



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
UNIDADE ARAXÁ

DIEGO FERREIRA DA SILVA

**APLICAÇÃO DE AUTOMAÇÃO EM PROCESSO DE ÁGUA GELADA EM UMA
INDÚSTRIA DE ARAXÁ**

Araxá/MG

2026

Diego Ferreira da Silva

**APLICAÇÃO DE AUTOMAÇÃO EM PROCESSO DE ÁGUA GELADA EM UMA
INDÚSTRIA DE ARAXÁ**

Trabalho de conclusão de curso,
apresentado ao Curso de Engenharia de
Automação Industrial, do Centro Federal
de Educação Tecnológica de Minas Gerais
- CEFET/MG, como requisito parcial para
obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia de Automação Industrial.

Orientador: Prof. Dr. Luís Paulo Fagundes

Araxá/MG

2026

Silva, Diego Ferreira da.
S586a Aplicação de automação em processo de água gelada em uma
 indústria de Araxá / Diego Ferreira da Silva. – 2026.
 60 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Luís Paulo Fagundes.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Centro Federal de
Educação Tecnológica de Minas Gerais. *Campus* Araxá. Engenharia de
Automação Industrial, Departamento de Eletromecânica, Araxá, 2026.
Bibliografia.

1. Automação industrial. 2. Controle automático. 3. Controladores
programáveis. 4. Automação. I. Fagundes, Luís Paulo. II. Centro Federal
de Educação Tecnológica de Minas Gerais. III. Título.

CDU 681.5(815.1)



FOLHA DE APROVAÇÃO DE TCC Nº 2 / 2026 - DELMAX (11.57.05)

Nº do Protocolo: 23062.034958/2026-12

Araxá-MG, 07 de julho de 2026.

DIEGO FERREIRA DA SILVA

**APLICAÇÃO DE AUTOMAÇÃO EM PROCESSO DE ÁGUA GELADA EM UMA
INDÚSTRIA DE ARAXÁ**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de **Engenharia de Automação Industrial** do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, do Campus **Araxá**, como parte do requisito para obtenção do grau de Bacharel em **Engenharia de Automação Industrial**.

Aprovado em **18 de junho de 2026**.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Luis Paulo Fagundes - Orientador
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Profa. Dra. Fabiana Alves Pereira
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Prof. Dr. Frederico Duarte Fagundes
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

**Araxá
2026**

(Assinado digitalmente em 07/07/2026 14:10)

FABIANA ALVES PEREIRA
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DELMAX (11.57.05)
Matrícula: 1281564

(Assinado digitalmente em 13/07/2026 09:30)

FREDERICO DUARTE FAGUNDES
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DELMAX (11.57.05)
Matrícula: 1107165

(Assinado digitalmente em 08/07/2026 09:03)

LUIS PAULO FAGUNDES
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DELMAX (11.57.05)
Matrícula: 2993114

(Assinado digitalmente em 07/07/2026 15:09)

DIEGO FERREIRA DA SILVA
DISCENTE
Matrícula: 20213000480

Visualize o documento original em <https://sig.cefetmg.br/public/documentos/index.jsp>
informando seu número: **2**, ano: **2026**, tipo: **FOLHA DE APROVAÇÃO DE TCC**, data de emissão:
07/07/2026 e o código de verificação: **9cd120c301**

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por Sua infinita bondade, pela saúde, sabedoria e força concedidas ao longo desta caminhada. Reconheço que, sem Sua presença constante, não teria alcançado esta etapa tão significativa.

Aos meus familiares, registro minha gratidão pelo apoio, pela confiança e por acreditarem em meu potencial, mesmo nos momentos de maior dificuldade. Aos meus pais, agradeço de maneira especial, pois desde o início se fizeram presentes com dedicação, cuidado e incentivo. Seja por meio de gestos de ternura, seja por palavras de conforto e orientação, vocês foram essenciais para que eu seguisse em frente.

À minha esposa, Gabriela Carvalho Rios, expresso meu profundo agradecimento por ter caminhado ao meu lado durante toda a graduação. Obrigado pelo zelo, pela parceria, pela compreensão e pelo apoio incondicional em cada etapa, além do aprendizado que construímos juntos.

Agradeço também a todos que, de alguma forma, estiveram comigo e não pouparam esforços para oferecer apoio, especialmente nos momentos mais conturbados. Sou grato pela paciência, pela escuta e pela capacidade de trazer serenidade e ânimo quando mais precisei.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Luís Paulo Fagundes, agradeço pela confiança, pelo suporte, pelas correções criteriosas, incentivos e contribuições acadêmicas, fundamentais para o aprimoramento deste trabalho.

A todos, deixo meu sincero muito obrigado.

RESUMO

A automação industrial tem se consolidado como elemento estruturante da Indústria 4.0, ao integrar ativos, sensores e plataformas de controle para elevar a eficiência, a qualidade e a segurança operacional em sistemas produtivos. Este trabalho analisa, no contexto de uma pesquisa aplicada com desenvolvimento/implantação de uma solução de automação industrial em um processo anteriormente manual em uma metalúrgica no município de Araxá (MG), uma proposta de automatização aplicada ao *Water Chiller* - sistema de água gelada e às rotinas operacionais associadas, uma vez que falhas recorrentes nesse equipamento vinham comprometendo a continuidade de uma etapa crítica do processo produtivo. Metodologicamente, adotou-se uma pesquisa de campo de abordagem qualitativa e quantitativa e caráter descritivo, complementada pela estratégia de estudo de caso, para analisar em profundidade seu contexto real, através de inspeção visual e análises técnicas, o problema foi caracterizado e seus fatores determinantes delimitados, subsidiando a definição de uma arquitetura de automação baseada em instrumentação, lógica de controle em CLP – Controlador Lógico Programável e camada supervisória no *FactoryTalk View*. A solução proposta integra sensores, atuadores e sistema supervisório para monitorar continuamente o sistema de água gelada, gerar alarmes e padronizar respostas operacionais, favorecendo o diagnóstico preventivo e a tomada de decisão em tempo real. Dessa forma, os resultados demonstram que a automação, eleva a confiabilidade operacional, elimina paradas associadas a falhas, contribui para maior eficiência produtiva, além de possibilitar o monitoramento on-line do processo.

Palavras-Chave: Automação industrial. Estudo de caso. *Water Chiller*. Confiabilidade e segurança operacional.

ABSTRACT

Industrial automation has become a core structural element of Industry 4.0 by integrating assets, sensors, and control platforms to improve efficiency, quality, and operational safety in production systems. This study analyzes, within the context of applied research involving the development and implementation of an industrial automation solution in a previously manual process at a metallurgical company located in Araxá, Minas Gerais, Brazil, an automation proposal applied to the *Water Chiller* — chilled water system — and its associated operational routines, since recurring failures in this equipment had been compromising the continuity of a critical stage of the production process. Methodologically, field research with a qualitative and quantitative approach and a descriptive nature was adopted, complemented by a case study strategy to analyze the real-world context in depth. Through visual inspections and technical analyses, the problem was characterized and its determining factors were delimited, supporting the definition of an automation architecture based on instrumentation, PLC — Programmable Logic Controller — control logic, and a supervisory layer using *FactoryTalk View*. The proposed solution integrates sensors, actuators, and a supervisory system to continuously monitor the *chilled water* system, generate alarms, and standardize operational responses, supporting preventive diagnosis and real-time decision-making. Therefore, the results demonstrate that automation increases operational reliability, eliminates downtime associated with failures, contributes to greater production efficiency, and enables online monitoring of the process.

Keywords: Industrial automation. Case study. *Water Chiller*. Reliability and operational safety.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - <i>Water Chiller</i> condensação por ar	19
Figura 2 - Investigação das quebras dos compressores	21
Figura 3 – Árvore de Causas de Falhas.....	22
Figura 4 - RF-02 (Sem Automação e com Compressores Scroll).....	23
Figura 5 – Esboço da proposta de automatização	25
Figura 6 - Arquitetura de interligação PIT	34
Figura 7 - Interligação LIT - Nível TQ200	36
Figura 8 - Sensor de Nível Ultrassônico Siemens	39
Figura 9 - Sensor de pressão para cálculo da densidade	40
Figura 10 - Transmissor de Pressão	40
Figura 11 - Elemento Sensor + Transmissor	41
Figura 12 - Transmissor de Vazão	42
Figura 13 - Chave de Fluxo	43
Figura 14 - Arquitetura de interligação chave fluxo	43
Figura 15 - CLP <i>CompactLogix</i> Instalado in loco	44
Figura 16 – Válvula/ Atuador Pneumático.....	45
Figura 17 – Arquitetura de interligação	45
Figura 18 – Lógica de status abertura/fechamento válvula	46
Figura 19 - Tela supervisório variáveis	47
Figura 20 - Tela gráfica das medições online	48
Figura 21 - Ladder alarmes CLP	49
Figura 22 - Histórico e detalhes online variáveis.....	50
Figura 23 - Monitoramento online das variáveis e controle do processo.....	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Lista dos sinais	28
Tabela 2 - Descritivo dos alarmes.....	29
Tabela 3 – Custos operacionais com a intervenção	37
Tabela 4 – Custos operacionais associados às paradas.....	37

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CLP	Controlador Lógico Programável
COP	Coeficiente de Performance (ou Desempenho)
FactoryTalk View	Software supervisão utilizado para operação, monitoramento e visualização de processos industriais.
FIT	Transmissor Indicador de Vazão
LIT	Transmissor Indicador de Nível
PIT	Transmissor Indicador de Pressão
PT100	Sensor de temperatura do tipo RTD, com resistência nominal de 100 ohms a 0 °C.
RF	Equipamento de Refrigeração
TT	Transmissor de Temperatura
TQ-200	Tanque de mistura água e monoetilenoglicol
TR	Tonelada de Refrigeração.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Justificativa	12
1.2	Objetivos	13
1.2.1	Objetivos Específicos	14
2	REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1	Manutenção no ambiente empresarial	15
2.1.1	Manutenção Corretiva	16
2.2	Automação de Processos Industriais	16
2.3	Instrumentação Industrial	17
2.4	<i>Water Chiller</i>	18
2.5	Compressores	19
3	METODOLOGIA	20
3.1	Estudo de Caso	20
3.2	Proposta da Automação	25
3.3	Arquitetura Geral do Sistema	26
3.4	Instrumentação do Sistema	27
3.5	Estratégia de Alarme	28
3.6	Sistema Supervisório	30
3.7	Elementos de Atuação	30
3.8	Sistema de Controle	31
3.9	Medição de Vazão	32
3.10	Medição de Temperatura	33
3.11	Medição de Pressão	33
3.12	Medição de Densidade da água gelada	34
3.13	Medição de Nível	35
3.14	Projeção de custos	36

4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	38
4.1	Transmissor de Nível	39
4.2	Densidade da água gelada	39
4.3	Transmissor de pressão	40
4.4	Transmissor de temperatura	41
4.5	Transmissor de Vazão	42
4.6	CLP <i>CompactLogix</i> instalado na planta	44
4.7	Válvula Pneumática.....	45
4.8	Implementação do supervisório.....	47
4.9	Monitoramento de alarme.....	49
4.10	Aumento da previsibilidade operacional	49
4.11	Redução das paradas não planejadas.....	50
4.12	Confiabilidade e segurança de pessoas	51
4.13	Avaliação Econômica e competitividade a longo prazo	53
4.14	Discussão dos Resultados	54
5	CONCLUSÕES	56
	REFERÊNCIAS.....	58

1 INTRODUÇÃO

A automação industrial, compreendida como a aplicação de tecnologias e sistemas voltados ao controle, à supervisão e à operação de máquinas e processos, constitui um recurso fundamental para o aumento da eficiência, da qualidade e da segurança operacional (MORAES; CASTRUCCI, 2007). No contexto da Indústria 4.0, essa automação assume papel estratégico ao integrar sistemas físicos e digitais, redes industriais, sensores, controladores e plataformas de supervisão, possibilitando maior conectividade, monitoramento em tempo real e tomada de decisão baseada em dados (SACOMANO, 2018).

No ambiente industrial contemporâneo, a automação deve ser compreendida não apenas como substituição de atividades repetitivas, mas como rearranjo sociotécnico que desloca o papel do operador de execução direta para funções de supervisão, intervenção e decisão apoiadas por sistemas computacionais (MORAES; CASTRUCCI, 2007). Nesse contexto, a integração de ativos, sensores e plataformas de controle amplia a capacidade de monitorar, analisar e atuar sobre o processo com base em informações continuamente atualizadas, viabilizando coordenação em tempo real por redes industriais (SANTOS, 2018).

Investigar a automação industrial sob uma perspectiva acadêmico-científica não apenas aprofunda o corpo de conhecimento em engenharia, mas também fundamenta a transformação de ambientes produtivos por meio de modelos, métodos e evidências que orientam decisões de projeto, operação e gestão (MORAES; CASTRUCCI, 2007).

Como resultado, tende-se a observar menor variabilidade de desempenho e maior repetibilidade, sobretudo em operações suscetíveis a intervenções manuais e a oscilações de procedimento (RIBEIRO; TEN CATEN, 2012). Em uma perspectiva sistêmica, a automação contribui simultaneamente para a qualidade e homogeneidade do produto, além de favorecer ganhos de produtividade e racionalização de custos, na medida em que integra dispositivos, lógica de controle e supervisão para apoiar decisões operacionais.

Nesse contexto, a elevação da confiabilidade e da disponibilidade dos ativos contribui para a continuidade operacional, a redução de falhas, paradas não

planejadas, perdas e retrabalhos, além de favorecer a segurança operacional e ocupacional. (KARDEC; NASCIF, 2013).

