. Assim, a engenharia de manutenção evolve de uma função reativa para uma posição estratégica no progresso sustentável das indústrias.

REFERÊNCIAS

ABEcom. **TPM: manutenção produtiva total**. São Paulo: Abecom, 2025. Disponível em: https://www.abecom.com.br/tpm/. Acesso em: 15 maio 2025

CHIAVENATO, Idalberto. **Introdução à Teoria Geral da Administração**. 8. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2011.

FELICE, F.; PELLICELLI, M. **Maintenance policies for SMEs: TPM and RCM.** Journal of Quality in Maintenance Engineering, v. 14, n. 2, p. 123–135, 2008.

KOTTER, J. P.; SCHLESINGER, L. A. **Choosing strategies for change**. Harvard Business Review, v. 86, n. 7-8, p. 130–139, 2008.

LIKER, J. K.; MEIER, D. **O modelo Toyota: 14 princípios de gestão do maior fabricante do mundo**. Porto Alegre: Bookman, 2007.

MACHADO, C. G.; MARTINS, R. A. **Mudança organizacional e inovação: um estudo em empresas industriais brasileiras**. Revista de Administração e Inovação, São Paulo, v. 12, n. 3, p. 6–27, 2015.

NAKAJIMA, Seiichi. **TPM tenkai: Total Productive Maintenance.** Tokyo: Japan Institute of Plant Maintenance, 1998.

NOGUEIRA, R. A. **Gestão da mudança organizacional e os desafios da implantação do TPM**. Revista de Administração e Inovação, São Paulo, v. 13, n. 2, p. 118–132, 2016.

PINTO, Márcio Vieira; XAVIER, Luiz Carlos. **Manutenção: função estratégica.** 2. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2012.

SILVA, E. R.; SANTOS, M. L. **Manutenção Produtiva Total: desafios e práticas para indústrias de pequeno porte**. Revista Gestão & Produção, São Carlos, v. 28, n. 3, p. e6021, 2021.

SLACK, Nigel; CHAMBERS, Stuart; JOHNSTON, Robert. **Administração da Produção**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2007.

TAHASHI, Y.; OSADA, T. **TPM: Total Productive Maintenance – Guia Prático para Implantação**. São Paulo: IMAM, 1993.

WOMACK, J. P.; JONES, D. T. **A Mentalidade Enxuta nas Empresas: Elimine o Desperdício e Crie Riqueza.** Rio de Janeiro: Campus, 2004.

Capítulo 04

Desenvolvimento da Cinemática Direta do Robô FANUC Modelo M-410: Uma Jornada da Teoria à Simulação

Development of the Forward Kinematics of the FANUC M-410 Robot: A Journey from Theory to Simulation

Henrique Siqueira Camada de Souza

Discentes em Engenharia de Eletrônica pela UTFPR-CM

Camila Fredegoto Santos

Discentes em Engenharia de Eletrônica pela UTFPR-CM

Flávio Luiz Rossini

Docente do curso de Engenharia Eletrônica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, Paraná, Brasil. ID Lattes: 8616413126997528.

Resumo: Este trabalho apresenta o desenvolvimento e validação de um modelo matemático para a cinemática direta de um manipulador robótico com seis graus de liberdade. A metodologia empregada baseia-se na formulação de transformações homogêneas para caracterizar as relações espaciais entre os elos do manipulador. Implementou-se o modelo computacionalmente no software MATLAB®, dessa forma permitiu a análise da configuração espacial e a visualização da trajetória do efetuador final. Realizou-se a validação experimental mediante a simulação da configuração com ângulos articulares nulos, os quais confirmaram a precisão do modelo proposto através da correspondência entre os resultados numéricos obtidos e os valores teóricos esperados. A abordagem desenvolvida constitui uma ferramenta eficaz para análise cinemática de manipuladores robóticos complexos.

Palavras-chave: cinemática direta; manipulador robótico; transformações homogêneas; modelagem matemática; simulação computacional.

Abstract: This work presents the development and validation of a mathematical model for the forward kinematics of a robotic manipulator with six degrees of freedom. The methodology employed is based on the formulation of homogeneous transformations to characterize the spatial relationships between the manipulator links. The model was implemented computationally in the MATLAB® software, thus allowing the analysis of the spatial configuration and the visualization of the trajectory of the end effector. The experimental validation was performed by simulating the configuration with zero joint angles, which confirmed the accuracy of the proposed model through the correspondence between the numerical results obtained and the expected theoretical values. The developed approach constitutes an effective tool for kinematic analysis of complex robotic manipulators.

Keywords: forward kinematics; robotic manipulator; homogeneous transformations; mathematical modeling; computational simulation.

INTRODUÇÃO

No passado, a tecnologia atual era ficcional, a robótica era impensável. A mão de obra humana era o único recurso disponível. Com o passar dos anos, as

DOI: 10.47573/aya.5379.2.465.4

limitações da mão de obra humana se mostraram, assim surgiram as grandes Revoluções Industriais (Rosário; 2012).

Tais limitações obrigaram as grandes industrias a adotarem novos sistemas de produção, que dependesse minimamente da mão de obra humana, a automação. Em meados de 1940, um engenheiro da Ford Motor Company descreveu sistemas capazes de suprir a demanda, porém humanos ainda tomavam as decisões (Lamb; 2015).

Com tamanha inovação, o termo robô se difundiu, tal termo surgiu da combinação das palavras Tchecas “rabota” e “robotinik”, que significam “trabalho forçado” e “servo” respectivamente. E de fato, muitos robôs funcionam com pequenos ciclos de parada para manutenção (Matarić; 2014).

Na década de 1960, o robô industrial ascendeu, isso fenômeno juntamente com a automação industrial se encontram em um nível crescente até os dias de hoje. Por volta de 1980, a América do Norte se muniu intensamente dessa tecnologia. Tal intensidade se justifica pelo fato de a mão de obra humana ficar mais custosa, enquanto os robôs ficam mais acessíveis, e junto a isso, mais tecnológicos, precisos e robustos (Craig; 2012).

Esses robôs são projetados graças aos estudos das engenharias elétrica, mecânica e de computação, que estruturam e descrevem tais equipamentos e as respectivas estações de trabalho (Pontim, Oliveira, Rossini; 2025). Junto a isso, a Teoria de Controle é de suma importância para avaliar algoritmos que planejam a movimentação e a aplicação de força nos mecanismos (Takano, Rossini; 2024).

O presenta estudo trata da modelagem do robô manipulador modelo M-410 da fabricante Fanuc. Mostra-se a modelagem cinemática do referido robô, essa é útil para estudo e planejamento de tarefas a serem executadas pelo equipamento (Silva Junior, Alcantara, Rossini; 2023) (Takano, Tank, Silva, Rossini; 2023).

A descrição cinemática de um robô, é a porta de entrada para obtenção da modelagem matemática (Lima, Rossini; 2023). Essa descrição, retorna o formalísmo matemático, o qual se torna útil em várias áreas de desenvolvimento, tanto no projeto de robô assim como na execução da tarefa (Rossini, Abreu, Oliveira; 2023).

Para uma correta modelagem dessas máquinas, existem métodos a serem realizados (Abreu, Rossini, Oliveira; 2022) (Souza, Rossini, Oliveira; 2023). A cinemática direta, sendo a parte inicial, computa a posição e orientação do sistema de referência da ferramenta em relação a base utilizando o conjunto de ângulos do sistema (Lima, Rossini, Corrêa, Lopes, Barbosa, Barrozo; 2022).

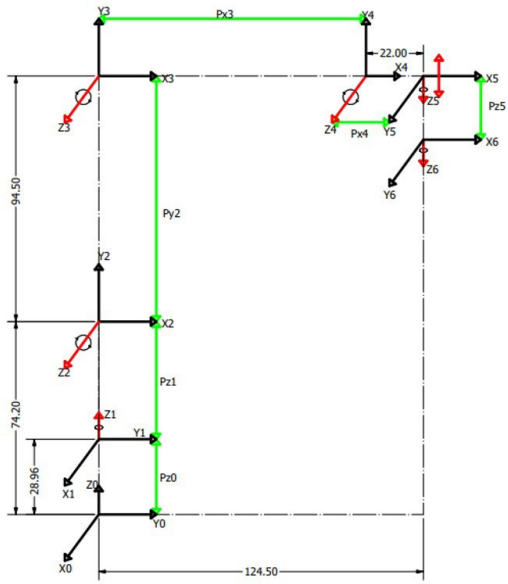
DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

A cinemática direta é de suma importância para a robótica, ela relaciona os ângulos das juntas, neste caso, $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5$, com a orientação da ferramenta (*end - effector*) no espaço cartesiano.

Para cada grau de liberdade do robô, há uma matriz de transformação homogênea, ${}^{A}_{B}T$, as quais serão demonstradas.

O robô considerado é representado pelo diagrama da figura 1:

Figura 1 - Esquemático do robô.



Fonte: autoria própria.

Fundamentação Teórica

A robótica é um campo multidisciplinar que engloba o projeto, construção, operação e aplicação de robôs. Um dos pilares para a compreensão e controle de manipuladores robóticos é a cinemática, que estuda o movimento de corpos sem considerar as forças que o causam (Rossini, Silva Junior, Alcantara; 2023). A cinemática de robôs divide-se em direta e inversa (Rezende, Rossini; 2024). A cinemática direta, foco deste trabalho, determina a posição e orientação do efetuador final do robô a partir dos valores conhecidos de suas variáveis articulares (Pontim, Oliveira, Rossini; 2025).

