

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Departamento De Engenharia Mecânica
Programa de Pós-Graduação em Especialização de Soldagem

Leandro Ywis Oliveira Da Silva

**ESTUDO DE CASO SOBRE O TEMPO DE TROCA E DESPERDÍCIO DE ARAMES
NO PROCESSO DE SOLDAGEM POR ARCO SUBMERSO (SAW) COM QUATRO
ARAMES**

Belo Horizonte
2025

Leandro Ywis Oliveira Da Silva

**ESTUDO DE CASO SOBRE O TEMPO DE TROCA E DESPERDÍCIO DE ARAMES
NO PROCESSO DE SOLDAGEM POR ARCO SUBMERSO (SAW) COM QUATRO
ARAMES**

Monografia de Especialização apresentada ao Curso de Especialização em Engenharia de Soldagem da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Especialista em Engenharia de Soldagem.

Orientador: Reginaldo Matias Nunes

Belo Horizonte
2025

S586e

Silva, Leandro Ywis Oliveira da.

Estudo de caso sobre o tempo de troca e desperdício de arames no processo de soldagem por arco submerso (SAW) com quatro arames [recurso eletrônico] / Leandro Ywis Oliveira da Silva. – 2025. 1 recurso online (21 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Reginaldo Matias Nunes.

Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Engenharia de Soldagem da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para a obtenção do título de Especialista em Soldagem.

Inclui bibliografia.

1. Soldagem. 2. Arame. 3. Arcos. I. Nunes, Reginaldo Matias.
II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia.
III. Título.

CDU: 621.791



Universidade Federal de Minas Gerais
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica
Programa de Pós-Graduação
Curso de Especialização em Soldagem



ATA DE DEFESA DE MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

No dia **04/12/2025**, às **14:30h**, a Comissão Examinadora se reuniu remotamente para avaliar o trabalho:

Título: ESTUDO DE CASO SOBRE O TEMPO DE TROCA E DESPERDÍCIO DE ARAMES NO PROCESSO DE SOLDAGEM POR ARCO SUBMERSO (SAW) COM QUATRO ARAMES

Nome Completo Aluno: Leandro Ywis Oliveira da Silva

Nº da Matrícula na UFMG: 2024672110

Local: UFMG - Sala de Seminários 1012

Parecer:

A Comissão Examinadora, após a apresentação pelo (a) candidato (a) durante 20 minutos e após ter argüido o(a) candidato(a) por 30 minutos, é de parecer **FAVORÁVEL** à aprovação do trabalho de monografia com a nota final de **70 pontos** e **COM** sugestões de modificação.

Sugere-se o prazo de 30 dias para efetuar-se as modificações sugeridas com revisão final acompanhada e homologada pelo orientador **Reginaldo Matias Nunes**

Assinaturas:

Documento assinado digitalmente
gov.br REGINALDO MATIAS NUNES
Data: 02/02/2026 14:33:10-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Reginaldo Matias Nunes
DEMEC/UFMG - Orientador

Documento assinado digitalmente
gov.br REGINALDO MATIAS NUNES
Data: 02/02/2026 14:34:04-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Reginaldo Matias Nunes
DEMEC/UFMG – Avaliador

Leandro Ywis
Oliveira da Silva

Assinado de forma digital por
Leandro Ywis Oliveira da Silva
Dados: 2026.02.03 05:42:21 -03'00'

Aluno: Leandro Ywis Oliveira da Silva
CPF: 110.935.486-06

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela força, sabedoria e fé que me sustentaram durante toda esta caminhada. À minha família, pelo amor, incentivo e paciência em todos os momentos. Ao meu orientador, Reginaldo Matias Nunes, pela orientação técnica, apoio e dedicação que contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho. E aos colegas de trabalho, pela colaboração, troca de experiências e constante aprendizado ao longo desta jornada.

RESUMO

O presente estudo de caso, desenvolvido no contexto da Engenharia de Soldagem, tem como objetivo analisar o impacto do tempo de parada e do desperdício de consumível no processo de Soldagem a Arco Submerso (SAW), em um sistema de alta produtividade composto por quatro arames, para soldagem entre uma chapa e um tubo de aço de baixa liga. O estudo busca quantificar as perdas financeiras e operacionais decorrentes das trocas de bobinas de arame, considerando dois cenários distintos: o primeiro, quando uma das bobinas se esgota completamente, e o segundo, quando há pouco arame em duas ou três bobinas e a substituição é realizada de forma preventiva, ocasionando desperdício. O experimento foi conduzido em uma célula de soldagem mecanizada equipada com 3 bobinas de arame EM12K de diâmetro 2,5 mm e 1 bobina de 4,0 mm, cada uma com 100 kg, de acordo com procedimento qualificado pela norma AWS D1.1. Durante a análise, foram observados tempos médios de troca de 25 minutos para operadores experientes e 50 minutos para operadores em fase de treinamento. A mensuração das perdas permitiu identificar um desperdício anual aproximado de 1,8 toneladas de arame, o que representa um custo estimado de R\$ 55.000,00 por ano, além de um tempo improdutivo acumulado de cerca de 130 horas anuais. Esses resultados demonstram a relevância da padronização do processo, do treinamento contínuo dos operadores e da aplicação dos princípios de redução de setup, como o método Troca Rápida de Ferramenta (SMED-Single Minute Exchange of Die), para otimizar o tempo de troca e minimizar perdas. Conclui-se que a otimização das trocas de arame no processo SAW Tandem ICE Twin constitui uma ação estratégica de alto impacto econômico e produtivo, contribuindo de forma significativa para a eficiência global, a competitividade industrial e a sustentabilidade operacional das linhas de soldagem.

Palavras-chave: soldagem SAW; multi-arames; desperdício de consumível; setup; produtividade.

