

DA ETIQUETA À GRAVAÇÃO PERMANENTE: APLICAÇÃO DE TECNOLOGIAS LASER (FIBRA ÓPTICA E UV) NA IDENTIFICAÇÃO SEGURA DE FRONTEIS DE AR- CONDICIONADO

FROM LABEL TO PERMANENT ENGRAVING: APPLICATION OF LASER
TECHNOLOGIES (FIBER OPTICS AND UV) IN THE SECURE IDENTIFICATION
OF AIR CONDITIONER FRONT PANELS

Engenharias • 22/10/2026

REGISTRO DOI: [10.70773/revistatopicos/792458567](https://doi.org/10.70773/revistatopicos/792458567)

Alciele Cruz da Silva¹

Siomara Dias da Rocha²

RESUMO

Este estudo analisa a viabilidade técnica da substituição de etiquetas adesivas por gravação permanente a laser na identificação de frontais de ar-condicionado. As etiquetas autoadesivas tradicionais apresentam limitações significativas em ambientes industriais, incluindo baixa resistência à umidade, à abrasão e à ciclagem térmica, além de gerarem elevado volume de resíduos em virtude de sua estrutura de três camadas (face material, adesivo e *liner*). A pesquisa avalia as tecnologias laser de fibra óptica e laser UV como alternativas para marcação direta nos componentes. Os resultados demonstram que a gravação a laser oferece durabilidade superior, resistência a condições ambientais adversas e eliminação completa de insumos descartáveis, alinhando-se aos critérios de rastreabilidade e sustentabilidade da Indústria 4.0. Conclui-se que a tecnologia laser constitui solução viável e superior para a identificação segura e permanente de frontais de ar-condicionado, contribuindo para a prevenção ambiental no processo produtivo.

Palavras-chave: Gravação a laser; Fibra óptica; Laser UV; Rastreabilidade; Indústria 4.0.

ABSTRACT

This study analyzes the technical feasibility of replacing adhesive labels with permanent laser engraving for the identification of air-conditioning front panels. Traditional self-adhesive labels present significant limitations in industrial environments, including low resistance to moisture, abrasion, and thermal cycling, in addition to generating a high volume of waste due to their three-layer structure, consisting of face material, adhesive, and liner. The research evaluates fiber laser and UV laser technologies as alternatives for direct marking on components. The results demonstrate that laser engraving provides superior durability, resistance to adverse

environmental conditions, and complete elimination of disposable consumables, in accordance with the traceability and sustainability criteria of Industry 4.0. It is concluded that laser technology represents a viable and superior solution for the safe and permanent identification of air-conditioning front panels, contributing to environmental prevention within the production process.

Keywords: Laser engraving; Fiber laser; UV laser; Traceability; Industry 4.0.

1. INTRODUÇÃO

As transformações do sistema produtivo global, intensificadas pela globalização e pelo avanço tecnológico, têm redefinido os padrões de produção industrial (Ianni, 1996). No contexto da Indústria 4.0, caracterizada pela automação, digitalização e integração de sistemas, a rastreabilidade e a confiabilidade das informações tornaram-se fatores essenciais para a competitividade das organizações (Kagermann; Wahlster; Helbig, 2013).

A evolução da impressão gráfica acompanha esse desenvolvimento tecnológico, tendo suas origens em métodos rudimentares utilizados por civilizações antigas, como os selos cilíndricos mesopotâmicos, que, ao serem rolados sobre argila úmida, produziam impressões em relevo que funcionavam como uma forma primitiva de identificação e autenticação de documentos. Ao longo dos séculos, avanços sucessivos transformaram radicalmente esse campo.

Em meados do século XV, a prensa de tipos móveis de Johann Gutenberg inaugurou a era da tipografia no Ocidente, permitindo a reprodução mecânica e em larga escala de textos. No final do século

XVIII, a invenção da litografia por Aloys Senefelder introduziu o princípio da impressão planográfica, baseado na repulsão entre água e tinta gordurosa. Posteriormente, o sistema offset, que transferia a imagem de uma chapa para um cilindro de borracha antes de aplicá-la ao papel, representou um avanço adicional em velocidade e qualidade.

Mais recentemente, a impressão digital consolidou a tendência de descentralização e democratização do acesso à produção gráfica. Essas inovações, em conjunto, contribuíram decisivamente para o aumento da eficiência, qualidade e acessibilidade dos processos de identificação e comunicação (Meggs; Purvis, 2016).

Paralelamente à evolução da impressão, a história da etiqueta como conhecemos hoje teve um marco fundamental em 1935, quando Stanton Avery fabricou as primeiras etiquetas autoadesivas (pressure-sensitive labels) em Los Angeles, eliminando a necessidade de umedecimento ou cola, característicos dos métodos tradicionais de etiquetagem úmida. Estas etiquetas consistem em um sanduíche de três camadas: o *face* material (papel ou filme, que recebe a impressão), o adesivo permanente (que fixa a etiqueta por pressão) e o liner (revestimento de silicone que protege o adesivo e é descartado na aplicação).

A estrutura em camadas, embora funcional, gera um elevado volume de resíduos mais de 50% do material é perdido durante a conversão e aplicação final e exige processos complexos de fabricação, incluindo a aplicação do adesivo por métodos como Mayer Bar, gravura ou *hot-melt*, seguida da laminação com o *liner* (Labels e Labeling, 2017).

Nesse cenário, os sistemas de identificação industrial desempenham papel estratégico, permitindo o controle de qualidade, a rastreabilidade de produtos e a conformidade com normas técnicas. Tradicionalmente, esses sistemas utilizam etiquetas adesivas, que apresentam limitações significativas, como baixa durabilidade, suscetibilidade a condições ambientais adversas e possibilidade de adulteração (Keyence, 2023).