Para descrever a posição e orientação de um robô e seus elos no espaço, são utilizados sistemas de coordenadas (Takano, Rossini; 2024). Tipicamente, um sistema de coordenadas global é fixado na base do robô e sistemas de coordenadas locais são atribuídos a cada elo. A relação entre esses sistemas é fundamental para a modelagem cinemática.

Os graus de liberdade (DOF) de um robô indicam o número de variáveis independentes necessárias para definir completamente sua configuração. Para um manipulador serial, o número de DOF geralmente corresponde ao número de juntas independentes (Rossini, Lima, Corrêa, Lopes, Barbosa, Barrozo; 2023). Um robô com 6 DOF, como o abordado neste estudo, pode alcançar qualquer posição e orientação dentro de seu espaço de trabalho.

MATRIZ DE ROTAÇÃO

Para o campo da robótica, é necessário não só descrever um ponto no espaço tridimensional, mas também sua orientação, que é definida por um sistema de coordenadas. Tal sistema de descreve as principais direções no plano em uma matriz 3 x 3 . Essa é a matriz de rotação, sua obtenção se baseia na comparação com o sistema de referência anterior, sendo esboçado matematicamente a rotação dos eixos. Na Equação (1) demonstra seu formato geral.

$$ {}^{A}_{B}R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \tag{1} $$

Cada coluna da matriz representa as projeções das coordenadas dos eixos X_B, Y_B e Z_B do sistema B expressos no sistema A, X_A, Y_A e Z_A :

- Primeira coluna: vetor unitário do eixo X_B expresso em A;
- Segunda coluna: vetor unitário do eixo Y_B expresso em A; e
- Terceira coluna: vetor unitário do eixo Z_B expresso em A.

MATRIZES DE TRANSFORMAÇÃO

A matriz de transformação homogênea descreve, além da rotação, a translação em relação ao sistema anterior. O qual pode ser descrito pela Equação (2).

$$ \begin{bmatrix} {}^{A}P \\ 1 \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{ccc|c} & {}^{A}_{B}R & & {}^{A}P_{BORG} \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array}\right] \begin{bmatrix} {}^{B}P \\ 1 \end{bmatrix} \tag{2} $$

MATRIZ TRANSFORMADA

A posição e orientação da ferramenta é obtida através da multiplicação sequencial das matrizes obtidas anteriormente, resultando assim na matriz transformada composta:

$$ {}^{0}_{6}T = T_1(\theta_1) \cdot T_2(\theta_2) \cdot T_3(\theta_3) \cdot T_4(\theta_4) \cdot T_5(\theta_5) \cdot T_6(\theta_6) \tag{3} $$

INTERPRETAÇÃO DA MATRIZ FINAL

A matriz de transformação final possui dezesseis entradas, sendo com 4 linhas e 4 colunas que pode ser escrita na forma:

$$ {}^{0}_{6}T = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & P_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & P_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{4} $$

Em que R é a matriz de rotação 3 x 3 e P é o vetor de posição 3 x 1 da ferramenta. A orientação do end-effector é determinada pela matriz de rotação, cujos elementos são utilizados para representar a orientação em termos de angulares.

POSIÇÃO ESPACIAL

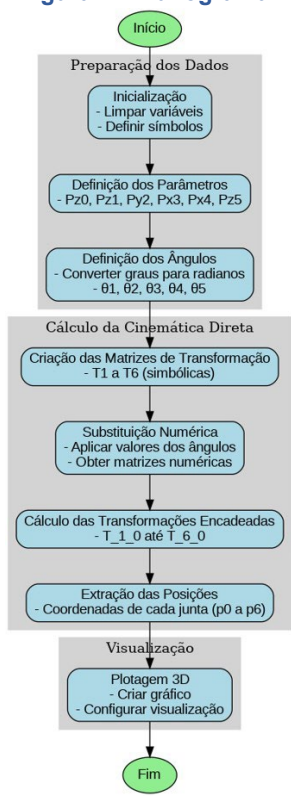
A posição espacial do efetuador final de um manipulador robótico é tipicamente expressa em coordenadas cartesianas (P_x, P_y, P_z) relativas ao sistema de coordenadas da base. Estas coordenadas são extraídas da matriz de transformação homogênea global ${}^0_6T$, especificamente da sua quarta coluna, conforme a Equação (5):

$$P = \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^0_6T_{1,4} \\ {}^0_6T_{2,4} \\ {}^0_6T_{3,4} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Fluxograma

Na figura 2, ilustra-se o pseudocódigo utilizado para a obtenção dos dados e gráficos. Com ele é possível analisar e comparar minunciosamente o mundo real com a simulação.

Figura 2 - Fluxograma.



Fonte: autoria própria.

RESULTADOS

A primeira transformação surge da projeção vetorial da primeira junta sobre a origem, obtendo assim a matriz T_1.

$$T_1 = \begin{bmatrix} Cos(\theta_1) & -Sen(\theta_1) & 0 & 0 \\ Sen(\theta_1) & Cos(\theta_1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & Pz_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Para a obtenção das outras, o mesmo procedimento é seguido, projeta-se sempre o elo atual na base cartesiana anterior.

$$T_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ Cos(\theta_2) & -Sen(\theta_2) & 0 & 0 \\ Sen(\theta_2) & Cos(\theta_2) & 0 & Pz_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_3 = \begin{bmatrix} Cos\theta_3) & -Sen(\theta_3) & 0 & 0 \\ Sen(\theta_3) & Cos(\theta_3) & 0 & Py_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_4 = \begin{bmatrix} Cos(\theta_4) & -Sen(\theta_4) & 0 & Px_3 \\ Sen(\theta_4) & Cos(\theta_4) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

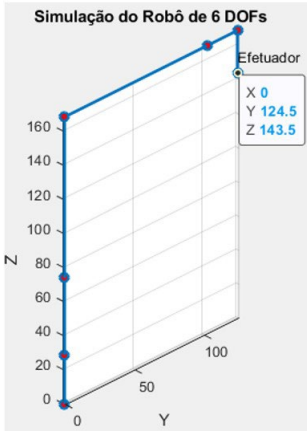
A matriz T_5 tem certa especificidade, pois ela retrata uma junta prismática, ou seja, não contém componentes senoidais e cossenoidais.

$$T_5 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & Px_4 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_6 = \begin{bmatrix} Cos(\theta_5) & -Sen(\theta_5) & 0 & 0 \\ Sen(\theta_5) & Cos(\theta_5) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & Pz_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

A seguir, apresenta-se na figura 2 os ângulos articulares iguais a zero, dessa forma valida o modelo apresentado e que as matrizes de transformação foram corretamente aplicadas.

Figura 2 - Simulação do Braço Robótico.



Fonte: autoria própria.

A posição final encontrada do efetuador:

- X = *0 mm*
- Y = *124,5 mm*
- Z = *143,5 mm*

Na figura 2, o gráfico 3D mostra a posição do efetuador ao longo das juntas, com marcações de cada posição.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

No estudo, apresentou-se a fundamentação para a obtenção do modelo matemático do robô FANUC M-410, assim como a validação do modelo por meio da simulação numérica.

A simulação demonstrou que o modelo cinemático desenvolvido é consistente, uma vez que com todos os ângulos igual a zero o efetuador atinge a posição esperada, comprovado quando comparado a figura 1. O uso de transformações homogêneas se mostrou eficaz para descrever a cinemática de manipuladores robóticos. O software MATLAB® facilitou a implementação e visualização, esse permite futura expansão para simulações dinâmicas e controle do mecanismo.

REFERÊNCIAS

ABREU, L. M.; ROSSINI, F. L.; OLIVEIRA, L. F. P.. **Modelagem cinemática de um robô modelo SCARA e desenvolvimento de aplicativo para análise gráfica.** In: Anais do XII Seminário de Extensão e Inovação & XXVII Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR, 2022, UTFPR Santa Helena. Anais do XII Seminário de Extensão e Inovação & XXVII Seminário de Iniciação Científica e

Tecnológica da UTFPR. Recife, Brasil: Even3, 2022. DOI 10.29327/1152426.1-2. Disponível em: https://doi.org/10.29327/1152426.1-2. Acesso em: 06 mai. 2025.

CRAIG, J. J. **Robótica.** 3. ed. São Paulo: Blucher. 2012.

LAMB, F. **Automação Industrial: Controle e processos industriais**. AMGH. 2015.

LIMA, B. S.; ROSSINI, F. L.. **Proposta de modelagem da cinemática, implementação computacional da cinemática inversa quanto a posição e orientação de robô manipulador 6-DOF.** In: Anais do XIII Seminário de Extensão e Inovação & XXVIII Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR, Ponta Grossa, 2023. Disponível em: https://seisicite.com.br/storage/seisicite-trabalhos-finais/961-8a5a4bf29c285d0131b3a0fdedcf0d351f814c1672861b2f6b5887301a6ef784.pdf. Acesso em: 04 mai. 2025.