ABSTRACT

This case study, developed within the context of Welding Engineering, aims to analyze the impact of downtime and consumable waste in the Submerged Arc Welding (SAW) process, specifically within a high-productivity system composed of four wires, used for welding a low-alloy steel plate to a pipe. The study seeks to quantify the financial and operational losses resulting from wire spool changes, considering two distinct scenarios: the first, when one of the spools is completely exhausted; and the second, when there is little wire remaining on two or three spools and the replacement is carried out preventively, resulting in waste. The experiment was conducted in a mechanized welding cell equipped with three 2.5 mm diameter EM12K wire spools and one 4.0 mm spool, each weighing 100 kg, according to a procedure qualified under the AWS D1.1 standard. During the analysis, average changeover times of 25 minutes for experienced operators and 50 minutes for operators in the training phase were observed. The measurement of losses identified an approximate annual waste of 1.8 tons of wire, representing an estimated cost of R\$ 55,000.00 per year, in addition to an accumulated non-productive time of about 130 annual hours. These results demonstrate the relevance of process standardization, continuous operator training, and the application of setup reduction principles, such as the Single Minute Exchange of Die (SMED) method, to optimize changeover time and minimize losses. It is concluded that the optimization of wire changes in the SAW Tandem ICE Twin process constitutes a strategic action with high economic and productive impact, significantly contributing to the overall efficiency, industrial competitiveness, and operational sustainability of welding lines.

Keywords: SAW welding; multi-wire; consumable waste; setup; productivity.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	9
2. OBJETIVO	10
3. METODOLOGIA	10
3.1 Materiais e Equipamentos	10
3.2 Procedimentos de Coleta de Dados.....	13
3.3 Tratamento e Análise dos Dados	14
3.4 Planejamento Prático Para Reduzir Paradas E Evitar Desperdício	14
3.5 Determinação do Consumo de Arame e Cálculo do Comprimento por Volta (Procedimento Experimental).....	14
4. RESULTADOS	15
4.1 Quantificação do Desperdício de Consumível.....	15
4.2 Geometria da Bobina, da Junta e Consumo de Arame.....	17
4.3 Impacto financeiro do desperdício	18
4.4 Produtividade e Nível de Experiência	19
4.5 Comparativo econômico entre consumo e desperdício	20
4.6 Comparativo Entre Custo de Parada e Custo de Descarte	21
4.7 Proposta de Melhoria Tecnológica	22
5. DISCUSSÃO	23
5.1 Estratégias De Melhoria	24
5.2 Implementação imediata	24
6. CONCLUSÃO.....	25
REFERÊNCIAS	27
8. APÊNDICE A — Proposta de Padronização e Viabilidade Econômica do Uso de Sensor de Rotação	29

1. INTRODUÇÃO

O processo de soldagem por arco submerso (SAW – *Submerged Arc Welding*) é amplamente empregado na indústria pesada devido à sua elevada taxa de deposição, excelente qualidade metalúrgica e alta eficiência energética. De acordo com Modenesi (2004), o processo é caracterizado pela fusão localizada entre um eletrodo metálico nu e a peça de trabalho, protegidos por um fluxo granuloso que cobre completamente a poça de fusão, impedindo a observação direta do arco. Sua aplicação é indispensável na fabricação de grandes estruturas metálicas, como vasos de pressão, tubulações, tanques, plataformas offshore e componentes estruturais de grande espessura (MARQUES et al., 2011; ROSA, 2023).

O avanço tecnológico e a busca constante por eficiência produtiva impulsionaram o desenvolvimento de variações do processo, como o *Twin-Arc* (dois arames em uma única poça de fusão) e o *Tandem-Arc* (dois ou mais arames energizados por fontes distintas, formando arcos separados), ou ainda combinações dessas configurações. O sistema de quatro arames, objeto deste estudo, *SAW Tandem ICE Twin*, insere-se nesse contexto de alta produtividade, combinando arames de diferentes diâmetros (2,5 mm e 4,0 mm) para otimizar simultaneamente a penetração, a taxa de deposição e o volume de enchimento em juntas de grande espessura (MARQUES et al., 2011; ESAB, 2021; TWI, 2023).

Apesar dos ganhos de produtividade proporcionados pelos sistemas multi-arama, a eficiência global do processo pode ser comprometida por fatores logísticos e operacionais, como o tempo de parada necessário para a troca das bobinas de arame. Em um sistema com múltiplas bobinas de 100 kg cada, a coordenação dessa troca tem impacto direto sobre os custos de fabricação e sobre o índice de eficiência global do equipamento (OEE). De acordo com Voigt (2015), o tempo improdutivo decorrente de paradas de máquina representa uma das principais fontes de perda de produtividade em processos contínuos. Sob a ótica da produção enxuta, Ohno (2006) classifica esse tipo de interrupção como um desperdício a ser combatido, pois não agrega valor ao produto final.

As especificações técnicas de consumíveis e os códigos de fabricação tais como; AWS A5.17 e AWS D1.1 (2020) são usadas para seleção e qualificação de procedimento respectivamente, no entanto sem mencionar variáveis operacionais como as tratadas neste artigo. Em complemento, normas internacionais como a ISO 14171:2016 e a ISO 3834 destacam a necessidade de gestão rigorosa de consumíveis e planejamento eficiente da operação. Estudos recentes apontam que perdas não monitoradas em processos de soldagem

podem representar até 15% do custo total de produção (COSTA e PEREIRA, 2021), o que evidencia a relevância econômica do tema.

2. OBJETIVO

Nesse contexto, o presente estudo de caso tem como objetivo analisar o impacto do tempo de parada e do desperdício de consumível em um processo de soldagem a arco submerso (*SAW Tandem ICE Twin*) com quatro arames, considerando dois cenários distintos: a substituição individual após o esgotamento completo de uma bobina e a troca preventiva de duas ou três bobinas com arame remanescente. A pesquisa quantifica as perdas de tempo e de material, avalia o impacto econômico das trocas e propõe estratégias de otimização baseadas nos princípios da filosofia SMED (*Single Minute Exchange of Die* – Traduzindo: Troca Rápida de Ferramenta), visando aumentar a produtividade e reduzir custos em operações industriais de larga escala.

3. METODOLOGIA

A metodologia adotada foi estruturada para identificar, quantificar e comparar o impacto operacional do tempo de parada e do desperdício de consumíveis em dois cenários distintos de troca de bobinas de arame, conduzido sob o formato de estudo de caso descritivo e analítico em uma linha de soldagem mecanizada, entre a soldagem de uma chapa e um tubo de aço baixa liga.