O sistema de água gelada *Water Chiller* é amplamente utilizado no resfriamento dos processos industriais que precisam de uma troca térmica e resfriamento do produto. Em processos dessa natureza, o controle térmico constitui um requisito fundamental para a estabilidade operacional, uma vez que as reações químicas são diretamente influenciadas pelas condições de temperatura às quais as matérias-primas são submetidas (DOSSAT, 2004).

Diante desse contexto, houve uma aplicação de melhoria de automação em uma planta química em metalúrgica mineira no município de Araxá, uma etapa crítica do sistema produtivo vinha sendo comprometida por falhas recorrentes em um equipamento essencial — *Water Chiller* (Equipamento de resfriamento de água ou de outros líquidos). constatou-se a ausência de automatização tanto do equipamento quanto das rotinas operacionais associadas, o que reforça a necessidade de modernização do processo e de adoção de estratégias de controle e monitoramento mais robustas através da Automação Industrial.

O trabalho teve como ponto focal automatizar o sistema de água gelada, **no qual foram identificadas falhas recorrentes que comprometiam a continuidade operacional de uma etapa crítica do processo produtivo**. Por meio de verificações em campo, inspeções visuais e análises técnicas das condições de operação, buscou-se caracterizar o problema e identificar os principais fatores associados às ocorrências observadas. **Com base nesse diagnóstico, foi proposta uma intervenção voltada à automação industrial, com o propósito de aumentar a robustez operacional, reduzir a recorrência de falhas e paradas não planejadas, além de elevar a confiabilidade e a segurança do sistema.**

1.1 Justificativa

Neste trabalho, a justificativa consolida-se na análise de uma planta metalúrgica situada em Araxá-MG. Identificou-se que a continuidade operacional de uma etapa crítica do processo é recorrentemente comprometida por falhas no sistema de utilidades, especificamente no *Water Chiller* (unidade de água gelada). A ausência

de uma camada de automatização e de rotinas de monitoramento digital evidencia uma fragilidade que transcende o nível mecânico, representando uma oportunidade estratégica de modernização tecnológica.

A criticidade do sistema de refrigeração é ampliada pelo regime de operação contínua adotado pela unidade industrial. O processo opera vinte e quatro horas por dia, sete dias por semana, exigindo elevados índices de disponibilidade dos equipamentos que compõem o sistema. Nesse contexto, qualquer falha associada ao sistema de água gelada possui potencial para impactar diretamente a produtividade da planta.

No caso analisado, verificou-se que o sistema de água gelada apresentava ausência de monitoramento automatizado das principais variáveis do processo. Antes da automatização, a identificação de desvios dependia predominantemente de verificações locais, inspeções manuais ou percepção dos operadores, o que limitava a agilidade na detecção de anomalias. Essa condição reduzia a capacidade de atuação e dificultava o acompanhamento histórico do comportamento operacional do sistema.

Adicionalmente, sob a ótica da gestão de ativos e confiabilidade de sistemas, por meio de monitoramento contínuo, lógica de alarmes e padronização de respostas, contribui diretamente para a redução de paradas não programadas e para o fortalecimento da segurança operacional.

Portanto, a necessidade de implantar, instrumentos de medição e supervisão capaz de monitorar continuamente variáveis como temperatura, vazão, pressão e nível. A integração desses instrumentos ao controlador lógico programável e ao sistema supervisório permite que as informações sejam disponibilizadas em tempo real, ampliando a visibilidade operacional e possibilitando respostas mais rápidas diante de desvios.

1.2 Objetivos

Desenvolver, executar e analisar no contexto de uma pesquisa aplicada em uma metalúrgica no município de Araxá, uma automatização do sistema de água gelada *Water Chiller* e de suas rotinas operacionais associadas, contemplando

instrumentação, arquitetura de controle em CLP e supervisão, de modo a aumentar a robustez operacional, reduzir a recorrência de falhas e paradas não planejadas, e elevar a confiabilidade e a segurança operacional do processo produtivo suportado por esse sistema.

1.2.1 Objetivos Específicos

- Caracterizar o processo produtivo afetado e o papel do sistema de água gelada *Water Chiller* na continuidade operacional da etapa crítica;
- Especificar os dispositivos e Instrumentos necessários à automação do processo e suas arquiteturas lógicas;
- Estruturar a da lógica de alarmes;
- Apresentar uma síntese de melhorias advindas da automatização do processo de resfriamento de água do *Water Chiller*.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Manutenção no ambiente empresarial

De acordo com Motter (1992), a manutenção tem assumido crescente relevância no ambiente industrial por contribuir para a preservação e a ampliação da vida útil de materiais e equipamentos, bem como para a melhoria da qualidade do produto e a mitigação de paradas não planejadas, com impactos diretos na redução de perdas e prejuízos associados à interrupção da produção.

Nessa perspectiva, ao sustentar maior estabilidade operacional e favorecer o cumprimento de prazos e padrões de qualidade, a manutenção tende a preservar a satisfação dos clientes, especialmente no que se refere à confiabilidade das entregas. Ademais, reconhece-se que, em qualquer organização, a manutenção desempenha papel estratégico ao elevar a confiabilidade dos equipamentos, apoiar a qualidade e reduzir desperdícios ao longo do processo produtivo (MALPAGA, 2009).

De modo geral, Costa Júnior (2008) argumenta que a manutenção pode ser compreendida como um indicador da forma como as organizações estruturam e conduzem suas operações, na medida em que reflete práticas de gestão, planejamento e controle aplicadas aos ativos físicos. Nessa perspectiva, sua finalidade não se limita à correção de falhas, mas envolve sobretudo a prevenção de paradas desnecessárias e/ou não programadas, contribuindo para a preservação das instalações e para a continuidade operacional em níveis compatíveis com os requisitos do processo produtivo.

No campo da engenharia, a manutenção pode ser compreendida como um processo que ultrapassa o domínio estritamente técnico, configurando-se também como uma mudança cultural no interior das organizações (MALPAGA, 2009), em complemento, pode ser interpretada como expressão de reconfigurações nas estratégias de trabalho e nas práticas operacionais das indústrias, na medida em que redefine prioridades, rotinas e critérios de desempenho associados à gestão de ativos (COSTA, 2015).

2.1.1 Manutenção Corretiva

A manutenção corretiva é realizada após a ocorrência de uma falha ou parada inesperada, com o objetivo de restabelecer as condições necessárias para que o equipamento volte a desempenhar sua função requerida (KARDEC; NASCIF, 2013, p. 51). De modo semelhante, Mirshawka e Olmedo (1993) afirmam que esse tipo de manutenção ocorre quando o equipamento apresenta quebra ou passa a operar em uma condição inadequada de desempenho.

Em geral, quando não há acompanhamento sistemático das condições dos ativos, as falhas tendem a surgir de forma imprevisível, podendo assumir maiores proporções e comprometer a continuidade do processo produtivo. Assim, a manutenção corretiva mostra-se mais viável em situações nas quais os custos associados ao reparo, à substituição do equipamento ou à disponibilidade de um equipamento reserva sejam inferiores aos custos de implantação de estratégias preventivas ou preditivas de manutenção.

Segundo Kardec e Nascif (2013), a aplicação de uma técnica sistemática de análise permite a redução de manutenções corretivas. Sendo assim, pode-se considerar o emprego da manutenção preditiva como uma maneira de garantir a qualidade do serviço desejado por meio da previsão de possíveis falhas.

2.2 Automação de Processos Industriais

Moraes e Castrucci (2007) definem automação como um sistema apoiado por recursos computacionais capaz de substituir, total ou parcialmente, o trabalho humano, agregando valor ao processo ao elevar a qualidade do produto, reduzir custos e aumentar a produtividade, sem comprometer a segurança das pessoas. Nessa perspectiva, a automação constitui instrumento de aperfeiçoamento de processos industriais e de serviços, com potencial de contribuir para o bem-estar humano.

A automação pode ser compreendida como um campo tecnológico interdisciplinar que articula mecânica, eletrônica e sistemas computacionais com o

propósito de auxiliar e/ou executar funções em processos produtivos, ampliando a eficiência e reforçando a segurança operacional (GROOVER, 2001).

Nesse contexto, um dos principais vetores de adoção da automação reside na busca por maior qualidade e flexibilidade dos processos, uma vez que o aumento de eficiência dos equipamentos pode reduzir custos operacionais e, por consequência, fortalecer a competitividade organizacional (MARÇAL, 2013).

2.3 Instrumentação Industrial

A instrumentação industrial constitui uma das áreas fundamentais da engenharia de controle e automação, sendo responsável pela medição, monitoramento, transmissão e controle das variáveis envolvidas nos processos produtivos, como temperatura, vazão, nível e pressão. Sua principal finalidade consiste em fornecer informações confiáveis e em tempo real sobre as condições operacionais dos sistemas industriais, permitindo que decisões de controle sejam executadas de forma precisa, segura e eficiente (BEGA, 2011).

Segundo Bega (2011), a instrumentação pode ser definida como o conjunto de dispositivos, sensores, transmissores, controladores e elementos finais de controle empregados para medir, indicar, registrar e controlar variáveis físicas ou químicas de um processo industrial. Essas variáveis podem incluir temperatura, pressão, nível, vazão, densidade, umidade e velocidade, entre outras grandezas relevantes para o funcionamento dos sistemas produtivos.

Os instrumentos industriais podem ser classificados de acordo com suas funções dentro da malha de controle. Entre os principais grupos destacam-se os instrumentos indicadores, responsáveis pela apresentação local das variáveis medidas; os instrumentos registradores, que armazenam informações para posterior análise; os transmissores, que convertem e enviam sinais para sistemas de controle; os transdutores, que transformam uma grandeza física em outra forma de energia; e os controladores, responsáveis pela tomada de decisão dentro da estratégia de controle implementada (BEGA, 2011).

Dentro da arquitetura de automação industrial, os sensores desempenham papel fundamental, uma vez que constituem a interface entre o processo físico e o

sistema de controle. Esses dispositivos são responsáveis pela detecção das variáveis de interesse e pela geração de sinais proporcionais às condições reais do processo. A qualidade das medições fornecidas pelos sensores influencia diretamente a precisão das estratégias de controle, a confiabilidade operacional e a segurança da instalação industrial (THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2020).

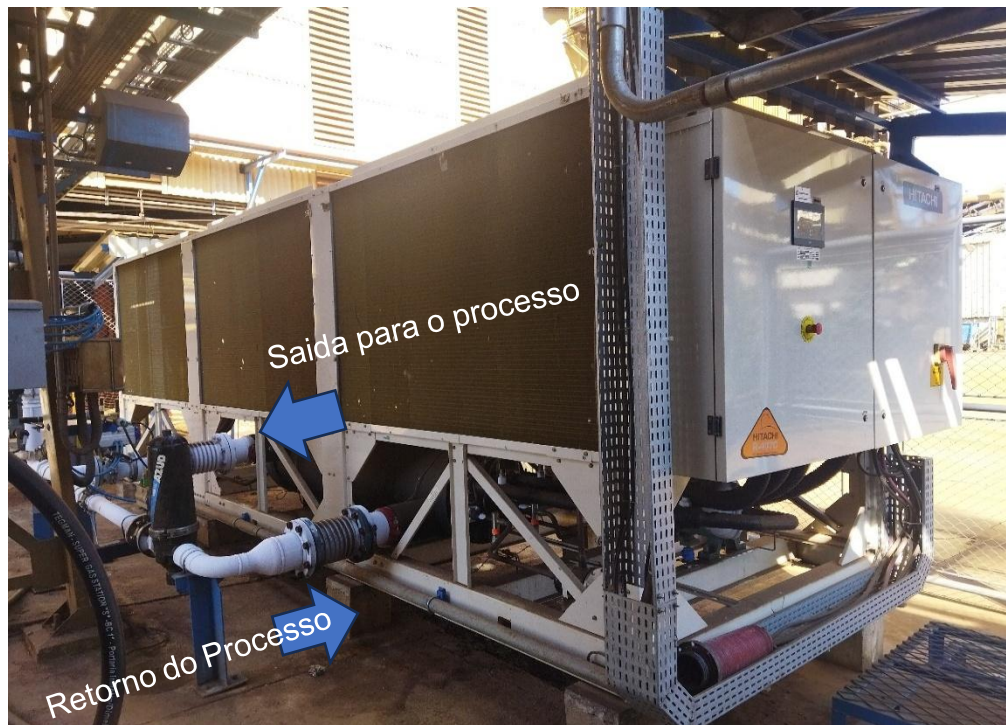
Nesse contexto, a instrumentação industrial desempenha papel estratégico na busca pela excelência operacional, permitindo maior disponibilidade dos equipamentos, redução de custos de manutenção, aumento da eficiência energética e melhoria contínua da qualidade dos produtos e serviços. Dessa forma, sua aplicação torna-se indispensável em sistemas industriais críticos, como os processos de refrigeração industrial, nos quais a manutenção adequada das variáveis operacionais é essencial para garantir a estabilidade produtiva e a integridade dos equipamentos (THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2020).

2.4 *Water Chiller*

O funcionamento de um *Water Chiller* baseia-se no ciclo de refrigeração por compressão de vapor, um sistema térmico que opera em regime permanente para transferir calor de uma fonte fria para uma fonte quente. Segundo Moran et al. (2005), este ciclo é composto por quatro processos fundamentais: compressão isentrópica, rejeição de calor isobárica no condensador, expansão isoentálpica e absorção de calor isobárica no evaporador.

Na Figura 1, apresenta uma instalação real em campo de um equipamento de condensação por ar, e as conexões de tubulações de retorno do processo e saída para o processo, são destacadas para entendimento do fluxo de funcionamento, sendo onde ocorre retorno de vapor, afetando diretamente o circuito frigorífico e compressores.