LIMA, B. S.; ROSSINI, F. L.; CORRÊA, J. H. D.; LOPES, J. M. P.; BARBOSA, R. F. S.; BARROZO, Y. R. **Modelagem, Simulação e Análise de Movimento do Robô Manipulador SCARA T3 401SS Fabricante EPSON**. In: DALLAMUTA, J; HOLZMANN, H. A.. Engenharia Elétrica: Sistemas de energia elétrica e telecomunicações. Ponta Grossa: Atena Editora, 2022. p. 108-125. DOI: 10.22533/at.ed.0022217088. Disponível em: https://doi.org/10.22533/at.ed.0022217088. Acesso em: 06 mai. 2025.

MATARIC, M. J. **Introdução à Robótica**. São Paulo: Pearson. 2014.

PONTIM, F. M.; OLIVEIRA, J. M. S.; ROSSINI, F. L. **Modelagem da Cinemática Direta de Robô com Quatro Graus de Liberdade e Simulação no Software MATLAB® via Robotics Toolbox.** In: PAGANI, Regina Negri. Cidades inteligentes e práticas sustentáveis. Ponta Grossa-PR: Aya Editora, 2025, p. 65-78. ISBN: 978-65-5379-763-5. DOI: 10.47573/aya.5379.2.450.4. Disponível em: https://ayaeditora.com.br/livros/L877.pdf. Acesso em: 05 mai. 2025.

REZENDE, L. G.; ROSSINI, F. L.. **Comparação de Algoritmos por Métodos Numéricos para Obtenção da Cinemática Inversa de Robô Manipulador SCARA**. In: BARBOSA, F.C. Engenharia: a máquina que constrói o futuro - Vol. IX. 9ª Ed. Piracanjuba: Editora Conhecimento Livre, 2024. p. 48-64. ISBN 9786553674998. DOI: 10.37423/240408906. Disponível em: https://api.conhecimentolivre.org/ecl-api/storage/app/public/L.932-2024.pdf. Acesso em: 07 mai. 2025.

ROSÁRIO, J. M. **Automação Industrial.** São Paulo: Baraúna. 2012.

ROSSINI, F. L.; ABREU, L. M.; OLIVEIRA, L. F. P.. **Modelagem Cinemática, Planejamento e Geração de Trajetória para um Robô Modelo SCARA através de Aplicativo para Análise Gráfica**. In: SOARES, A.M.. Tópicos especiais em engenharia: inovações e avanços tecnológicos, 7. Ponta Grossa: Aya, 2023. p. 43-58. ISBN 9786553792999. DOI: 10.47573/aya.5379.2.211.4. Disponível em: https://doi.org/10.47573/aya.5379.2.211.4. Acesso em: 06 mai. 2025.

ROSSINI, F. L.; LIMA, B. S.; CORRÊA, J. H. D.; LOPES, J. M. P.; BARBOSA, R. F. S.; BARROZO, Y. R.. **Modeling, Simulation, Motion Trajectory Planning and Nonlinear Control in the Joint Space of the Manipulator Robot SCARA T3 401SS Manufacturer Epson. Seven Editora, [S. l.],** 2023. DOI: 10.56238/devopinterscie-248. Disponível em: https://sevenpublicacoes.com.br/index.php/editora/article/view/1092. Acesso em: 08 mai. 2025.

ROSSINI, F. L.; SILVA JUNIOR, P. R. M.; ALCANTARA, C. V. B.. **Modelagem Dinâmica e Simulação do Sistema de Controle Não Linear do Robô Manipulador SCARA RH-3FRHR35 com Fixação Superior, Fabricante Mitsubishi.** In: BARBOSA, F.C. Engenharia: a máquina que constrói o futuro. 17ª Ed. Piracanjuba: Editora Conhecimento Livre, 2023. p. 173-194. ISBN 9786553674240. DOI: 10.37423/231208504. Disponível em: https://doi.org/10.37423/231208504. Acesso em: 07 mai. 2025.

SILVA JUNIOR, P. R. M.; ALCANTARA, C. V. B.; ROSSINI, F. L.. **Modelagem Cinemática e Simulação do Robô Manipulador SCARA RH-3FRHR35 com Fixação Superior, Fabricante Mitsubishi.** In: Anais do XIII Seminário de Extensão e Inovação & XXVIII Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR, Ponta Grossa, 2023. Disponível em: https://seisicite.com.br/storage/seisicite-trabalhos-finais/1242-5774dc898fc34571c5a99a2ce390c2fb2879ad8bbf64ce2679d20019d20ef389.pdf. Acesso em: 04 mai. 2025.

SOUZA, E. D.; ROSSINI, F. L.; OLIVEIRA, L. F. P.. **Desenvolvimento de um Aplicativo no Ambiente App Designer do Software Matlab® para Planejamento de Trajetória do Robô Puma 560**. In: FREITAS, L.C.. Engenharia elétrica e de computação: docência, pesquisa e inovação tecnológica. Ponta Grossa: Atena, 2023. p. 87-109. ISBN 9786525809465. DOI: 10.22533/at.ed.4652316018. Disponível em: https://doi.org/10.22533/at.ed.4652316018. Acesso em: 07 mai. 2025.

TAKANO, G. V. B.; ROSSINI, F. L. **Modelagem e Simulação do Controle Não Linear e Variante no Tempo Aplicado à Dinâmica do Multifuncional T3-401S SYNTHIS Robô SCARA, Fabricante EPSON**. In: BARBOSA, F.C. Engenharia: soluções e inovações para o desenvolvimento. 11ª Ed. Piracanjuba: Editora Conhecimento Livre, 2024. p. 79-97. ISBN: 978-65-5367-538-4. DOI: 10.37423/240709180. Disponível em: https://api.conhecimentolivre.org/ecl-api/storage/app/public/L.979-2024.pdf. Acesso em: 1 mai. 2025.

TAKANO, G. V. B.; TANK, J. S.; SILVA, L. A. S.; ROSSINI, F. L. **Modelagem e Simulação da Cinemática Direta do Multifuncional T3-401S Synthis Robô SCARA, Fabricante Epson**. In: Anais do XIII Seminário de Extensão e Inovação & XXVIII Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR, Ponta Grossa, 2023. Disponível em: https://seisicite.com.br/storage/seisicite-trabalhos-finais/1238-7e7c319b5b15be5b653a4cc91d8e32a6d5ecd49ea2c7d2b3e6f1864d1066d620.pdf. Acesso em: 04 mai. 2025.

Capítulo 05

Manual Técnico para Seleção de Medidores Eletromagnéticos e Ultrassônicos em Sistemas de Tratamento e Distribuição de Água

Technical Manual for the Selection of Electromagnetic and Ultrasonic Meters in Water Treatment and Distribution Systems

Vinicius Barboza dos Santos

Universidade Federal de Mato Grosso – Engenharia de Controle e Automação

Resumo: Este manual apresenta diretrizes práticas para a seleção de medidores de vazão eletromagnéticos e ultrassônicos em sistemas de tratamento e distribuição de água. A partir da análise de parâmetros técnicos, operacionais e econômicos, são estabelecidos critérios comparativos baseados em estudos acadêmicos e normas técnicas nacionais. O documento tem por objetivo auxiliar profissionais do setor hídrico na escolha da tecnologia mais adequada às condições de escoamento, infraestrutura e finalidade da medição.

Palavras-chave: medição de vazão; medidor ultrassônico; medidor eletromagnético; conduto forçado; água tratada.

Abstract: This manual provides practical guidelines for selecting electromagnetic and ultrasonic flow meters in water treatment and distribution systems. Based on technical, operational, and economic parameters, it establishes comparative criteria supported by academic studies and national standards. The goal is to support water management professionals in choosing the most suitable technology for flow conditions, infrastructure, and measurement purposes.

Keywords: flow measurement; ultrasonic meter; electromagnetic meter; pressurized pipe; treated water.

INTRODUÇÃO

A medição precisa da vazão de água é um componente fundamental para a operação eficiente e segura de sistemas hidráulicos, sendo essencial tanto para o controle operacional quanto para o gerenciamento sustentável dos recursos hídricos. A adequada quantificação da vazão permite a realização de balanços hídricos, o monitoramento de perdas ao longo da rede, a avaliação da eficiência dos sistemas de captação, tratamento e distribuição, além de subsidiar decisões técnicas e econômicas em projetos e operações (Coelho, 1983).

Nos sistemas de abastecimento de água, os medidores de vazão desempenham papel crucial em todas as etapas do ciclo hidrológico artificial — desde a captação da água bruta até sua distribuição final aos consumidores (Ana, 2019). Dentre os diversos instrumentos disponíveis, destacam-se os medidores de vazão eletromagnéticos e ultrassônicos, amplamente utilizados por sua precisão, confiabilidade e adaptabilidade a diferentes condições de operação.

DOI: 10.47573/aya.5379.2.465.5

Essas tecnologias vêm se consolidando como soluções eficazes, especialmente em condutos forçados, onde é necessário garantir medições confiáveis mesmo sob regimes de escoamento turbulento e condições adversas de pressão e temperatura. Os medidores eletromagnéticos baseiam-se na Lei de Faraday da indução eletromagnética e requerem a condutividade mínima do fluido, enquanto os ultrassônicos operam por meio da medição do tempo de trânsito de ondas acústicas ou pela análise do efeito Doppler, podendo ser instalados sem contato direto com o fluido em versões do tipo *clamp-on* (Delmeé, 2003).

Este manual foi desenvolvido com o intuito de oferecer critérios técnicos objetivos e diretrizes práticas para a seleção apropriada entre essas tecnologias, considerando as características hidráulicas do sistema, as propriedades do fluido, as exigências metrológicas da aplicação e os aspectos de instalação, operação e manutenção.

