DIGITALIZAÇÃO DA OPERAÇÃO DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE EFLUENTES: DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA WEB MOBILE-FIRST PARA CONFORMIDADE COM A RESOLUÇÃO CONAMA Nº 430/2011

Vitor Gabriel Alves Silva(1)

Graduando em Engenharia da Computação e concluinte do curso Técnico em Química. Atua na operação de sistemas de tratamento de efluentes, com monitoramento de parâmetros operacionais, controle de insumos químicos, registro de indicadores ambientais e organização de documentação técnica, além de coordenação de equipes operacionais. Possui formação de Auditor Líder e de Auditor Interno em Sistemas de Gestão Integrada nas normas ISO 9001, ISO 14001 e ISO 45001, e formação complementar em tratamento de efluentes.

Endereço(1): Acesso Canário da Terra, 468D — Condomínio Bem Viver — Chapecó — Santa Catarina — CEP 89813-140 — Brasil — Tel: (49) 98813-6556 — e-mail: v.gabriel.silva2015@gmail.com

RESUMO

A operação de Estações de Tratamento de Efluentes (ETEs) de pequeno e médio porte no Brasil enfrenta desafios persistentes de rastreabilidade e conformidade com a Resolução CONAMA nº 430/2011, frequentemente baseada em registros manuais em papel ou planilhas isoladas. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema web *mobile-first* para gestão integrada da operação de ETEs, contemplando registro de leituras de campo com detecção imediata de não-conformidade no momento do registro, análises laboratoriais com *snapshots* imutáveis dos limites legais vigentes na coleta, importação de laudos por inteligência artificial, gestão de equipamentos e manutenções, controle de estoque de produtos químicos, gestão de turnos com passagem de plantão estruturada, notificações *push* e auditoria completa de alterações. A solução foi implementada com arquitetura JavaScript moderna (Next.js, TypeScript, Prisma) e segregação de responsabilidades por perfil de usuário. O sistema resultante, em estágio de protótipo funcional, compreende trinta e nove tabelas relacionais, cerca de cento e cinquenta testes automatizados e cerca de cem telas distribuídas em treze módulos funcionais. Demonstra-se que ferramentas digitais acessíveis podem reduzir riscos de não-conformidade ambiental, fortalecer a rastreabilidade legal exigida pela legislação brasileira e aproximar a gestão operacional de ETEs das exigências contemporâneas de saneamento básico.

Palavras-chave: Tratamento de efluentes, CONAMA 430/2011, Sistema web de gestão.

1. INTRODUÇÃO

O saneamento básico no Brasil enfrenta desafios estruturais persistentes, evidenciados pelos dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. Segundo o diagnóstico com ano-base de 2022, apenas 56% da população brasileira dispõe de coleta de esgoto e 52,2% do esgoto gerado recebe tratamento, o que corresponde a cerca de noventa milhões de habitantes sem acesso à rede coletora, situação que repercute diretamente na qualidade dos corpos hídricos receptores e na saúde pública (BRASIL, 2023; INSTITUTO TRATA BRASIL, 2024), dimensão central da gestão ambiental contemporânea (PHILIPPI JR.; ROMÉRO; BRUNA, 2014). A Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020, conhecida como Novo Marco Legal do Saneamento, estabeleceu metas ambiciosas de universalização do atendimento, com cobertura de 90% da população por sistemas de esgotamento sanitário até 2033 (BRASIL, 2020), sobre as diretrizes nacionais já fixadas pela Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007 (BRASIL, 2007).

Nesse contexto, as Estações de Tratamento de Efluentes (ETEs) desempenham papel central na proteção dos recursos hídricos (VON SPERLING, 2014; JORDÃO; PESSÔA, 2017), seja por processos anaeróbios (CHERNICHARO, 2007), seja por processos aeróbios do tipo lodos ativados (VON SPERLING, 2016). A Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011, do Conselho Nacional do Meio Ambiente, estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes em corpos receptores, especificando parâmetros físicos, químicos e ecotoxicológicos, além de substâncias específicas, tais como pH (entre 5 e 9), Demanda Bioquímica de Oxigênio com remoção mínima de 60%, nitrogênio amoniacal total com limite máximo de 20 mg/L e sólidos sedimentáveis com até 1 mL/L em teste de uma hora em cone Imhoff. A resolução fixa ainda limites distintos para óleos minerais, de 20 mg/L, e para óleos vegetais e gorduras animais, de 50 mg/L, além de restrições para materiais flutuantes e substâncias tóxicas específicas (CONAMA, 2011). Tais padrões articulam-se ao