Com o avanço das tecnologias fotônicas, a gravação a laser surge como uma alternativa inovadora, oferecendo marcações permanentes, de alta precisão e sem a necessidade de consumíveis. Os lasers de fibra óptica, amplamente utilizados na indústria, destacam-se pela eficiência energética e robustez, enquanto os lasers UV possibilitam marcações em materiais sensíveis por meio de processos fotoquímicos (Steen; Mazumder, 2010; Ofoegbu et al., 2025).

No setor de fabricação de aparelhos de ar-condicionado, a substituição das etiquetas adesivas pela gravação permanente a laser nos frontais dos equipamentos representa uma mudança significativa nos processos produtivos, com impactos diretos na qualidade, na segurança da informação e na sustentabilidade ambiental. Diante desse contexto, este estudo tem como objetivo analisar a viabilidade técnica da aplicação das tecnologias laser de fibra óptica e UV na identificação segura de frontais de ar-condicionado, avaliando aspectos como durabilidade da marcação, resistência a condições ambientais adversas (umidade e variação térmica) e a eliminação do uso de insumos como papel, adesivos e *liner*, contribuindo assim para a redução de impactos ambientais no processo produtivo.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA OU REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Evolução Histórica dos Sistemas de Identificação

A necessidade de identificar, autenticar e registrar informações acompanha a humanidade desde os primórdios da civilização. Os sistemas de identificação visual evoluíram paralelamente às tecnologias de comunicação e produção, desde formas primitivas de marcação até os sofisticados métodos de gravação permanente utilizados na Indústria 4.0.

2.2. As Origens da Identificação Visual na Antiguidade

As primeiras manifestações de identificação visual remontam à Mesopotâmia, onde os sumérios desenvolveram os selos cilíndricos por volta de 3500 a.C. Estes pequenos cilindros de pedra, com imagens e escritas entalhadas em suas superfícies, eram rolados sobre tabletes de argila úmida, produzindo impressões em relevo que funcionavam como uma forma primitiva de identificação e autenticação de documentos (Meggs; Purvis, 2016).

Os selos cilíndricos representam o antecedente direto dos sistemas modernos de identificação, pois permitiam a certificação da autoria de documentos comerciais e contratos, a prova de autenticidade de proclamações religiosas e reais, a identificação de propriedade por meio de marcas proprietárias e a reprodução padronizada de imagens, sendo considerados uma forma inicial de impressão.

Complementarmente, os egípcios desenvolveram os escaravelhos, selos em forma de besouro com inscrições hieroglíficas gravadas em sua base plana que funcionavam como selos de identificação pessoal e símbolos de ressurreição (Meggs; Purvis, 2016). Estes

artefatos demonstram que, já na antiguidade, a identificação visual estava intrinsecamente ligada à necessidade de autenticidade e perpetuação da informação.

2.3. A Evolução da Impressão e Seus Impactos na Identificação

A invenção da prensa de tipos móveis por Johann Gutenberg em meados do século XV representou um marco fundamental na história da comunicação visual. Por volta de 1450, Gutenberg desenvolveu um sistema completo que integrava um molde de tipos para fundição precisa de caracteres individuais, uma liga metálica (80% chumbo, 5% estanho e 15% antimônio) que garantia a consistência dimensional, uma tinta à base de óleo com maior aderência e uma prensa adaptada que permitia impressão em larga escala. A Bíblia de Gutenberg (1450-1455), primeiro livro tipográfico, inaugurou a era da reprodução mecânica de textos, expandindo significativamente as possibilidades de identificação e comunicação em massa (Meggs; Purvis, 2016).

No final do século XVIII, a invenção da litografia por Aloys Senefelder (1796) introduziu o princípio da impressão planográfica, baseado na repulsão entre água e tinta gordurosa. Este processo permitia a reprodução de imagens e textos a partir de uma superfície plana de pedra, ampliando as possibilidades gráficas para identificação de produtos. Posteriormente, o sistema offset que transferia a imagem de uma chapa para um cilindro de borracha antes de aplicá-la ao papel representou um avanço adicional em velocidade e qualidade de reprodução, tornando-se o padrão para a produção de etiquetas adesivas utilizadas maciçamente na indústria do século XX (Meggs; Purvis, 2016).

2.4. Etiquetas Autoadesivas: Definição, Fabricação, Materiais e Tendências

As etiquetas autoadesivas (*pressure-sensitive labels*) foram inventadas por Stanton Avery em 1935, quando ele fabricou as primeiras etiquetas que podiam ser aplicadas sem umedecimento ou cola. Elas consistem em um sanduíche de três camadas: o face material (papel ou filme, que recebe a impressão), o adesivo permanente (que fixa a etiqueta por pressão) e o *liner* (revestimento de silicone que protege o adesivo e é descartado na aplicação).

Uma etiqueta autoadesiva deve atender a dois requisitos contraditórios: a capacidade de segurar (aderir a diferentes superfícies) e a capacidade de liberar (desprender-se facilmente do liner). O processo de fabricação envolve a aplicação do adesivo sobre o face stock (por métodos como Mayer Bar, gravura ou hot-melt) e sua laminação com o liner (Labels e Labeling, 2017).