Figura 1 - Water Chiller condensação por ar



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

A eficiência deste sistema é quantificada pelo COP, definido como a razão entre a capacidade de refrigeração obtida no evaporador e o trabalho despendido pelo compressor. Dossat (2004) ressalta que a seleção do fluido refrigerante é crítica, devendo apresentar propriedades termo físicas que permitam altas taxas de transferência de calor e pressões de operação seguras.

Instalações de água gelada com *Water Chiller* são concebidas para atender elevadas cargas térmicas em processos industriais e sistemas de climatização, sendo usualmente classificadas quanto ao método de rejeição de calor no condensador, isto é, pela forma de condensação do refrigerante, podendo ser por condensação por água ou por ar (DOSSAT, 2004).

2.5 Compressores

O compressor é considerado o principal componente do ciclo de compressão de vapor, sendo responsável por elevar a pressão e a temperatura do fluido refrigerante proveniente do evaporador, possibilitando sua condensação e a

continuidade do processo de refrigeração. Sua função consiste em aspirar o fluido refrigerante em baixa pressão e descarregá-lo em alta pressão, fornecendo a energia necessária para que ocorra a transferência de calor entre os ambientes refrigerado e externo (DOSSAT, 2004).

Segundo Miller (2008) o princípio de funcionamento dos compressores baseia-se na redução do volume ocupado pelo fluido refrigerante em estado gasoso, provocando o aumento de sua pressão. Durante o processo de compressão, ocorre também a elevação da temperatura do fluido em razão do trabalho mecânico realizado sobre ele. No ciclo de compressão, o refrigerante é admitido pelo compressor na condição de vapor superaquecido a baixa pressão, sendo então comprimido e descarregado para o condensador em alta pressão e temperatura. Esse processo é fundamental para garantir a rejeição de calor no condensador e a continuidade do ciclo termodinâmico de refrigeração. A eficiência do compressor influencia diretamente o desempenho energético do sistema, sendo um dos principais fatores relacionados ao coeficiente de performance (COP) da instalação frigorífica.

Os compressores utilizados em sistemas de refrigeração podem ser classificados de acordo com seu princípio construtivo e mecanismo de compressão, destacando-se os modelos alternativos, scroll, parafuso, centrífugos e de palhetas rotativas. A seleção da tecnologia mais adequada depende de fatores como capacidade frigorífica requerida, faixa de operação, eficiência energética, custo de manutenção e confiabilidade operacional (MILLER, 2008).

De acordo com Dossat (2004), em aplicações industriais de grande porte, como sistemas de água gelada empregados no resfriamento de processos produtivos, a escolha do compressor exerce influência direta sobre a disponibilidade do sistema, o consumo energético e a estabilidade operacional da planta, tornando-se um dos aspectos mais relevantes no projeto e na operação de sistemas frigoríficos industriais.

3 METODOLOGIA

3.1 Estudo de Caso

No âmbito desta automatização, realizou-se uma investigação sistemática sobre a ocorrência de falhas contínuas e quebras recorrentes em unidades de água gelada (*Water Chiller*) instalados na planta química da metalúrgica, com

compressores do tipo *scroll*. A investigação foi estruturada com foco em diagnóstico orientado por **evidências**.

Na Figura 2, apresenta os diagnósticos realizamos em campo, com a abertura dos compressores, para avaliar as partes mecânicas e elétrica, buscando delimitar o comportamento do problema (frequência, condições de ocorrência e efeitos sobre o processo), caracterizar seus mecanismos prováveis e, sobretudo, identificar a causa fundamental (causa raiz) associada às condições operacionais e/ou às características do equipamento e de sua integração ao sistema.

As investigações conduzidas em relação às unidades de *Water Chiller* foram estruturadas com base em inspeções de campo e ferramentas de gestão de melhoria contínua (*Kaizen*) ao longo de 4 meses, buscando caracterizar o padrão de ocorrência das falhas, identificar as condições operacionais associadas aos eventos e estabelecer a relação causal entre o regime de operação do processo e o comportamento do sistema de refrigeração.

Figura 2 - Investigação das quebras dos compressores



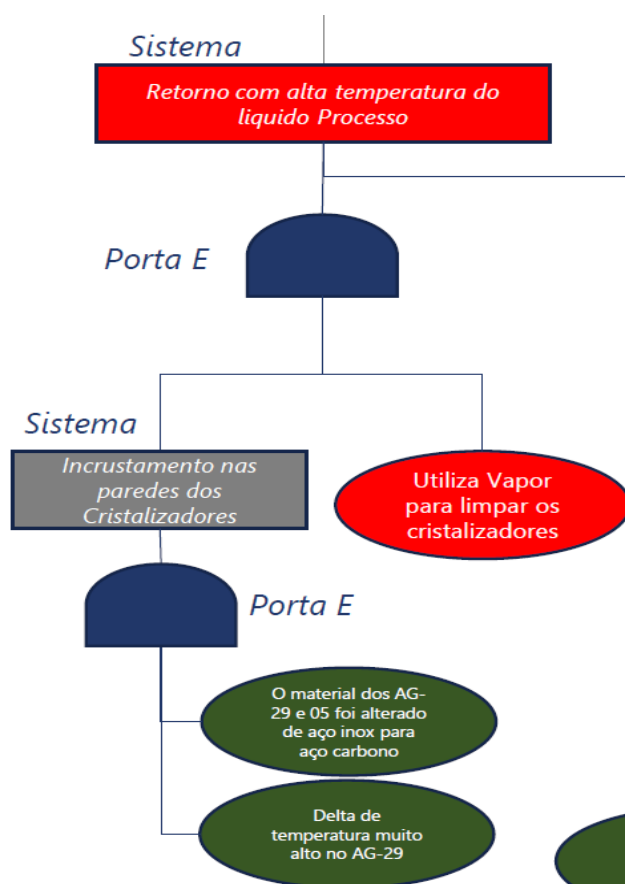
Fonte: Elaborado pelo Autor (2025).

A análise evidenciou que a recorrência das quebras estava associada a condições operacionais adversas, notadamente à ocorrência de retorno de vapor na linha de água gelada, decorrente de operações manuais de válvulas de vapor, manobradas durante o processo de limpeza dos reatores. Na Figura 3, temos a apresentação da causa raiz, evidenciada pela aplicação da ferramenta de gestão árvore de causas e falhas, devido a quantidades de causas analisadas não foi

apresentada as demais ramificações, o fenômeno analisado tem intensificado por mudanças no ritmo operacional.

A partir desta análise, foi possível delimitar o fator gerador do problema e, conseqüentemente, fundamentar a proposição de uma estratégia de mitigação tecnicamente consistente, orientada à redução da recorrência do mecanismo identificado e ao aumento da confiabilidade operacional do sistema.

Figura 3 – Árvore de Causas de Falhas



Fonte: Elaborado pelo Autor (2024)

No caso específico desta aplicação, a estratégia de intervenção diferenciou-se por articular, de forma integrada, ações de automação, modernização do ativo e digitalização do monitoramento do sistema de água gelada. A proposta técnica contemplou (i) a substituição de unidades sem automação por *Water Chiller* com sistema automatizado e com possibilidade de integração à rede industrial, (ii) a revisão da arquitetura do conjunto motocompressor, com adoção de solução baseada em compressor do tipo parafuso e (iii) a implementação de monitoramento online via supervisão, de modo a ampliar a observabilidade do processo e reduzir a

dependência de intervenções reativas. A partir do diagnóstico, essas diretrizes foram consolidadas como um conjunto de medidas corretivas e preventivas orientadas à redução da recorrência de falhas, ao aumento da confiabilidade do sistema e à mitigação de impactos sobre a continuidade operacional do processo produtivo.

Os ativos diretamente envolvidos no escopo de ajustes e adequações correspondem às unidades identificadas pelos TAGs RF-02 e RF-04 a **Figura 4** apresenta o *Water Chiller* e o painel elétrico de acionamentos, que são idênticos ao do RF-04, instaladas na área química da metalúrgica, associadas ao fabricante Korper e potência de 90 TR.

Figura 4 - RF-02 (Sem Automação e com Compressores Scroll)



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

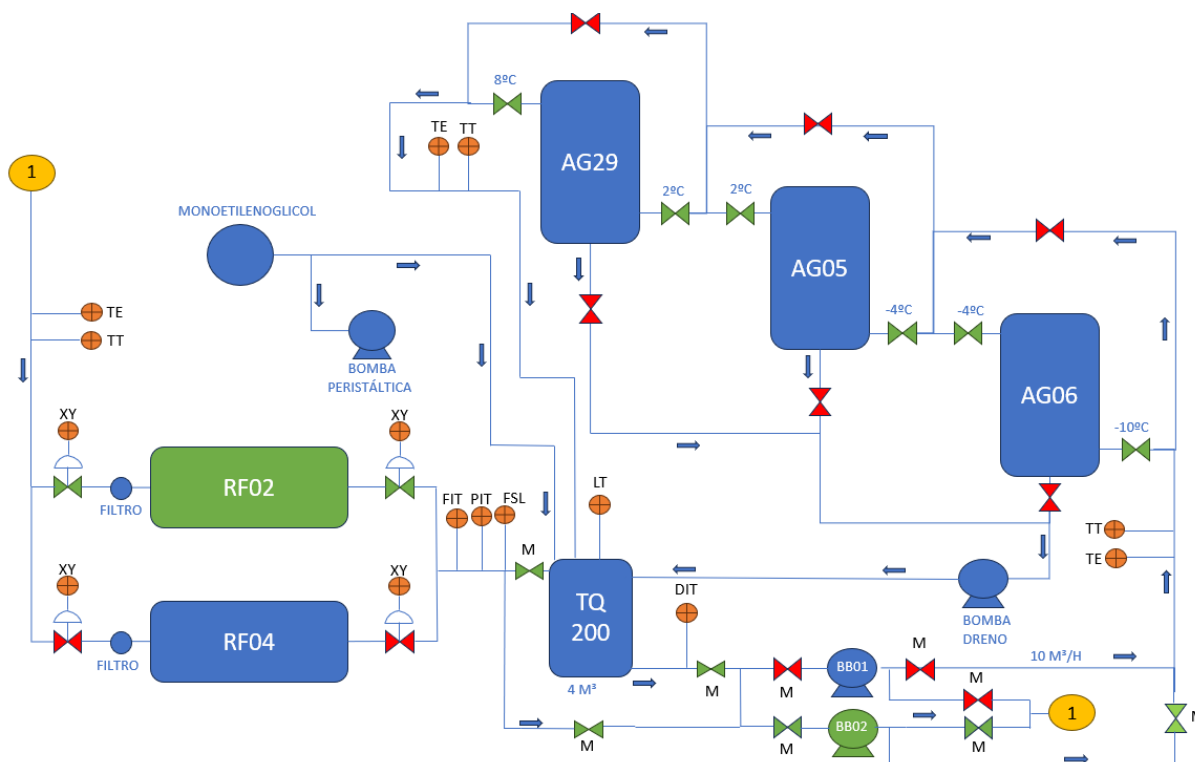
A necessidade de intervenção foi reforçada pelos achados da primeira inspeção, que evidenciaram a criticidade da parada para manutenção: registrou-se um total de 2.160 minutos de indisponibilidade para reparação dos danos, com custo estimado de R\$ 341,00 por minuto de parada, valores e informações disponibilizados pelos responsáveis técnicos do processo, o que caracteriza impacto econômico significativo e justifica a adoção de medidas estruturantes em vez de soluções pontuais.

No contexto técnico-operacional, foi constatada a necessidade de automatizar o sistema de água gelada, associada à incorporação de mecanismos de monitoramento online, em virtude de o modo de falha identificado ter sido relacionado ao retorno de líquido aquecido proveniente do processo produtivo. A análise realizada permitiu verificar que essa condição contribuiu significativamente para a degradação do desempenho operacional do sistema, justificando a proposição de uma arquitetura de controle e supervisão capaz de ampliar a confiabilidade, a rastreabilidade e a capacidade de resposta frente a desvios operacionais.

Dada a dimensão da demanda térmica e os requisitos operacionais, definiu-se ainda a necessidade de aquisição de dois novos *Water Chiller* de 150 TR, com temperatura mínima de trabalho de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, acompanhada da automatização do processo conforme o arranjo proposto na **Figura 5**, o esquema não se trata de um diagrama P&ID foi realizado apenas para facilitar a alocação dos instrumentos e tubulações.

Do ponto de vista metodológico, o estudo foi delineado para assegurar rastreabilidade e consistência entre o objeto de investigação, os dados coletados e as conclusões técnicas. A metodologia empregada no presente trabalho consistiu em um conjunto estruturado de procedimentos empregados para analisar o sistema em seu contexto real, incluindo (as unidades RF-02, RF-04 e sua função no processo), o levantamento de evidências a partir de inspeções e registros técnicos associados às paradas e falhas, a quantificação do impacto operacional (tempo de parada) e econômico (custo por minuto parado), e a análise das condições de operação que sustentaram o diagnóstico (retorno de vapor na linha de água e necessidade de monitoramento).

Figura 5 – Esboço da proposta de automatização



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Um aspecto relevante do sistema de água gelada refere-se às características físico-químicas do fluido armazenado no reservatório TQ-200. Diferentemente da água convencional, o fluido utilizado precisa ter densidade acima de 1030 kg/m^3 , resultado da adição de agentes anticongelantes destinados a permitir a operação do sistema em temperaturas inferiores ao ponto de congelamento da água.

A utilização dessa solução torna-se necessária em função das condições operacionais dos *Water Chiller*, responsáveis pelo fornecimento de fluido refrigerante a temperaturas próximas de -10°C .

3.2 Proposta da Automação

Será realizado o monitoramento constante, todos os sensores acoplados ao processo e os respectivos sinais enviados ao CLP (Controlador Lógico Programável) através de um sinal analógico de 4 a 20mA, este por sua vez teve a programação e configuração criada para gerar as informações ao operador em valores conhecidos,

na relação temperatura (°C), da real situação da temperatura do processo da linha, além de ter uma configuração específica que dispara a produção *pop-ups* automáticos quando o níveis de temperatura atingirem valores pré-configurados.

