

IMPLANTAÇÃO DE SISTEMA DE MEDIÇÃO DE TEMPERATURA A LASER PARA OTIMIZAÇÃO DO CONTROLE TÉRMICO NO PROCESSO DE FUNDIÇÃO

IMPLEMENTATION OF A LASER TEMPERATURE MEASUREMENT SYSTEM TO OPTIMIZE THERMAL CONTROL IN THE CASTING PROCESS

 <https://doi.org/10.63330/sasciencesv6n2-234>

Submetido em: 08/10/2026 e Publicado em: 19/10/2026

SAS: e26461

Francisco de Sousa Canto

Formando em Engenharia Elétrica

Centro Universitário FAMETRO

E-mail: franciscosousasousa198@gmail.com

Resumo

O monitoramento da temperatura do metal líquido constitui uma etapa fundamental nos processos de fundição, pois influencia diretamente o controle operacional, a qualidade do processo e a segurança das atividades industriais. Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo analisar os impactos da implantação de um sensor de temperatura a laser para o monitoramento de metal líquido em temperaturas aproximadas entre 1.380 °C e 1.420 °C, considerando os benefícios técnicos, operacionais e econômicos decorrentes da utilização dessa tecnologia. Anteriormente, o acompanhamento térmico era realizado por meio de leituras com pirômetro, exigindo a atuação direta de um profissional para a execução e o registro das medições. A implantação do novo sistema buscou proporcionar maior agilidade, continuidade e confiabilidade ao acompanhamento da temperatura, além de reduzir intervenções manuais no processo. Metodologicamente, a pesquisa caracteriza-se como aplicada, exploratória e descritiva, com abordagem qualitativa e quantitativa, desenvolvida por meio de estudo de caso, pesquisa bibliográfica e análise documental. Serão comparadas as condições existentes antes e após a implantação do sensor, considerando indicadores relacionados ao tempo de medição, frequência das leituras, utilização de mão de obra, confiabilidade dos dados, segurança operacional, custos e eficiência produtiva. Espera-se demonstrar que a aplicação do sensor de temperatura a laser representa uma alternativa tecnológica capaz de aperfeiçoar o controle térmico no setor de fundição, contribuindo para a modernização do processo, redução de custos, melhoria das condições operacionais e maior eficiência no acompanhamento das temperaturas do metal líquido.

Palavras-chave: Automação industrial; Fundição; Metal líquido; Monitoramento térmico; Sensor de temperatura.



Abstract

Monitoring the temperature of molten metal is a fundamental stage in foundry processes, as it directly influences operational control, process quality, and the safety of industrial activities. In this context, this study aims to analyze the impacts of implementing a laser temperature sensor for monitoring molten metal at temperatures ranging approximately from 1,380 °C to 1,420 °C, considering the technical, operational, and economic benefits resulting from the use of this technology. Previously, thermal monitoring was performed through pyrometer readings, requiring direct operator involvement in carrying out and recording the measurements. The implementation of the new system sought to provide greater agility, continuity, and reliability in temperature monitoring, while also reducing manual interventions in the process. Methodologically, this research is characterized as applied, exploratory, and descriptive, adopting both qualitative and quantitative approaches and being conducted through a case study, bibliographic research, and documentary analysis. The conditions before and after the implementation of the sensor will be compared, considering indicators related to measurement time, frequency of readings, workforce utilization, data reliability, operational safety, costs, and production efficiency. The study is expected to demonstrate that the application of a laser temperature sensor represents a technological alternative capable of improving thermal control in the foundry sector, contributing to process modernization, cost reduction, improved operational conditions, and greater efficiency in monitoring molten metal temperatures.

Keywords: Foundry; Industrial automation; Molten metal; Temperature sensor; Thermal monitoring.

1 INTRODUÇÃO

Os processos de fundição ocupam posição estratégica no setor industrial, uma vez que possibilitam a fabricação de componentes metálicos destinados a diferentes segmentos produtivos. Nesse contexto, o controle das variáveis térmicas torna-se fundamental, especialmente durante as etapas que envolvem o metal em estado líquido. A temperatura inadequada pode interferir na fluidez, no preenchimento dos moldes e nas características finais do material produzido. Dessa forma, o monitoramento térmico deve ser compreendido não apenas como procedimento operacional, mas como elemento associado à estabilidade e à qualidade do processo de fabricação (Campbell, 2015).

A necessidade de controlar temperaturas elevadas, como aquelas situadas aproximadamente entre 1.380 °C e 1.420 °C, evidencia a importância de métodos de medição capazes de fornecer informações confiáveis sem comprometer a dinâmica operacional. Em procedimentos convencionais, a utilização manual de pirômetros exige que o trabalhador realize periodicamente as leituras, tornando o acompanhamento dependente da intervenção humana. Embora esse método seja amplamente empregado, sua utilização pode apresentar limitações relacionadas à frequência das medições, ao tempo necessário para



obtenção dos dados e às condições existentes no ambiente industrial. Assim, modernizar o monitoramento representa uma oportunidade concreta de aperfeiçoamento do processo produtivo.

Nesse cenário, as tecnologias de medição de temperatura sem contato apresentam possibilidades relevantes para ambientes industriais caracterizados por temperaturas elevadas. A termometria por radiação permite determinar a temperatura de uma superfície a partir da radiação térmica emitida, possibilitando medições sem a necessidade de contato direto entre o instrumento e o objeto monitorado. Entretanto, fatores como emissividade, características da superfície, condições ambientais e configuração do instrumento precisam ser considerados para garantir a qualidade das informações obtidas. Portanto, a adoção tecnológica deve estar acompanhada de critérios técnicos adequados de instalação, calibração e operação (Minkina & Dudzik, 2009).

A implantação de um sistema baseado em sensor de temperatura a laser no processo de fundição pode, portanto, ser analisada como uma estratégia de modernização e melhoria operacional, e não simplesmente como substituição de um equipamento por outro. Ao reduzir a necessidade de leituras manuais e ampliar as possibilidades de acompanhamento da temperatura do metal líquido, a tecnologia pode favorecer maior disponibilidade de informações para a tomada de decisão, redução do tempo empregado nas medições e melhor utilização da mão de obra. Nesse sentido, torna-se relevante comparar os cenários anterior e posterior à implantação, permitindo verificar, por meio de indicadores, se os benefícios técnicos, econômicos e operacionais justificam a solução adotada.

2 FUNDAMENTOS DO PROCESSO DE FUNDIÇÃO E CONTROLE TÉRMICO

2.1 PROCESSOS DE FUNDIÇÃO E METAL LÍQUIDO

Os processos de fundição constituem uma importante rota de fabricação de componentes metálicos, fundamentada na transformação do material sólido em estado líquido, seguida pelo vazamento em uma cavidade com geometria previamente definida e pela posterior solidificação. Durante esse percurso, o comportamento do metal líquido influencia diretamente a integridade e a qualidade do produto obtido, uma vez que fenômenos relacionados ao escoamento, à turbulência, à transferência de calor e ao preenchimento do molde podem favorecer discontinuidades e defeitos. Dessa maneira, o controle das condições do metal fundido representa requisito fundamental para a estabilidade do processo (Campbell, 2015).

A fundição, entretanto, não deve ser compreendida apenas como uma sequência operacional composta pelas etapas de fusão, transporte, vazamento e solidificação. Trata-se de um sistema produtivo no qual diferentes variáveis térmicas, metalúrgicas e operacionais permanecem interdependentes, de modo que alterações ocorridas em determinada fase podem repercutir sobre as etapas subsequentes e sobre o resultado final. Nesse contexto, acompanhar adequadamente as condições do metal líquido torna-se estratégico para

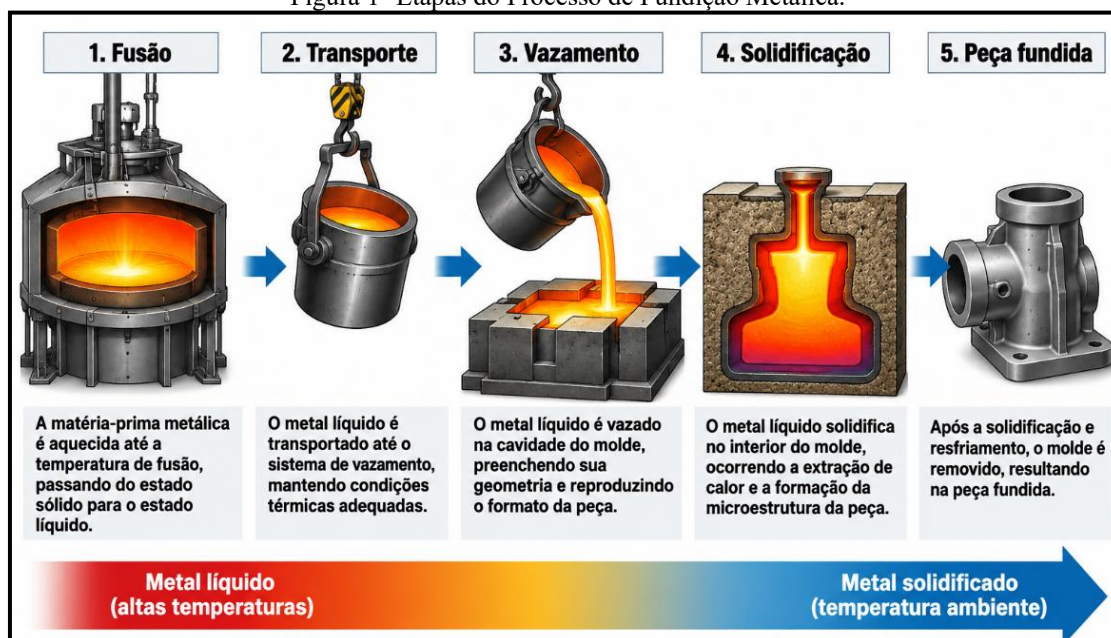


reduzir incertezas, reconhecer desvios e estabelecer maior regularidade no processamento, sobretudo em operações industriais caracterizadas por temperaturas elevadas (Groover, 2020).