Os materiais mais comuns para o *face stock* são papéis (revestidos ou não) e filmes plásticos como PE, PP e PET, sendo este último preferido para aplicações que exigem alta durabilidade e resistência química, como bens duráveis e o setor automotivo. Os liners podem ser de papel (*glassine, kraft*) ou filme (poliéster, polipropileno), sendo que os liners filmicos oferecem maior resistência à tração, sendo ideais para aplicação em alta velocidade. A aplicação das etiquetas é feita por máquinas que descolam a etiqueta do liner em uma placa destacadora (*stripper plate*) e a fixam ao produto por meio de rolos, escovas, almofadas a vácuo ou jatos de ar (Labels and Labeling, 2017).

2.5. Transição para a Era Digital e a Indústria 4.0

O advento da impressão digital consolidou a tendência de descentralização e democratização do acesso à produção gráfica, permitindo tiragens curtas, personalização e integração com sistemas computadorizados. Este avanço tecnológico se alinha com o conceito mais amplo da Indústria 4.0 a quarta revolução industrial que se caracteriza pela introdução da Internet das Coisas (IoT) e dos Sistemas Ciber-Físicos (CPS) no ambiente de manufatura (Kagermann; Wahlster; Helbig, 2013).

Neste novo paradigma, os sistemas de identificação industrial precisam atender a requisitos mais exigentes: rastreabilidade completa ao longo de todo o ciclo de vida do produto; integração com sistemas digitais de gestão da produção (ERP, MES); resistência a condições adversas (umidade, temperatura, produtos químicos); segurança contra adulteração e falsificação; e sustentabilidade pela eliminação de insumos descartáveis.

2.6. Da Etiqueta Adesiva à Gravação Permanente

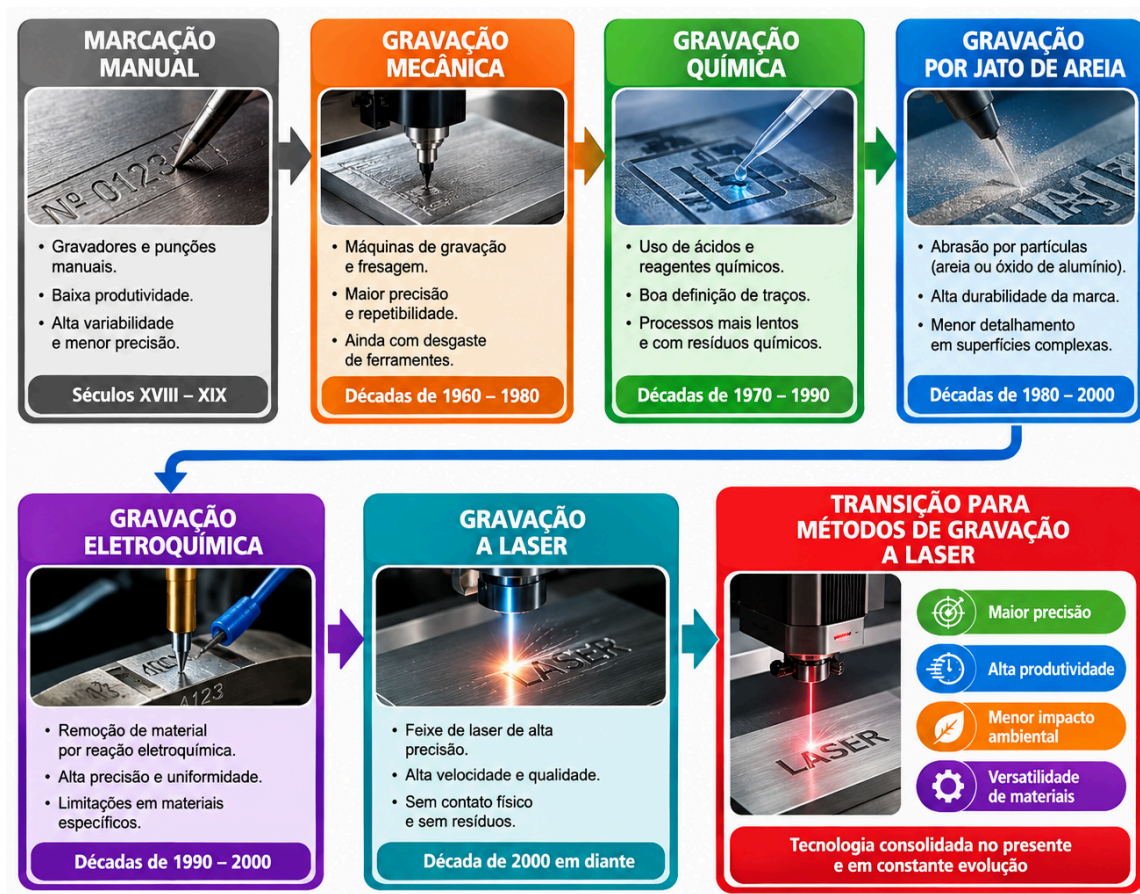
Historicamente, as etiquetas adesivas tornaram-se o padrão industrial para identificação de produtos, combinando a tradição da impressão gráfica com a praticidade do suporte autoadesivo. No entanto, estas soluções apresentam limitações significativas quando submetidas a condições ambientais severas ou quando se exige maior durabilidade e segurança.

A própria gravação a laser resulta de uma longa trajetória de amadurecimento tecnológico. A demonstração do primeiro laser de rubi, em 1960, foi seguida, em 1964, pelo desenvolvimento dos lasers de CO₂ e de Nd:YAG, que viabilizaram o processamento industrial de materiais. A partir da década de 1970, sistemas de CO₂ passaram a

ser empregados na marcação em linha e, nos anos 1980, os lasers de Nd:YAG bombeados por lâmpada consolidaram a marcação em metais.