Durante a operação do equipamento caso a temperatura aumente, ou seja, atinja o nível de 0 °C gera-se automaticamente na tela do supervisório um alarme para o operador e dispara *pop-ups* automático para a manutenção alertando-a para a elevação do nível da temperatura. A partir da identificação do alarme, a equipe responsável poderá avaliar a condição operacional e executar as ações corretivas previstas no procedimento interno.

A análise histórica das ocorrências registradas demonstrou que as falhas associadas aos compressores dos *Water Chiller* representavam uma das principais causas de indisponibilidade do sistema. Em função disso, verificou-se a necessidade de implementação de uma solução que não apenas eliminasse os mecanismos responsáveis pelas falhas observadas, mas que também ampliasse a capacidade de monitoramento e diagnóstico do processo.

3.3 Arquitetura Geral do Sistema

A automatização foi desenvolvida com o objetivo de aumentar a confiabilidade operacional do sistema de água gelada, reduzir a recorrência de falhas associadas ao retorno de vapor proveniente do processo produtivo e disponibilizar informações operacionais em tempo real para as equipes de operação e manutenção.

A **arquitetura implementada** foi baseada em uma estrutura distribuída composta por instrumentos de campo, CLP - Rockwell e sistema supervisório. Essa configuração permitiu a aquisição contínua das variáveis críticas do processo, o processamento das informações pelo controlador e a disponibilização dos dados em ambiente supervisório para acompanhamento operacional.

Os sinais do transmissor são disponibilizados ao sistema de automação por meio de saída analógica padronizada de 4–20 mA, permitindo sua integração direta ao CLP - CompactLogix. A utilização desse padrão de comunicação industrial proporcionou elevada imunidade a interferências eletromagnéticas, maior

confiabilidade na transmissão dos dados e facilidade de integração com a arquitetura de controle implementada.

A automatização permitiu a integração dos instrumentos de campo ao sistema de controle, garantindo transmissão contínua e segura das informações operacionais.

3.4 Instrumentação do Sistema

Para o monitoramento das condições operacionais do sistema de água gelada foram instalados instrumentos destinados à medição contínua das variáveis consideradas críticas para a integridade do processo.

O monitoramento da temperatura foi realizado por sensores do tipo PT100 instalados nos pontos estratégicos do sistema, ilustrados na Figura 4, permitindo acompanhar a temperatura ao longo do processo.

O nível do reservatório TQ-200 foi monitorado por meio de sensor ultrassônico, responsável por identificar condições de baixo nível capazes de comprometer a estabilidade operacional do equipamento.

O controle do nível do reservatório constitui outro aspecto relevante para a operação segura do sistema. Níveis inadequados podem comprometer o desempenho hidráulico do circuito, provocar cavitação em bombas e reduzir a eficiência global da instalação.

A vazão do circuito foi monitorada por um sensor de vazão magnético e transmitida ao CLP, com sinal analógico, para acompanhamento online desta variável. Foi selecionado um sensor ultrassônico de nível, entre as principais vantagens dessa tecnologia destacam-se a ausência de contato direto com o fluido, reduzido desgaste mecânico, elevada confiabilidade operacional e baixa necessidade de manutenção.

Ao todo foram implementados 7 sinais analógicos de entrada e 5 sinais discretos, utilizados para aquisição contínua das variáveis monitoradas, apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Lista dos sinais

Sinal	Tipo	Instrumento
Analogico	4 a 20 mA	DIT
Analogico	4 a 20 mA	FIT
Discreto	0 - 24V	FSL
Analogico	4 a 20 mA	LT
Analogico	4 a 20 mA	PIT
Analogico	4 a 20 mA	TT
Analogico	4 a 20 mA	TT
Analogico	4 a 20 mA	TT
Discreto	0 - 24V	XY
Discreto	0 - 24V	XY
Discreto	0 - 24V	XY
Discreto	0 - 24V	XY

Fonte: Elaborado pelo Autor (2026)

A vazão do circuito de água gelada exerce influência direta sobre a capacidade de transferência de calor entre os equipamentos de refrigeração e os reatores do processo. O monitoramento contínuo da vazão permitiu identificar situações associadas à redução do fluxo de água, condição capaz de comprometer o desempenho térmico do sistema e aumentar os riscos de falhas operacionais.

A densidade utilizou tecnologias simultânea de nível e pressão, informações disponibilizadas ao sistema de automação, uma vez que os princípios físicos empregados pelos instrumentos são distintos. O transmissor ultrassônico determina o nível a partir do tempo de propagação das ondas sonoras refletidas pela superfície do líquido, o transmissor hidrostático realiza a medição por meio da pressão exercida pela coluna líquida sobre o elemento sensor.

3.5 Estratégia de Alarme

A implementação de uma estratégia estruturada de alarmes constituiu um dos principais elementos da automatização. Em sistemas industriais críticos, a simples aquisição de dados não é suficiente para garantir a segurança operacional, sendo necessária a existência de mecanismos capazes de alertar os operadores quando determinadas variáveis ultrapassam limites previamente estabelecidos.

O primeiro grupo de alarmes foi relacionado à temperatura do sistema. Considerando que o processo de resfriamento dos reatores depende diretamente da capacidade de remoção de calor proporcionada pelos *Water Chiller*, qualquer elevação da temperatura acima 45 °C pode indicar perda de desempenho térmico ou início de degradação operacional.

O segundo grupo foi associado a densidade do monoetilenoglicol. A redução da densidade abaixo de 1030, provoca congelamentos da linha, consequentemente redução da vazão.

O terceiro grupo de alarmes foi associado à vazão do circuito hidráulico, a redução da vazão abaixo de 65 m³/h, pode comprometer a transferência de calor e aumentar o risco de falhas.

O quarto grupo de alarme foi associado ao nível do reservatório. A redução excessiva do nível, abaixo de 25% pode provocar problemas operacionais em bombas e equipamentos auxiliares, além de comprometer a estabilidade hidráulica do sistema.

Na sequência foram associados os alarmes de pressão < 2 bar e status da chave de fluxo. Assim, resumindo foram implementados alarmes destinados à identificação antecipada de condições operacionais potencialmente críticas, apresentados na Tabela 2. Sendo que, os alarmes configurados contemplaram:

Tabela 2 - Descritivo dos alarmes

Descrição do alarme	Variável monitorada	Condição de disparo	Ação esperada	Prioridade
Temperatura alta da água gelada	Temperatura	Temperatura > 40 °C	Verificar valvula de vapor, manobrar atuador de forma automatica para impedir o retorno de vapor.	Alta
Baixa densidade	Densidade	Densidade < 1030	Completar dosagem de monoetilenoglicol.	Alta
Baixa vazão de água gelada	Vazão	Vazão < 65 m ³ /h	Verificar bomba de circulação, obstrução na linha, válvulas, filtro Y e condição do medido.	Média
Nível baixo no tanque TQ-200	Nível	Nível < 25 %	Verificar volume do tanque, possibilidade de vazamento, reposição de fluido e condição do transmissor de nível.	Média
Pressão baixa na linha	Pressão	Pressão < 2 bar	Verificar circulação do fluido, sucção da bomba, nível do tanque, vazamentos e possíveis restrições no sistema.	Média
Chave de Fluxo	Vazão	Condição 0V	Verificar circulação do fluido, sucção da bomba	Alta

Fonte: Elaborado pelo Autor (2026).

Quando qualquer uma dessas condições é identificada, o sistema gera automaticamente alertas no supervisório, permitindo intervenção imediata da equipe operacional.

3.6 Sistema Supervisório

A tela do supervisório foi desenvolvida utilizando o *software FactoryTalk View*, plataforma de supervisão industrial empregada para visualização, monitoramento e acompanhamento de variáveis de processo. O uso dessa ferramenta justificou-se pela compatibilidade com a arquitetura de automação já empregada na planta industrial, facilitando assim a integração com os dispositivos de campo.

No desenvolvimento da aplicação, o *FactoryTalk View* foi utilizado para estruturar telas gráficas do sistema de água gelada, permitindo a visualização das principais variáveis monitoradas. Além disso, a ferramenta possibilitou a configuração de alarmes operacionais, indicação de estados do processo, acompanhamento de tendências e registro de eventos relevantes. Dessa forma, sua utilização contribuiu para ampliar a rastreabilidade das ocorrências, reduzir a dependência de verificações manuais em campo e apoiar a tomada de decisão pelas equipes de operação e manutenção.

As telas já existentes do sistema supervisório da planta não seguem o padrão ISA 101, desta forma, as novas telas vão manter o padrão existente, evitando a necessidade de treinamentos adicionais aos operadores.

3.7 Elementos de Atuação

Para o gerenciamento do circuito hidráulico foi utilizado um conjunto de válvula e atuador pneumático, sendo, uma válvula esfera tripartida, fabricante MGA de 3 polegadas, acionada pneumaticamente por atuador rotativo modelo VLCX92 com interface de montagem padrão NAMUR F07/F05.

A escolha desse conjunto foi fundamentada na elevada robustez mecânica, confiabilidade operacional e ampla aplicação desse tipo de

equipamento em sistemas industriais sujeitos a operação contínua, além disso, trata-se de um equipamento já disponível no estoque da empresa.

A válvula foi empregada como elemento de bloqueio automático do fluxo de água gelada, permitindo a abertura e o fechamento do circuito de forma integrada à arquitetura de automação e as condições de alarme, o sistema ao monitorar temperaturas acima de 45°C, aciona de forma automática o fechamento, impedindo o retorno do vapor para o *Water Chiller*.

O acionamento pneumático possibilita rápida resposta operacional e reduziu a dependência de intervenções manuais para execução de manobras no sistema.

3.8 Sistema de Controle

O processamento das informações foi realizado por um CLP - *Rockwell CompactLogix*, já instalado na unidade, responsável pela aquisição dos sinais de campo, execução da lógica de controle e gerenciamento dos alarmes operacionais.

A lógica desenvolvida contemplou rotinas de supervisão contínua das variáveis monitoradas, permitindo identificar desvios operacionais antes que estes evoluíssem para condições de falha. Os parâmetros de alarme foram configurados com base nos limites operacionais definidos para o sistema, conforme apresentado na seção 3.2.

A escolha dessa plataforma foi justificada pela infraestrutura de automação já existente e disponível na planta, o que favoreceu a integração com os dispositivos de campo, reduziu a necessidade de adequações adicionais e possibilitou melhor aproveitamento dos recursos técnicos previamente instalados.

No contexto deste trabalho, o controlador foi configurado para realizar a aquisição dos sinais provenientes dos instrumentos de campo, executar o processamento das informações em tempo real e disponibilizar os dados para o sistema supervisor. Essa interligação dos instrumentos de campo ao CLP permitiu que o sistema operasse de forma contínua, mantendo atualizadas as informações necessárias, fazendo a leitura em tempo real dos medidores.

3.9 Medição de Vazão

O monitoramento da vazão do circuito de água gelada foi realizado por meio de um transmissor/indicador eletromagnético de vazão, fabricante Endress+Hauser Proline modelo Promag P10, instalado na linha principal de circulação do fluido refrigerante. A seleção desse instrumento foi devido ao equipamento ser item de estoque e possuir sobressalente, além de ser um equipamento já utilizado no processo produtivo de outras unidades.

Em sistemas de água gelada, a vazão influencia diretamente a capacidade de transferência térmica entre o fluido refrigerante e os equipamentos de processo, tornando seu monitoramento indispensável para garantir a eficiência operacional dos *Water Chiller* e a estabilidade térmica dos reatores industriais.

O princípio de funcionamento do transmissor baseia-se na Lei da Indução Eletromagnética de Faraday, segundo a qual uma tensão elétrica é induzida quando um fluido eletricamente condutivo atravessa um campo magnético gerado pelo sensor. A tensão induzida é proporcional à velocidade do escoamento do fluido e é processada eletronicamente pelo transmissor para determinação da vazão volumétrica. Uma das principais vantagens dessa tecnologia é a ausência de partes móveis em contato com o fluido, eliminando problemas relacionados ao desgaste mecânico, reduzindo a necessidade de manutenção e aumentando a vida útil do equipamento. Além disso, a medição eletromagnética apresenta elevada estabilidade metrológica e baixa sensibilidade a variações de temperatura, pressão e viscosidade do fluido (BAKER, 2016).

Na mesma linha do transmissor de vazão foi instalada uma chave de fluxo IFM SI5010 opera com princípio de medição calorimétrico, também denominado térmico. Esse princípio baseia-se na remoção de calor provocada pelo escoamento do fluido ao redor do elemento sensor. Quando há circulação adequada, o fluido remove calor da ponta sensora, mantendo uma condição térmica compatível com o fluxo ajustado.

Quando ocorre redução significativa da vazão ou interrupção do escoamento, a troca térmica diminui, permitindo que o dispositivo identifique a condição anormal e altere o estado de sua saída digital, intertravando o sistema (BEGA, 2011).

3.10 Medição de Temperatura

Os sinais de temperatura do sistema foram condicionados por transmissores digitais de temperatura ECIL/INOR modelo IPAQ C330, instalados em conjunto com elemento sensor PT100. Esses dispositivos foram responsáveis pela conversão das variações de resistência elétrica dos elementos sensores em sinais padronizados de corrente 4–20 mA, compatíveis com a arquitetura de automação.

O transmissor IPAQ C330, caracteriza-se por sua elevada precisão, estabilidade operacional e flexibilidade de configuração, podendo operar com diferentes tecnologias de sensores de temperatura (ECIL; INOR, 2020). No presente trabalho, sua aplicação está associada ao sensor PT100 utilizado para monitoramento da temperatura da água gelada produzida pelos *Water Chiller*, da temperatura de entrada do processo e da temperatura de retorno do circuito de resfriamento.