A solidificação representa uma etapa determinante para a formação das propriedades do material fundido, pois a transformação do metal líquido em sólido envolve fenômenos térmicos e metalúrgicos diretamente relacionados à formação de sua microestrutura. A extração de calor e as condições térmicas estabelecidas durante o processamento interferem na evolução da solidificação e, conseqüentemente, nas características finais do componente produzido. Assim, o controle da temperatura do metal líquido deve integrar uma estratégia abrangente de gestão do processo, articulando transferência térmica, condições de processamento e obtenção das propriedades desejadas no produto fundido (Stefanescu, 2015).

Nesse cenário, o monitoramento térmico assume uma função que ultrapassa a simples identificação pontual da temperatura, tornando-se uma importante fonte de informação para o controle das condições de processamento do metal líquido. A obtenção sistemática de dados térmicos possibilita acompanhar variações, estabelecer parâmetros operacionais e apoiar decisões relacionadas às etapas de vazamento e solidificação. Em processos nos quais alterações de temperatura podem influenciar a fluidez e o comportamento do material, maior disponibilidade e confiabilidade das medições favorecem um controle produtivo mais consistente, contribuindo para a estabilidade e a qualidade das operações de fundição (Kalpakjian & Schmid, 2014).

Figura 1 -Etapas do Processo de Fundição Metálica.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor, 2026.

A Figura 1 apresenta, de maneira sistematizada, as principais etapas envolvidas no processo de fundição, evidenciando a trajetória do material desde a fusão da matéria-prima metálica até a obtenção da



peça solidificada. Observa-se que o metal passa por diferentes condições térmicas durante a fusão, o transporte e o vazamento no molde, exigindo controle adequado para preservar suas características e favorecer o correto preenchimento da cavidade. Nesse processo, o comportamento do metal líquido está diretamente relacionado às condições de processamento e à qualidade final do componente produzido.

A representação também evidencia que o controle térmico não se limita ao momento inicial de fusão, mas acompanha diferentes fases do processamento até a solidificação e o resfriamento da peça. Essa compreensão reforça a importância da obtenção de informações confiáveis sobre a temperatura do metal líquido, sobretudo em operações industriais realizadas sob condições térmicas elevadas. Nesse sentido, tecnologias de monitoramento mais eficientes podem contribuir para acompanhar as variações de temperatura, reduzir intervenções manuais e fornecer informações mais rápidas para a tomada de decisão, favorecendo maior estabilidade, segurança e eficiência no processo de fundição.

2.2 TEMPERATURA E CONTROLE TÉRMICO NO PROCESSO DE FUNDIÇÃO

A temperatura constitui uma variável determinante para a estabilidade dos processos de fundição, pois interfere diretamente nas condições de escoamento do metal líquido, no preenchimento da cavidade do molde e na posterior transformação do material durante o resfriamento. O controle térmico adequado permite estabelecer condições operacionais compatíveis com as características do material processado, reduzindo variações capazes de comprometer o desenvolvimento das etapas produtivas. Nesse sentido, o acompanhamento da temperatura deve ocorrer de maneira sistemática, considerando sua influência sobre o comportamento do metal e sobre a qualidade do processo de fabricação (Groover, 2020).

A gestão eficiente da temperatura exige uma compreensão que ultrapasse a simples manutenção do metal dentro de uma faixa previamente estabelecida, uma vez que as condições térmicas influenciam diferentes etapas do processo de fundição. Em ambientes industriais, os dados de temperatura constituem informações relevantes para avaliar o comportamento do processo, identificar possíveis desvios e orientar intervenções operacionais. Nesse sentido, a precisão e a frequência das medições ampliam a capacidade de acompanhamento das condições produtivas, permitindo que o controle térmico seja integrado à tomada de decisão e às estratégias destinadas à estabilidade do processo e à prevenção de perdas (Groover, 2020).

Figura 2 - Controle Térmico na Fundição.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor, 2026.

A Figura 2 apresenta de forma integrada a relação entre temperatura e controle térmico ao longo das principais etapas do processo de fundição. Inicialmente, observa-se a fase de fusão, na qual a matéria-prima metálica é submetida ao aquecimento até alcançar condições adequadas para sua transformação em estado líquido. A partir desse momento, o comportamento térmico do material passa a exigir acompanhamento sistemático, pois as variações de temperatura podem influenciar sua fluidez, as condições de processamento e o desempenho das etapas posteriores, tornando o controle térmico um elemento essencial para a estabilidade da operação.

Na etapa de transporte, a figura demonstra a necessidade de preservar condições térmicas adequadas até o momento do vazamento. Durante esse deslocamento, ocorrem perdas naturais de calor para o ambiente, o que pode modificar as características do metal líquido caso não exista acompanhamento apropriado. No vazamento, a temperatura assume importância ainda maior, uma vez que o material precisa apresentar condições suficientes de fluidez para preencher adequadamente a geometria do molde. Dessa forma, o monitoramento possibilita identificar alterações térmicas e apoiar decisões operacionais antes que elas comprometam a continuidade e a qualidade do processo.

A representação da solidificação e do resfriamento evidencia a transição progressiva do metal líquido para o estado sólido, processo acompanhado pela extração de calor e pela formação da estrutura final da peça. Nesse estágio, a evolução térmica deve ser considerada como parte integrante do controle da produção, pois o comportamento do resfriamento está associado às características obtidas no componente fundido. A faixa gráfica apresentada na Figura 2 reforça essa dinâmica ao demonstrar visualmente a



passagem das elevadas temperaturas presentes no metal líquido para condições próximas à temperatura ambiente após a consolidação da peça.

Por fim, a Figura 2 destaca o monitoramento como elemento transversal às diferentes etapas, demonstrando a utilização de tecnologias capazes de acompanhar e registrar as condições térmicas do processo. A disponibilidade de dados de temperatura permite avaliar tendências, identificar desvios e ampliar a capacidade de intervenção diante de condições operacionais inadequadas. No contexto desta pesquisa, essa perspectiva é particularmente relevante porque fundamenta a análise da implantação do sensor de temperatura a laser, permitindo compreender como a modernização da medição pode contribuir para maior confiabilidade das informações, redução de intervenções manuais, estabilidade operacional e eficiência do processo de fundição.

A temperatura de processamento também exerce influência sobre as condições de vazamento e solidificação, tornando necessário equilibrar a manutenção da fluidez do metal com as exigências técnicas relacionadas à formação adequada da peça. Temperaturas inadequadas podem modificar o comportamento do material durante o preenchimento do molde e interferir no desenvolvimento posterior da solidificação. Por essa razão, o acompanhamento térmico deve considerar as particularidades do processo, do material e das condições de fabricação, permitindo estabelecer parâmetros operacionais capazes de favorecer maior regularidade e controle durante a produção (Kalpakjian & Schmid, 2014).

Diante dessas condições, a eficiência do controle térmico depende não somente da definição de limites de temperatura, mas também da capacidade do sistema de medição de fornecer informações confiáveis no momento necessário. Em processos que operam com metal líquido sob temperaturas elevadas, medições pouco frequentes podem produzir lacunas importantes no acompanhamento das condições reais de operação. A adoção de estratégias capazes de ampliar a disponibilidade dos dados térmicos permite fortalecer o caráter preventivo do controle, reduzir a dependência de verificações pontuais e criar condições para maior estabilidade, rastreabilidade e eficiência na condução do processo de fundição.

2.3 MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE TEMPERATURA EM PROCESSOS INDUSTRIAIS

A medição de temperatura em processos industriais constitui uma atividade essencial para o acompanhamento das condições operacionais e para a manutenção de parâmetros compatíveis com as características dos materiais processados. Diferentes métodos podem ser empregados conforme a faixa térmica, o ambiente, a precisão requerida e a possibilidade de contato com o objeto analisado. Entre as alternativas encontram-se instrumentos baseados em contato direto e sistemas que determinam a temperatura por meio da radiação emitida pela superfície, sendo a escolha da técnica condicionada às particularidades de cada aplicação industrial (McGee, 1988).