O advento dos lasers de fibra óptica, a partir da década de 1990, trouxe ganhos expressivos de eficiência energética, robustez e qualidade de feixe, enquanto os lasers UV de estado sólido bombeados por diodo (DPSS, 355 nm) introduziram a marcação a frio de polímeros por processos fotoquímicos. Mais recentemente, as fontes de fibra do tipo MOPA com pulso e frequência ajustáveis e a integração com os sistemas digitais da Indústria 4.0 ampliaram a flexibilidade e a rastreabilidade do processo. A Figura 1 sintetiza essa evolução.

Figura 1. Evolução histórica da tecnologia de gravação a laser.



Fonte: Elaborado pelos Autores, 2026.

A transição para métodos de gravação permanente como a marcação a laser representa a convergência entre a necessidade milenar de identificação autêntica e as mais recentes tecnologias da Indústria 4.0. Esta evolução segue a mesma trajetória histórica dos sistemas de identificação: da marcação física (selos cilíndricos) à reprodução mecânica (tipografia), e desta à integração digital (gravação a laser controlada por computador). A marcação a laser em substâncias poliméricas, obtida por processos fototermicos ou fotoquímicos, produz marcas de alto contraste, permanentes e sem consumíveis, o que a torna especialmente adequada para rastreabilidade e proteção contra falsificação (Ofoegbu et al., 2025).

Conforme demonstrado por Weyer et al. (2015), em sistemas de produção modulares e com múltiplos fornecedores, a padronização é o desafio crucial. Neste contexto, a gravação a laser particularmente as tecnologias de fibra óptica e UV insere-se como uma solução de identificação que combina a permanência da marcação, superando as limitações das etiquetas adesivas; a integração digital com os sistemas de controle da produção; a flexibilidade para personalização em tempo real; e a sustentabilidade pela eliminação de insumos como papel, adesivos e liner (Avery Dennison, 2024).

2.7. Limitações das Etiquetas Adesivas na Indústria

As etiquetas adesivas desempenham um papel estratégico nos sistemas de identificação industrial, permitindo o controle de qualidade, a rastreabilidade de produtos e a conformidade com normas técnicas. No entanto, estas soluções apresentam limitações significativas quando submetidas a condições adversas típicas de ambientes industriais, particularmente em sistemas de climatização

(HVAC), onde fatores como umidade, variação térmica e exposição a agentes químicos comprometem sua integridade e funcionalidade.

2.8. Vulnerabilidades Físicas e Mecânicas

A literatura técnica sobre sistemas HVAC identifica que etiquetas adesivas convencionais frequentemente falham devido às condições adversas de operação (Chen et al., 2025). A ciclagem térmica variações de temperatura entre -20 °C e 60 °C causa expansão e contração do substrato, enfraquecendo o adesivo e promovendo o descolamento prematuro. Adicionalmente, a exposição à umidade elevada (até 100% UR) acelera a degradação do papel e compromete a integridade da camada adesiva, resultando na perda da etiqueta.

Do ponto de vista mecânico, a baixa resistência à abrasão é um fator crítico. O atrito inerente ao transporte, manuseio e manutenção dos equipamentos apaga códigos de barras, números de série e outras informações essenciais, comprometendo a rastreabilidade logística e a conformidade regulatória. Conforme documentado pela KEYENCE (2023), fatores como abrasão mecânica e exposição a agentes químicos aceleram a degradação do substrato, inviabilizando a garantia de autenticidade em processos produtivos.

2.9. Riscos de Segurança e Adulteração

Um aspecto frequentemente negligenciado das etiquetas adesivas é sua vulnerabilidade à adulteração e falsificação. Conforme destacado por Etivoet (2025), a facilidade com que etiquetas de papel convencionais podem ser removidas e substituídas representa um sério risco para a segurança da cadeia produtiva. Em aplicações que envolvem garantia estendida, rastreabilidade regulatória ou autenticidade de componentes críticos, a possibilidade de remoção

ou troca da etiqueta compromete a confiabilidade de todo o sistema de identificação.

A Keyence (2023) reforça que a possibilidade de adulteração inviabiliza a garantia de autenticidade em processos produtivos, justificando a busca por alternativas de marcação permanente. A remoção intencional da etiqueta pode ocorrer tanto por ação de operadores mal-intencionados quanto por acidente durante a manutenção, resultando na perda irreversível dos dados de identificação.

3. METODOLOGIA

3.1. Caracterização da Pesquisa

Quanto ao objetivo, este trabalho caracteriza-se como um estudo científico derivado da análise de problemas evidenciados no processo de aplicação de etiquetas em aparelhos de ar-condicionado. Trata-se de uma pesquisa de natureza aplicada, com abordagem quali-quantitativa, desenvolvida a partir da análise de problemas operacionais identificados no processo produtivo de frontais de aparelhos de ar-condicionado. O estudo caracteriza-se como uma pesquisa-ação, uma vez que parte da observação direta de uma demanda real da indústria e propõe uma intervenção tecnológica para solução do problema.

3.2. Procedimentos para Coleta e Análise de Dados

Como parte da pesquisa bibliográfica, foi realizada uma análise das exigências da Norma UL 969, que estabelece critérios para sistemas de marcação e etiquetagem duráveis aplicados em produtos industriais, incluindo ensaios de imersão em água e de

envelhecimento acelerado sob radiação ultravioleta (CUBBISON, 2025). Essas informações permitiram compreender os requisitos relacionados à resistência da identificação frente a fatores como abrasão, umidade, variações térmicas e exposição a agentes químicos. Esses critérios serviram como referência para a avaliação da viabilidade da substituição de etiquetas adesivas por gravação permanente a laser na identificação de frontais de aparelhos de ar-condicionado. A Figura 2 apresenta a comparação visual entre a identificação realizada por etiqueta adesiva e a por gravação a laser.