3.1 Materiais e Equipamentos

O estudo foi conduzido em uma célula de soldagem automatizada “Fig. 1” configurada com uma coluna manipuladora (altura da coluna de 6 metros), três bobinas de arame EM12K de diâmetro 2,5 mm e uma de 4,0 mm, cada uma com capacidade de 100 kg, “Fig. 2”. O metal de base utilizado foi o ASTM A572 Gr.50, aplicado à chapa e ao tubo com extensão de 15 000 mm e geometria de chanfro tipo “K” “Fig.3”, em conformidade com as recomendações da norma AWS D1.1 (2020) — figura 5.1, para definição do tipo de chanfro, e tabela 5.3, para especificação do metal de base. Essa escolha foi motivada pela elevada espessura da peça e pela

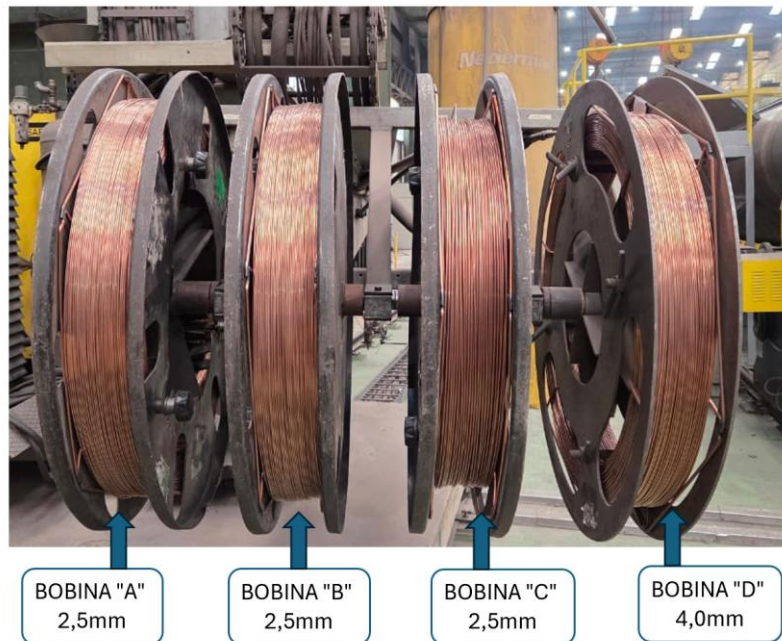
necessidade de penetração total do metal de solda, assegurando a integridade estrutural e reduzindo a ocorrência de retrabalhos.

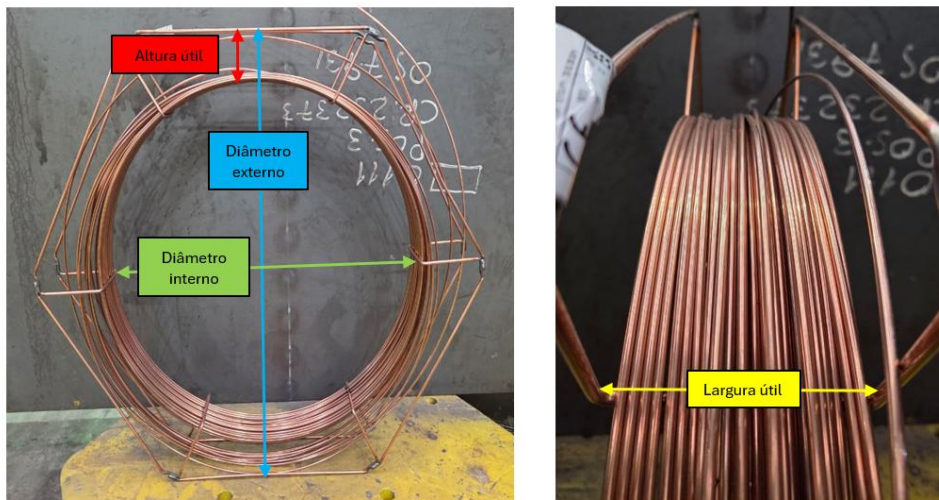
Figura 1 - Local do posto de trabalho reservado para armazenamento, movimentação e troca das bobinas do consumível.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

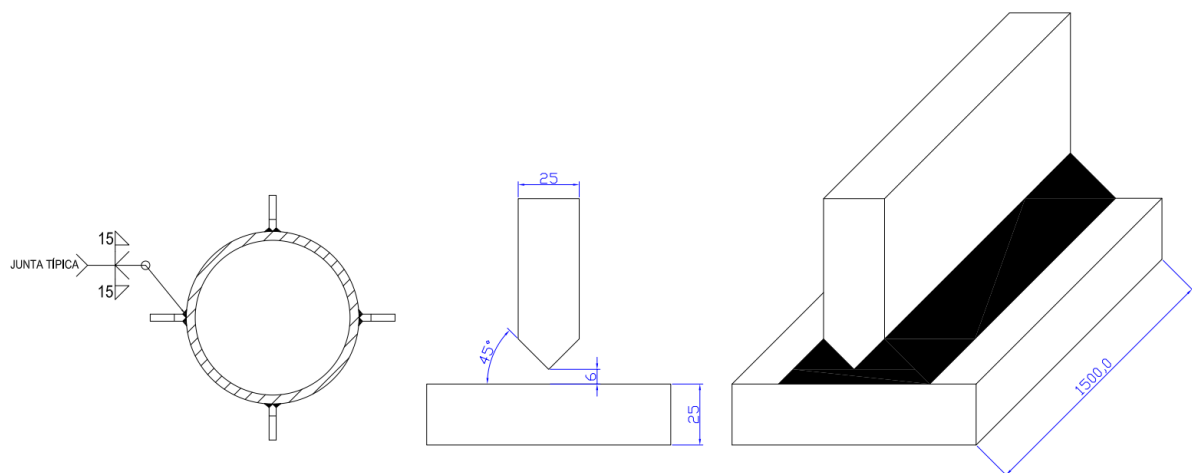
Figura 2 - Arranjo das bobinas para soldagem SAW com 4 arames e geometria da acomodação do arame.





Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

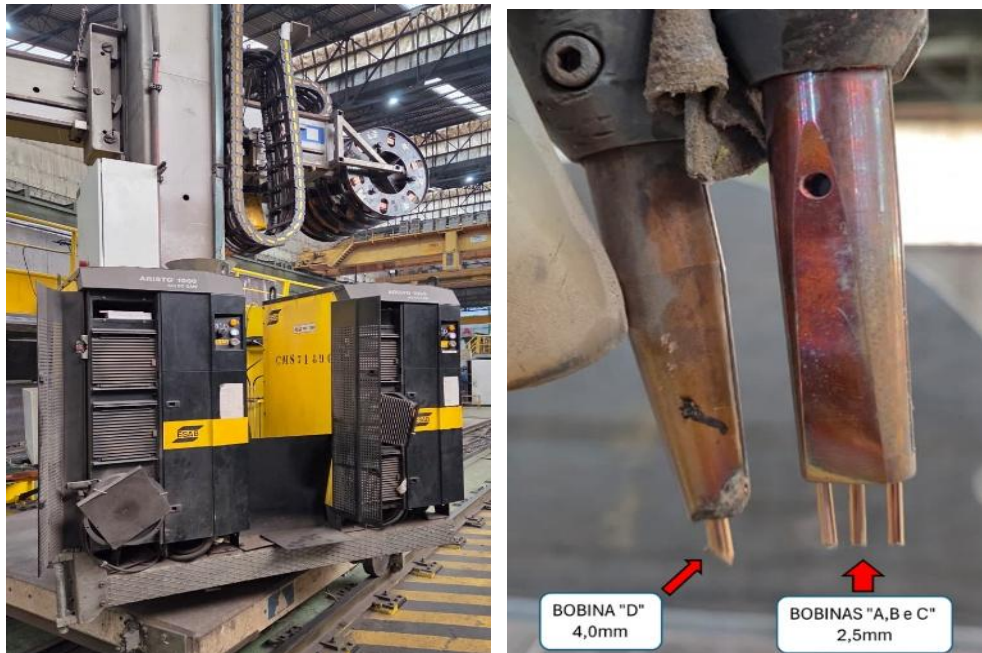
Figura 3 - Ilustração da secção transversal da junta, chanfro em “K”, dimensões em milímetros



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A célula de soldagem é composta por fonte de corrente contínua “Fig.4”, controle digital de parâmetros, alimentadores independentes e sistema automatizado de deslocamento longitudinal.

Figura 4 - A esquerda fonte da máquina de solda e a direita caneta com os 4 arames, sendo uma para arame de 4,0 e outra para os três arames de 2.5 milímetros



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

3.2 Procedimentos de Coleta de Dados

Os dados foram coletados por meio de observação direta e cronometragem de operações de troca de bobinas. As medições seguiram o método de cronoanálise comparativa, registrando-se o tempo de parada desde a interrupção da soldagem até a retomada total da operação. As variáveis observadas incluíram:

- Tempo total de parada;
- Número de trocas realizadas por período;
- Volume médio de arame remanescente nas bobinas substituídas;
- Nível de experiência do operador (experiente ou em treinamento/desenvolvimento).

Foram definidos dois cenários operacionais para análise:

- Cenário 1 – Troca após esgotamento completo: o processo é interrompido quando uma das quatro bobinas se esgota totalmente.
- Cenário 2 – Troca preventiva: a substituição ocorre de forma programada, quando duas ou três bobinas apresentam baixo volume remanescente, evitando múltiplas paradas não sincronizadas.

Esses dois cenários foram adotados para avaliar o impacto das estratégias de troca sobre a produtividade e o consumo de material, conforme diretrizes de Shingo (2003) sobre redução de tempos de paradas para troca das bobinas.

3.3 Tratamento e Análise dos Dados

Os tempos registrados foram tratados estatisticamente para obtenção das médias e variâncias. As perdas de consumível foram quantificadas por meio da pesagem dos resíduos de arame remanescente em cada troca, e convertidas em equivalentes econômicos utilizando o preço médio de mercado por quilograma.

Os dados foram organizados e analisados em planilhas eletrônicas (Excel) para cálculo das métricas de produtividade e perdas, sendo os resultados comparados entre os dois cenários definidos. As análises consideraram também os princípios de produção enxuta (OHNO, 2006), visando correlacionar o tempo de parada ao custo de improdutividade.

3.4 Planejamento Prático Para Reduzir Paradas E Evitar Desperdício

Observou-se historicamente maior demanda do $\varnothing 4,0$ mm em relação ao $\varnothing 2,5$ mm. Contudo, os cálculos deste trabalho baseiam-se exclusivamente nas medições experimentais descritas na Seção 3.5 (massa remanescente e voltas), por representarem o comportamento real da linha.

3.5 Determinação do Consumo de Arame e Cálculo do Comprimento por Volta (Procedimento Experimental)

Para cada bitola, foram registradas a massa remanescente e a quantidade de voltas correspondentes, determinando-se o comprimento total do arame (em metros). A partir da razão entre o comprimento total e o número de voltas, obteve-se o comprimento médio por volta. Com base nesse valor, o consumo por junta foi convertido em voltas por metro de solda. Esse procedimento, permitiu quantificar a relação entre o consumo de arame e a extensão soldada, fornecendo uma base para a padronização das trocas de bobina.

4. RESULTADOS

4.1 Quantificação do Desperdício de Consumível

A coleta de dados foi realizada ao longo de quatro semanas de operação contínua, em regime normal de produção. Durante esse período, registraram-se reinícios de soldagem inerentes ao processo produtivo, os quais foram considerados na análise para avaliar sua influência sobre o tempo total de operação e o volume de desperdício de arame. Também foi observado na linha de produção a relação média de consumo de 2:1, ou seja, o arame de 4,0 mm consome o dobro do material que o de 2,5 mm.

A “Fig. 5” ilustra o procedimento de pesagem dos arames de 2,5 mm e 4,0 mm, bem como o descarte dos consumíveis observados no estudo.

Figura 5 - Ilustração da pesagem do arame de 2,5mm, 4,0mm e descarte do consumível



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A “Tab. 1” e “Tab. 2” apresentam os valores registrados de arame descartado, tempo de interrupção da soldagem, e quantidade de trocas de bobinas para cada diâmetro analisado.