As temperaturas monitoradas constituem variáveis fundamentais para avaliação do desempenho térmico do sistema de refrigeração, uma vez que permitem acompanhar continuamente a capacidade de remoção de calor do sistema e identificar desvios operacionais capazes de comprometer a estabilidade térmica dos reatores industriais.

3.11 Medição de Pressão

Foi incorporado na linha de água gelada, um transmissor indicado de pressão, fabricante IFM modelo PN2093, o instrumento foi utilizado para o monitoramento contínuo da pressão da linha de água gelada, variável fundamental para a avaliação das condições hidráulicas do circuito responsável pelo resfriamento dos reatores industriais.

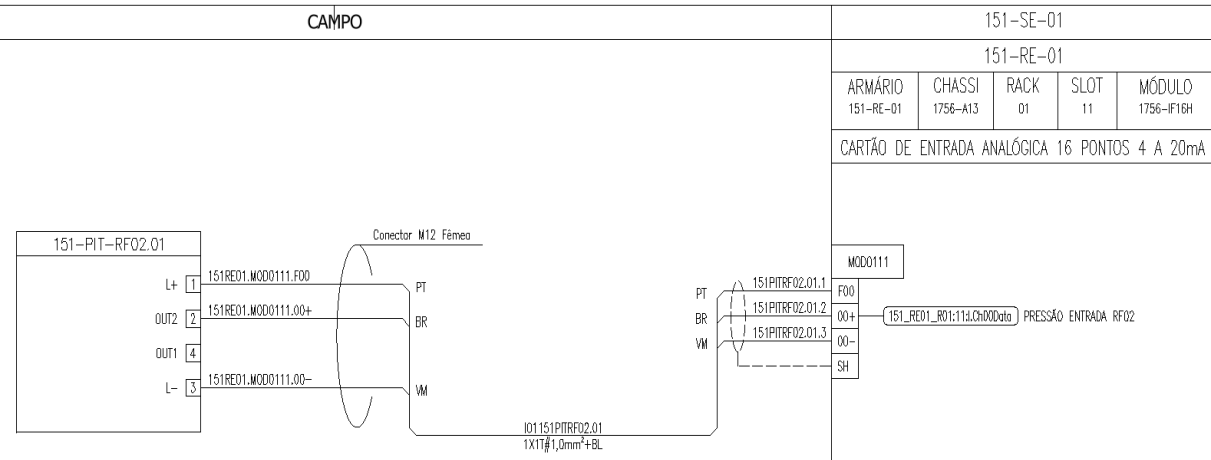
O transmissor possui princípio de medição baseado em célula cerâmica-capacitiva, tecnologia adequada para aplicações industriais que exigem robustez, estabilidade operacional e resistência a variações de pressão (DOEBELIN, 2011). O equipamento apresenta faixa de medição de -1 a 25 bar, permitindo a supervisão tanto de condições de pressão positiva quanto de situações associadas a vácuo relativo na linha.

A presença de *display* local com indicação alfanumérica também contribui para facilitar inspeções em campo, possibilitando a verificação imediata da pressão medida durante atividades de operação e manutenção.

O sinal de pressão é transmitido ao sistema de automação por meio de saída analógica padronizada de 4–20 mA, conforme Figura 6, até a entrada analógica no *slot* do CLP, permitindo acompanhamento em tempo real, registro histórico e análise de tendências. Essa integração possibilita que a pressão da linha passe a ser utilizada como variável de apoio à tomada de decisão operacional e ao diagnóstico de anomalias no circuito hidráulico.

A utilização conjunta do transmissor de pressão, do transmissor de vazão e da chave de fluxo proporciona maior capacidade de monitoramento do sistema de água gelada. Enquanto o transmissor de vazão fornece a medição contínua do escoamento e a chave de fluxo atua como confirmação discreta da circulação mínima, o transmissor de pressão permite avaliar o comportamento hidráulico da linha.

Figura 6 - Arquitetura de interligação PIT



Fonte: Elaborado pelo Autor (2026).

3.12 Medição de Densidade da água gelada

A densidade do fluido do reservatório TQ-200 é estimada indiretamente a partir da medição de pressão hidrostática na região inferior do tanque indicada pelo transmissor da fabricante VEJA e da medição de nível realizada por transmissor ultrassônico instalado na parte superior do reservatório, apresentado no item 4.2.3.

A equação 1 (FOX; MCDONALD; PRITCHARD, 2014), foi utilizada visto que o tanque opera aberto à atmosfera e o princípio de funcionamento do medidor VEGA baseia-se na medição da pressão exercida pela coluna líquida sobre o elemento sensor, permitindo a determinação indireta da densidade.

A instalação do transmissor na parte inferior do reservatório possibilita a obtenção de medições contínuas, da pressão de coluna de fluido do tanque, fornecendo informações fundamentais para a supervisão operacional e para a prevenção de falhas associadas à congelamento do fluido. Os valores medidos são transmitidos ao CLP, onde passam por processamento e conversão para unidades de engenharia, sendo posteriormente disponibilizados no sistema supervisório para acompanhamento em tempo real.

A equação (1) apresenta a relação utilizada:

$$\rho = \frac{P}{g \cdot h} \quad (1)$$

Onde:

- ρ = densidade do fluido;
- P = pressão hidrostática medida pelo VEGA;
- g = aceleração da gravidade;
- h = altura da coluna líquida medida pelo transmissor de nível Siemens LU150.

Além da função de monitoramento, o valor da densidade é utilizado como variável de proteção operacional, permitindo a implementação de alarmes de baixa densidade, visto que o sistema trabalha com anticongelante, para permitir a operação em temperaturas inferiores ao ponto de congelamento da água.

3.13 Medição de Nível

A medição é realizada por meio de transmissor ultrassônico Siemens SITRANS LU150, instalado na região superior do tanque. O equipamento opera segundo o princípio da medição sem contato, realizando a emissão de pulsos ultrassônicos em

Tabela 3 – Custos operacionais com a intervenção

Elementos	Custo (R\$)	Mês/Ano
Compressores	R\$ 400.000,00	04/2024
Gás Refrigerante (R404)	R\$ 110.000,00	05/2024
Inversor de acionamento	R\$ 15.000,00	05/2024
Mão de Obra (Técnico)	R\$ 50.500,00	05/2024
TOTAL	R\$ 575.500,00	

Fonte: Elaborado pelo Autor (2026).

Durante o ano de 2024, foram registradas seis ocorrências de parada não programada associadas a falhas nos compressores dos *Water Chiller* do sistema de água gelada, dados disponibilizados nas ferramentas de gestão da qualidade. Em decorrência dessas quebras, foram realizadas intervenções corretivas com o objetivo de restabelecer a disponibilidade operacional do equipamento. A avaliação dos impactos econômicos decorrentes das paradas da unidade encontra-se apresentada na **Tabela 4**, tendo sido considerada uma indisponibilidade acumulada de 2.160 (dois mil cento e sessenta) minutos e um custo estimado de R\$ 341,00 (trezentos e quarenta e um reais) por minuto de parada produtiva, valores informados pela operação.

Além das perdas associadas à interrupção do processo, foram incorporados à análise os custos referentes às duas manutenções corretivas executadas internamente, permitindo uma avaliação mais abrangente dos prejuízos ocasionados pela recorrência das falhas.

Tabela 4 – Custos operacionais associados às paradas.

Elementos	Custo (R\$)	
Paradas somatório (2.160 minutos)	736.560,00	
TOTAL	736.560,00	

Fonte: Elaborado pelo Autor (2026).

Conforme apresentado nas Tabelas 3 e 4, os custos decorrentes das paradas operacionais e custo de reparo dos *Water Chiller antigos*, totalizaram R\$ 1.362.560,00, evidenciando o impacto econômico significativo associado à

indisponibilidade do sistema de água gelada. Esses resultados demonstram a relevância da adoção de medidas que visem aumentar a confiabilidade operacional do equipamento e reduzir a ocorrência de falhas que comprometam a continuidade do processo produtivo.

Nesse contexto, com a substituição dos equipamentos críticos, aliada à implementação de recursos de monitoramento online, espera-se a redução da probabilidade de ocorrência de novas paradas decorrentes de falhas de retorno de vapor. Entretanto, o principal diferencial da solução proposta reside na automatização do processo, uma vez que a integração entre instrumentação, sistema supervisor e lógica de controle permite o monitoramento contínuo das variáveis operacionais, a geração de alarmes em tempo real e a adoção de ações preventivas antes que condições críticas evoluam para falhas capazes de interromper a produção.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A implementação da automatização proposta permitiu avaliar os impactos da automação sobre a confiabilidade operacional do sistema de água gelada. Antes da intervenção, foram registradas seis ocorrências de falhas associadas aos compressores do sistema, ocasionando paradas não programadas e elevados custos operacionais.

O aumento da potência dos *Water Chiller* de 90 para 150 TR e a troca dos compressores por modelo parafuso foram importantes, porém não são suficientes para suportar o retorno de vapor na linha de água gelada, sendo assim, a automatização do sistema para impedir esse retorno, foram essenciais.

Após a substituição dos equipamentos e a implementação da arquitetura de automação proposta, o sistema passou a operar continuamente sem registros de falhas nos compressores durante o período de doze meses de operação, dados de ordens de manutenção. Esse resultado evidencia um aumento significativo da confiabilidade operacional do sistema e demonstra a efetividade das medidas adotadas.

Além dos benefícios econômicos, observaram-se ganhos relacionados à segurança operacional, à rastreabilidade das informações e à capacidade de diagnóstico do sistema. A disponibilização de dados históricos e alarmes em tempo

real permitiu maior previsibilidade das condições operacionais e reduziu a dependência de inspeções exclusivamente manuais.

4.1 Transmissor de Nível

Com a instalação do transmissor de nível, na parte superior do tanque, apresentado da Figura 8, tornou-se possível calcular e identificar condições anormais como baixo nível do tanque, contribuindo para maior controle operacional e para a prevenção de falhas no sistema de refrigeração industrial.

Figura 8 - Sensor de Nível Ultrassônico Siemens



Fonte: Elaborado pelo Autor (2026)

4.2 Densidade da água gelada

Com a implementação do instrumento VEGA, na parte inferior do tanque, apresentado da Figura 9, tornou-se possível calcular e identificar condições anormais como baixa densidade e congelamento da água, contribuindo para o aumento da confiabilidade operacional e para a prevenção de falhas no sistema de refrigeração industrial.

Figura 9 - Sensor de pressão para cálculo da densidade



Fonte: Elaborado pelo Autor (2026)

4.3 Transmissor de pressão

Com a implementação do PIT, na linha de água gelada, apresentado na Figura 10, tornou-se possível identificar condições anormais como baixa pressão, perda de carga elevada, obstrução parcial, falha de bombeamento ou fechamento indevido de válvulas, contribuindo para o aumento da confiabilidade operacional e para a prevenção de falhas no sistema de refrigeração industrial.

Figura 10 - Transmissor de Pressão



Fonte: Elaborado pelo Autor (2026).

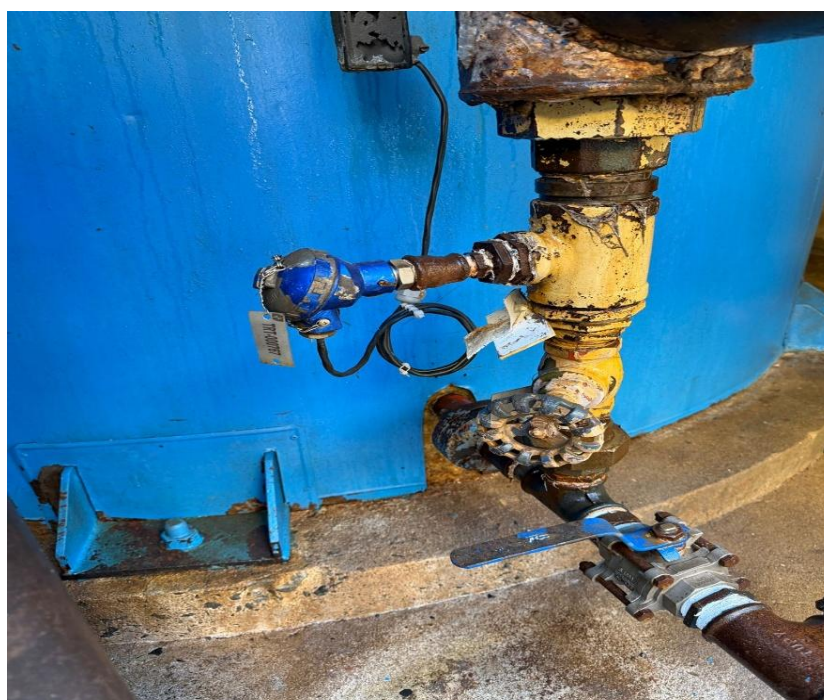
4.4 Transmissor de temperatura

A utilização dos TT, conforme Figura 11, contribuiu para aumentar a confiabilidade das medições, reduzindo a influência de interferências eletromagnéticas e possibilitando a transmissão dos sinais por maiores distâncias sem degradação significativa da qualidade da informação. Adicionalmente, os recursos internos de diagnóstico permitiram aumentar a integridade das medições e fortalecer a estratégia de monitoramento contínuo implementada no sistema.

A disponibilidade das informações de temperatura em tempo real possibilitou o acompanhamento permanente do desempenho térmico do processo, fornecendo subsídios para a identificação precoce de desvios operacionais e contribuindo para o aumento da confiabilidade do sistema de água gelada responsável pelo resfriamento dos reatores industriais.