Figura 2. Comparação entre etiqueta adesiva e identificação por gravação a laser.



Fonte: Elaborado pelos Autores, 2026.

3.3. Identificação do Problema e Oportunidade de Melhoria

Por meio da análise de problemas relacionados a etiquetas rasuradas em campo e ao posicionamento das etiquetas fora do especificado ainda no processo produtivo, constatou-se que as etiquetas adesivas convencionais aplicadas nos frontais dos equipamentos apresentavam perda de legibilidade e descolamento prematuro, comprometendo a rastreabilidade e a conformidade com normas regulatórias. Essa constatação, oriunda de relatórios de assistência técnica e devoluções de clientes, evidenciou a

necessidade de um método mais durável e confiável para a identificação dos produtos.

Diante desse cenário, surgiu a oportunidade de inovar o método de aplicação de etiqueta, substituindo a etiqueta de papel por informações gravadas permanentemente a laser, garantindo maior durabilidade das informações e eliminando as vulnerabilidades associadas aos sistemas adesivos tradicionais.

3.4. Análise do Processo Produtivo e Cronoanálise

Paralelamente à identificação do problema de qualidade, foi conduzida uma cronoanálise detalhada do processo produtivo, com o objetivo de mapear as operações de etiquetagem e identificar oportunidades de melhoria operacional e redução de custos. A análise revelou que, em uma linha de montagem de frontais de ar-condicionado, existiam 8 postos de trabalho dedicados exclusivamente à colagem das etiquetas de identificação, como gás refrigerante R32 e demais informações obrigatórias. Cada operação demandava a separação do *liner* (descartável), o posicionamento manual da etiqueta, o uso de gabarito para posicionar as etiquetas dentro das cotas especificadas e a inspeção visual para verificação de alinhamento e bolhas. Essa configuração gerava os indicadores apresentados no Quadro 1.

Quadro 1. Indicadores operacionais da etiquetagem adesiva.

Indicador	Valor observado
Postos de colagem	8 operadores
Tempo médio por etiqueta	15 segundos

Perda de material (liner)	50% do insumo
Retrabalho por colagem inadequada	3% das unidades
Custo anual com insumos (etiquetas)	R\$ 829.110,36

Fonte: Elaborado pelos Autores, 2026.

A cronoanálise evidenciou, portanto, não apenas uma oportunidade de melhoria na qualidade e durabilidade da identificação, mas também um potencial significativo de redução financeira e otimização do método de montagem nas operações, além de minimizar impactos produtivos no processo.

3.5. Procedimentos para Avaliação das Tecnologias Laser

3.5.1. Seleção das Tecnologias

Foram selecionadas duas tecnologias laser para avaliação comparativa: o laser de fibra óptica (comprimento de onda ~1064 nm) e o laser UV (comprimento de onda ~355 nm). A escolha baseou-se em suas características complementares: o laser de fibra é amplamente utilizado para marcação em metais, enquanto o laser UV é indicado para materiais poliméricos e sensíveis ao calor, como os plásticos empregados nos frontais dos aparelhos. Com base nisso, optou-se pela aquisição de máquina UV.

3.5.2. Análise de Viabilidade Econômico-Operacional

Além dos critérios técnicos, a pesquisa considerou aspectos econômicos e operacionais, comparando o custo atual (insumos + mão de obra + retrabalho + descarte), o custo projetado (aquisição

do equipamento + manutenção + energia + mão de obra reduzida), o impacto no fluxo produtivo (redução de postos de trabalho e tempo de ciclo) e o retorno sobre o investimento (ROI).

3.5.3. Instrumentos e Ferramentas Utilizadas

Para a execução dos ensaios foram utilizados dois sistemas laser comercialmente disponíveis: um laser de fibra pulsado MOPA (Hunst JPT MOPA M7 Laser Marking Machine, 1064 nm, infravermelho), empregado como referência comparativa de marcação fototérmica; e um laser UV de estado sólido bombeado por diodo (DPSS, 355 nm), utilizado na validação final do processo de gravação permanente. Foi utilizado ainda cronômetro digital para medição de tempos operacionais.

3.5.4. Limitações da Pesquisa

A pesquisa apresenta como limitação a realização dos testes no próprio processo produtivo, sem exposição prolongada às condições reais de operação dos equipamentos (por exemplo, ciclos de uso contínuo e exposição a agentes químicos de limpeza). Recomenda-se, como desdobramento futuro, a realização de testes de campo com acompanhamento de longo prazo. O Quadro 2 sintetiza as etapas metodológicas adotadas.

Quadro 2. Quadro-resumo da metodologia.

Etapa	Procedimento	Objetivo
1. Diagnóstico	Análise de problemas em campo e cronoanálise	Identificar falhas e oportunidades

2. Seleção	Escolha das tecnologias laser (fibra e UV)	Viabilizar a comparação técnica
3. Testes	Ensaios de abrasão, umidade e ciclagem térmica	Avaliar durabilidade das marcações
4. Análise	Comparação de custos e impacto operacional	Verificar viabilidade econômica
5. Validação	Verificação de legibilidade e rastreabilidade	Garantir conformidade com norma

Fonte: Elaborado pelos Autores, 2026.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES OU ANÁLISE DOS DADOS

Foram realizados testes de gravação a laser com o objetivo de avaliar a substituição da etiqueta “Atenção R-32” por uma gravação diretamente na peça. A avaliação comparativa contemplou as duas tecnologias selecionadas o laser de fibra (Fonte Hunst JPT MOPA M7, 1064 nm) e o laser UV (355 nm), tendo a marcação definitiva, submetida aos ensaios de intemperismo, sido obtida com a fonte UV, por sua maior adequação aos substratos poliméricos sensíveis ao calor. Após a gravação, as peças foram encaminhadas à equipe da Qualidade para realização de testes de intemperismo em câmara climática, visando avaliar a resistência e a durabilidade da gravação quando submetida a condições extremas de temperatura.