enquadramento dos corpos receptores estabelecido pela Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do mesmo conselho (CONAMA, 2005). A resolução, contudo, não se limita a fixar valores. Seu Capítulo III institui regime de gestão que obriga o responsável pela fonte poluidora ao automonitoramento periódico dos efluentes lançados, com base em amostragem representativa, e à apresentação anual de Declaração de Carga Poluidora ao órgão ambiental competente, mantendo em arquivo os laudos e relatórios que a fundamentam (CONAMA, 2011). O cumprimento desse regime exige monitoramento contínuo, com registro confiável e recuperável de cada leitura operacional e de cada análise laboratorial.

A realidade operacional de muitas ETEs de pequeno e médio porte, no entanto, contrasta com a sofisticação das exigências regulatórias. Registros operacionais são frequentemente mantidos em planilhas físicas, cadernos de plantão ou planilhas eletrônicas isoladas, dificultando a rastreabilidade temporal das medições, a auditoria de alterações e a tomada de decisão baseada em dados. Sistemas comerciais de gestão de ETE existem, mas costumam apresentar custos de licença, complexidade de implantação ou requisitos de infraestrutura incompatíveis com a estrutura operacional de prestadores de menor porte, autarquias municipais ou condomínios industriais, cuja gestão de águas e efluentes apresenta particularidades próprias (MIERZWA; HESPANHOL, 2005) e pode demandar processos de tratamento específicos, como ocorre com efluentes de baixa biodegradabilidade (MORAIS; SIRTORI; PERALTA-ZAMORA, 2006). A dimensão do desafio de universalização e a heterogeneidade dos prestadores no país são documentadas em diagnósticos setoriais (BRASIL, 2017; INSTITUTO TRATA BRASIL, 2024).

Soma-se a este cenário a particularidade de que a rastreabilidade exigida pela legislação ambiental possui dimensão temporal: os limites vigentes no momento da coleta de uma amostra devem ser preservados mesmo que a regulamentação seja posteriormente atualizada, sob pena de inviabilizar a auditoria histórica. Essa característica é raramente contemplada de forma explícita em planilhas eletrônicas, tornando a comprovação de conformidade vulnerável à passagem do tempo. A hipótese não é abstrata. O Conselho Nacional do Meio Ambiente submeteu proposta de revisão da própria Resolução nº 430/2011 à Consulta Pública nº 10/2025, aberta em 21 de agosto e encerrada em 6 de outubro de 2025, que discute a alteração de parâmetros de lançamento (CONAMA, 2025). As análises registradas hoje serão auditadas sob o regime que resultar dessa revisão.

Esta lacuna entre exigência legal e ferramentas digitais acessíveis motivou o desenvolvimento do sistema apresentado neste trabalho. A proposta foi construir uma plataforma web responsiva, com foco em uso em campo por dispositivos móveis, capaz de digitalizar o ciclo completo da operação de uma ETE, desde o registro de leituras de campo pelo operador até a análise consolidada de não-conformidades pelo gestor, preservando a rastreabilidade legal e estabelecendo segregação clara de responsabilidades entre os perfis profissionais envolvidos.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver um sistema web *mobile-first* para gestão integrada da operação de Estações de Tratamento de Efluentes, com foco em conformidade à Resolução CONAMA nº 430/2011 e rastreabilidade operacional plena.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

a) Estruturar fluxo digital de registro de leituras de campo com detecção imediata de não-conformidade, no momento do registro manual, em relação aos limites legais vigentes;

b) Implementar gestão de análises laboratoriais com preservação imutável dos limites aplicáveis no momento da coleta, garantindo a rastreabilidade temporal exigida pela legislação ambiental;

c) Disponibilizar controle integrado de manutenção preventiva e corretiva de equipamentos, com agendamento automático da próxima manutenção preventiva ao concluir a anterior;