A metodologia adotada neste manual técnico baseia-se em uma abordagem estruturada composta por cinco etapas principais: definição de critérios de avaliação, seleção de medidores representativos, análise econômica comparativa, análise de desempenho metrológico e elaboração de relatório de resultados. Com base em normativas técnicas nacionais e internacionais, recomendações de fabricantes, dados de campo e boas práticas da engenharia, busca-se auxiliar os profissionais da área na escolha do medidor mais adequado para cada situação específica, promovendo eficiência operacional e qualidade na gestão dos recursos hídricos.

FUNDAMENTOS DA MEDIÇÃO DE VAZÃO

A medição de vazão constitui uma das atividades mais relevantes nos sistemas hidráulicos, sendo indispensável para o controle de processos, a gestão operacional e a supervisão eficiente do uso de recursos hídricos. O conhecimento aprofundado dos fundamentos que regem a medição de vazão é essencial para garantir a confiabilidade dos dados obtidos, uma vez que esses valores impactam diretamente em decisões técnicas, econômicas e ambientais. Em especial, nos sistemas de captação, tratamento e distribuição de água, a precisão na quantificação da vazão permite a realização de balanços hídricos, o controle de perdas e o planejamento operacional adequado (Ana, 2019).

A grandeza vazão pode ser compreendida como a quantidade de fluido que atravessa uma seção transversal de um conduto ao longo do tempo. Essa medida pode ser expressa em termos de volume (m^3/s ou L/s) ou massa (kg/s), dependendo da aplicação. A vazão volumétrica é determinada pelo produto entre a velocidade média do fluido e a área da seção transversal do conduto. Já a vazão mássica depende, adicionalmente, da massa específica do fluido. Embora essa última seja relevante em algumas situações específicas, como em medições de alta precisão ou em laboratórios de calibração, na maioria das aplicações em água bruta considera-se a massa específica como constante e dependente da temperatura do fluido.

A tubulação utilizada para condução de água em sistemas pressurizados é, via de regra, de seção circular.

> O meio mais comumente utilizado para o transporte de fluidos entre duas localidades ou dois pontos de uma planta industrial é através de uma tubulação de seção circular. O motivo é que o perfil circular de um tubo fornece a maior resistência estrutural e apresenta a maior área transversal por unidade de superfície de parede (Ana, 2019, p. 15).

A medição de vazão em condutos forçados pressupõe, portanto, que o tubo esteja completamente preenchido, condição necessária para o funcionamento adequado da maioria dos medidores.

Diversas propriedades físicas do fluido influenciam o comportamento do escoamento e, consequentemente, a medição da vazão. A massa específica e a viscosidade são parâmetros fundamentais nesse contexto. A viscosidade, em especial, está diretamente associada à resistência que o fluido oferece ao escoamento, afetando tanto a dissipação de energia quanto o regime de escoamento estabelecido. Os fluidos podem ser classificados em newtonianos ou não-newtonianos, conforme sua resposta ao cisalhamento, sendo que a maioria das aplicações em abastecimento de água lida com fluidos newtonianos

O entendimento da medição de vazão exige também a aplicação de princípios fundamentais da física. A Lei da Continuidade estabelece que, em um escoamento permanente e incompressível, a vazão deve permanecer constante entre dois pontos de um conduto, desde que não haja adição ou retirada de fluido. Isso significa que, se a área da seção transversal de um conduto se altera, a velocidade média do escoamento deve se ajustar proporcionalmente para manter a vazão constante.

$$\rho_1 Q_1 = \rho_2 Q_2$$

Onde:

ρ: massa especifica do fluido na seção especificada do conduto, em kg/m³;

Q: vazão volumétrica do fluido na seção especificada do conduto, em m³/s

A Lei da Conservação da Energia, descrita pelo Teorema de Bernoulli, estabelece que a energia total de um fluido — somando as energias de pressão, cinética e potencial — permanece constante ao longo do escoamento, desde que não haja perdas por atrito ou trocas térmicas, sendo essa a base de funcionamento de medidores de diferencial de pressão, como tubos de Pitot e placas de orifício (Delmeé, 2003).

$$\frac{P}{\rho} + \frac{v^2}{2} + gZ = constante$$

Onde:

P: pressão absoluta média do fluido na seção transversal, em Pa;

ρ: massa específica média do fluido na seção transversal, em kg/m³;

v: velocidade média na seção transversal, em m/s;

g: aceleração da gravidade local, em m/s²;

Z: cota da seção transversal, em m;

Outro conceito essencial para a caracterização do escoamento é o Número de Reynolds, que representa a razão entre as forças inerciais e as forças viscosas em um escoamento. Esse número adimensional permite identificar o regime do fluxo, que pode ser laminar, turbulento ou transicional. Em aplicações práticas, especialmente em sistemas de distribuição de água, o regime predominante é o turbulento, em que o fluido apresenta movimento caótico e elevada dispersão de energia (Ana, 2019).

- Laminar (Re < 2100);
- Transicional (2100 < Re < 4000);
- Turbulento (Re > 4000);

Os perfis de velocidade, por sua vez, representam graficamente a variação da velocidade do fluido ao longo do diâmetro da tubulação. Em escoamentos laminares, o perfil possui formato parabólico, com velocidades menores próximas às paredes e máximas no centro do tubo. Já em escoamentos turbulentos, o perfil é mais achatado, com menor variação entre os pontos. Esses perfis são fundamentais para o correto funcionamento de medidores que dependem da simetria e do desenvolvimento completo do escoamento, como os medidores ultrassônicos ou do tipo turbina (Edwards, 2015).

TECNOLOGIAS DE MEDIÇÃO

Atualmente, o mercado dispõe de uma ampla variedade de tecnologias voltadas à medição de vazão, cada uma apresentando características específicas que as tornam mais ou menos adequadas conforme a aplicação. Essas tecnologias podem ser classificadas, de maneira geral, em três grupos principais: métodos indiretos, diretos e tecnologias especiais. Este manual concentra-se na análise dos medidores de vazão enquadrados na categoria de tecnologias especiais, com ênfase nos modelos eletromagnéticos e ultrassônicos, amplamente utilizados em sistemas de captação, tratamento e distribuição de água devido à sua elevada precisão, confiabilidade e aplicabilidade em diferentes condições operacionais.

Medidores Eletromagnéticos

Os medidores de vazão eletromagnéticos funcionam a partir do princípio da indução eletromagnética, no qual bobinas instaladas externamente ao corpo do medidor criam um campo magnético direcionado perpendicularmente ao escoamento do fluido (Ribeiro, 1997). Quando o fluido condutor atravessa essa região, ocorre uma interação entre o campo magnético e as partículas carregadas presentes no líquido, resultando na indução de uma tensão elétrica. Essa tensão é proporcional à velocidade do fluido e pode ser detectada por eletrodos posicionados no interior do tubo. Para que esse processo ocorra de maneira eficiente, é indispensável

que o fluido possua condutividade elétrica mínima — normalmente superior a 5 microsiemens por centímetro (µS/cm). Essa condutividade é o que viabiliza a geração de sinais elétricos confiáveis, fundamentais para o correto funcionamento do medidor.

À medida que o fluido condutor passa pela região submetida ao campo magnético gerado pelas bobinas, ocorre a indução de uma força eletromotriz (FEM), em conformidade com o princípio estabelecido pela Lei de Faraday da indução eletromagnética (Bega, 2006). Essa interação resulta na produção de uma diferença de potencial elétrico (tensão), cuja intensidade é proporcional à velocidade média do fluido em movimento. Assim, ao registrar essa tensão, o medidor é capaz de calcular com exatidão a velocidade de escoamento no interior do tubo, permitindo o acompanhamento contínuo e eficiente do desempenho do sistema hidráulico.

A relação matemática é dada por:

$E = k \cdot B \cdot D \cdot V$

Onde:

E é a tensão gerada (mV);

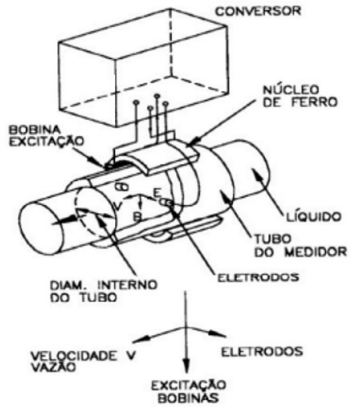
k é um fator de calibração especifico do medidor;

B é a intensidade do campo magnéticos;

D é o diâmetro do tubo;

V é a velocidade média do fluido;

Figura 1- Componentes dos medidores de vazão eletromagnéticos.



Fonte: Gerônimo, 2021.

A estrutura principal do medidor de vazão, usualmente confeccionada em aço carbono ou aço inoxidável, abriga os elementos internos e apresenta conexões ou flanges destinados à sua fixação na linha de processo (Bega, 2006). No interior desse corpo está localizado o tubo de medição, canal pelo qual o fluido escoa. Esse tubo é internamente revestido com materiais dielétricos como PTFE (Teflon), borracha ou cerâmica, cuja função é evitar interferências elétricas e garantir resistência química frente a diferentes tipos de fluidos conduzidos.