4.1. Desempenho da Gravação a Laser Sob Ciclagem Térmica

Foram utilizadas 2 peças para o ensaio, submetidas a temperaturas de 70 °C (calor) e - 40 °C (frio). O teste foi realizado durante 3 dias, contemplando um total de 24 ciclos de teste. O objetivo do ensaio foi verificar o comportamento da gravação a laser após a exposição

às variações extremas de temperatura, avaliando sua permanência e possíveis alterações após o processo de intemperismo. A amplitude térmica imposta ($\Delta T = 110\text{ }^{\circ}\text{C}$) é superior à faixa de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ descrita como crítica para o descolamento de adesivos em sistemas HVAC (Chen et al., 2025), o que torna o ensaio um cenário conservador de validação.

Os resultados demonstraram que a gravação a laser manteve integridade e legibilidade plenas após os 24 ciclos térmicos, sem apresentar desbotamento, trincas ou perda de contraste. Em contrapartida, as etiquetas adesivas convencionais submetidas às mesmas condições apresentaram descolamento nas bordas, enrugamento do substrato e perda parcial de legibilidade, confirmando as limitações descritas na literatura técnica (Chen et al., 2025; Keyence, 2023).

Esses resultados corroboram o caráter permanente e estável da marcação laser em substratos poliméricos relatado por Ofoegbu et al. (2025). O comportamento observado também é coerente com os requisitos da Norma UL 969, que condiciona a aprovação de sistemas de marcação durável à retenção de legibilidade após imersão em água e envelhecimento acelerado sob radiação ultravioleta (CUBBISON, 2025).

A escolha da tecnologia UV mostrou-se adequada para a gravação em materiais poliméricos sensíveis ao calor, produzindo marcas de alto contraste por processo fotoquímico, sem causar danos térmicos à superfície. A ausência de zona termicamente afetada (ZTA) relevante explica, do ponto de vista físico, a estabilidade dimensional da marca sob ciclagem: por não depender de fusão, pirólise ou carbonização localizada, a marcação UV não introduz tensões

residuais nem microfissuras que se propagariam sob dilatação/contração cíclica.

4.2. Impacto Econômico-Operacional e Sustentabilidade

Do ponto de vista econômico-operacional, a substituição das etiquetas adesivas elimina o custo anual de R\$ 829.110,36 com insumos, reduz a mão de obra dedicada (8 postos) e suprime o descarte de liner, alinhando o processo aos princípios de economia circular e sustentabilidade (Avery Dennison, 2024).

A eliminação do *liner* é ambientalmente relevante porque esse componente, por ser siliconizado, raramente é reciclado e representa mais de 50% do material processado em operações de etiquetagem. Soma-se a esse ganho a supressão do retrabalho de 3% associado à colagem inadequada e a redução do tempo de ciclo antes de 15 segundos por etiqueta distribuídos em 8 postos, com impacto direto na produtividade da linha.

Sob a ótica da segurança da informação, a gravação permanente elimina a vulnerabilidade à adulteração apontada por Etivoet (2025) e pela KEYENCE (2023): por ser integrada ao próprio substrato polimérico, a marca não pode ser removida e recolada sem destruição visível da peça, garantindo autenticidade ao longo de todo o ciclo de vida. Esses três vetores durabilidade, economia e segurança convergem para os requisitos de rastreabilidade da Indústria 4.0 (Kagermann; Wahlster; Helbig, 2013; Weyer et al., 2015).

4.3. Análise Comparativa com Estudos Correlatos

Os resultados obtidos neste estudo dialogam com um conjunto consolidado de pesquisas sobre marcação a laser em polímeros,

permitindo situar os achados frente ao estado da arte. No que se refere ao mecanismo de formação da marca, a opção pela tecnologia UV de natureza predominantemente fotoquímica e de baixo aporte térmico contrasta com a marcação fototérmica típica das fontes de fibra e de Nd:YAG. Zheng e Lim (2004) demonstraram que, em elastômeros termoplásticos, a obtenção de contraste adequado por escurecimento térmico depende fortemente da incorporação de aditivos sensíveis, como o dióxido de titânio (TiO_2).

De modo convergente, Cao et al. (2021) verificaram que a marcação de polipropileno com fontes infravermelhas ocorre por absorção de energia e conversão em calor, com fusão local, pirólise e carbonização do material, o que exige composições aditivadas (por exemplo, com sulfeto de molibdênio) para modular o contraste. A gravação UV empregada no presente trabalho dispensa tais aditivos e evita o dano térmico superficial, o que se refletiu na ausência de trincas e desbotamento após a ciclagem térmica.

A influência dos parâmetros de processo e das condições de superfície sobre a qualidade da marca, observada empiricamente neste estudo com o uso de uma fonte MOPA de parâmetros ajustáveis, é corroborada por Czyżewski, Sykutera e Rojewski (2022). Esses autores, ao estudarem peças moldadas de polipropileno branco, evidenciaram que a potência, a frequência de pulso, a velocidade de varredura e o estado da superfície determinam a eficiência da carbonização e, por consequência, o contraste e a nitidez do grafismo. Tal convergência reforça a importância da padronização paramétrica apontada por Weyer et al. (2015) como desafio crucial em ambientes de produção modulares para assegurar repetibilidade e legibilidade em escala industrial.