d) Integrar gestão de turnos operacionais e passagem de plantão estruturada, com *checklist* automático e formalização da transferência de responsabilidade entre operadores;

e) Implementar controle de estoque de produtos químicos com alerta automático quando o estoque calculado ou a contagem física registrada estiverem abaixo do mínimo definido;

f) Garantir rastreabilidade total das alterações em registros sensíveis por meio de *log* de auditoria com armazenamento dos estados anterior e posterior em formato consultável;

g) Adotar arquitetura *mobile-first* responsiva, adequada ao uso pelo operador em campo, em dispositivos com tela reduzida e em condições adversas de iluminação.

3. METODOLOGIA UTILIZADA

3.1 LEVANTAMENTO DE REQUISITOS

O desenvolvimento partiu da análise sistemática da Resolução CONAMA nº 430/2011, em particular do artigo 16, que define os padrões de lançamento de efluentes em corpos receptores. Foram catalogados os parâmetros físicos, químicos e específicos sujeitos a monitoramento, suas respectivas unidades de medida e os limites mínimo e máximo aplicáveis, conforme apresentado na Tabela 1, que registra também a origem normativa de cada limite. Parte dos parâmetros acompanhados na rotina da estação, como Demanda Química de Oxigênio, fósforo total, sólidos suspensos, turbidez, condutividade e coliformes termotolerantes, não integra o rol do artigo 16, tendo sido incorporada por decorrer do enquadramento do corpo receptor ou de condicionantes impostas pelo órgão ambiental estadual (CONAMA, 2005). A distinção explícita entre limites de origem federal, estadual e operacional foi incorporada ao próprio modelo de dados, de modo que cada limite cadastrado carregue a norma que o fundamenta. Dois recortes normativos foram tratados de forma explícita. O parágrafo 1º do artigo 21 da Resolução nº 430/2011 dispensa o padrão de nitrogênio amoniacal total para efluentes de sistemas de tratamento de esgotos sanitários, razão pela qual a exigibilidade do limite é atributo configurável do parâmetro e não constante fixada no código. Os valores de turbidez e de coliformes termotolerantes correspondem à classe 2 de águas doces, condição aplicável por força do artigo 42 da Resolução nº 357/2005, segundo o qual as águas doces são consideradas classe 2 enquanto não aprovado o respectivo enquadramento.

A partir desse mapeamento, foram identificadas as entidades operacionais envolvidas no monitoramento de uma ETE: pontos de coleta de amostras (tipicamente entrada bruta, reator biológico e saída final), parâmetros de qualidade da água, métodos de análise utilizados pelo laboratório, categorias de equipamentos e seus respectivos planos de manutenção, turnos operacionais, ocorrências não previstas e produtos químicos utilizados nos processos de tratamento, tomando-se por referência a terminologia e as unidades operacionais previstas nas normas brasileiras de concepção e de projeto de sistemas de esgoto sanitário (ABNT, 1986, 2011).

Foram identificados três perfis profissionais distintos, cada qual com responsabilidades e permissões próprias: o Gestor, responsável pela configuração do sistema, pelo cadastro de parâmetros e referências legais, pela consulta a indicadores agregados e pela auditoria de alterações; o Técnico, responsável pelas análises laboratoriais, pela manutenção dos equipamentos e pela resolução de ocorrências; e o Operador, responsável pelo registro de leituras de campo, pelo registro de ocorrências *in loco* e pela operação dos turnos. Por ser uma plataforma *multi-tenant*, o sistema contempla ainda um perfil de administração (*super-admin*), voltado à gestão da própria plataforma e dos *tenants*, e um perfil dedicado de manutenção, incorporado ao longo da evolução do trabalho para as equipes responsáveis pela execução das ordens de manutenção.