A parte eletrônica do equipamento, também denominada unidade de conversão ou transmissor, tem como função interpretar os sinais elétricos captados pelos eletrodos posicionados ao longo do tubo de medição. Essa unidade pode ser integrada diretamente ao corpo do medidor, formando uma configuração compacta, ou instalada de forma separada, em uma montagem remota — o que é especialmente útil em locais de difícil acesso ou com condições ambientais adversas. O transmissor é equipado com circuitos responsáveis pela amplificação e filtragem do sinal, além de conter um microprocessador que realiza os cálculos de vazão. Também dispõe de interfaces de comunicação digital ou analógica, que viabilizam a conexão do medidor a sistemas supervisórios, CLPs e demais dispositivos de automação industrial (Edwars, 2015).

Desde sua criação, os medidores de vazão eletromagnéticos passaram por notáveis avanços, impulsionados pelo desenvolvimento de novas tecnologias em eletrônica, materiais e técnicas de processamento de sinais. Esses aprimoramentos contribuíram para maior precisão, confiabilidade e versatilidade dos equipamentos. Atualmente, é possível encontrar diferentes configurações construtivas desses medidores, que variam conforme o método de instalação. Os principais tipos disponíveis no mercado incluem os modelos de inserção, os do tipo wafer (compactos, instalados entre flanges) e os flangeados, que apresentam uma estrutura robusta e são fixados diretamente à tubulação por meio de flanges.

Medidores Ultrassônicos

Os medidores de vazão ultrassônicos operam por meio da emissão e recepção de ondas sonoras de alta frequência, utilizando essas ondas para determinar a velocidade de escoamento do fluido dentro de uma tubulação (Edwards, 2015). O funcionamento dessa tecnologia está fundamentado na análise do comportamento das ondas ultrassônicas quando se propagam em um meio em movimento, considerando as alterações na velocidade do som conforme as características do fluxo. Existem dois princípios principais utilizados nesse tipo de medidor: o método de tempo de trânsito, que compara o tempo de propagação das ondas em direções opostas ao fluxo, e o método baseado no efeito Doppler, que se vale da mudança de frequência das ondas refletidas por partículas ou bolhas presentes no fluido.

O método de efeito Doppler se baseia na mudança de frequência da onda ultrassônica quando ela é refletida por partículas em suspensão ou bolhas dentro do fluido (Ribeiro, 1997). Quando uma onda sonora é refletida por um objeto em movimento, a frequência da onda refletida é diferente da frequência original, conforme descrito pela equação do efeito Doppler:

$$f_r = f_t \left(\frac{c + v}{c} \right)$$

Onde:

f_t é a frequência da onda transmitida;

f_r é a frequência da onda refletida;

c é a velocidade do som no fluido;

v é a velocidade do fluido;

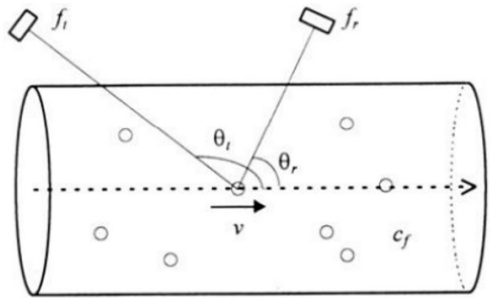
A diferença entre as frequências transmitida e recebida (Δf) é proporcional à velocidade do fluido:

$$v = \frac{c \cdot \Delta f}{2 f_t \cos \theta}$$

Onde θ é o ângulo de emissão da onda em relação à direção do fluxo.

Se for possível determinar o diâmetro interno da tubulação, a vazão volumétrica pode ser calculada multiplicando a velocidade do fluido pela área da seção transversal.

Figura 2 - Princípio de funcionamento do medidor de vazão por efeito doppler.



Fonte: Digitrol, 2021.

Quando as partículas transportadas pelo fluido refletem esse ultrassom, a frequência das ondas refletidas é modificada de forma proporcional à componente da velocidade das partículas na direção do feixe. O transmissor e o receptor de ultrassom são posicionados em proximidade dentro de um dispositivo de medição, conhecido como cabeçote medidor. Nesse arranjo, um circuito eletrônico é capaz de medir as frequências e calcular a velocidade média do fluido com base na diferença entre elas. Por requerer a presença de partículas no fluido, esse método de medição não é adequado para fluidos limpos.

O funcionamento do medidor ultrassônico baseado no tempo de trânsito fundamenta-se na comparação do tempo que os pulsos acústicos levam para percorrer o fluido em direções opostas, ao longo de trajetórias inclinadas em relação ao eixo do escoamento (Ferreira, 2010). Quando o sinal é transmitido na mesma direção do fluxo, sua propagação é favorecida, resultando em um tempo de percurso mais curto. Em contrapartida, quando o sinal se propaga contra o sentido do fluxo, ele encontra maior resistência, o que prolonga seu tempo de deslocamento entre os transdutores. Essa diferença entre os tempos de ida e volta é diretamente influenciada pela velocidade do fluido e constitui o parâmetro-chave para seu cálculo. A partir da medição dessa diferença de tempo e do conhecimento da área interna da tubulação, o equipamento é capaz de determinar com precisão a vazão do fluido que atravessa o conduto.

A diferença no tempo de trânsito é dada por:

$$\Delta_t = t_{BA} - t_{AB} = \frac{2 \cdot L \cdot v \cos \vartheta}{C}$$

Onde:

c é a velocidade do som no fluido;

v é a velocidade do fluido na tubulação;

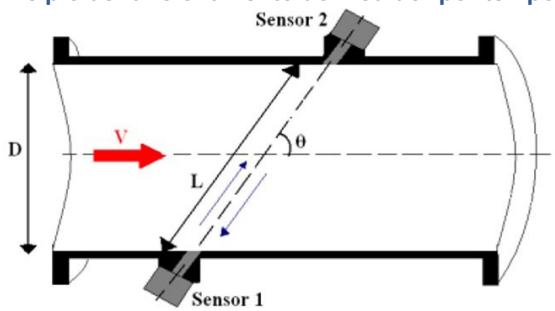
L é o comprimento do trajeto acústico;

θ é o ângulo do trajeto, em relação ao eixo da tubulação;

tBA é o tempo medido de trânsito entre o transmissor e receptor;

tAB é o tempo medido de trânsito entre o receptor e transmissor;

Figura 3 - Princípio de funcionamento do medidor por tempo de trânsito.



Fonte: Omega, 2023.

Os medidores ultrassônicos, assim como os medidores eletromagnéticos, podem ser classificados com base no método de instalação. Os dois principais tipos são os medidores *clamp-on* e os medidores em linha, cada um com características próprias que os tornam mais adequados para diferentes aplicações. Os medidores ultrassônicos *clamp-on* são dispositivos de medição que não exigem contato direto com o fluido, pois são instalados externamente à tubulação, fixando-se por meio de sensores ultrassônicos que emitem e recebem sinais através das paredes do tubo. Essa característica permite uma instalação rápida e sem a necessidade de interromper o fluxo, tornando-os ideais para medições temporárias, diagnósticos e situações onde a intervenção direta na tubulação não é viável (Ferreira, 2010).

Já os medidores ultrassônicos em linha são integrados diretamente na tubulação, fazendo parte do sistema de condução do fluido. Esse tipo de medidor proporciona medições mais precisas e confiáveis, sendo amplamente utilizado em processos industriais que exigem monitoramento contínuo do fluxo, como nas indústrias química, petroquímica, de saneamento e alimentos.

Ambos os modelos operam com base no mesmo princípio físico: a medição da variação do tempo de trânsito do ultrassom através do fluido em movimento. No entanto, a escolha entre um modelo *clamp-on* ou em linha depende de fatores como a necessidade de precisão, a facilidade de instalação, os custos envolvidos e as condições operacionais do sistema.

CRITÉRIOS PARA SELEÇÃO

A seleção adequada de medidores de vazão em sistemas de abastecimento de água é um processo técnico essencial que visa garantir medições confiáveis, precisas e compatíveis com as condições operacionais do sistema. Dentre as tecnologias disponíveis, os medidores eletromagnéticos e ultrassônicos destacam-se como os mais utilizados em aplicações de captação, tratamento e distribuição de água, em razão de sua versatilidade, precisão e robustez (Ana, 2019). No entanto, a escolha entre esses dispositivos deve considerar uma série de critérios técnicos, ambientais, operacionais e econômicos.

Um dos critérios primordiais diz respeito às características do fluido, tais como condutividade elétrica, presença de sólidos em suspensão, bolhas de ar e homogeneidade. Medidores eletromagnéticos são indicados exclusivamente para líquidos condutores, sendo especialmente eficazes em águas brutas com sólidos, graças à ausência de partes móveis e à baixa sensibilidade a incrustações. Já os medidores ultrassônicos — que operam com base no tempo de trânsito ou no efeito Doppler — são indicados para líquidos limpos ou levemente contaminados, e sua aplicação não exige contato direto com o fluido, sendo adequados para sistemas em operação contínua, onde não é desejável interromper o escoamento para instalação.

Outro critério relevante é a condição da tubulação e o espaço disponível para instalação. Medidores eletromagnéticos, sobretudo os do tipo flangeado ou inserção, exigem paradas no sistema e trechos retos de tubulação a montante e jusante para assegurar a qualidade da medição. Em contrapartida, os modelos ultrassônicos do tipo *clamp-on* são instalados externamente, permitindo medição sem intervenção física no duto, ideal para locais de difícil acesso ou com restrição de espaço (Ferreira, 2010).