A seleção de um método de medição não deve ser determinada exclusivamente pela capacidade do instrumento de operar em determinada faixa de temperatura. Em processos industriais severos, é necessário considerar rapidez de resposta, repetibilidade, acessibilidade ao ponto monitorado, condições ambientais e necessidade de intervenção humana. Em operações envolvendo metais líquidos, essas variáveis tornam-se ainda mais relevantes, pois a elevada temperatura impõe desafios à execução das leituras. Assim, a tecnologia adotada precisa combinar desempenho metrológico e viabilidade operacional, permitindo que a informação obtida represente adequadamente as condições efetivas do processo.

A confiabilidade das medições térmicas também depende da calibração e da rastreabilidade dos instrumentos utilizados, uma vez que resultados consistentes exigem procedimentos capazes de relacionar as indicações do equipamento a referências reconhecidas. Em aplicações industriais, a qualidade da informação térmica está associada não somente ao princípio de funcionamento do sensor, mas também às condições de instalação, utilização e verificação periódica. Dessa forma, compreender as fontes de incerteza e estabelecer práticas adequadas de calibração são requisitos importantes para que os valores registrados possam sustentar decisões relacionadas ao controle do processo (Nicholas & White, 2001).

No contexto da fundição, os métodos sem contato apresentam particular interesse por possibilitarem o acompanhamento térmico sem a necessidade de estabelecer contato físico direto com superfícies ou materiais submetidos a temperaturas elevadas. Entretanto, a maior facilidade operacional proporcionada por essas tecnologias não elimina a necessidade de avaliar criticamente as condições em que as leituras são realizadas. Características superficiais, posicionamento do instrumento, distância de medição e condições ambientais podem interferir nos resultados. Portanto, a modernização do monitoramento deve estar associada a critérios técnicos que assegurem confiabilidade, repetibilidade e efetiva utilidade dos dados para o controle industrial.

3 TECNOLOGIAS PARA MONITORAMENTO DE TEMPERATURA

3.1 PIRÔMETROS E MEDIÇÃO CONVENCIONAL DE TEMPERATURA

Os pirômetros constituem instrumentos relevantes para a medição de temperaturas elevadas em processos industriais, especialmente em situações nas quais o contato direto com o material apresenta limitações técnicas ou operacionais. Seu funcionamento baseia-se na detecção da radiação térmica emitida pelo objeto ou superfície analisada, possibilitando determinar a temperatura sem estabelecer contato físico com o elemento monitorado. Em processos envolvendo materiais metálicos, essa característica favorece sua aplicação em ambientes caracterizados por condições térmicas severas, embora fatores relacionados ao método empregado possam influenciar a confiabilidade dos valores registrados (Leonidas et al., 2022).

Apesar das vantagens proporcionadas pela medição sem contato, a utilização convencional do pirômetro pode manter significativa dependência da atuação humana quando as leituras são realizadas



manualmente. O operador precisa direcionar o instrumento ao ponto de interesse, executar a medição e registrar ou interpretar o valor obtido, produzindo informações associadas a momentos específicos do processo. Em operações de fundição, essa característica pode limitar a continuidade do acompanhamento térmico. Portanto, a questão central não reside somente na capacidade de medir altas temperaturas, mas também na frequência, padronização e disponibilidade das informações produzidas.

A aplicação da pirometria em processos metálicos exige atenção às condições em que as medições são realizadas, pois posicionamento, distância, características da região monitorada e definição adequada do momento da leitura podem afetar a representatividade dos resultados. Estratégias de medição precisam considerar as particularidades do processo para que os valores obtidos expressem adequadamente seu comportamento térmico. Desse modo, embora a pirometria ofereça vantagens importantes para aplicações industriais, seu desempenho depende da adoção de procedimentos tecnicamente estruturados e compatíveis com as condições reais de operação (Jorge et al., 2022).

A evolução dos sistemas pirométricos demonstra que o monitoramento térmico industrial caminha progressivamente para soluções capazes de ampliar a velocidade de aquisição e a quantidade de informações disponíveis durante o processo. Sistemas multiespectrais de resposta rápida exemplificam esse avanço ao possibilitarem medições dinâmicas em situações caracterizadas por rápidas alterações de temperatura. Essa evolução é particularmente relevante para processos industriais nos quais medições pontuais podem não representar integralmente as oscilações térmicas existentes. Assim, tecnologias mais rápidas favorecem uma compreensão temporal mais abrangente do comportamento térmico e fortalecem as possibilidades de controle operacional (Belikov et al., 2024).

Figura 3 - Etapas da medição pirométrica.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor, 2026.



A figura apresenta as etapas fundamentais da medição pirométrica aplicada ao acompanhamento térmico de processos industriais, iniciando pelo direcionamento do equipamento ao ponto de interesse. Na sequência, o pirômetro realiza a captação da radiação térmica emitida pela superfície monitorada e converte essa informação em um valor de temperatura apresentado ao operador. Por não exigir contato físico direto com o material, esse método apresenta vantagens em operações submetidas a temperaturas elevadas, possibilitando a realização de leituras rápidas e reduzindo a necessidade de aproximação direta do trabalhador ao metal líquido.

No contexto do processo de fundição analisado, a medição pirométrica representa um importante recurso para acompanhar as condições térmicas do metal e subsidiar decisões operacionais. Entretanto, quando o procedimento depende do direcionamento manual do equipamento, as informações obtidas permanecem condicionadas aos momentos em que o operador realiza as leituras, podendo existir intervalos sem acompanhamento térmico. Essa característica evidencia a importância da evolução dos sistemas de medição para soluções capazes de ampliar a frequência, a continuidade e a disponibilidade das informações térmicas ao longo do processo industrial. A utilização de tecnologias de monitoramento mais rápidas possibilita acompanhar com maior precisão as variações de temperatura e reduzir limitações associadas às medições exclusivamente pontuais. Dessa forma, a modernização dos sistemas de aquisição de dados térmicos pode favorecer maior capacidade de controle do processo, confiabilidade das informações e eficiência operacional, especialmente em aplicações caracterizadas por rápidas alterações de temperatura (Belikov et al., 2024).

3.2 SENSORES DE TEMPERATURA A LASER E MEDIÇÃO SEM CONTATO

Os sensores empregados na medição de temperatura sem contato constituem uma alternativa tecnológica relevante para processos industriais nos quais as condições térmicas dificultam ou inviabilizam a aproximação direta do instrumento ao material monitorado. Esses dispositivos determinam a temperatura a partir da radiação térmica emitida pela superfície, acompanhar materiais submetidos a elevadas temperaturas com resposta relativamente rápida. Em aplicações envolvendo metais, essa característica amplia as possibilidades de monitoramento e reduz determinadas limitações associadas aos métodos que exigem contato físico entre o elemento sensor e o objeto analisado (Leonidas et al., 2022).

A utilização dessa tecnologia deve ser compreendida como parte de uma mudança na forma de produzir e interpretar informações térmicas dentro do ambiente industrial. Mais do que substituir instrumentos convencionais, sistemas sem contato podem favorecer maior rapidez na identificação de alterações do processo e diminuir intervenções realizadas em áreas submetidas a condições térmicas severas. Entretanto, sua incorporação precisa estar associada à padronização das condições de leitura e à adequada interpretação dos dados. A eficiência tecnológica depende, portanto, da integração entre



equipamento, processo, procedimentos operacionais e capacidade de transformar medições em decisões produtivas.

Em processos envolvendo materiais metálicos, a utilização da pirometria requer atenção a fatores como posicionamento do instrumento, região efetivamente monitorada e condições específicas da superfície analisada. A confiabilidade dos resultados depende da adoção de estratégias de medição compatíveis com as características dinâmicas do processo, especialmente quando existem variações térmicas significativas durante a operação. Nesse sentido, a medição sem contato oferece vantagens importantes, mas seus resultados precisam ser analisados considerando as condições reais de aplicação e as possíveis limitações inerentes ao procedimento adotado (Jorge et al., 2022).