O monitoramento das variáveis térmicas do sistema foi realizado por meio de quatro sensores de temperatura do tipo PT100 instalados em pontos estratégicos do processo, apresentados na Figura 4, compreendendo a temperatura da água gelada produzida pelos *Water Chiller*, a temperatura de entrada do processo e a temperatura de retorno do circuito de resfriamento.

Figura 11 - Elemento Sensor + Transmissor



Fonte: Elaborado pelo Autor (2026)

Além do monitoramento em tempo real, os valores medidos passaram a ser armazenados pelo sistema supervisório, possibilitando análises históricas, identificação de tendências e suporte às atividades de manutenção e engenharia de processos. A disponibilidade dessas informações ampliou significativamente a capacidade de diagnóstico operacional do sistema e fortaleceu a estratégia de monitoramento contínuo implementada neste trabalho.

4.5 Transmissor de Vazão

A instalação do FIT na linha de água gelada, conforme aprestando na Figura 12, possibilitou o acompanhamento constante da vazão via CLP e supervisório, contribuindo para acompanhamento dessa variável crítica por parte da operação.

Figura 12 - Transmissor de Vazão



Fonte: Elaborado pelo Autor (2026)

Na mesma linha de tubulação em que foi instalado o transmissor de vazão, foi incorporada uma chave de fluxo, apresentada na Figura 13, A chave de fluxo foi empregada para identificar a presença ou ausência de circulação da água gelada na tubulação, realizando o intertravamento da bomba e do *Water Chiller*.

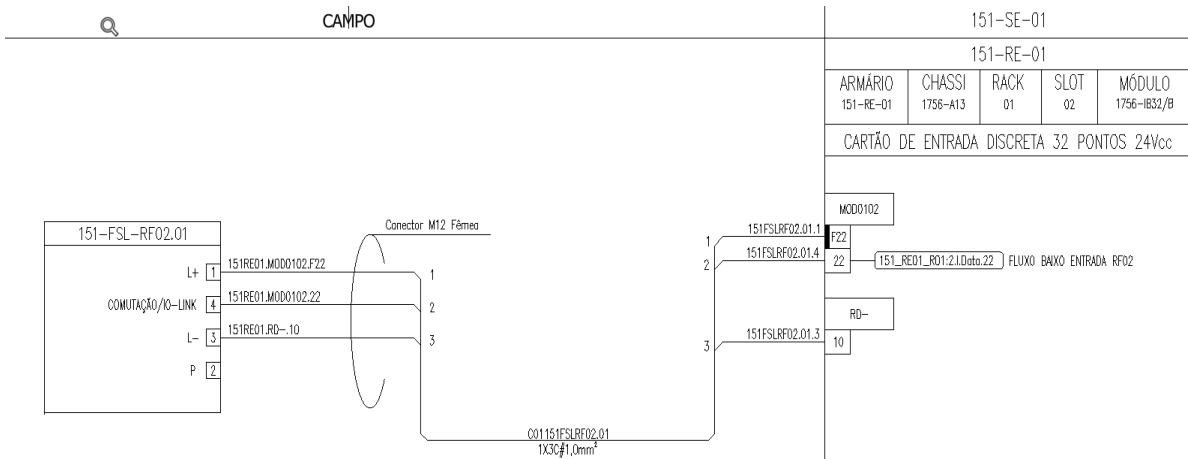
Figura 13 - Chave de Fluxo



Fonte: Elaborado pelo Autor (2026).

O equipamento foi integrado ao sistema de automação como sinal discreto de proteção, conforme figura 14, permitindo ao CLP identificar condições de baixa vazão ou ausência de fluxo no circuito hidráulico. Essa informação passou a ser utilizada na lógica de alarme e supervisão do sistema, contribuindo para a proteção dos *Water Chiller*, bombas e demais componentes associados ao processo de resfriamento dos reatores.

Figura 14 - Arquitetura de interligação chave fluxo



Fonte: Elaborado pelo Autor (2026)

A aplicação dessa chave é especialmente relevante em sistemas de água gelada, uma vez que a perda de circulação pode comprometer a transferência térmica, reduzir a eficiência do processo e provocar condições operacionais indesejadas.

4.6 CLP *CompactLogix* instalado na planta

Além das funções de aquisição e processamento, o CLP, apresentado na Figura 15, passou a desempenhar papel fundamental na estratégia de detecção precoce de falhas. Por meio da comparação contínua entre os valores medidos e os limites operacionais previamente estabelecidos, tornou-se possível identificar condições anormais antes que estas evoluíssem para falhas capazes de comprometer a continuidade operacional

Figura 15 - CLP *CompactLogix* Instalado in loco



Fonte: Elaborado pelo Autor (2026)

Sob a ótica da engenharia de automação, essa abordagem caracteriza a transição de uma estratégia predominantemente reativa para uma filosofia baseada em monitoramento contínuo e intervenção preventiva.

Outro aspecto relevante refere-se à capacidade de expansão futura da lógica de controle. A arquitetura adotada permite a incorporação de novos instrumentos,

malhas de controle e estratégias avançadas de monitoramento sem a necessidade de substituição da infraestrutura principal de automação, garantindo maior flexibilidade para futuras modernizações do sistema.

4.7 Válvula Pneumática

O conjunto válvula/atuador pneumático, apresentada na Figura 16, possibilita rápida resposta operacional e reduziu a dependência de intervenções manuais para execução de manobras no sistema.

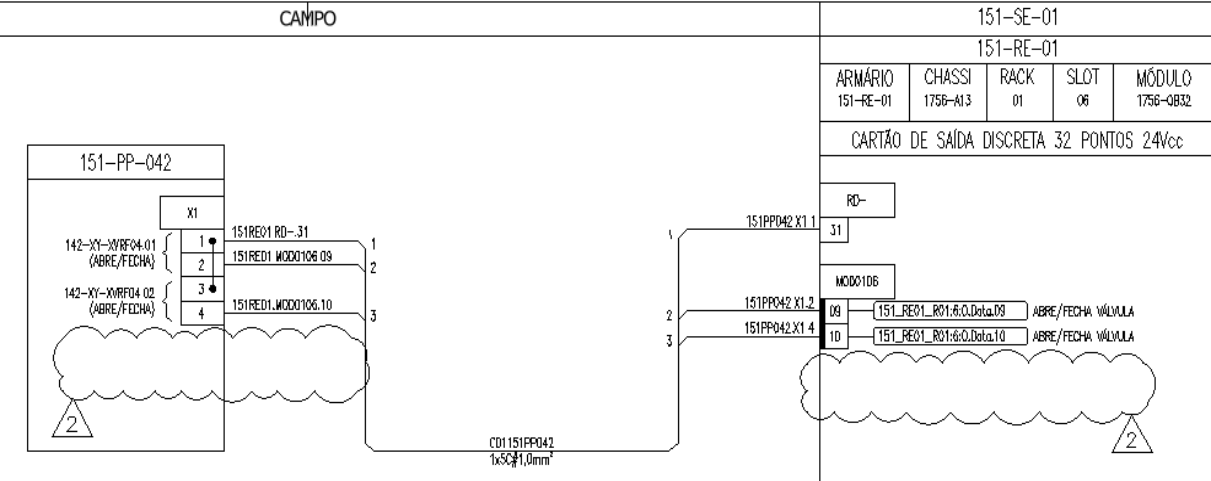
Figura 16 – Válvula/ Atuador Pneumático



Fonte: Elaborado pelo Autor (2026)

A integração da válvula ao CLP, apresentada na Figura 17, permite utilização em estratégias de proteção operacional e intertravamento e contribui para aumentar a segurança do processo, interrompendo o retorno de vapor, no fechamento automático devido a condição de alarme de temperatura. Além disso, a utilização de uma válvula automatizada favorece o aumento da confiabilidade do sistema de refrigeração, através do controle das condições operacionais do circuito, além disso, possibilitou identificar os status de abertura e fechamento através da interligação ao CLP, conforme apresentado na Figura 18.

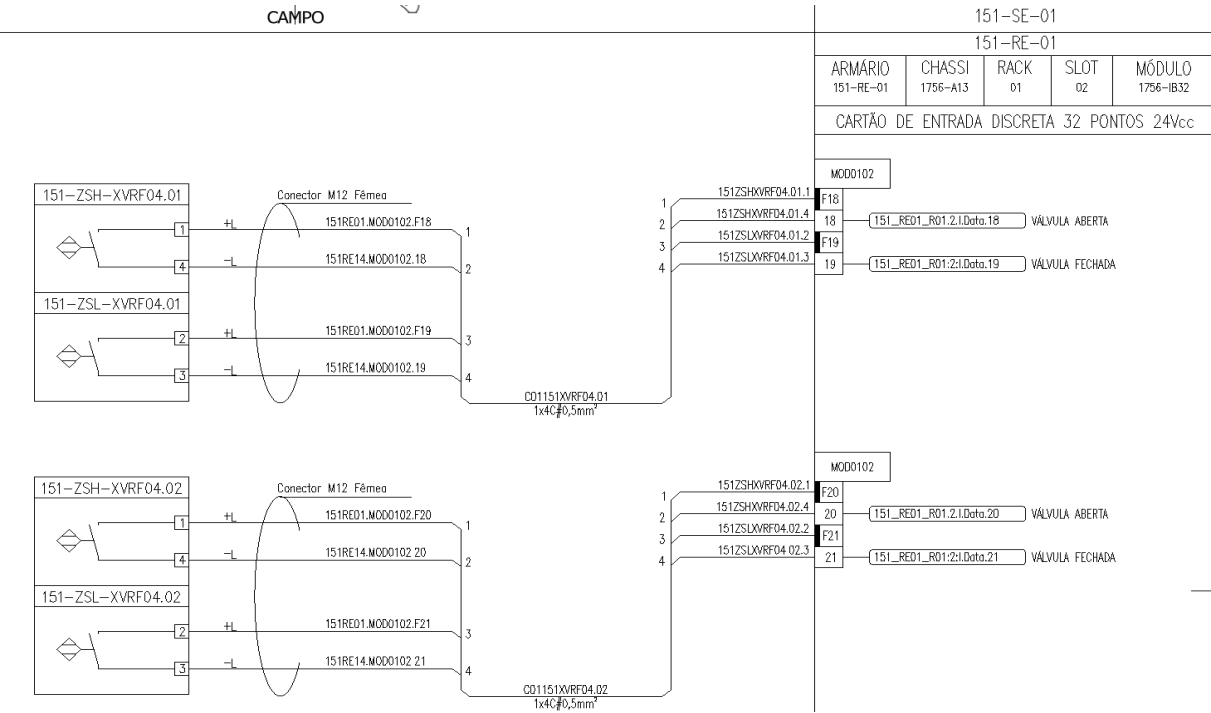
Figura 17 – Arquitetura de interligação



Fonte: Elaborado pelo Autor (2026)

A construção tripartida da válvula também proporciona vantagens relacionadas à manutenção, uma vez que possibilita desmontagem e substituição de componentes internos com menor impacto sobre a infraestrutura hidráulica existente.

Figura 18 – Lógica de status abertura/fechamento válvula

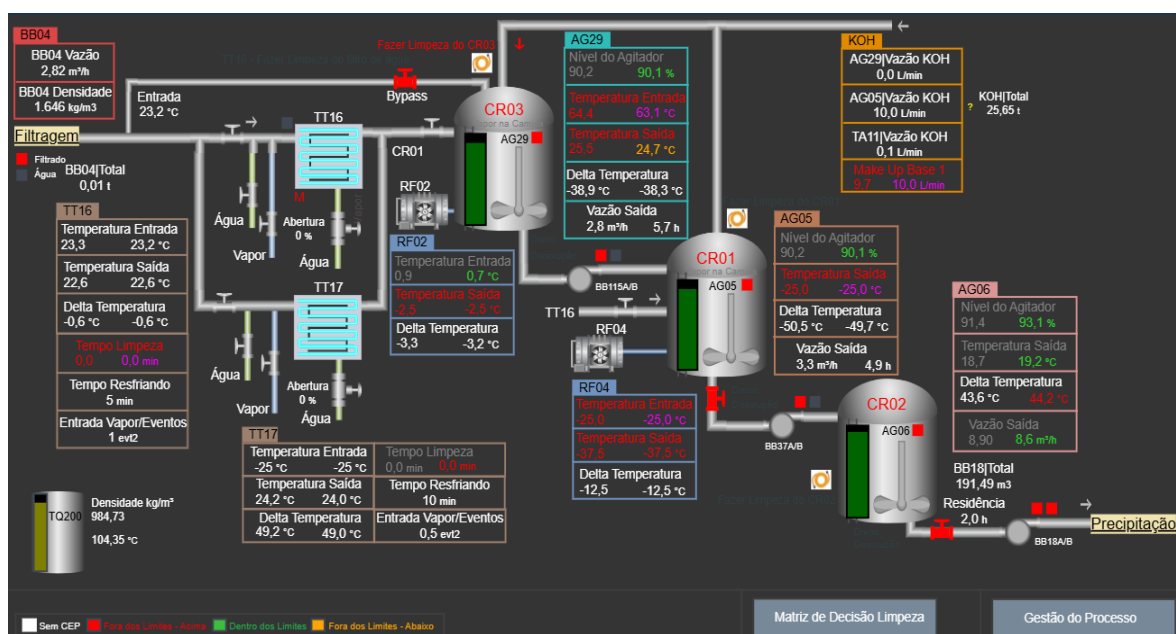


Fonte: Elaborado pelo Autor (2026)

4.8 Implementação do supervisório

A tela do supervisório permitiu a visualização das variáveis monitoradas em tempo real. Também foram implementadas telas específicas para acompanhamento das tendências de temperatura e gerenciamento de alarmes operacionais, a Figura 19 apresenta a tela desenvolvida.