A precisão e faixa de medição são fatores críticos na seleção. Medidores eletromagnéticos apresentam alta precisão (até ±0,2% do valor medido), sendo preferíveis em aplicações que exigem controle rigoroso de vazão. Os ultrassônicos, embora comumente mais suscetíveis a variações no perfil de escoamento e à presença de bolhas de ar, oferecem boa precisão (entre ±1% e ±2%) e ampla faixa operacional, podendo medir velocidades maiores, o que os torna indicados para grandes diâmetros e altas vazões.

Além dos critérios técnicos de medição, é fundamental considerar fatores como a interferência eletromagnética, as condições ambientais (incluindo temperatura, umidade e vibração), a compatibilidade com protocolos de comunicação industrial — como HART, *Modbus e Profinet* —, bem como a facilidade de calibração e manutenção dos dispositivos. Tanto os medidores eletromagnéticos quanto os ultrassônicos podem ser integrados a sistemas supervisórios, possibilitando diagnóstico remoto por meio de softwares dedicados. Essa capacidade de integração amplia significativamente a funcionalidade desses instrumentos, tornando-os adequados para aplicações em sistemas inteligentes de tratamento e distribuição de água (Delmeé, 2003).

CONDIÇÕES DE INSTALAÇÃO

Medidores eletromagnéticos e ultrassônicos apresentam requisitos distintos de instalação, os quais devem ser rigorosamente observados conforme suas características construtivas e princípios de funcionamento.

Os medidores eletromagnéticos requerem, prioritariamente, que a tubulação permaneça completamente cheia de fluido durante toda a operação. Recomenda-se sua instalação em pontos do sistema que garantam tal condição, evitando-se locais elevados ou com riscos de formação de bolsões de ar. Além disso, é fundamental que o trecho de tubulação onde se instala o medidor possua um comprimento reto suficiente para estabilizar o perfil de escoamento. Conforme orientações técnicas, sugere-se um trecho reto a montante de, no mínimo, cinco a dez diâmetros internos da tubulação (5D a 10D) e a jusante de, ao menos, três diâmetros (3D), especialmente na ausência de retificadores de fluxo (Bega, 2006).

Outro aspecto relevante refere-se à orientação dos eletrodos. Para prevenir o acúmulo de sedimentos, recomenda-se que os eletrodos estejam posicionados horizontalmente. Também é imprescindível a realização de aterramento adequado, utilizando anéis de aterramento e conexões condutivas entre os flanges e a tubulação, com o objetivo de minimizar interferências eletromagnéticas e garantir a estabilidade do sinal de medição. A instalação deve ainda considerar a ausência de vibrações e interferências externas, além de facilitar o acesso para atividades de manutenção preventiva ou corretiva.

Por sua vez, os medidores ultrassônicos, especialmente os modelos do tipo *clamp-on*, apresentam maior flexibilidade quanto às exigências de instalação. Sua principal vantagem reside na capacidade de operação sem contato direto com o fluido, permitindo a instalação externa aos condutos sem necessidade de interrupção do escoamento. Todavia, para garantir o desempenho metrológico adequado, é necessário que a superfície externa da tubulação esteja limpa, sem corrosão, pintura ou imperfeições que prejudiquem o acoplamento acústico dos transdutores (ABNT NBR16198, 2013).

Os transdutores devem ser posicionados com exatidão geométrica, respeitando as instruções do fabricante quanto ao espaçamento e ao ângulo de incidência das ondas ultrassônicas. A presença de bolhas de ar ou partículas sólidas em excesso pode comprometer significativamente a qualidade do sinal, sobretudo nos modelos por tempo de trânsito. Assim como nos medidores eletromagnéticos, é recomendável que a instalação se dê em trechos retos da tubulação, sendo sugeridos ao menos dez diâmetros a montante (10D) e cinco a jusante (5D).

Adicionalmente, deve-se evitar locais sujeitos a vibração intensa ou à presença de pulsação hidráulica, como trechos próximos a bombas e válvulas. Os limites de temperatura e umidade do ambiente também devem ser observados, sendo necessário, em alguns casos, o uso de isolamento térmico (ABNT NBR16198, 2013). A instalação dos medidores ultrassônicos deve ainda considerar a facilidade de acesso, uma vez que sua manutenção e reposicionamento podem ser realizados

com o sistema em operação, representando um diferencial significativo em aplicações onde a continuidade do processo é essencial.

Em síntese, a seleção adequada do local e das condições de instalação dos medidores de vazão, sejam eletromagnéticos ou ultrassônicos, é determinante para o desempenho do sistema de medição. A adoção de boas práticas de instalação contribui para a redução de incertezas, aumento da confiabilidade das leituras e melhor desempenho operacional do sistema de abastecimento de água.

AVALIAÇÃO ECONÔMICA

A avaliação econômica é um dos aspectos mais relevantes no processo de seleção de medidores de vazão, especialmente em sistemas de abastecimento de água, onde o investimento em instrumentação deve conciliar desempenho técnico, durabilidade e custo-benefício ao longo do ciclo de vida do equipamento. Nesse contexto, os medidores eletromagnéticos e ultrassônicos, amplamente utilizados para medições em condutos forçados, apresentam características distintas que impactam diretamente nos custos de aquisição, instalação, operação e manutenção.

O primeiro fator a ser considerado diz respeito ao custo de aquisição dos equipamentos. Medidores ultrassônicos, sobretudo os modelos com tecnologia avançada de tempo de trânsito e sistemas *clamp-on*, apresentam valores iniciais de compra superiores aos medidores eletromagnéticos. Esse custo mais elevado está associado à sofisticação dos transdutores piezoelétricos, à necessidade de algoritmos complexos de processamento de sinais e à flexibilidade de instalação sem intervenção física na tubulação. Por outro lado, medidores eletromagnéticos, por utilizarem um princípio de medição baseado na indução eletromagnética — conforme a Lei de Faraday —, possuem construção mais direta, o que tende a refletir em um menor investimento inicial.

Entretanto, a análise econômica não deve restringir-se ao custo de aquisição, devendo incluir os custos indiretos associados à instalação, manutenção e operação do sistema de medição. Os medidores ultrassônicos do tipo *clamp-on* oferecem significativa vantagem nesse quesito, uma vez que sua instalação externa não exige interrupção do processo, cortes na tubulação ou obras civis complexas, reduzindo sensivelmente os custos operacionais e o tempo de parada. Já os medidores eletromagnéticos, especialmente os modelos flangeados ou de inserção, demandam intervenção na tubulação, além da necessidade de aterramento elétrico adequado e de trechos retos para estabilização do escoamento, fatores que encarecem o processo de instalação.

No que se refere à manutenção, os medidores eletromagnéticos, por não possuírem partes móveis, apresentam baixa frequência de falhas, mas exigem procedimentos mais rigorosos caso seja necessário o seu desmonte para inspeção, o que frequentemente implica em parada do sistema. Por sua vez, os medidores ultrassônicos, apesar de mais sensíveis à condição da parede do tubo e à presença de bolhas de ar, permitem manutenções preventivas e reposicionamentos com o processo em funcionamento, garantindo maior flexibilidade operacional.

Adicionalmente, deve-se considerar os custos com calibração e verificação metrológica, que variam conforme a acessibilidade do equipamento, a necessidade de padrões de referência externos e o suporte técnico disponibilizado pelo fabricante. Outro ponto de destaque na análise econômica é a vida útil esperada e a disponibilidade de peças sobressalentes, fatores que afetam diretamente o custo total de propriedade ao longo do tempo.

Por fim, a escolha do medidor mais econômico deve ser fundamentada em uma análise integrada dos custos diretos e indiretos associados a cada tecnologia, ponderando não apenas o valor inicial, mas também os impactos no desempenho operacional, na confiabilidade da medição e na sustentabilidade do sistema como um todo. Dessa forma, tanto os medidores eletromagnéticos quanto os ultrassônicos podem representar soluções economicamente viáveis, desde que compatíveis com as condições técnicas, estruturais e financeiras do projeto.

PROCEDIMENTO DE SELEÇÃO

O procedimento de seleção deve iniciar-se pela especificação inicial da medição, considerando variáveis como faixa de vazão, pressão, temperatura, tipo de fluido, diâmetro da tubulação, necessidade de trechos retos e exigências de exatidão. A partir dessas informações, avalia-se a compatibilidade entre as características do processo e as capacidades técnicas dos diferentes modelos de medidores.

A seguir, apresenta-se uma tabela com os principais procedimentos de seleção para cada tipo de medidor:

Tabela 1 - Procedimentos de seleção para medidores eletromagnéticos e ultrassônicos.

Critério de Seleção	Medidores Eletromagnéticos	Medidores Ultrassônicos
Tipo de fluido	Fluido condutor elétrico	Fluido homogêneo; livre de bolhas ou partículas em excesso
Faixa de vazão esperada	Alta (±0,2% a ±0,5%)	Moderada a alta (±1% a ±2%)
Condições de instalação	Requer trechos retos e tubulação cheia	Instalação externa possível (clamp-on), maior flexibilidade
Parada do processo para instalação	Necessária	Não necessária (clamp-on)
Acessibilidade e espaço físico	Instalação interna requer espaço	Adequado para locais de difícil acesso
Manutenção	Pode exigir desmontagem e parada	Permite manutenção com processo em operação
Custo de aquisição	Menor	Maior

Critério de Seleção	Medidores Eletromagnéticos	Medidores Ultrassônicos
Custo de instalação	Maior (modificações físicas na tubulação)	Menor (sem intervenção na tubulação)
Suporte a grandes diâmetros	Requer adaptação	Altamente aplicável

Fonte: elaborado pelo autor.