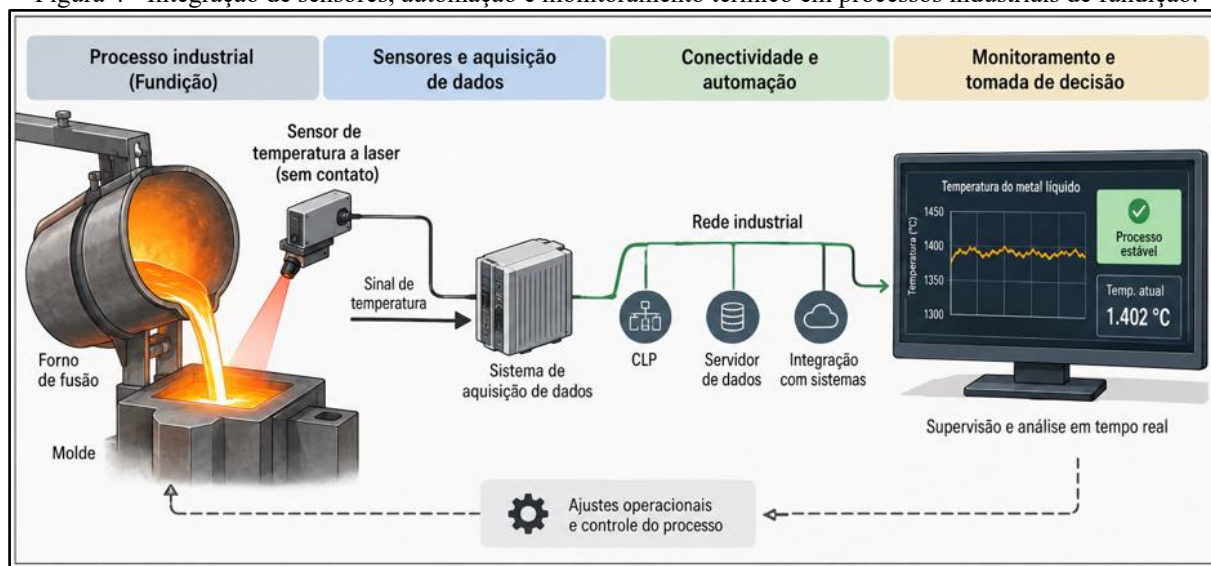
A evolução dos sistemas pirométricos também evidencia uma tendência de ampliação da velocidade e da capacidade de aquisição de dados térmicos, possibilitando acompanhar fenômenos cuja temperatura varia rapidamente ao longo do tempo. Sistemas multiespectrais de resposta rápida podem contribuir para reduzir limitações associadas às medições exclusivamente pontuais e proporcionar informações mais representativas do comportamento térmico observado. Para processos de fundição, essa evolução tecnológica fortalece a perspectiva de monitoramento mais contínuo, capaz de apoiar o controle operacional e ampliar a disponibilidade de informações para decisões relacionadas às condições térmicas do metal líquido (Belikov et al., 2024).

3.3 AUTOMAÇÃO E MONITORAMENTO TÉRMICO EM PROCESSOS INDUSTRIAIS

A automação industrial tem ampliado as possibilidades de acompanhamento das variáveis que interferem no desempenho dos processos produtivos, permitindo integrar sensores, sistemas de aquisição de dados e recursos computacionais em estruturas capazes de fornecer informações continuamente. Nesse contexto, o monitoramento térmico pode ser incorporado aos sistemas automatizados para favorecer maior visibilidade das condições de operação e reduzir a dependência de verificações exclusivamente manuais. A integração entre tecnologias digitais e equipamentos produtivos representa, portanto, um dos elementos relevantes para o desenvolvimento de sistemas industriais mais conectados e orientados por dados (Alcácer & Cruz-Machado, 2019).

Sob uma perspectiva crítica, automatizar o monitoramento térmico não significa apenas substituir a atuação humana por dispositivos eletrônicos, mas reorganizar a maneira como a informação é produzida, disponibilizada e utilizada no processo industrial. Quando a temperatura pode ser acompanhada com maior frequência, torna-se possível identificar alterações em intervalos menores e estabelecer respostas operacionais mais consistentes. Entretanto, a efetividade desse avanço depende da qualidade dos dados gerados e da integração com as rotinas produtivas. A automação deve, assim, fortalecer a tomada de decisão, sem transformar a tecnologia em um recurso desvinculado das necessidades reais da operação.

Figura 4 - Integração de sensores, automação e monitoramento térmico em processos industriais de fundição.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor, 2026.

Os sensores assumem papel estratégico na transformação de fenômenos físicos em informações capazes de alimentar sistemas de monitoramento e controle. Sua integração aos processos produtivos permite ampliar a aquisição de dados e acompanhar variáveis relevantes para a estabilidade operacional, contribuindo para ambientes industriais progressivamente digitalizados. No monitoramento térmico, esses dispositivos possibilitam registrar mudanças de temperatura e fornecer informações que podem apoiar intervenções, análises de desempenho e estratégias de controle. Dessa maneira, a utilização integrada de sensores representa um componente importante para o desenvolvimento de sistemas produtivos inteligentes e orientados pela informação (Javaid et al., 2021).

A conectividade industrial amplia essa perspectiva ao possibilitar que informações provenientes de sensores sejam compartilhadas entre diferentes componentes e sistemas, favorecendo acompanhamento, registro histórico e análise das condições produtivas. No contexto da fundição, integrar dados térmicos à infraestrutura automatizada pode proporcionar uma visão mais abrangente do comportamento do metal líquido e reduzir limitações associadas às medições isoladas. Essa arquitetura tecnológica favorece maior rastreabilidade das informações e cria condições para decisões fundamentadas em dados continuamente disponíveis, fortalecendo a eficiência e a capacidade de resposta e alterações verificadas durante a operação (Gilchrist, 2016).

4 METODOLOGIA

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA

O presente trabalho caracterizou-se como uma pesquisa de natureza aplicada, uma vez que esteve direcionado à investigação de uma situação concreta identificada no ambiente industrial e à análise dos



efeitos decorrentes da implantação de uma solução tecnológica para o monitoramento térmico. Quanto aos objetivos, a pesquisa apresentou caráter exploratório e descritivo, pois buscou ampliar a compreensão sobre o sistema de medição utilizado no processo de fundição e, simultaneamente, descrever as condições verificadas antes e após a implantação da tecnologia, considerando suas características técnicas e operacionais (Gil, 2019).

Quanto à abordagem do problema, adotou-se uma perspectiva quali-quantitativa, articulando informações mensuráveis e elementos descritivos relacionados ao processo investigado. A dimensão quantitativa foi empregada na comparação dos indicadores disponíveis, como tempo de medição, frequência das leituras, quantidade de intervenções manuais, utilização de mão de obra e custos. A dimensão qualitativa foi utilizada para interpretar as mudanças verificadas na rotina operacional, na forma de monitoramento e nas condições de execução da atividade, possibilitando uma compreensão integrada das transformações associadas à implantação do sistema (Prodanov & Freitas, 2013).

4.2 PROCEDIMENTOS TÉCNICOS E DELINEAMENTO DA PESQUISA

Quanto aos procedimentos técnicos, foram utilizadas a pesquisa bibliográfica, a pesquisa documental e o estudo de caso. A pesquisa bibliográfica forneceu a fundamentação necessária para a compreensão dos processos de fundição, controle térmico, métodos de medição de temperatura, pirometria, sensores sem contato e automação industrial. A pesquisa documental compreendeu a análise dos registros técnicos disponibilizados pela empresa, enquanto o estudo de caso possibilitou examinar de maneira aprofundada a implantação do sistema de medição no contexto real em que o fenômeno investigado ocorreu (Gil, 2019).

O estudo de caso mostrou-se adequado à investigação por possibilitar a análise aprofundada de um fenômeno contemporâneo inserido em seu contexto real, especialmente diante da necessidade de considerar conjuntamente as características do processo e da tecnologia implantada. Dessa maneira, o sistema de medição foi examinado considerando suas especificações técnicas, as condições de operação e as alterações verificadas no acompanhamento da temperatura do metal líquido, permitindo estabelecer uma comparação estruturada entre o cenário anterior e aquele identificado após a implantação (Yin, 2015).

4.3 MÉTODO DE ABORDAGEM E DE PROCEDIMENTO

O método de abordagem adotado foi o hipotético-dedutivo, partindo-se da proposição de que a implantação de um sistema de medição de temperatura sem contato poderia contribuir para o aprimoramento do monitoramento térmico quando comparada ao procedimento convencional anteriormente utilizado. A partir dessa proposição, foram examinados dados e evidências relacionados à disponibilidade das informações, eficiência operacional, confiabilidade das medições, necessidade de



intervenções manuais e custos associados ao processo, permitindo avaliar os efeitos decorrentes da solução tecnológica implantada (Prodanov & Freitas, 2013).

Como método de procedimento, adotou-se o monográfico, concentrando-se a investigação em uma situação específica de implantação tecnológica no processo industrial de fundição. Essa delimitação possibilitou examinar detalhadamente as características do sistema de medição e as modificações observadas no ambiente analisado, sem pretender generalizar automaticamente os resultados para outros processos industriais. A análise aprofundada do caso permitiu relacionar os fundamentos teóricos às evidências empíricas obtidas durante a investigação, preservando as particularidades técnicas e operacionais do processo estudado (Gil, 2019).

4.4 CARACTERIZAÇÃO DO ESTUDO DE CASO

O estudo de caso foi realizado em um processo industrial de fundição no qual o acompanhamento térmico do metal líquido ocorreu em temperaturas situadas aproximadamente entre (1.380 °C e 1.420 °C). O primeiro cenário analisado correspondeu à condição anterior à implantação da tecnologia, quando as verificações eram efetuadas por meio de pirômetro e dependiam da atuação direta de um profissional para o direcionamento do equipamento, realização da leitura e acompanhamento das informações. Essa condição constituiu a referência utilizada para a comparação com o sistema posteriormente implantado.