Tabela 1 - Peso dos arames descartados por bobina (período de 1 mês)

Diâmetro 2,5 mm	Diâmetro 4,0 mm
	5,2kg
	4,0kg
	2,0kg
	2,3kg
	4,4kg
7,0kg	18,9kg
4,9kg	5,9kg
2,9kg	5,8kg
3,5kg	5,9kg
	3,8kg
	18,9kg
	3,2kg
	3,7kg
	4,5kg
	5,6kg
	8,6kg
	12,5kg
	8,8kg
Peso total descartado	
18,3kg (2,5mm)	123,9kg (4,0mm)

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Tabela 2 - Quantidade de bobinas descartadas e tempo de interrupção do processo de soldagem para troca das bobinas observado durante um mês:

Descrição	Diâmetro 2,5 mm	Diâmetro 4,0 mm
Tempo médio de parada da soldagem para troca de 2X bobinas	20 minutos	
Tempo médio de parada da soldagem para troca de 3X bobinas	30 minutos	

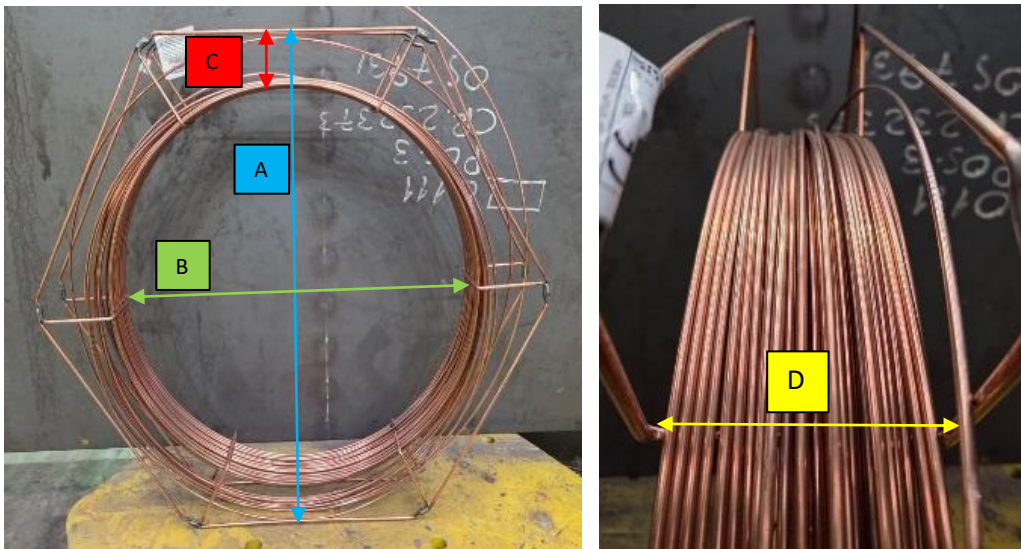
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Observa-se que o diâmetro de 4,0 mm apresentou maior volume de descarte, refletindo diretamente em maior impacto financeiro, já que é o arame mais utilizado no processo produtivo.

4.2 Geometria da Bobina, da Junta e Consumo de Arame

A “Fig. 6” ilustra a geometria da bobina, aplicável para os dois arames de 2,5 mm e 4,0 mm.

Figura 6 - Geometria da bobina (A: \varnothing externo = 700 mm; B: \varnothing interno = 630 mm; C: altura útil = 70 mm; D: largura útil = 95 mm)



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A “Tab. 3” apresenta uma estimativa do número total de voltas existentes em uma bobina cheia para cada diâmetro de arame, servindo como referência para o ciclo completo de consumo.

Tabela 3 - Comprimento e voltas em 100 kg de arame (bobina cheia)

Bitola (mm)	Comprimento total (m)	Voltas estimadas por bobina cheia
\varnothing 2,5	\approx 2.595	\approx 1.100 voltas
\varnothing 4,0	\approx 1.010	\approx 430 voltas

Fonte: Valores de referência compatíveis com dimensões da bobina e densidade linear; utilizados apenas como ordem de grandeza. Elaborado pelo autor (2025)

A “Tab. 4” relaciona o consumo em voltas por metro de junta soldada, permitindo prever com maior precisão a taxa de uso ao longo da produção.

Tabela 4 - Voltas por metro de junta (valores experimentais)

Bitola	Metro de arame por metro de junta	Voltas por metro
Ø 2,5 mm	59,2 m/m	≈ 29,6 voltas/m
Ø 4,0 mm	46,3 m/m	≈ 23,1 voltas/m

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Os valores apresentados foram recalculados a partir das medições reais de campo, utilizando a massa remanescente, o número de voltas registradas e a densidade linear de cada bitola. A conversão adotou um comprimento médio de ≈2,01 m por volta na região final da bobina, compatível com o diâmetro operacional observado. Dessa forma, a relação “voltas por metro de junta” reflete diretamente o comportamento do processo e não depende da razão teórica de consumo entre as bitolas, garantindo coerência com as condições efetivas da soldagem.

A “Tab. 5” apresenta a geometria da junta em “K”, com as dimensões de seção transversal, volume e a quantidade de consumível necessária para a soldagem de uma e de quatro juntas.

Tabela 5 - Geometria da junta em “K” (seção transversal) e consumível por 1 junta e por 4 juntas.

Etapa da solda	Processo	Espessura (mm)	Consumível por junta (kg)	Consumível (4 juntas) (kg)
Enchimento	SAW	42,0	103,3	413,1
Acabamento	SAW	3,0	14,8	59,2
Reforço da perna (Reforço)	SAW	15,0	26,5	106,0
Total	-	75,0	171,1	684,2

Fonte: Elaborado pelo autor (2025), com base em dados de cronoanálise industrial.

4.3 Impacto financeiro do desperdício

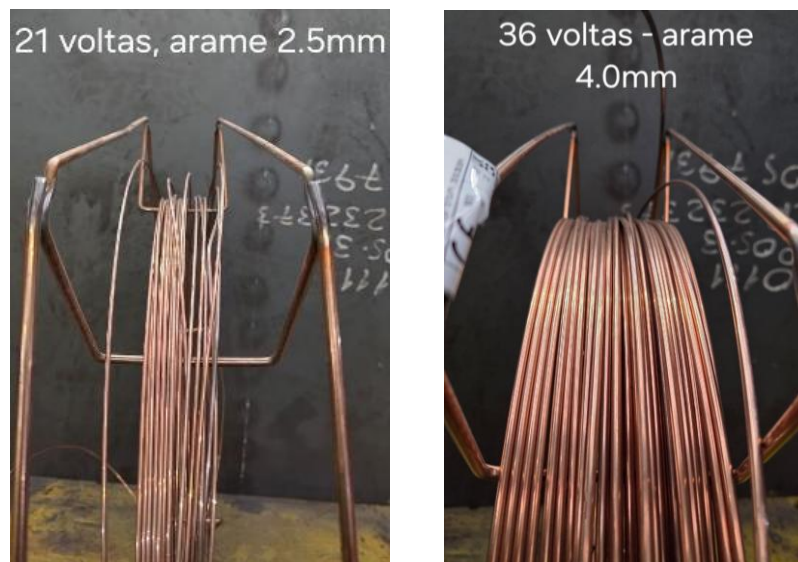
A “Tab. 6” apresenta o volume de arame descartado semanal, mensal e anual, além do impacto financeiro correspondente por diâmetro de arame.