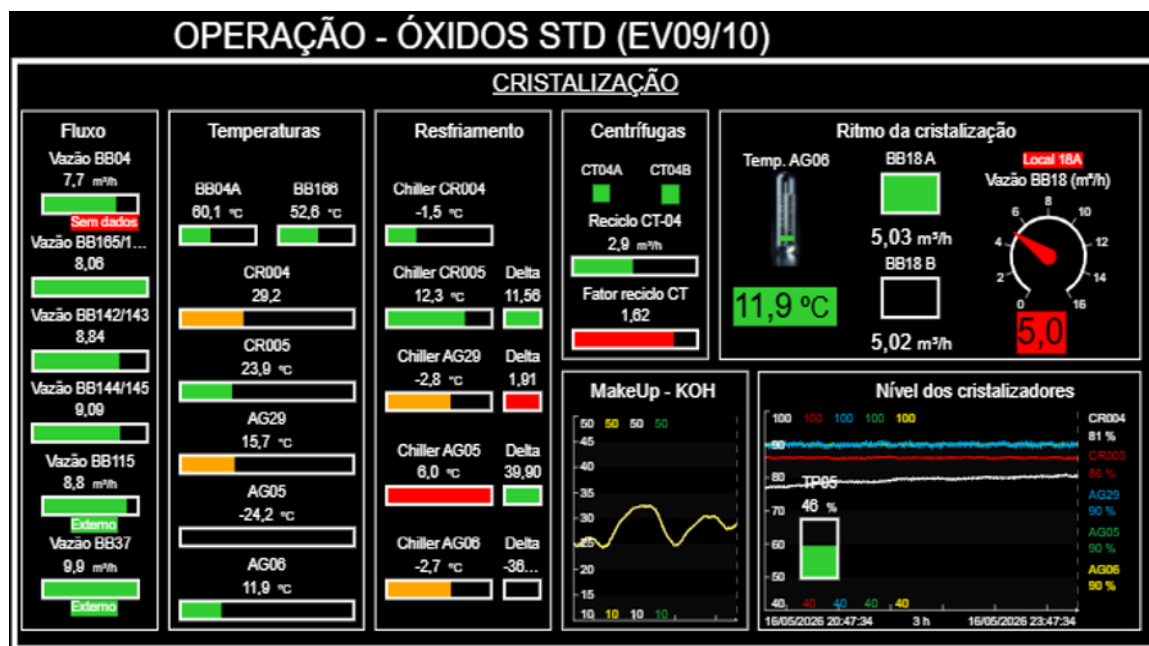
Figura 19 - Tela supervisório variáveis



Fonte: Elaborado pelo Autor (2026)

A utilização de um sistema supervisório tornou possível centralizar as informações operacionais em uma interface gráfica única, conforme Figura 20, permitindo aos operadores acompanhar em tempo real as condições de funcionamento dos equipamentos e identificar rapidamente possíveis desvios operacionais.

Figura 20 - Tela gráfica das medições online



Fonte: Elaborado pelo Autor (2026)

Anteriormente à implantação do sistema, o acompanhamento das condições operacionais era realizado predominantemente por meio de inspeções periódicas em campo e observações locais dos equipamentos. Esse procedimento apresentava limitações significativas, uma vez que determinadas anomalias somente eram identificadas após sua manifestação em níveis capazes de comprometer o desempenho do sistema.

A implementação de telas de tendência constituiu um dos principais avanços proporcionados pela solução desenvolvida, apresentando as variáveis do processo. A análise gráfica das variáveis permite identificar alterações graduais de comportamento que dificilmente seriam percebidas apenas por meio da observação pontual dos valores instantâneos.

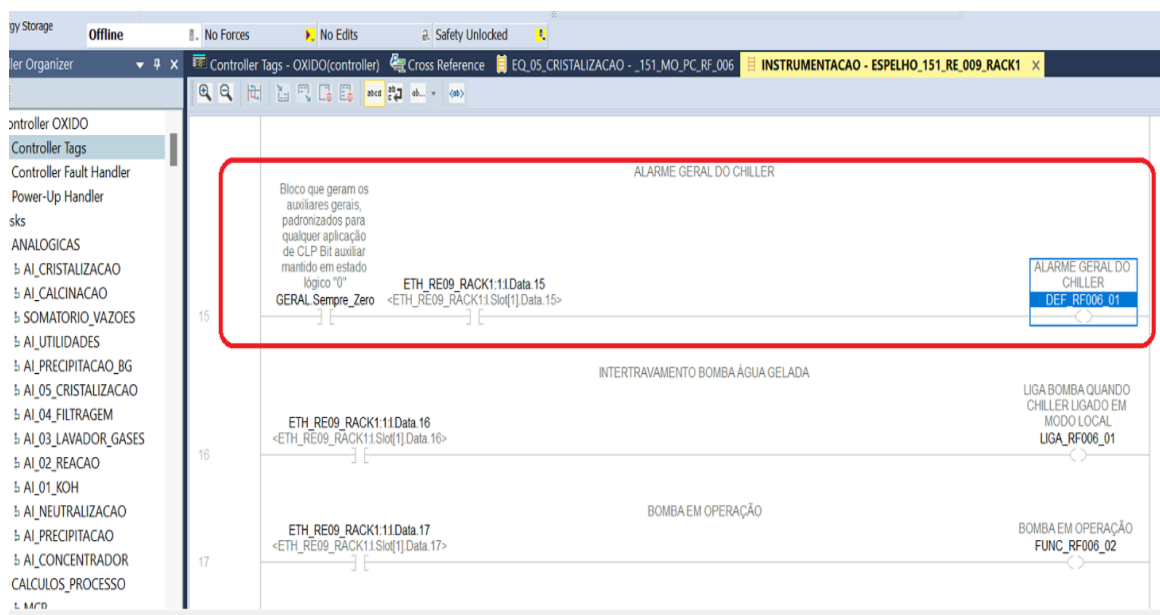
Do ponto de vista da manutenção, essa funcionalidade, possibilita a identificação antecipada de degradações operacionais e auxilia na definição de estratégias de intervenção mais eficientes.

Além disso, o armazenamento contínuo dos dados operacionais passou a constituir uma importante base de informações para análises futuras relacionadas à confiabilidade, desempenho energético e manutenção preditiva.

4.9 Monitoramento de alarme

A lógica ladder de alarmes foi implementada, a Figura 21, apresenta a linha de programação de alarme geral.

Figura 21 - Ladder alarmes CLP



Fonte: Elaborado pelo Autor (2026)

Sempre que uma condição de alarme é identificada, o sistema supervisório registra automaticamente o evento e disponibiliza a informação para os operadores responsáveis pela condução do processo.

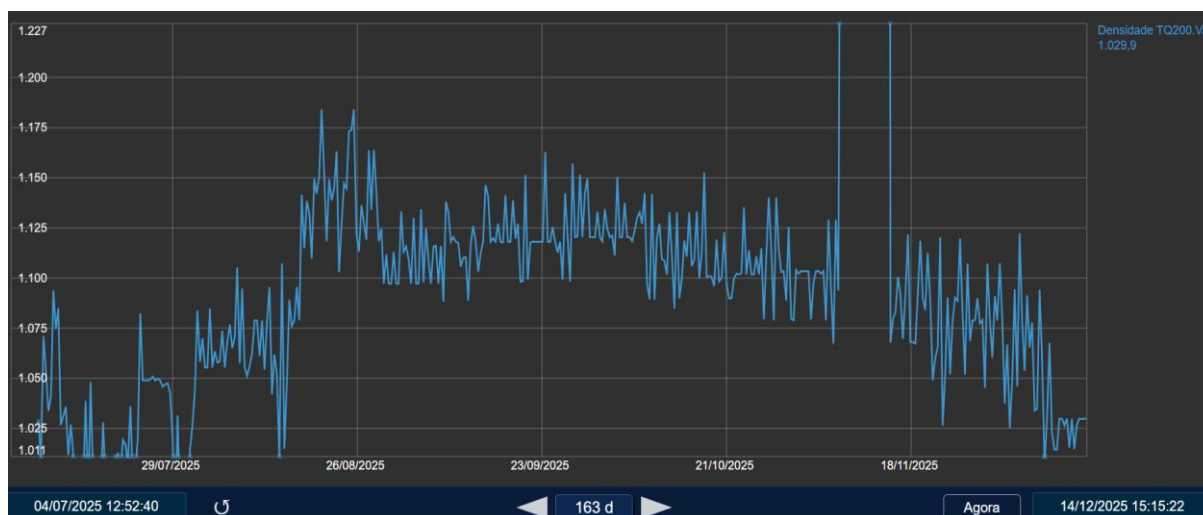
Sob a perspectiva da segurança operacional, a implementação dessa estratégia contribui para reduzir riscos associados à perda de controle térmico dos reatores, preservando a integridade dos equipamentos, a qualidade do processo produtivo e a segurança das equipes envolvidas.

4.10 Aumento da previsibilidade operacional

A integração entre instrumentação analógica, CLP e supervisório possibilitou o monitoramento contínuo das variáveis críticas do processo, conforme mostra a Figura 22, tem-se o monitoramento da densidade historicamente, permitindo o

acompanhamento dos valores ao longo da operação. Dessa forma, tornou-se possível acompanhar e analisar condições anormais, antes de evoluírem para falhas capazes de comprometer a continuidade operacional.

Figura 22 - Histórico e detalhes online variáveis



Fonte: Elaborado pelo Autor (2026)

Além dos benefícios relacionados à prevenção do congelamento, a correta utilização dos instrumentos de campo contribuiu para ampliar o detalhamento das informações disponibilizadas ao sistema de automação. Anteriormente, as medições eram realizadas manualmente em campo, por meio de pirômetro a laser e nível por mangueira, o que limitava a precisão e a disponibilidade dos dados operacionais. Sendo assim, tornou-se possível aumentar a confiabilidade das medições de nível, pressão e temperatura.

4.11 Redução das paradas não planejadas

Antes das modificações realizadas, o sistema apresentava histórico de falhas recorrentes nos compressores, ocasionando paradas não planejadas, intervenções corretivas emergenciais e impactos na continuidade operacional da planta. Considerando que o processo opera em regime contínuo, durante 24 horas por dia, a indisponibilidade do sistema de refrigeração representa uma condição crítica, uma vez que a estabilidade térmica dos reatores depende diretamente do fornecimento adequado de água gelada.

No cenário anterior à automatização, foram registradas 6 (seis) ocorrências de falhas associadas aos equipamentos, comprovadas pelos históricos de atendimentos as ordens de manutenção, totalizando aproximadamente 2.160 minutos de parada. Esse tempo de indisponibilidade resultou em impacto econômico significativo, especialmente pelo custo associado à interrupção do processo produtivo.

Após a implementação da automatização, observou-se uma mudança significativa no comportamento operacional do sistema. Durante o período de 12 meses posteriores a automatização, não foram registradas falhas nos compressores nem paradas não planejadas associadas ao sistema de água gelada, dados confirmados pela não aberturas de ordens de manutenção e histórico de falha do equipamento.

A eliminação das paradas não planejadas pode ser atribuída à maior capacidade de monitoramento contínuo das variáveis críticas do processo, especialmente temperatura, vazão, nível e pressão. A instalação de sensores e transmissores permitiu que o sistema passasse a operar com maior visibilidade operacional, possibilitando a identificação antecipada de condições anormais. Nesse contexto, os alarmes de temperatura elevada, baixa vazão e baixo nível do tanque passaram a atuar como mecanismos de proteção e apoio à tomada de decisão, antes que os desvios evoluíssem para falhas severas.

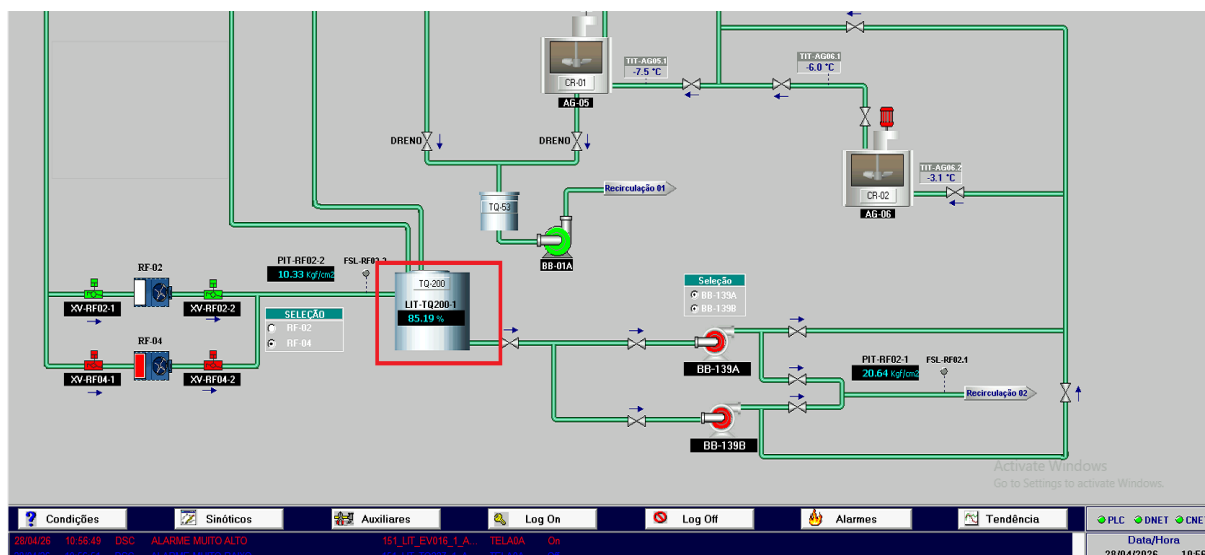
A disponibilização de tendências e históricos no sistema supervisório permitiu o acompanhamento contínuo do comportamento das variáveis, possibilitando a identificação de padrões operacionais e desvios de desempenho. Do ponto de vista quantitativo analisado, observou-se a eliminação das paradas não planejadas e das intervenções corretivas relacionadas às falhas dos compressores, até o mês de maio de 2026.