O segundo cenário correspondeu às condições verificadas após a implantação do sistema de medição de temperatura a laser. Nessa etapa, foram considerados o equipamento empregado, seu princípio de funcionamento, seu posicionamento no processo, a forma de aquisição dos dados, a frequência das leituras e sua integração à rotina operacional. A caracterização desses elementos permitiu compreender de maneira sistemática como a tecnologia foi incorporada ao ambiente produtivo e quais modificações ocorreram em relação ao procedimento anteriormente utilizado, uma vez que a análise de um estudo de caso deve considerar o fenômeno investigado em associação direta com as condições reais do contexto em que ele se desenvolveu (Yin, 2015).

4.5 PROCEDIMENTOS DE COLETA DE DADOS

A coleta de dados foi realizada mediante o levantamento dos registros técnicos e operacionais disponíveis referentes aos períodos anterior e posterior à implantação do sistema. Inicialmente, foram identificadas informações relacionadas ao procedimento convencional de medição, incluindo frequência das leituras, tempo empregado na atividade, necessidade de intervenção humana, forma de registro das temperaturas e demais elementos capazes de caracterizar o cenário de referência. A utilização de registros documentais possibilitou reunir evidências relacionadas às condições efetivamente observadas no ambiente investigado (Gil, 2019).



Posteriormente, foram coletadas informações referentes ao funcionamento do sistema implantado, buscando-se utilizar parâmetros equivalentes àqueles empregados na caracterização do cenário anterior. Foram considerados, de acordo com a disponibilidade e a rastreabilidade dos registros, dados de temperatura, frequência das medições, tempo necessário para obtenção das informações, quantidade de intervenções manuais e indicadores relacionados aos aspectos técnicos, operacionais e econômicos. A adoção de parâmetros equivalentes entre os dois cenários favoreceu maior consistência na comparação realizada.

4.6 INDICADORES E PROCEDIMENTOS DE ANÁLISE DOS DADOS

Os indicadores foram selecionados considerando sua relação com os objetivos da pesquisa e a disponibilidade de registros confiáveis no processo analisado. Foram considerados, quando disponíveis, o tempo necessário para realização das medições, a frequência das leituras, a disponibilidade das informações, a quantidade de intervenções manuais, a utilização de mão de obra, os custos associados ao procedimento, a confiabilidade dos registros e aspectos relacionados à segurança operacional. A organização sistemática dessas informações possibilitou transformar os registros coletados em evidências para a interpretação do fenômeno investigado (Prodanov & Freitas, 2013).

Os dados quantitativos foram organizados em planilhas, tabelas, quadros e gráficos, permitindo estabelecer comparações entre as condições existentes antes e após a implantação. Quando aplicável, foram determinadas diferenças absolutas e percentuais entre os indicadores selecionados. Os dados qualitativos foram analisados de maneira descritiva e interpretativa, considerando principalmente as mudanças verificadas na execução das medições, na disponibilidade das informações e na necessidade de intervenção do operador. A integração das diferentes evidências possibilitou uma análise mais abrangente dos efeitos associados à implantação da tecnologia (Yin, 2015).

4.7 ETAPAS DA PESQUISA

O desenvolvimento da pesquisa foi organizado em cinco etapas principais. Na primeira, realizou-se o levantamento bibliográfico e documental relacionado ao processo de fundição e às tecnologias de monitoramento térmico. Na segunda, caracterizou-se o processo industrial e o método de medição anteriormente utilizado. Na terceira, foram analisadas as características técnicas e operacionais do sistema implantado. Na quarta, foram coletados, organizados e comparados os indicadores referentes aos cenários anterior e posterior. Finalmente, na quinta etapa, realizou-se a interpretação e a discussão dos resultados obtidos, estabelecendo-se sua relação com os objetivos da investigação (Gil, 2019).

Ao final, os resultados obtidos foram confrontados com os objetivos estabelecidos, buscando-se verificar em que medida a implantação do sistema contribuiu para o aperfeiçoamento do monitoramento



térmico do metal líquido. A análise considerou as diferenças identificadas entre os cenários anterior e posterior, bem como sua relevância técnica, operacional e econômica para o processo estudado. Dessa forma, as conclusões foram formuladas com base nas evidências disponíveis, permitindo avaliar os benefícios e as limitações observados após a implantação da tecnologia no processo industrial de fundição.

5 IMPLANTAÇÃO DO SENSOR DE TEMPERATURA A LASER: ESTUDO DE CASO

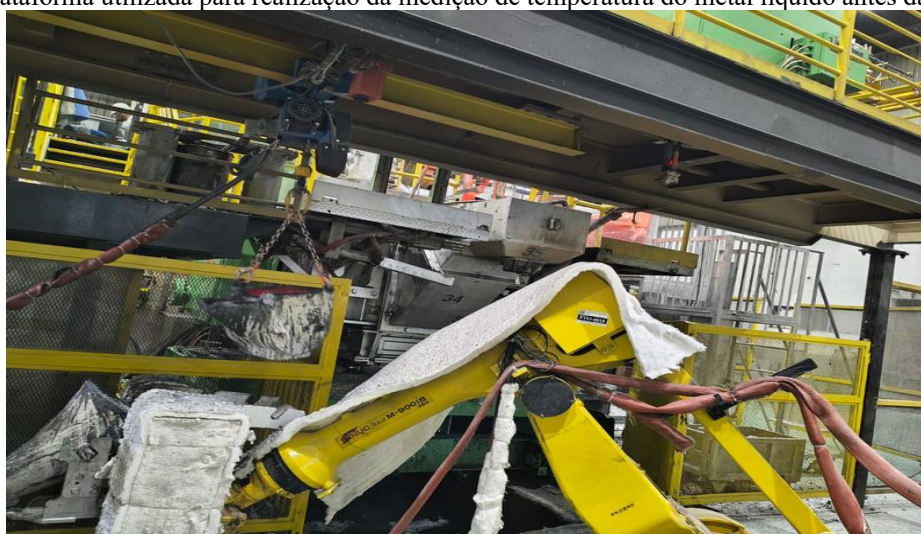
5.1 CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO INDUSTRIAL ANALISADO

O estudo de caso foi desenvolvido em um processo industrial de fundição caracterizado pela movimentação de metal líquido em temperaturas elevadas e pela necessidade de acompanhamento térmico durante a operação. O material fundido era transportado em um recipiente denominado operacionalmente de caneca, que se deslocava entre diferentes pontos do processo produtivo. Nessas condições, a temperatura constituiu uma variável relevante para o acompanhamento da operação, tornando necessária a utilização de instrumentos capazes de fornecer informações sobre as condições térmicas do metal.

A análise das condições existentes demonstrou que o processo já possuía uma rotina de verificação de temperatura antes da implantação do novo sistema. Entretanto, a obtenção dessa informação dependia da atuação direta de um colaborador, que precisava acessar uma plataforma localizada junto à área produtiva e realizar manualmente a medição da temperatura do metal líquido. Dessa forma, embora a variável térmica fosse monitorada, o procedimento apresentava dependência da intervenção humana e ocorria em intervalos previamente estabelecidos.

A Figura 5 apresenta a plataforma utilizada para a execução das medições antes da implantação do novo sistema. A estrutura estava inserida diretamente no ambiente produtivo e constituía o ponto ao qual o colaborador precisava se deslocar para realizar a leitura.

Figura 5 - Plataforma utilizada para realização da medição de temperatura do metal líquido antes da implantação.



Fonte: Dados da pesquisa (2026).



5.2 CONDIÇÃO OPERACIONAL ANTERIOR À IMPLANTAÇÃO

Antes da implantação do sistema automatizado, o acompanhamento térmico era realizado manualmente. Conforme as informações obtidas durante o estudo de caso, o colaborador deslocava-se até a plataforma e realizava a leitura da temperatura diretamente na caneca que transportava o metal líquido. Esse procedimento ocorria aproximadamente a cada uma hora, caracterizando uma condição de monitoramento periódico, na qual a disponibilidade da informação dependia do momento em que a medição era executada.

A Figura 6 apresenta a caneca utilizada para o transporte do metal. A imagem evidencia as condições severas às quais os elementos empregados no processo estavam submetidos, sobretudo em razão da elevada temperatura do material. A proximidade necessária para a realização das medições constituía uma característica relevante do procedimento anterior e justificou a busca por uma alternativa capaz de diminuir a necessidade de intervenção direta nessa etapa.

Figura 6 - Caneca utilizada para transporte do metal líquido no processo de fundição.



Fonte: Dados da pesquisa (2026).

Outro aspecto identificado esteve relacionado às condições de execução da medição. De acordo com as informações fornecidas pelo responsável pelo processo, o equipamento empregado anteriormente poderia ser submetido a condições térmicas severas durante a leitura. Foram relatadas ocorrências em que componentes envolvidos na medição sofreram danos associados à exposição ao metal em alta temperatura.