APLICAÇÕES RECOMENDADAS

Os medidores de vazão eletromagnéticos são amplamente recomendados para aplicações em que o fluido apresenta condutividade elétrica suficiente, sendo especialmente eficazes na medição de água bruta ou parcialmente tratada, mesmo na presença de sólidos em suspensão. Esses dispositivos são comumente empregados em pontos estratégicos como:

- Linhas de captação em mananciais superficiais, como rios e lagos, onde a qualidade da água é variável e a presença de detritos é comum;
- Entradas e saídas de Estações de Tratamento de Água (ETAs), onde se exige alta precisão e confiabilidade para o controle operacional;
- Linhas de recalque em estações elevatórias, aproveitando sua robustez e baixa sensibilidade a variações de pressão e vazão;
- Redes primárias de distribuição, particularmente em sistemas integrados a plataformas de automação e supervisão.

Dentre suas principais vantagens, destaca-se a ausência de partes móveis, o que reduz significativamente os requisitos de manutenção, além de garantir longa vida útil mesmo em condições adversas.

Por sua vez, os medidores ultrassônicos, especialmente os do tipo *clamp-on*, são recomendados para situações onde a instalação interna ao conduto não é viável, seja por limitações estruturais, operacionais ou econômicas. Essa tecnologia é ideal para aplicações como:

- Pontos de distribuição secundária, nos quais é necessário realizar medições sem interromper o fornecimento;
- Instalações existentes, em que intervenções físicas na tubulação seriam inviáveis ou indesejadas;
- Campanhas temporárias de medição e diagnósticos de perdas, com uso de equipamentos portáteis;
- Tubulações de grande diâmetro, nas quais o custo e a complexidade de medidores intrusivos são elevados;
- Locais de difícil acesso, onde a instalação externa facilita a manutenção e reduz o tempo de parada.

Adicionalmente, os medidores ultrassônicos são vantajosos em ambientes onde se busca preservar a integridade física da tubulação, evitando soldas, cortes ou paradas no processo (ABNT NBR16198, 2013).

Dessa forma, pode-se afirmar que os medidores eletromagnéticos são preferencialmente aplicados em sistemas robustos, de operação contínua e com exigência de alta precisão, enquanto os medidores ultrassônicos destacam-se pela flexibilidade de instalação, adaptabilidade a condições existentes e facilidade de manutenção. A seleção adequada, com base nas características operacionais de cada etapa do sistema, contribui decisivamente para a eficiência do abastecimento de água, otimização de recursos e confiabilidade dos dados obtidos.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A escolha e a aplicação corretas dos medidores de vazão são etapas fundamentais para a eficiência, a confiabilidade e a sustentabilidade dos sistemas de abastecimento de água. Este manual técnico apresentou, de forma sistematizada, os principais aspectos que devem ser considerados na seleção, instalação e avaliação econômica de medidores eletromagnéticos e ultrassônicos, com foco nas particularidades operacionais dos sistemas de captação, tratamento, adução e distribuição.

Os medidores eletromagnéticos, consolidados no mercado devido à sua robustez e alta precisão, demonstram excelente desempenho em aplicações que envolvem fluidos condutores e ambientes com presença de sólidos em suspensão. Sua durabilidade e estabilidade metrológica os tornam ideais para medições em redes primárias, estações de bombeamento e pontos críticos de controle operacional.

Por outro lado, os medidores ultrassônicos, notadamente os modelos *clamp-on*, destacam-se pela versatilidade de instalação, especialmente em locais de difícil acesso, tubulações existentes ou em situações que demandam medições temporárias e diagnósticos de perdas. Sua instalação não intrusiva, aliada à possibilidade de manutenção sem a necessidade de interromper o fluxo, proporciona uma solução técnica eficiente e economicamente atrativa para diversas etapas da distribuição de água.

Durante o desenvolvimento deste manual, observou-se que a seleção do medidor mais adequado não deve ser baseada unicamente no custo de aquisição, mas sim em uma análise integrada que contemple as características do fluido, as condições hidráulicas, a infraestrutura disponível, a exatidão requerida, o ciclo de vida do equipamento e os custos associados à instalação e manutenção. A utilização de tabelas comparativas e critérios técnicos objetivos contribui para a tomada de decisão técnica mais assertiva.

Portanto, espera-se que este manual sirva como uma ferramenta prática de apoio a engenheiros, técnicos e gestores na definição de estratégias de medição de vazão eficientes e adequadas à realidade de cada sistema. Ao adotar critérios técnicos sólidos e compatíveis com as normas vigentes, será possível garantir a

medição precisa dos volumes transportados, promovendo o uso racional da água e a gestão eficaz dos recursos hídricos.

REFERÊNCIAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR ISO 4064-1**: Medição de vazão em condutos fechados — Parte 1: Métodos de medição. Rio de Janeiro, 2014.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR ISO 10012**: Sistemas de gestão da medição — Requisitos para os processos de medição e para os equipamentos de medição. Rio de Janeiro, 2004.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR ISO 6817:** Medição de vazão de líquido condutivo em condutos fechados — Método utilizando medidores de vazão eletromagnéticos. Rio de Janeiro: ABNT, 1999.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR ISO 9104**: Medição de vazão de líquido condutivo em condutos fechados — Método utilizando medidores de vazão eletromagnéticos — Métodos para a avaliação do desempenho. Rio de Janeiro: ABNT, 2000.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 16198**: Medição de vazão de fluidos em condutos fechados — Métodos usando medidor de vazão ultrassônico por tempo de trânsito — Diretrizes gerais de seleção, instalação e uso. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ARANTES, Walace Ferreira de. **Avaliação metrológica da comparação Inter laboratorial da calibração de medidores ultrassônicos.** 2007. 142 f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

ANA – Agência Nacional de Águas (Brasília/DF). **Manual orientativo para sistemas de medição de vazão de água em condutos forçados.** 1. ed. Brasília: CEDOC/Biblioteca, 2019. 106 p. v. 1.

BEGA, E. (organizador). **Instrumentação industrial.** Rio de Janeiro: Interciência, 2ª edição, 2006.

COELHO, Adalberto Cavalcanti. **Medição de água e controle de perdas.** Associação Brasileira de Engenharia Sanitária - ABES, p. 3-13, 1983.

DELMEÉ, Gerrard J. **Manual de medição de vazão.** 3ª edição. São Paulo: Edgard Blücher Ltda., 2003.

EDWARDS, J. E.; OTTERSON, D. W. **Tech Talk: (7) Flow Measurement Basic**s (Part 2). Measurement and Control, 48(4):115-121, 2015. doi:10.1177/0020294015578987.

FERREIRA, Ana Luísa Auler da Silva. **Tecnologia ultrassônica na medição de vazão em escoamentos incompressíveis.** 2010. 272 f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

MARTINS, N. **Manual de medição de vazão através de placas de orifício, bocais e venturis**. Rio de Janeiro: Interciência, 1ª edição, 1998.

RIBEIRO, Marco Antônio. **Medição de vazão: fundamentos e aplicações**. 5. ed. Salvador: Tek Treinamento & Consultoria, 1997.

Organizador

Rômulo Damasclin Chaves dos Santos

Minha trajetória acadêmica e profissional está pautada na busca incessante pela compreensão dos fenômenos físico-matemáticos por meio da Modelagem Matemática e Computacional. Utilizo como "ferramentas" matemáticas a Análise Complexa, Análise Funcional, Equações Diferenciais Parciais, Integrais e Integro-Diferenciais, além da Análise Numérica para interpretar tais fenômenos de maneira aproximada e concisa do mundo físico real. Atualmente, como Pós-doutorando (Voluntário) em Física no Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA/SP), concentro meus esforços em Dinâmica Não-Linear, Sistemas Complexos e Caos. Nesse viés acadêmico, obtive o título de Doutor em Matemática Aplicada pela Faculdade de Ciências da Universidade do Porto (FCUP/U.Porto) através do Programa de Pós-graduação em Matemática Pura e Aplicada (PDMA-FCUP/U.Porto, 2014 — 2018), onde durante o doutoramento, optei em continuar na área de Dinâmica dos Fluidos; tendo o título reconhecido e validado pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS, 2019). Também possuo um Mestrado em Engenharia Mecânica concedido pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI/MG, 2012 —