4.12 Confiabilidade e segurança de pessoas

A automatização do processo de água gelada contribuiu diretamente para a elevação da segurança operacional da instalação, uma vez que possibilitou o monitoramento contínuo das principais variáveis associadas ao desempenho dos *Water Chiller*. A identificação de desvios operacionais dependia majoritariamente de inspeções em campo e atuação direta das equipes de operação e manutenção. Após a automatização, variáveis como temperatura, vazão, nível e pressão passaram a ser

acompanhadas em tempo real por meio de instrumentos integrados ao CLP e ao sistema supervisório, conforme Figura 23, permitindo maior previsibilidade do comportamento operacional do sistema.

Figura 23 - Monitoramento online das variáveis e controle do processo



Fonte: Elaborado pelo Autor (2026)

Outro fator que contribuiu para o aumento da confiabilidade foi a implantação de alarmes automáticos associados às variáveis críticas do processo. Foram configurados alarmes de temperatura elevada, baixa vazão e baixo nível do tanque TQ-200, os quais passaram a atuar como mecanismos de alerta antecipado para as equipes responsáveis. Dessa forma, as ações de operação e manutenção deixaram de depender exclusivamente da percepção local dos operadores e passaram a ser apoiadas por informações objetivas, registradas e disponibilizadas em tempo real no sistema supervisório.

Além dos ganhos relacionados à confiabilidade dos equipamentos, a automação implementada proporcionou melhoria significativa na segurança das pessoas envolvidas na operação e manutenção do sistema. Com a disponibilização dos parâmetros em supervisório, reduziu-se a necessidade de deslocamento frequente dos operadores até áreas de campo para verificação manual das condições de operação. Essa redução da exposição direta ao ambiente industrial contribuiu para diminuir riscos associados a inspeções em áreas com tubulações, válvulas, equipamentos pressurizados, componentes elétricos e superfícies sujeitas a baixas temperaturas.

O reforço da segurança também esteve associado à maior padronização das respostas operacionais. A partir da geração automática de alarmes, as equipes passaram a atuar com base em eventos claramente identificados pelo sistema, reduzindo a possibilidade de falhas decorrentes de interpretações subjetivas ou atrasos na identificação de problemas. Essa condição é especialmente importante em sistemas de água gelada utilizados no resfriamento de reatores, nos quais a perda de controle térmico pode comprometer a estabilidade do processo e exigir atuação rápida das equipes responsáveis.

4.13 Avaliação Econômica e competitividade a longo prazo

A automatização do sistema de água gelada apresentou impactos que ultrapassaram a redução imediata das falhas e das paradas não planejadas, uma vez que também contribuiu para ampliar a flexibilidade operacional da planta no longo prazo. Antes da implementação da solução, o sistema apresentava elevada dependência de intervenções manuais e ações corretivas realizadas após a manifestação das falhas. Essa condição reduzia a capacidade de resposta da operação diante de variações no processo produtivo e limitava a previsibilidade das ações de manutenção. **Com a automatização**, o sistema passou a operar com maior capacidade de monitoramento, diagnóstico e resposta frente a desvios operacionais.

No longo prazo as informações armazenadas pelo sistema supervisório podem subsidiar análises de desempenho, estudos de confiabilidade, avaliação de eficiência energética e desenvolvimento de rotinas de manutenção baseada em condição. Essa possibilidade representa um avanço importante em relação ao modelo anterior, no qual as decisões eram mais dependentes da experiência operacional e da ocorrência efetiva de falhas. Com a automatização, a gestão do sistema passou a ser orientada por evidências, permitindo maior planejamento das intervenções e melhor aproveitamento dos recursos de manutenção.

A competitividade da unidade industrial também foi favorecida pela maior estabilidade do processo produtivo. A eliminação das paradas não planejadas contribui para reduzir perdas de produção, custos corretivos e indisponibilidade dos equipamentos. Em processos industriais contínuos, como o resfriamento de reatores, a estabilidade térmica constitui fator essencial para manter a produtividade, a

qualidade do produto e o cumprimento dos prazos operacionais. Assim, a maior confiabilidade do sistema de água gelada reflete positivamente no desempenho global da planta.

A implantação da solução também criou uma base tecnológica para futuras melhorias e às exigências da Indústria 4.0, favorecendo a evolução gradual do sistema sem necessidade de reestruturações completas da arquitetura de automação.

Outro ponto considerando-se a eliminação das falhas observadas durante os doze meses posteriores à implantação, pode-se estimar um período de retorno simples do investimento (*payback*) próximo de:

$$\text{Payback} = 2.602.500 / 1.362.560$$

$$\text{Payback} \approx 1,91 \text{ anos}$$

Esse resultado demonstra que a solução implantada apresenta viabilidade econômica compatível com os critérios normalmente adotados em projetos industriais de modernização tecnológica, além dos benefícios financeiros e competitividade a longo prazo, devido a maior disponibilidade operacional do processo.

4.14 Discussão dos Resultados

Os resultados obtidos permitem afirmar que os benefícios não decorreram exclusivamente da substituição física dos equipamentos anteriormente instalados, embora a modernização dos ativos tenha contribuído para o aumento da robustez do sistema, os ganhos observados estão diretamente associados à integração entre instrumentação, automação industrial, supervisão em tempo real e monitoramento contínuo das variáveis críticas do processo.

A implementação da arquitetura proposta permitiu aumentar significativamente a observabilidade do sistema, reduzindo a incerteza operacional e proporcionando condições mais adequadas para a tomada de decisão.

Sob a perspectiva da manutenção industrial, verificou-se uma transição de um modelo predominantemente corretivo para uma abordagem baseada em monitoramento contínuo das condições operacionais. Essa mudança encontra respaldo nos conceitos modernos de manutenção baseada em condição e gestão da confiabilidade dos ativos.

Os resultados observados durante apenas 12 (doze) meses de operação demonstram que a utilização integrada de tecnologias de automação industrial pode contribuir significativamente para o aumento da disponibilidade operacional, redução de custos de manutenção, o cálculo do *payback* foi realizado com base em premissas simplificadas.

A aplicação foi conduzida em um único processo produtivo da planta industrial, o que limita a extrapolação dos resultados para outros cenários operacionais com características distintas. Além disso, destaca-se a ausência de indicadores de disponibilidade, decorrente de restrições no acesso a essas informações junto à área de operação.

Ressalta-se, ainda, que os efeitos advindos da automação se mostraram determinantes para a eliminação do retorno de vapor — identificado como causa raiz das falhas recorrentes. Embora tenha ocorrido simultaneamente a substituição dos equipamentos, entende-se que a automação exerceu papel fundamental na solução do problema, uma vez que, mesmo equipamentos novos não suportariam condições prolongadas de retorno de vapor ao longo de meses de operação.

Dessa forma, os resultados obtidos confirmam o potencial da automação industrial como ferramenta estratégica para suporte à continuidade operacional e à competitividade de sistemas produtivos que dependem de elevados níveis de confiabilidade.

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo analisar a aplicação de automação industrial em um sistema de água gelada utilizado em uma planta industrial localizada no município de Araxá-MG. A pesquisa foi motivada pela ocorrência de falhas recorrentes nos compressores dos *Water Chiller* existentes, situação que comprometia a continuidade operacional do processo produtivo e gerava elevados prejuízos econômicos.

A partir da investigação realizada, foi possível identificar que a recorrência das falhas estava associada às condições operacionais do sistema, especialmente ao retorno de vapor proveniente do processo produtivo. Com base nesse diagnóstico, foi desenvolvida e implementada uma solução envolvendo a substituição dos equipamentos existentes, a incorporação de instrumentação para monitoramento contínuo das variáveis críticas e a implantação de uma arquitetura de automação composta por CLP e supervisor.

Os resultados obtidos demonstraram a efetividade da solução adotada. Após a implementação, o sistema permaneceu em operação durante doze meses sem registro de falhas nos compressores ou ocorrências de paradas não programadas, evidenciando aumento significativo da confiabilidade operacional.

Sob o aspecto econômico, verificou-se que a redução das perdas associadas às paradas **operacionais contribui** para justificar o investimento realizado, apresentando potencial de retorno financeiro em prazo compatível com as estratégias de gestão de ativos industriais.

Os instrumentos, transmissores e atuadores especificados para automação do processo, juntamente com a integração do CLP e Supervisor, atenderam perfeitamente o sistema, além de possibilitar a estruturação da lógica de alarmes, permitindo o monitoramento de variáveis críticas, como temperatura, vazão e nível, além da identificação antecipada de condições anormais de operação.

Conclui-se, portanto, que a automação industrial associada ao monitoramento contínuo de variáveis críticas constitui uma estratégia eficaz para aumentar a disponibilidade operacional, reduzir custos decorrentes de falhas e fortalecer a segurança dos processos produtivos, esse fato se confirma, pois a condição de retorno de vapor, o principal causador das quebras foi monitorado e tratado.

Em termos acadêmicos, o estudo contribui para demonstrar a aplicação prática dos conceitos de automação industrial, supervisão de processos e engenharia da confiabilidade em um ambiente industrial real. A pesquisa evidencia que a integração entre tecnologias de automação e estratégias de gestão de ativos pode representar uma alternativa eficaz para mitigação de falhas, aumento da disponibilidade operacional e melhoria do desempenho global dos processos produtivos.

Por fim, conclui-se que a solução desenvolvida atingiu os objetivos estabelecidos para este trabalho, demonstrando que a automação industrial, quando aplicada de forma integrada aos princípios da confiabilidade operacional e da gestão de ativos, constitui uma ferramenta estratégica para o aumento da competitividade, da segurança e da eficiência dos sistemas produtivos industriais.

REFERÊNCIAS

BEGA, Egídio Alberto. Instrumentação industrial. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2011.

BAKER, R. C. Flow Measurement Handbook: Industrial Designs, Operating Principles, Performance, and Applications. Cambridge: Cambridge University Press, 2016.

COSTA, D. de S. **Segurança dos trabalhadores na mineração**: o (extra) ordinário trabalho de uma borracharia. Belo Horizonte/MG: Marketing Aumentado, 2015.

COSTA JÚNIOR, Eudes Luiz. **Gestão em processos produtivos**. Curitiba, PR: IBPEX. 2008.

DOEBELIN, Ernest O. *Measurement Systems: Application and Design*. New York: McGraw-Hill, 2011.

DOSSAT, Roy J. Princípios de refrigeração: teoria, prática, exemplos, problemas, soluções. Tradução de Raul Peragallo Torreira. Curitiba: Hemus, c2004.

ECIL; INOR. *IPAQ C/R330: transmissor de temperatura universal*. Piedade: ECIL Temperatura Industrial, 2020.

FOX, Robert W.; MCDONALD, Alan T.; PRITCHARD, Philip J. Introdução à Mecânica dos Fluidos. 8. ed. São Paulo: LTC, 2014.

GIL, Antônio C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 6. ed. São Paulo: Atlas. 2017.

GROOVER, M. P. *Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing*. New Jersey: Prentice Hall, 2001.

KARDEC, A. ; NASCIF, J. **Manutenção**. Função estratégica. 4 ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2013.

MALPAGA, Isaac. **O departamento de manutenção**. Clube dos Autores, 2009.

MARÇAL, L.F.; GUIMARAES, M.P.; RESENDE, A.A. **Automatização de uma termoformadora visando melhorias no processo produtivo de uma empresa fabricante de peças termoplásticas para o setor automobilístico**. In: **XXXIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção**. Anais...Salvador, 2013.

MILLER, Rex; MILLER, Mark R. *Refrigeração e ar condicionado*. [S. l.]: LTC, 2008. ISBN 978-8521616245.

MIRSHAWKA, V.; OLMEDO, N.L. **Manutenção – Combate aos Custos da Não-Eficácia:A Vez do Brasil**. São Paulo: Makron Books do Brasil, 1993.

MORAES, Cícero Couto de; CASTRUCCI, Plínio de Lauro. **Engenharia de automação industrial**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

MOTTER, Osir. *Manutenção industrial: o poder oculto na empresa*. São Paulo: Hemus, 1992.

MORAN, J.M; H. N. SHAPIRO; B.R. MUNSON; D.P.DEWITT, *Introdução à Engenharia de Sistemas Térmicos: Termodinâmica, Mecânica dos Fluidos e Transferência de Calor*, Rio de Janeiro, Editora LTC, 2005.

RIBEIRO, José Luis Duarte; TEN CATEN, Carla Schwengber. *Introdução ao controle estatístico do processo*. Porto Alegre: FEENG/UFRGS, 2012. 172 p. (Série Monográfica Qualidade). ISBN 85-88085-10-0.

SACOMANO, José Benedito; GONÇALVES, Rodrigo Franco; BONILLA, Sílvia Helena; SILVA, Márcia Terra da; SÁTYRO, Walter Cardoso. **Indústria 4.0: conceitos e fundamentos**. São Paulo: Blucher, 2018.

SANDIM, A. S. de A. *Planejamento e gestão de operações florestais*. São Paulo: Ed. do Autor, 2011.

SANTOS, B. P.; ALBERTO, A.; LIMA, T. D. F. M.; CHARRUA-SANTOS, F. M. B. Indústria 4.0: desafios e oportunidades. *Revista Produção e Desenvolvimento*, 2018. Disponível em: <https://revistas.cefet-rj.br/index.php/producaoedesenvolvimento/article/download/e316/193>. Acesso em: 2 maio 2026.

THOMAZINI, Daniel; ALBUQUERQUE, Pedro Urbano Braga de. Sensores industriais: fundamentos e aplicações. 9. ed. São Paulo: Érica, 2020.

YIN, Robert K. **Estudo de caso:** planejamento e métodos. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.