A evidência apresentada na Figura 7 demonstra uma dessas condições, reforçando a necessidade de considerar não apenas a obtenção da temperatura, mas também a exposição operacional associada ao método utilizado.

Além dos possíveis danos aos componentes utilizados na medição, essa condição evidenciava uma limitação operacional relacionada à necessidade de aproximação do trabalhador de uma região submetida a elevada carga térmica. A execução periódica da atividade aumentava a exposição do colaborador às condições próprias do processo de fundição, especialmente durante o posicionamento do instrumento e a obtenção da leitura. Nesse sentido, a implantação de um sistema de medição sem contato apresentou-se como alternativa para reduzir a intervenção direta nessa etapa, mantendo o acompanhamento da temperatura e transferindo parte da atividade de aquisição dos dados para uma solução integrada ao processo produtivo.

Figura 7 - Evidência de componente utilizado na medição após exposição às condições térmicas do processo.



Fonte: Dados da pesquisa (2026).

A condição anterior apresentava, portanto, três características relevantes para a análise: periodicidade das leituras, necessidade de intervenção direta do colaborador e exposição do sistema de medição às condições térmicas do processo. Esses elementos constituíram a referência utilizada para avaliar as modificações introduzidas pela implantação da nova tecnologia.



5.3 CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO IMPLANTADO

A solução implantada foi baseada em um sistema de medição de temperatura sem contato instalado em posição definida ao longo do percurso operacional. Diferentemente do procedimento anterior, no qual o colaborador precisava deslocar-se até a plataforma e realizar a leitura, o novo sistema passou a permitir a aquisição da temperatura durante a própria sequência de movimentação do processo.

A implantação exigiu que o sensor fosse posicionado de maneira compatível com a trajetória do recipiente contendo o metal líquido. A definição desse ponto mostrou-se fundamental, uma vez que a leitura passou a depender do correto posicionamento do material em relação ao campo de medição do equipamento. Dessa maneira, a solução envolveu não apenas a instalação física de um dispositivo, mas sua integração à dinâmica operacional existente.

A tecnologia implantada também foi integrada a uma interface de supervisão, possibilitando a disponibilização da informação térmica ao operador. Essa configuração estabeleceu uma relação entre aquisição, processamento e visualização dos dados, permitindo que o valor obtido pelo sistema fosse apresentado na IHM utilizada para acompanhamento da operação.

5.4 ETAPAS DE IMPLANTAÇÃO E INTEGRAÇÃO AO PROCESSO

A implantação foi realizada de forma a incorporar a medição da temperatura à sequência operacional existente. Inicialmente, foi definido o ponto de instalação do sensor, considerando a trajetória realizada pelo sistema responsável pela movimentação do recipiente. Posteriormente, o equipamento foi posicionado de maneira que a região de interesse pudesse ser monitorada quando o conjunto alcançasse a posição destinada à leitura.

Figura 8 - Estrutura robotizada.



Fonte: Dados da pesquisa (2026).



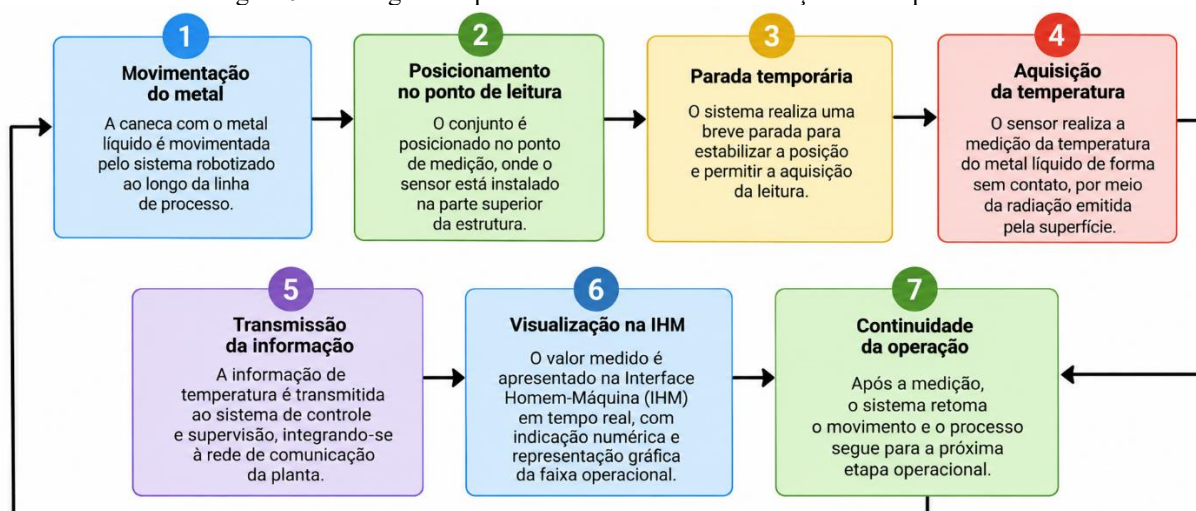
A Figura 8 evidencia a estrutura robotizada presente no processo e a região em que o sistema de medição foi incorporado. Essa configuração possibilitou associar o deslocamento do equipamento a uma posição específica para aquisição da temperatura, reduzindo a necessidade de uma operação independente executada pelo colaborador.

Durante a operação, o sistema robotizado deslocava o conjunto até o ponto de monitoramento e realizava uma breve parada para possibilitar a aquisição da temperatura. Após a leitura, o processo prosseguia conforme sua sequência operacional. Dessa maneira, a medição deixou de constituir uma atividade manual isolada e passou a integrar o fluxo operacional do equipamento.

Esse funcionamento pode ser representado pela seguinte sequência:

Movimentação do metal → posicionamento no ponto de leitura → parada temporária → aquisição da temperatura → transmissão da informação → visualização na IHM → continuidade da operação.

Figura 9 - Fluxograma operacional do sistema de medição de temperatura.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2026).

Essa integração representou uma mudança relevante em relação ao procedimento anterior, principalmente porque estabeleceu uma condição mais padronizada para realização das leituras.

5.5 SISTEMA DE SUPERVISÃO E VISUALIZAÇÃO DA TEMPERATURA

A informação obtida pelo sistema implantado passou a ser disponibilizada por meio de uma interface de supervisão identificada como “TEMPERATURA REAL”. A IHM apresentou ao operador o valor medido e uma representação gráfica da condição térmica, possibilitando acompanhar visualmente a posição da temperatura em relação aos limites estabelecidos para a operação.

Na imagem disponibilizada para o estudo, a interface apresenta uma escala semicircular dividida visualmente em diferentes regiões, incluindo uma faixa central verde e regiões laterais indicativas de



condições distintas. Na parte inferior da tela são apresentados valores numéricos associados ao acompanhamento térmico. Essa representação possibilita ao operador interpretar de maneira mais imediata a condição registrada pelo sistema.

A utilização dessa interface também contribuiu para tornar o acompanhamento da temperatura mais padronizado e acessível durante a operação, uma vez que o operador passou a dispor de uma referência visual associada ao valor numérico apresentado pelo sistema. A diferenciação das faixas na tela favoreceu a identificação das condições térmicas registradas e facilitou o reconhecimento de eventuais desvios em relação à condição operacional estabelecida. Dessa forma, a IHM passou a atuar como elemento de integração entre a medição realizada pelo sensor e o acompanhamento do processo, transformando o dado térmico adquirido em uma informação visual capaz de auxiliar a supervisão e a tomada de decisão operacional.

Figura 10 - Interface de supervisão utilizada para visualização da temperatura real do processo.



Fonte: Dados da pesquisa (2026).

A incorporação da IHM representou uma alteração importante na forma como a informação térmica passou a ser disponibilizada. No cenário anterior, o valor dependia da execução manual da medição; após a implantação, a temperatura obtida pelo sistema passou a ser apresentada diretamente na interface de supervisão. Dessa maneira, a implantação aproximou a aquisição da temperatura das estratégias de automação e monitoramento já utilizadas no ambiente industrial.



5.6 FUNCIONAMENTO APÓS A IMPLANTAÇÃO

Após a implantação, o processo de obtenção da temperatura passou a ocorrer de maneira integrada à movimentação do sistema. Conforme observado nas evidências disponibilizadas, quando o conjunto alcançava o ponto estabelecido para a medição, ocorria uma breve interrupção do movimento, criando a condição necessária para que o sensor realizasse a leitura. O valor obtido era então disponibilizado no sistema de supervisão, permitindo seu acompanhamento pelo operador.

Essa configuração modificou a participação humana no procedimento. O colaborador deixou de depender exclusivamente do deslocamento periódico até a plataforma para obter a informação e passou a dispor do valor apresentado pelo sistema. A atuação humana permaneceu relevante para acompanhamento, interpretação e tomada de decisão, porém a etapa de aquisição da temperatura passou a apresentar menor dependência da execução manual.