Quanto à rastreabilidade e à durabilidade da informação codificada, os resultados aqui obtidos alinham-se aos de Liu et al. (2018), que analisaram a leitura de códigos QR gravados a laser em superfícies de polipropileno e destacaram a estabilidade da marca frente à degradação como condição para a decodificação automática confiável. Do mesmo modo, Ofoegbu et al. (2025), ao marcarem polióximetileno (POM), relataram marcas de alto contraste e permanência adequadas a aplicações de manufatura enxuta e rastreabilidade exatamente o comportamento verificado nos frontais de ar-condicionado após os 24 ciclos térmicos. Em conjunto, esses estudos sustentam que a marcação a laser, quando adequadamente parametrizada, supera as etiquetas adesivas não apenas em durabilidade, mas também em confiabilidade de leitura ao longo do ciclo de vida do produto.

4.4. Comparação com a Evolução Real do Estado da Arte e da Técnica

Para situar o presente estudo frente à trajetória real da tecnologia, o Quadro 3 sintetiza, em ordem cronológica, as principais contribuições da literatura correlata, confrontando a fonte laser empregada, o material-alvo, o mecanismo físico-químico de formação da marca, os achados centrais e a relação de cada trabalho com os resultados aqui obtidos. A leitura do quadro evidencia um movimento histórico claro: dos fundamentos do processamento a laser (Steen; Mazumder, 2010), passando pela marcação fototérmica dependente de aditivos (Zheng; Lim, 2004; Cao et al., 2021), pela consolidação paramétrica em polímeros de engenharia e commodities (Czyżewski; Sykutera; Rojewski, 2022; Liu et al., 2018), até a marcação de alto contraste orientada à rastreabilidade da Indústria 4.0 (Ofoegbu et al., 2025).

Quadro 3. Síntese comparativa com os estudos mais relevantes do estado da arte.

Autor(es) / Ano	Fonte laser	Material	Mecanismo	Principais resultados	Relação com este estudo
Zheng e Lim (2004)	Nd:YAG (IR)	Elastômeros termoplásticos (TPE)	Fototérmico (escurecimento)	Contraste depende da adição de TiO ₂	Confirma a limitação do modo térmico; a via UV deste estudo dispensa

△ Esta tabela possui muitas colunas e foi cortada para impressão. Para visualizá-la completa, acesse o artigo original em: <https://revistatopicos.com.br/artigos/da-etiqueta-a-gravacao-permanente-aplicacao-de-tecnologias-laser-fibra-optica-e-uv-na-identificacao-segura-de-frontais-de-ar-condicionado?noblockage>

Fonte: Elaborado pelos Autores, 2026.

A comparação com a evolução real da técnica revela que o presente trabalho se posiciona na fronteira mais recente dessa trajetória. Enquanto os estudos pioneiros (Zheng; Lim, 2004; Cao et al., 2021) demonstraram que o contraste em polímeros marcados por fontes infravermelhas depende criticamente de aditivos (TiO₂, MoS₂) com os riscos de dano térmico inerentes à fusão e à carbonização , a adoção de uma fonte UV de 355 nm neste estudo representa justamente o salto tecnológico que a literatura descreve como a transição da marcação “a quente” para a marcação a frio. Esse deslocamento é coerente com a maturidade crescente das fontes de estado sólido bombeadas por diodo e das arquiteturas MOPA, cuja

flexibilidade paramétrica é confirmada por Czyżewski, Sykutera e Rojewski (2022).

Cabe ressaltar, por fim, uma diferença de escopo relevante: enquanto grande parte da literatura correlata concentra-se na caracterização laboratorial do mecanismo e dos parâmetros de marcação, o presente trabalho contribui ao avaliar a solução em contexto produtivo real, associando o desempenho técnico à viabilidade econômica (eliminação de R\$ 829.110,36 anuais em insumos) e ao alinhamento com os critérios da Norma UL 969. Essa articulação entre bancada e chão de fábrica representa um avanço incremental em relação aos estudos citados, ao demonstrar que os ganhos de contraste e permanência descritos na literatura se traduzem, na prática industrial, em rastreabilidade, sustentabilidade e redução de custos.

5. CONCLUSÃO / CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo analisou a viabilidade técnica e econômica da substituição de etiquetas adesivas por gravação permanente a laser na identificação de frontais de ar-condicionado, com foco nas tecnologias de fibra óptica e UV. A pesquisa partiu da identificação de problemas reais observados no processo produtivo e em campo, como etiquetas rasuradas, descolamento prematuro e posicionamento fora das cotas especificadas, que comprometiam a rastreabilidade, a conformidade regulatória e a segurança da informação.

Os ensaios de intemperismo em câmara climática, com exposição a temperaturas de 70

°C e -40 °C ao longo de 24 ciclos, demonstraram que a gravação a laser mantém integridade e legibilidade, sem deterioração significativa, ao passo que as etiquetas adesivas convencionais apresentam perda de legibilidade, descolamento e degradação do substrato. A superioridade da gravação a laser evidencia-se especialmente na resistência à abrasão, à umidade e à ciclagem térmica, achado que converge com os resultados de estudos correlatos sobre marcação a laser em polímeros e que posiciona o trabalho na fronteira mais recente da evolução da técnica, conforme sintetizado no Quadro 3.