2014), com ênfase em Dinâmica dos Fluidos e Máquinas de Fluxo, e uma Graduação em Matemática pela Universidade Federal do Acre (UFAC, 2006 — 2009), onde foi desenvolvido em paralelo à Graduação um projeto de Iniciação Científica, intitulado "Modelagem Geométrica de Fractais com Programação Orientada a Objeto". Assim, para além da minha formação acadêmica, estou como Revisor em alguns importantes Periódicos Científicas, a saber, do Journal of Mathematics and Statistics from Science Publications, do International Journal of Theoretical and Applied Mathematics from Science Publishing Group; do Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal from ASTES Journal; do Journal of Applied Fluid Mechanics (JAFM), e da Revista de Matemática da Universidade Federal de Ouro Preto (RMAT – UFOP); e ainda como membro em grupos de pesquisa e em associações profissionais, como o Grupo de Pesquisa em Sistemas Complexos, Dinâmica Não-Linear e Caos (ITA-SP), na Sociedade Brasileira de Matemática (SBM), na Sociedade Brasileira de Matemática Aplicada e Computacional (SBMAC) e na International Association of Engineers and Computer Scientists (IAENG). Minhas áreas de interesse e de pesquisa envolvem e incluem a Modelagem Matemática e Computacional, a Dinâmica dos Fluidos,

a Análise Funcional, a Análise Complexa e Numérica, as Equações Diferenciais Parciais, Integrais e Integro-Diferenciais, Turbulência em Fluidos Newtonianos Incompressíveis, a Transferência de Calor por Convecção Mista (Forçada e Natural) e Sistemas Dinâmicos Complexos. Tenho expertise em alguns Métodos Numéricos com sintaxe em linguagem C/C++, Python e Matlab, a saber, o Large-Eddy Simulation (LES), o Smagorinsky Sub-Grid Model, o Spalart-Allmaras Method, o Partially-Averaged Navier-Stokes (PANS), o Detached-Eddy Simulation (DES), o Unsteady Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equations (URANS), o Smoothed-Particle Hydrodynamics (SPH), o Immersed Boundary Method (IBM) e o Centered Finite Difference Method. Sou autor de artigos, livros e capítulos de livros científicos. Na área de Inovação e Tecnologia, possuo registros de programas de computador junto ao INPI (Instituto Nacional de Propriedade Industrial).

Índice Remissivo

A

abastecimento 60, 62, 68, 70, 73
abordagem 1, 41, 42, 45, 46, 48, 49
acadêmicos 46, 60
aço 64
administração 41, 45
água 60, 61, 62, 63, 68, 70, 72, 73, 74
água tratada 60
algoritmos 15, 19, 23, 27, 31, 32
ambiente industrial 41
análise 1, 15, 18, 23, 26, 27, 40, 42, 46, 47, 51, 57
ângulos 51, 52, 56, 57
automação industrial 1, 15, 18
automation 1, 2, 13

C

cartesianas 55
cartesiano 52
cinemática 51, 52, 53, 57, 58
cinemática direta 51, 52, 53
cinética 62
computacional 15, 16, 17, 18, 19, 21, 23, 24, 25, 26, 27, 29, 30, 32, 51, 58
conceitos 41, 43, 46
cultura organizacional 42, 44, 46

D

digitais 19, 24, 27, 34

E

eletromagnético 27, 31, 60
eletromagnéticos 60, 61, 63, 64, 65, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74
energias 62
engenharia 17, 40, 41, 42, 43, 49
estudos 18, 21, 52, 60

F

ferramenta 16, 40, 45, 51, 52, 54, 55
ferramentas 18, 44

H

habilidades 16, 19
hídrico 60
hidrológico 60

I

indução 61, 63, 64, 70
industrial 1, 2, 13, 15, 16, 18, 19, 26, 31, 32, 35, 40, 41, 42, 45, 46
infraestrutura 34, 60, 73
inovação 18
instrumentos 60, 68
inteligência artificial 15, 16, 17, 18, 31
inteligentes 17, 18, 28
investimentos 45

L

laboratório 19
liderança 40, 44, 49

M

machine learning 15, 16
magnético 63, 64
manipulador 51, 52, 53, 55, 58
manutenção 40, 41, 42, 44, 45, 46, 47, 48, 49
massa 61, 62
matemática 1, 51, 52
mathematical 1

matrizes 54, 56
medição 31, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75
medicina 15, 18, 34, 35
medidor 60, 61, 63, 64, 65, 66, 67, 69, 71, 73, 74
medidores 60, 61, 62, 63, 64, 65, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74
metalúrgica 42, 46
metalúrgico 40, 45, 46
metodologia 1, 43, 45
modelagem 51, 52, 53, 58
multidimensionais 16

N

normas técnicas 60

O

optimization 1, 2, 13, 14

P

potencial 62, 64
princípio 26, 27, 63, 64, 67, 70
processamento 15, 16, 17, 18, 19, 21, 22, 27, 28, 29, 31, 32, 33
processo 16, 17, 20, 21, 22, 23, 24, 28, 29, 31, 32, 44, 45, 46, 49
processos 15, 17, 18, 19, 21, 31, 35
programming 1, 2, 13, 14
project management 1, 2, 4

R

recursos hídricos 60, 61, 74
risk analysis 1, 4
robô 52, 53, 57, 58

robôs 52, 53
robótica 16, 17, 19, 51, 52, 53, 54
robótico 51, 55
robóticos 51, 53, 57

S

schedules 1, 4, 13
segurança 1, 15, 18
simulação 51, 55, 57
sistema VI, 17, 19, 21, 22, 24, 25, 30, 31, 41, 45, 46, 47, 52, 53, 54, 55
sistema hidráulico 64
sistemas 15, 17, 19, 22, 25, 28, 32, 52, 53, 60, 61, 62, 63, 65, 68, 70, 72, 73, 74

T

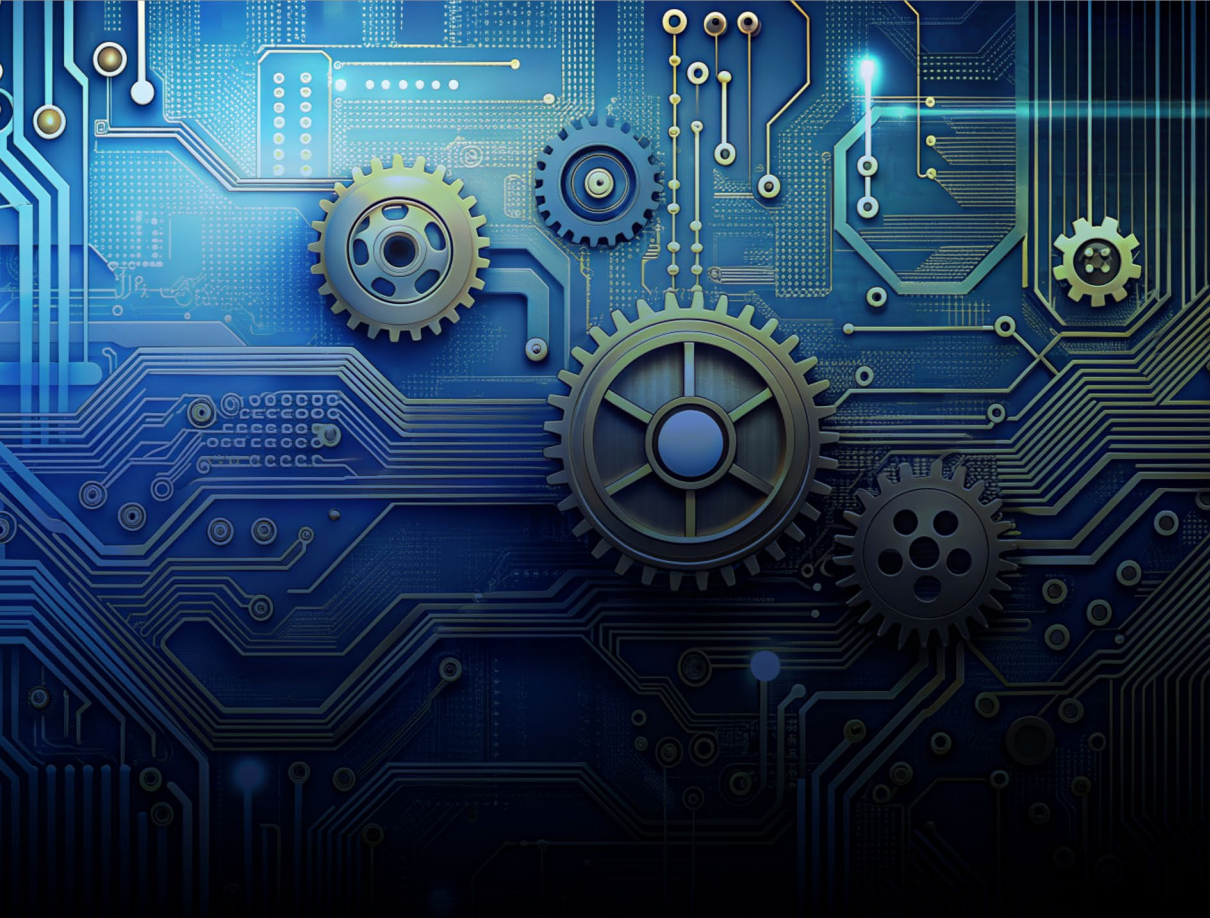
técnicos 47, 60, 61, 68, 73
tecnologia 15, 18, 19, 21, 22, 24, 25, 26, 27, 28, 31, 33, 34, 51, 52, 60, 65, 70, 71, 72
tecnológicas 16
tecnológicos 17
tratamento 60, 61, 63, 68, 73

U

ultrassônico 60, 66, 74
ultrassônicos 60, 61, 63, 65, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74

V

vazão 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 68, 70, 71, 72, 73, 74, 75
velocidade 28, 32, 34, 44, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67
visão computacional 15, 16, 17, 18, 19, 21, 23, 24, 25, 26, 27, 29, 30, 32



AYA EDITORA
2025