Dessa forma, a implantação promoveu uma transição entre duas configurações distintas: uma condição baseada predominantemente em medição manual e periódica e outra baseada em aquisição sem contato integrada à sequência operacional e associada a uma interface de supervisão. Essa diferença constituiu a base para a análise comparativa apresentada no capítulo seguinte.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 COMPARAÇÃO DAS CONDIÇÕES ANTES E APÓS A IMPLANTAÇÃO

A análise comparativa demonstrou uma alteração estrutural na forma de acompanhamento da temperatura do metal líquido. Antes da implantação, a leitura era realizada aproximadamente a cada uma hora e dependia do deslocamento do colaborador até a plataforma. Após a implantação, a medição passou a estar associada ao posicionamento do sistema no ponto de leitura, sendo o resultado disponibilizado por meio da interface de supervisão.



Tabela 1 - Comparação das condições de medição antes e após a implantação.

Indicador	Antes da implantação	Após a implantação
Método de aquisição	Medição manual	Medição sem contato integrada ao processo
Frequência anterior conhecida	Aproximadamente a cada 1 hora	Associada ao ciclo/passagem pelo ponto de leitura
Necessidade de deslocamento do operador	Sim	Reduzida para execução da leitura
Aproximação durante a medição	Necessária	Reduzida
Ponto de medição	Dependente da execução manual	Posição previamente definida
Visualização	Associada à leitura realizada	Informação apresentada na IHM
Integração à automação	Limitada	Integrada à sequência operacional
Intervenção humana na aquisição	Elevada	Reduzida
Condição de leitura	Periódica e pontual	Vinculada ao ciclo operacional
Exposição do instrumento/elemento de medição	Evidenciada no procedimento anterior	Medição realizada sem contato direto

Fonte: Elaborado pelo autor com base nos dados da pesquisa (2026).

Os resultados evidenciaram que a principal transformação não esteve limitada à substituição de um equipamento de medição. Houve uma mudança na própria organização da aquisição da informação térmica. A leitura deixou de depender exclusivamente de uma ação periódica executada pelo colaborador e passou a integrar a sequência operacional, permitindo maior padronização do momento e da posição em que a temperatura era obtida.

6.2 ALTERAÇÕES NA FREQUÊNCIA E DISPONIBILIDADE DAS INFORMAÇÕES

No procedimento anterior, a temperatura era verificada aproximadamente em intervalos de uma hora. Essa característica criava períodos entre duas medições consecutivas nos quais alterações térmicas poderiam ocorrer sem que um novo valor estivesse imediatamente disponível. O procedimento fornecia informações importantes para a operação, porém sua frequência estava condicionada à rotina de execução das leituras.

Após a implantação, a obtenção da temperatura passou a estar relacionada à passagem do sistema pelo ponto de medição. Essa alteração aumentou a integração entre monitoramento e operação, uma vez que a leitura passou a fazer parte da sequência do processo. A disponibilidade da informação deixou, portanto, de depender exclusivamente do deslocamento periódico do colaborador.

Esse resultado apresenta coerência com a discussão desenvolvida na fundamentação teórica, segundo a qual a integração de sensores, sistemas de aquisição e recursos computacionais amplia as possibilidades de acompanhamento das variáveis industriais e favorece estruturas produtivas orientadas por dados (Alcácer & Cruz-Machado, 2019).



6.3 IMPACTOS SOBRE A INTERVENÇÃO HUMANA E A SEGURANÇA OPERACIONAL

Um dos resultados mais relevantes observados esteve relacionado à modificação da participação do colaborador na obtenção da temperatura. No cenário anterior, o trabalhador precisava acessar fisicamente a plataforma e executar o procedimento de leitura próximo ao recipiente contendo metal líquido em elevada temperatura. As evidências fornecidas também registraram ocorrências de exposição do equipamento ou de seus componentes às condições térmicas severas existentes nessa região.

Com a implantação do sistema sem contato, a aquisição da temperatura passou a ocorrer a partir de um ponto instalado no processo, reduzindo a necessidade de aproximação do colaborador especificamente para executar a leitura. Esse resultado não significa a eliminação dos riscos existentes na atividade de fundição, mas evidencia a redução de uma intervenção manual associada ao procedimento de medição.

Essa distinção é importante do ponto de vista científico. Com os dados atualmente disponíveis, é possível demonstrar que houve redução da necessidade de exposição durante a execução da leitura, mas não seria adequado afirmar um percentual de redução de acidentes ou de risco ocupacional sem indicadores específicos de segurança referentes aos períodos anterior e posterior.

6.4 PADRONIZAÇÃO E CONFIABILIDADE DO PROCESSO DE MEDIÇÃO

Outro resultado observado esteve relacionado à padronização das condições de aquisição da temperatura. Na medição manual, fatores associados ao momento escolhido para a leitura, posicionamento e execução do procedimento poderiam variar entre as verificações. Após a implantação, a existência de um ponto previamente estabelecido e a parada do sistema para realização da medição contribuíram para tornar mais uniforme a condição em que os dados eram obtidos.

Essa característica possui relevância para sistemas de medição sem contato, uma vez que fatores como posicionamento, região monitorada e condições de aplicação podem interferir na representatividade dos resultados obtidos. Assim, a definição de uma condição operacional repetível favorece a utilização das informações térmicas no acompanhamento do processo (Jorge et al., 2022).

Entretanto, a comprovação metrológica da exatidão ou da superioridade quantitativa do novo sistema exigiria dados adicionais de calibração, incerteza, especificações do fabricante ou comparação simultânea com um instrumento de referência. Portanto, com as evidências atualmente disponíveis, o resultado mais seguro é afirmar que houve maior padronização da condição de medição, e não necessariamente maior exatidão metrológica.

6.5 INTEGRAÇÃO DA MEDIÇÃO AO SISTEMA DE SUPERVISÃO

A disponibilização da temperatura na IHM representou outro resultado relevante da implantação. A interface permitiu que a informação adquirida pelo sistema fosse apresentada diretamente ao operador,



utilizando representação gráfica e indicação numérica. Essa integração favoreceu a transformação do dado de temperatura em uma informação disponível para acompanhamento da operação.

A mudança também aproximou o monitoramento térmico da lógica de automação industrial discutida no referencial teórico. A integração de sensores e sistemas digitais permite que informações provenientes do processo sejam disponibilizadas para supervisão e análise, ampliando a rastreabilidade e o suporte à tomada de decisão (Gilchrist, 2016).

Nesse sentido, o benefício identificado não esteve apenas na aquisição do valor térmico, mas também em sua disponibilização dentro da infraestrutura de supervisão do processo. Essa característica ampliou a funcionalidade da medição ao incorporar a temperatura ao conjunto de informações utilizadas durante a operação.

6.6 IMPACTOS OPERACIONAIS E ECONÔMICOS

Sob a perspectiva operacional, a implantação reduziu uma atividade manual anteriormente necessária para obtenção periódica da temperatura. O tempo utilizado pelo colaborador para deslocar-se até a plataforma, posicionar-se, executar a medição e retornar às demais atividades passou a não ser requerido da mesma maneira para cada leitura. Consequentemente, ocorreu uma reorganização da utilização da mão de obra associada ao monitoramento térmico.

Também foi identificada, nas informações fornecidas para o estudo, a existência de consumíveis associados ao procedimento anterior de medição. A implantação do sistema sem contato modificou essa condição, criando potencial para redução de custos recorrentes relacionados ao método anteriormente empregado.

Entretanto, os dados atualmente disponíveis não permitem calcular de maneira confiável a economia financeira mensal ou anual. Para essa determinação serão necessários o consumo médio real do componente anteriormente utilizado, seu custo unitário, número de medições realizadas e eventuais custos de manutenção do novo sistema. Por esse motivo, a presente análise reconheceu a eliminação ou redução de uma fonte de consumo operacional, mas não atribuiu um valor financeiro sem evidência documental.

6.7 ATENDIMENTO AOS OBJETIVOS DA PESQUISA

Os resultados obtidos permitiram responder progressivamente aos objetivos estabelecidos. O primeiro objetivo específico foi atendido mediante a caracterização do procedimento anterior, no qual a medição era realizada manualmente e aproximadamente a cada uma hora. O segundo foi contemplado pela descrição do sistema implantado, de seu posicionamento no processo, da realização da leitura durante a parada operacional e da disponibilização da temperatura na interface de supervisão.



O terceiro objetivo foi atendido por meio da comparação entre os cenários anterior e posterior, evidenciando mudanças na forma de aquisição, participação do operador, ponto de leitura e integração da informação térmica ao processo. Por sua vez, o quarto objetivo permitiu identificar ganhos operacionais principalmente relacionados à redução da intervenção manual para obtenção da temperatura, à padronização das condições de leitura e à integração do monitoramento à rotina produtiva.