Tabela 6 - Desperdício de consumível e impacto financeiro no processo SAW.

Descrição	Diâmetro do arame	Descarte semanal (kg)	Descarte mensal (kg)	Descarte anual (kg)	Custo por kg (R\$)	Custo semanal (R\$)	Custo mensal (R\$)	Custo anual (R\$)
Descarte de consumível	Ø 2,5 mm	4,57	18,3	219,36	29,37	134,22	536,88	6.442,60
Descarte de consumível	Ø 4,0 mm	30,97	123,9	1486,56	24,57	760,93	3.043,73	36.524,78
Total	—	35,54	142,16	1705,92	—	895,15	3.580,62	42.967,38

Fonte: Cronoanálise (2025). Peso da roldana desconsiderado (1,0 kg). Elaborado pelo autor (2025).

A “Tab. 7” apresenta o número de voltas de arame descartado, o custo e metragem da junta.

Tabela 7 - Equivalência do descarte em voltas e junta

Bitola	Voltas medidas	Comprimento total (m)	Massa descartada (kg)	Custo (R\$)
Ø 2,5 mm	21	≈ 41,8	≈ 1,61	≈ 47,3
Ø 4,0 mm	36	≈ 72,4	≈ 7,15	≈ 175,3

Fonte: Elaborado pelo autor (2025),

4.4 Produtividade e Nível de Experiência

A “Tab. 8” apresenta o tempo médio de troca de bobina conforme o nível de experiência dos operadores.

Tabela 8 - Tempo médio de troca de bobina e improdutividade estimada por operador

Nível do Operador	Tempo Médio de Troca (min)	Paradas/semana	Tempo Anual Estimado (h)
Experiente	25	3	60
Iniciante	50	3	120

Fonte: Cronoanálise de operações reais (2025). Elaborado pelo autor (2025).

Verifica-se que operadores iniciantes consomem, em média, o dobro do tempo em relação aos operadores experientes, gerando um acréscimo anual de até 65 horas improdutivas.

4.5 Comparativo econômico entre consumo e desperdício

Apresenta-se a relação entre o custo do tempo de parada e o custo do arame descartado, considerando R\$150/hora de custo de célula e os preços médios de consumível. Os limites econômicos mostraram que o descarte passa a ser mais oneroso que a parada quando o remanescente supera 2 a 5 kg, dependendo do diâmetro. Assim, recomenda-se a troca sincronizada por esgotamento em vez da troca preventiva. A “Tab. 9” apresenta o comparativo entre o consumo produtivo de arame e o volume de arame desperdiçado ao longo de um ano, expressos em equivalência de juntas e bobinas.

Tabela 9 - Comparativo entre consumo produtivo e desperdício de arame

Descrição	Consumo (kg)	Custo unitário (R\$/kg)	Custo total (R\$)	Equivalência em juntas	Equivalência em bobinas de 100 (kg)
Soldagem de 1 junta completa (enchimento + acabamento + reforço)	171,05	29,38	5.024,70	1 Junta	≈ 1,7 bobinas
Soldagem de 4 juntas completas	684,2	29,38	20.098,80	4 Juntas	≈ 6,8 bobinas
Desperdício anual total de arame	1705,9	29,38	42.967,38	≈ 11 juntas completas (2,7 conjuntos)	≈ 18,7 bobinas

Fonte: Elaborado pelo autor com base nos dados do estudo (2025).

Esses resultados evidenciam que o volume de material perdido equivale a aproximadamente três conjuntos com quatro juntas completas, evidenciando o potencial de

economia que poderia ser alcançado com a padronização operacional e o monitoramento automatizado do consumo.

4.6 Comparativo Entre Custo de Parada e Custo de Descarte

Para avaliar se é economicamente mais vantajoso realizar a troca preventiva das bobinas ou aguardar o esgotamento completo, foi considerado o custo-hora médio da linha de soldagem de R\$ 150,00/hora. A relação entre o custo de parada e o custo do material descartado pode ser expressa por:

$$p \cdot m < C_h \cdot t \quad (1)$$

Onde:

p = preço do arame (R\$/kg);

m = massa remanescente (kg);

C_h = custo-hora da célula (R\$/h);

t = tempo de parada (h);

$$m^1 = \frac{C_h \cdot t}{p} \quad (2)$$

Onde:

m^1 = limite econômico de descarte (kg).

C_h = custo-hora da célula (R\$/h);

t = tempo de parada (h);

p = preço do arame (R\$/kg);

Quando o remanescente m excede m^1 , o custo do descarte supera o custo de uma parada programada; portanto, não se justifica a troca preventiva.

Para fundamentar a decisão operacional entre a troca preventiva e o esgotamento da bobina, utilizam-se dois insumos principais: os limites econômicos convertidos em massa remanescente e número de voltas “Tab. 10” e os custos de parada para diferentes durações “Tab.

11”. A análise comparativa desses parâmetros evidencia, de forma objetiva, o ponto ótimo para a realização da troca.

Tabela 10 - Limites de descarte que justificam troca preventiva (com arame residual na bobina)

Bitola	Preço (R\$/kg)	Limite econômico (kg)	Volts equivalentes permitidas	Interpretação
Ø 2,5 mm	29,37	2,13	≈ 27 volts	Só compensa prevenir se restarem ≤ 2,1 kg (≈27 volts)
Ø 4,0 mm	24,57	2,54	≈ 13 volts	Só compensa prevenir se restarem ≤ 2,5 kg (≈13 volts)

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A “Tab. 11” apresenta os custos associados às interrupções operacionais da célula de soldagem, em diferentes durações de parada. Esses valores constituem a base comparativa para a análise de viabilidade econômica entre a troca preventiva das bobinas e o descarte de material remanescente.

Tabela 11 - Custo de parada da célula de soldagem

Duração da parada	Custo por parada (R\$)	Quantidade de paradas mensal	Custo/mês* (R\$)	Custo/ano** (R\$)
15 min (tempo sugerido)	37,5	13	487,5	5.850
20 min (tempo sugerido)	50	13	650	7.800
25 min (operador experiente)	62,5	13	812,5	9.750
30 min (tempo sugerido)	75	13	975	11.700
45 min (tempo sugerido)	112,5	13	1.462,50	17.550
50 min (operador em treinamento)	125	13	1.625,00	19.500

* Mês calculado com 13 paradas/mês (≈3 paradas/semana).