A tecnologia UV mostra-se a mais adequada para os materiais poliméricos sensíveis ao calor empregados nos frontais, equilibrando qualidade de marcação, durabilidade e viabilidade econômica. A eliminação de insumos descartáveis reduz custos e impactos ambientais e suprime os riscos de adulteração, garantindo autenticidade e rastreabilidade ao longo de todo o ciclo de vida do produto. Conclui-se que a gravação a laser constitui solução viável, superior e sustentável para a identificação segura e permanente de frontais de ar-condicionado, alinhando-se aos critérios da Norma UL 969 e às demandas da Indústria 4.0.

Como desdobramento futuro, recomenda-se a realização de testes de campo com acompanhamento de longo prazo, a avaliação da aplicação da tecnologia em outros componentes do sistema de climatização, a padronização dos parâmetros de gravação para diferentes materiais e a integração do sistema laser com os sistemas de gestão da produção (ERP/MES) para rastreabilidade automatizada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

EVERETT DENNISON. The pivotal role of pressure-sensitive labels in eco-design. Mentor: Avery Dennison, 2024. Disponível em: <https://www.averydennison.com/ap/en/industries/consumer-packaged-goods/resources/inspiration/trends-and-insights/the-pivotal-role-of-pressure-sensitive-labels-in-eco-design>. Acesso em: 15 mar. 2025.

CAO, Zheng et al. Preparation and laser marking properties of poly(propylene)/molybdenum sulfide composite materials. ACS Omega, v. 6, n. 13, p. 9129-9140, 2021. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsomega.1c00255>. Acesso em: 28 set. 2025.

CHEN, Yimin et al. Evaluation of HVAC & refrigeration system fault behaviors and impacts: a systematic review. Journal of Building Engineering, v. 95, 2025. Disponível em: <https://impact.ornl.gov/en/publications/evaluation-of-hvac-amp-refrigeration-system-fault-behaviors-and-i-2/>. Acesso em: 20 fev. 2025.

CUBBISON. Understanding UL 969 compliant electrical equipment labels. [S. l.]: Cubbison, 2025. Disponível em: <https://www.cubbison.com/blog/understanding-ul-969-compliant-electrical-equipment-labels>. Acesso em: 10 mar. 2025.

CZYŻEWSKI, Piotr; SYKUTERA, Dariusz; ROJEWSKI, Marek. The impact of selected laser-marking parameters and surface conditions on white polypropylene moldings. Polymers, v. 14, n. 9, art. 1879, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym14091879>. Acesso em: 28 set. 2025.

ETIVOET. De l'étiquette-livret en papier à l'étiquette multicouche: un tournant vers l'avenir. Etivoet, 2025. Disponível em: <https://etivoet.be/fr/innovation/letiquette-livret-est-morte-vive-letiquette-multicouche>. Acesso em: 5 abr. 2025.

IANNI, Octávio. A era do globalismo. Rio de Janeiro: Civilização Brasileira, 1996.

KAGERMANN, Henning; WAHLSTER, Wolfgang; HELBIG, Johannes. Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0: final report of the Industrie 4.0 Working Group. Frankfurt am Main: Forschungsunion; acatech, 2013. Disponível em: <https://en.acatech.de/publication/recommendations-for-implementing-the-strategic-initiative-industrie-4-0-final-report-of-the-industrie-4-0-working-group/>. Acesso em: 12 maio 2025.

KEYENCE CORPORATION. How laser marking is replacing labeling. [S. l.]: Keyence, 2023. Disponível em: <https://www.keyence.com/products/marker/laser-marker/resources/laser-marking-resources/how-laser-marking-is-replacing-labeling.jsp>. Acesso em: 18 jun. 2025.

LABELS AND LABELING. Pressure-sensitive labels. In: Label Academy. [S. l.]: Labels & Labeling / Tarsus Group, 2017. Disponível em: <https://www.labelsandlabeling.com/labels/label-academy/article/pressure-sensitive-labels>. Acesso em: 22 jul. 2025.

LIU, Chunlin et al. Recognition of laser-marked quick response codes on polypropylene surfaces. Polymer Degradation and Stability, v. 147, p. 115-122, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2017.11.019>. Acesso em: 28 set. 2025.

MEGGS, Philip B.; PURVIS, Alston W. Meggs' history of graphic design. 6. ed. Hoboken: Wiley, 2016.

OFOEGBU, Stanley Udochukwu et al. Laser marking on polyoxymethylene (POM) polymer substrate. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 131, 2025. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-024-13178-7>. Acesso em: 8 ago. 2025.

STEEN, William M.; MAZUMDER, Jyotirmoy. Laser material processing. 4. ed. London: Springer, 2010. Disponível em: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-84996-062-5>. Acesso em: 3 set. 2025.

WEYER, Stephan et al. Towards Industry 4.0: standardization as the crucial challenge for highly modular, multi-vendor production systems. IFAC-PapersOnLine, v. 48, n. 3, p. 579-584, 2015. Disponível em: <https://www.dfki.de/web/forschung/projekte-publikationen/publikation/7671>. Acesso em: 25 ago. 2025.

ZHENG, Hongyu; LIM, Geok Choo. Laser-effected darkening in TPEs with TiO₂ additives. Optics and Lasers in Engineering, v. 41, n. 5, p. 791-800, 2004. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0143-8166\(03\)00032-0](https://doi.org/10.1016/S0143-8166(03)00032-0). Acesso em: 28 set. 2025.

¹ Discente do Curso Superior de Engenharia de Produção da Fundação Centro de Pesquisa e Inovação Tecnológica – FUCAPI, Manaus -AM. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

² Docente do Curso Superior de Engenharia de Produção da Fundação Centro de Pesquisa e Inovação Tecnológica – FUCAPI,

Manaus -AM. Doutora em Química (PPGQ/UFAM). E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)