Em relação ao objetivo geral, as evidências demonstraram que a implantação modificou de maneira relevante o monitoramento térmico do metal líquido. Os resultados mais claramente sustentados pelos dados disponíveis foram a redução da dependência da medição manual, a integração da aquisição ao processo, a disponibilização da temperatura na IHM e a redução da necessidade de aproximação do colaborador para executar a leitura. A quantificação de benefícios econômicos e de eventuais ganhos de produtividade dependerá da incorporação dos registros financeiros e operacionais correspondentes.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como propósito analisar a implantação de um sistema de medição de temperatura sem contato aplicado ao monitoramento do metal líquido em um processo industrial de fundição. A investigação permitiu compreender as condições operacionais existentes antes da implantação, caracterizar a solução tecnológica incorporada ao processo e comparar as principais modificações observadas na forma de obtenção e disponibilização das informações térmicas. A análise demonstrou que a mudança não se restringiu à substituição de um instrumento de medição, mas promoveu uma reorganização da rotina de monitoramento da temperatura, integrando a aquisição dos dados à sequência operacional do processo produtivo.

Na condição anterior à implantação, a medição apresentava dependência significativa da atuação do colaborador, que precisava se deslocar até a plataforma e realizar periodicamente a leitura da temperatura do metal líquido. As informações levantadas no estudo indicaram que esse procedimento ocorria aproximadamente a cada uma hora, estabelecendo um acompanhamento pontual da condição térmica. Além do tempo necessário para a execução da atividade, o método exigia aproximação da região onde se encontrava o material em elevada temperatura, condição que também submetia os elementos utilizados na medição às características severas do ambiente de fundição.

A implantação do sistema de medição sem contato modificou essa dinâmica ao estabelecer um ponto específico para aquisição da temperatura durante a movimentação do metal. O sistema robotizado passou a posicionar o conjunto no local determinado para a leitura, realizando uma breve parada para possibilitar a aquisição da informação térmica. Posteriormente, o valor obtido passou a ser transmitido ao sistema de controle e disponibilizado na Interface Homem-Máquina (IHM). Dessa forma, a medição foi incorporada ao fluxo operacional, proporcionando maior padronização das condições em que os dados eram obtidos.



A integração da medição à IHM constituiu outro resultado relevante da implantação, uma vez que permitiu disponibilizar ao operador informações numéricas e gráficas relacionadas à temperatura do processo. A representação visual das condições térmicas facilitou o acompanhamento da variável e possibilitou identificar a posição do valor medido em relação às faixas estabelecidas para a operação. Nesse contexto, a informação deixou de estar associada exclusivamente à execução manual de uma leitura e passou a compor o ambiente de supervisão, ampliando sua disponibilidade para o acompanhamento e para a tomada de decisão durante o processo produtivo.

Em relação à intervenção humana, verificou-se uma redução da necessidade de atuação direta do colaborador especificamente para a obtenção da temperatura. Essa mudança apresentou relevância operacional, sobretudo porque o procedimento anterior exigia deslocamento e aproximação de uma região submetida a elevadas temperaturas. A implantação não eliminou os riscos inerentes ao processo de fundição, porém reduziu uma atividade que demandava exposição direta durante a realização da leitura. Dessa maneira, os resultados indicaram uma melhoria das condições de execução do monitoramento térmico, sem que se atribuam percentuais de redução de riscos ou acidentes que não tenham sido comprovados por indicadores específicos de segurança.

Sob a perspectiva da confiabilidade operacional, a definição de um ponto específico e de uma sequência padronizada para a realização das medições representou um avanço em relação à condição anterior. A estabilização temporária do conjunto no ponto de leitura contribuiu para reduzir variações relacionadas à forma de execução do procedimento e estabeleceu condições mais uniformes para aquisição dos valores. Entretanto, os dados disponíveis não permitiram afirmar superioridade metrológica em termos de exatidão ou incerteza de medição, uma vez que essa conclusão exigiria resultados de calibração, especificações completas do equipamento e comparação com instrumentos de referência. Assim, o ganho demonstrado esteve principalmente relacionado à padronização operacional da medição.

Os resultados também evidenciaram benefícios relacionados à racionalização das atividades desenvolvidas pelos trabalhadores. O tempo anteriormente destinado ao deslocamento até a plataforma e à realização periódica da leitura deixou de ser necessário nas mesmas condições após a implantação. A atuação do colaborador passou a concentrar-se mais no acompanhamento das informações disponibilizadas pelo sistema e na interpretação das condições do processo. Essa mudança demonstra como a automação pode ser empregada não simplesmente para substituir a participação humana, mas para modificar sua função dentro do processo, transferindo atividades repetitivas de aquisição de dados para sistemas tecnológicos integrados.

Quanto aos aspectos econômicos, foram identificados elementos que indicaram potencial de redução de custos, principalmente em razão da alteração do método de medição e da diminuição da utilização de componentes consumíveis associados ao procedimento anterior. Contudo, a ausência, nesta



etapa do estudo, de informações consolidadas sobre quantidade efetivamente consumida, custos unitários, manutenção e demais despesas não permitiu estabelecer com segurança a economia financeira mensal ou anual proporcionada pela implantação. Essa limitação foi considerada importante para preservar a consistência dos resultados, evitando apresentar benefícios econômicos que não estivessem sustentados por registros documentais e indicadores quantitativos.

De maneira geral, os objetivos propostos foram atendidos ao permitir caracterizar o procedimento anterior, descrever o sistema implantado e analisar as principais alterações decorrentes de sua incorporação ao processo industrial. A comparação entre os cenários demonstrou avanços relacionados à redução da dependência da medição manual, à padronização do ponto de aquisição, à integração da leitura à sequência operacional, à disponibilização da temperatura na IHM e à redução da necessidade de aproximação do colaborador para executar a medição. Esses resultados reforçam a relevância da utilização de tecnologias de monitoramento integradas à automação em processos industriais submetidos a condições térmicas severas.

Por fim, concluiu-se que a implantação do sistema de medição de temperatura sem contato contribuiu para o aprimoramento do monitoramento térmico do processo de fundição analisado, principalmente pela integração entre aquisição, transmissão, supervisão e utilização da informação durante a operação. Como possibilidade de continuidade, recomenda-se ampliar o período de acompanhamento e incorporar indicadores quantitativos referentes à frequência das medições, tempo de operação, custos, manutenção, calibração, incerteza de medição, consumo de materiais e registros de segurança. A inclusão desses parâmetros poderá aprofundar a avaliação dos benefícios técnicos e econômicos da solução, além de fornecer subsídios para aperfeiçoamentos futuros e para a possível aplicação de sistemas semelhantes em outras etapas do processo industrial.

REFERÊNCIAS

- ALCÁCER, V., & CRUZ-MACHADO, V. (2019). Scanning the Industry 4.0: A literature review on technologies for manufacturing systems. **Engineering Science and Technology, an International Journal**, 22(3), 899–919.
- BELIKOV, R., MERGES, D., VARENTSOV, D., et al. (2024). Fast multi-wavelength pyrometer for dynamic temperature measurements. **International Journal of Thermophysics**, 45, Article 29.
- CAMPBELL, J. (2015). Complete casting handbook: Metal casting processes, metallurgy, techniques and design (2nd ed.). **Butterworth-Heinemann**.
- GILCHRIST, A. (2016). Industry 4.0: The industrial internet of things. **Apress**.
- GIL, A. C. (2019). Métodos e técnicas de pesquisa social (7ª ed.). **Atlas**.



- GROOVER, M. P. (2020). Fundamentals of modern manufacturing: Materials, processes, and systems (7th ed.). **John Wiley & Sons**.
- JAVAID, M., et al. (2021). Sensors for daily life: A review. **Sensors International**, 2.
- JORGE, V. L., TEIXEIRA, F. R., & SCOTTI, A. (2022). Pyrometrical interlayer temperature measurement in WAAM of thin wall: Strategies, limitations and functionality. **Metals**, 12(5), Article 765.
- KALPAKJIAN, S., & SCHMID, S. R. (2014). Manufacturing engineering and technology (7th ed.). **Pearson**.
- LEONIDAS, E., et al. (2022). A comparative review of thermocouple and infrared radiation temperature measurement methods during the machining of metals. **Sensors**, 22(13), Article 4693.
- MCGEE, T. D. (1988). Principles and methods of temperature measurement. **John Wiley & Sons**.
- MINKINA, W., & DUDZIK, S. (2009). Infrared thermography: Errors and uncertainties. **John Wiley & Sons**.
- NICHOLAS, J. V., & WHITE, D. R. (2001). Traceable temperatures: An introduction to temperature measurement and calibration (2nd ed.). **John Wiley & Sons**.
- PRODANOV, C. C., & FREITAS, E. C. (2013). Metodologia do trabalho científico: Métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico (2ª ed.). **Feevale**.
- STEFANESCU, D. M. (2015). Science and engineering of casting solidification (3rd ed.). **Springer**.
- YIN, R. K. (2015). Estudo de caso: Planejamento e métodos (5ª ed.). **Bookman**.