** Ano calculado com 156 paradas/ano (≈3 paradas/semana × 52 semanas).

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

4.7 Proposta de Melhoria Tecnológica

Para eliminar a subjetividade e padronizar o ponto de troca, avalia-se o uso de sensores de rotação/contadores de volts. O investimento estimado varia de R\$ 2,4 mil a R\$ 17,6 mil, com payback 4–12 meses e potencial de redução de até 40% no desperdício (ver Apêndice A).

5. DISCUSSÃO

Os resultados apresentados indicam que o desperdício de arame e o tempo de troca das bobinas são fatores críticos na eficiência do processo de soldagem por arco submerso. A perda anual de aproximadamente 2 toneladas de arame e o tempo improdutivo entre 65 e 130 horas mostram o impacto direto da falta de padronização nas trocas de bobinas sobre o custo operacional e a produtividade.

De acordo com a ABNT NBR 16100 (2012), a eficiência dos processos SAW depende da padronização dos parâmetros operacionais e da regularidade na manutenção do sistema. A priorização da continuidade da produção, embora mantenha o ritmo operacional, gera perdas financeiras expressivas. Conforme Riani (2006), esse tipo de estratégia tende a ocultar ineficiências que comprometem o desempenho global. Além disso, Costa e Pereira (2021) apontam que perdas não monitoradas podem representar até 15% do custo total de produção em indústrias metalúrgicas, o que reforça a relevância de uma gestão integrada do consumo de insumos e do tempo de setup.

A diferença de desempenho entre operadores experientes e iniciantes também se mostrou significativa, impactando a estabilidade do processo e o planejamento da produção. A adoção de práticas de troca rápida de ferramenta, pode reduzir o número de paradas e minimizar o descarte de arame, mantendo a estabilidade do arco e a qualidade da solda.

A análise comparativa entre desperdício de tempo e de material evidencia a necessidade de equilibrar produtividade e custo, conforme apresentado na Tabela 12.

Tabela 12 - Comparativo entre tipos de desperdício e estratégias de mitigação

Tipo de Desperdício	Variável-Chave	Impacto Direto	Estratégia de Mitigação
Tempo de troca das bobinas	Horas de máquina parada	Redução da produtividade	Aplicação do método de troca rápida de ferramenta e padronização das trocas
Desperdício de Material	Volume de arame descartado	Aumento de custo direto	Uso de bobinas maiores e sensores de fim de arame

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A estratégia atual da empresa, que prioriza a continuidade da produção, mantém o ritmo operacional, mas gera perdas financeiras significativas e ineficiência produtiva, comprometendo a competitividade e a sustentabilidade do processo. Por outro lado, a redução do desperdício de arame representa uma alternativa mais vantajosa, capaz de diminuir os custos

com material, melhorar a eficiência operacional e elevar a produtividade geral. Portanto, a reavaliação dessa estratégia é essencial para equilibrar a continuidade da produção com a otimização dos recursos, garantindo uma operação mais rentável e sustentável.

5.1 Estratégias De Melhoria

Com base nos resultados obtidos, as seguintes ações são recomendadas:

- Treinamento padronizado de operadores, com base nos princípios da troca rápida de ferramenta, para uniformizar os procedimentos de troca.
- Implementação de sensores e alarmes de fim de arame, permitindo trocas sincronizadas e evitando desperdício desnecessário.

Essas medidas, quando aplicadas em conjunto, podem reduzir o tempo improdutivo em até 50% e o desperdício de material em mais de 20%, conforme demonstrado em estudos de Teixeira et al. (2018). Além disso, consolidam uma nova metodologia operacional, baseada na integração entre gestão técnica, controle automatizado e padronização de processos, promovendo ganhos sustentáveis de produtividade e eficiência.

5.2 Implementação imediata

A padronização operacional por número de voltas, com marcação física no carretel e uso de dois pontos de referência: 28 voltas ($\varnothing 2,5$ mm) e 13 voltas ($\varnothing 4,0$ mm), aplicando margem de +2 voltas. Essa medida não exige investimento de alto custo, reduz o desperdício e viabiliza a sincronização das trocas sem incremento relevante de ociosidade, ver “Fig. 7”, modelo que pode ser implementado com baixo de investimento.

Figura 7 – Modelo para padronização de controle do número de voltas com baixo investimento



Figura 7: Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

6. CONCLUSÃO

O estudo realizado na linha mecanizada de soldagem SAW (Submerged Arc Welding) com configuração Tandem ICE Twin evidenciou que a falta de padronização nas trocas de bobinas resulta em perdas significativas de consumível e aumento do custo operacional anual. A análise comparativa entre a troca preventiva e o esgotamento controlado demonstrou que, embora a primeira reduza incertezas operacionais, ela eleva substancialmente o descarte de arame, enquanto a segunda exige critérios técnicos claros para evitar paradas inesperadas. Assim, a determinação do ponto ideal de troca deve considerar simultaneamente o custo do tempo improdutivo e o valor do consumível remanescente.

Com base nos resultados obtidos, recomenda-se uma estratégia de melhoria estruturada, alinhada aos princípios da manufatura enxuta e da gestão técnica de consumíveis, priorizando ações de baixo custo e alta eficiência. Os resultados mostram que o desperdício de arame possui impacto econômico superior ao tempo improdutivo de paradas curtas, tornando essencial a adoção de um critério objetivo para o ponto de troca.

A medida recomendada para implementação imediata, por apresentar custo zero e elevado potencial de redução de perdas, é a padronização operacional baseada no número de

voltas remanescentes, com marcação física no carretel. Os valores definidos são: 28 voltas para arame Ø2,5 mm e 13 voltas para arame Ø4,0 mm, aplicando margem operacional de +2 voltas. Essa solução elimina variabilidade entre operadores, reduz o descarte e permite sincronização eficiente das trocas, sem aumento relevante da ociosidade.

Como evolução natural e de baixo CAPEX, recomenda-se a implementação piloto de um sistema simples composto por sensor indutivo e contador local (alerta visual/sonoro), cuja adoção definitiva deve ser condicionada a uma redução mínima de 20% do desperdício em 90 dias. Sistemas mais completos, baseados em encoder + CLP + IHM, devem ser considerados apenas em etapas futuras, nas linhas de maior criticidade, conforme o payback projetado.

A adoção progressiva dessas ações – padronização por voltas, capacitação operacional, monitoramento técnico do consumo e uso seletivo de automação – constitui uma metodologia robusta, economicamente viável e alinhada à melhoria contínua. O modelo proposto aumenta a previsibilidade do processo, minimiza perdas e otimiza o uso de recursos, consolidando maior eficiência e sustentabilidade para a linha de produção.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN WELDING SOCIETY (AWS). A5.17/A5.23:2017 – **Specification for Submerged Arc Welding Electrodes and Fluxes**. Miami: AWS, 2017.
- AMERICAN WELDING SOCIETY (AWS). D1.1/D1.1M:2020 – **Structural Welding Code: Steel**. Miami: AWS, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR ISO 3834:2005 – **Requisitos de qualidade para soldagem por fusão de materiais metálicos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.
- ESAB. **High Productivity Multi-Wire SAW Systems**. ESAB Technical Documentation, 2021.
- GROOVER, M. P. **Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems**. 4th ed. Hoboken: Wiley, 2007.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). ISO 14171:2016 – **Welding consumables: Solid wire electrodes, tubular cored electrodes and electrode-flux combinations for submerged arc welding**. Geneva: ISO, 2016.
- LIU, G.; LI, L. **Recycling and reusing consumable welding wires: A review**. Journal of Manufacturing Processes, v. 34, n. 4, p. 701–709, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.06.009>.
- MADSEN, B.; FALTIN, D. **Optimization of consumable welding wire use in the submerged arc welding process**. Journal of Materials Processing Technology, v. 214, n. 12, p. 2810–2817, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.05.019>.
- MANUAL DA QUALIDADE. **Soldagem Industrial: Processos, Técnicas e Normas de Qualidade**. 2023.
- MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BOLDT, L. **Soldagem: Fundamentos e Tecnologia**. 3. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2011.
- MARTINS, J. L. F.; FERREIRA, M. L. R.; SARAIVA, J. M. F. **Estimativa da produtividade em soldagem pelo método de Monte Carlo**. Soldagem & Inspeção, São Paulo, v. 16, n. 3, p. 204–212, jul./set. 2011.
- MATTOSO, A. S. **Metodologia de redução de setup em um processo de extrusão: implantação e análise crítica por meio de uma pesquisa-ação**. Monografia (Engenharia Industrial Química) – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, 2014.
- MODENESI, P. J. et al. **Introdução à Metalurgia da Soldagem**. 7. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2012.
- MODENESI, P. J. **Técnica Operatória de Soldagem SAW**. Infosolda, 2004.

MOREIRA, R.; LIMA, F.; SILVA, J. **Aplicação do método SMED na redução de setups em processos fabris**. Revista Produção & Engenharia, v. 9, n. 2, p. 45–54, 2019.

NEUMANN, H.; SCALICE, R. K. **Evolução dos processos de automação em células de soldagem**. SciELO Brasil, 2021.

OHNO, T. **O Sistema Toyota de Produção: Além da Produção em Larga Escala**. Porto Alegre: Bookman, 2006.

RIANI, R. F. S. **Metodologia de Redução de Setup (SMED) em um Centro de Usinagem**. Monografia (Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2006.

RODRIGUES, V.; LIMA, T. **Redução de tempo de setup em processos de soldagem industrial**. Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 2021.

ROSA, M. E. R. **Investigação da soldagem SAW com tecimento transversal associado ao aquecimento de arame-eletrodo por indução eletromagnética**. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Naval) – Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2023.

SCHULZE, V.; HOFFMANN, S. **Submerged Arc Welding: Fundamentals and Applications**. Berlin: Springer-Verlag, 2011.

SHINGO, S. **A Revolução na Troca Rápida de Ferramentas (SMED)**. Porto Alegre: Bookman, 2003.

TEIXEIRA, T. B. et al. **Otimização do tempo de setup na mesa de fixação dos dispositivos de soldagem por robô**. Revista Científica Semana Acadêmica, ano MMXVIII, nº 000149, 2018.

TWI – The Welding Institute. **Submerged Arc Welding – Process Overview**. Cambridge: TWI, 2023.

8. APÊNDICE A — Proposta de Padronização e Viabilidade Econômica do Uso de Sensor de Rotação

Objetivo: padronizar o ponto de troca por voltas de forma automática e audível/visual, reduzindo variação entre operadores.

Opções técnicas:

- A- Encoder incremental + CLP + IHM (alta precisão);
- B- Sensor indutivo + roda dentada + CLP slim (boa relação custo/benefício);
- C- Contador local (baixo custo, depende de disciplina);

Tabela A1 - Estimativas de custo (CAPEX)

Item	Qtde	Custo unitário (R\$)	Subtotal (R\$)
Encoder incremental 1024 ppr	4	900,00 – 1.400,00	3.600,00 – 5.600,00
Sensor indutivo M18 24V	4	100,00 – 400,00	400,00 – 1.600,00
CLP (contador rápido)	1	1.000,00 – 2.000,00	1.000,00 – 2.000,00
IHM 7"	1	1.500,00 – 6.500,00	1.500,00 – 6.500,00
Torre de sinal/sirene	1	400,00 – 800,00	400,00 – 800,00
Mecânica e montagem	—	600,00 – 1.200,00	600,00 – 1.200,00
Instalação elétrica	—	800,00 – 1.500,00	800,00 – 1.500,00
Total Opção A (encoder + CLP + IHM)	—	—	8.900,00 – 17.600,00
Total Opção B (indutivo + CLP)	—	—	2.400,00 – 5.100,00
Total Opção C (contador local)	—	—	100,00 – 500,00

Fonte: Dados coletados pelo autor (2025).

Tabela A2 - Ganhos e payback (estimativas)

Opção	Redução de descarte	Economia anual (R\$)	Payback
A	25-40%	16.000,00 – 28.000,00	4-12 meses
B	15-25%	10.000,00 – 18.000,00	2-6 meses
C	5-10%	2.700,00 – 6.000,00	imediatos-3 meses

Fonte: Dados coletados pelo autor (2025).

Recomendação: iniciar com a Opção B (sensor indutivo + CLP) como projeto piloto, avaliando redução $\geq 20\%$ no desperdício em 90 dias. Em caso de sucesso, migrar para a Opção A nas linhas críticas.