Tabela 1 - Principais parâmetros de qualidade monitorados pelo sistema e origem normativa dos respectivos limites

Parâmetro	Unidade	Limite mínimo	Limite máximo ou condição	Origem do limite
pH	adimensional	5,0	9,0	CONAMA 430/2011, art. 16
$DBO_{5,20}$	mg/L	—	remoção mín. de 60%	CONAMA 430/2011, art. 16
Sólidos sedimentáveis	mL/L	—	1,0	CONAMA 430/2011, art. 16
Nitrogênio amoniacal total	mg/L	—	20,0	CONAMA 430/2011, art. 16
DQO (Demanda Química de	mg/L	—	200,0	Órgão ambiental estadual

Parâmetro	Unidade	Limite mínimo	Limite máximo ou condição	Origem do limite
Oxigênio)				
Fósforo total	mg/L	—	1,0	Órgão ambiental estadual
Sólidos suspensos totais	mg/L	—	100,0	Órgão ambiental estadual
Coliformes termotolerantes	NMP/100 mL	—	1.000	CONAMA 357/2005, classe 2 (art. 42)
Turbidez	UNT	—	100,0	CONAMA 357/2005, classe 2 (art. 42)
Condutividade	µS/cm	—	—	Acompanhamento operacional

Fonte: elaboração própria (2026), a partir de CONAMA (2005, 2011) e de condicionantes do órgão ambiental estadual.

A leitura da resolução não se esgotou no artigo 16. O Capítulo III, que trata das diretrizes para gestão de efluentes, institui as obrigações de fazer que dão sentido operacional aos limites: o automonitoramento periódico previsto no artigo 24, a responsabilidade técnica sobre coleta e análise fixada no artigo 25, a exigência de laboratório acreditado do artigo 26 e o dever de apresentar a Declaração de Carga Poluidora anual, com guarda dos laudos que a fundamentam, estabelecido no artigo 28 e em seu parágrafo 3º. Cada um desses dispositivos foi convertido em requisito funcional, conforme a Tabela 2.

Tabela 2 - Exigências do Capítulo III da Resolução CONAMA nº 430/2011 e recursos correspondentes no sistema

Dispositivo	Exigência	Recurso correspondente no sistema
Art. 24	Automonitoramento periódico dos efluentes lançados, com base em amostragem representativa	Agendamentos de monitoramento por ponto de coleta e parâmetro, com registro de leituras de campo e de análises laboratoriais
Art. 24, § 1º	Critérios e procedimentos de execução e averiguação definidos pelo órgão ambiental competente	Cadastro configurável de parâmetros, limites e métodos de análise, com histórico de versões dos limites aplicados
Art. 25	Coleta e análise sob responsabilidade de profissional legalmente habilitado	Fluxo de aprovação de análise com registro nominal de quem registrou e de quem validou o resultado
Art. 26	Ensaios realizados por laboratório acreditado	Retenção da identificação do laboratório de origem e do texto do laudo em cada análise externa
Art. 28	Declaração de Carga Poluidora anual ao órgão ambiental competente	Série histórica por parâmetro e ponto de coleta, comparável aos limites vigentes na data de cada coleta
Art. 28, § 3º	Manutenção em arquivo dos relatórios e laudos que fundamentam a declaração	Preservação imutável dos limites aplicados e registro de auditoria com estados anterior e posterior

Fonte: elaboração própria (2026), a partir de CONAMA (2011).

Essa leitura reposiciona o objeto do trabalho. O sistema não digitaliza uma tabela de limites, e sim o ciclo de automonitoramento que a resolução impõe ao responsável pela fonte poluidora, desde a coleta em campo até a guarda do laudo que sustentará a declaração anual. A imutabilidade dos limites, tratada adiante, deixa de ser refinamento técnico e passa a ser condição para que a série histórica mantida em arquivo permaneça interpretável quando auditada anos depois.

3.2 MODELAGEM DE DADOS

A modelagem de dados foi conduzida segundo os princípios da normalização relacional e do desenho orientado ao domínio (EVANS, 2003). O modelo conceitual final é composto por trinta e nove tabelas, agrupadas em domínios funcionais: identidade e controle de acesso (*tenants*, usuários, sessões, *tokens* de redefinição de senha, tentativas de *login* e inscrições de notificação *push*); configuração operacional (parâmetros de qualidade, limites, histórico e aliases de parâmetros, métodos de análise, pontos de coleta, turnos, escalas de turno, categorias de equipamentos e prazos por severidade); execução operacional (leituras, análises internas, análises externas e laudos, agendamentos de monitoramento, equipamentos, manutenções preventivas e corretivas, dias de manutenção, ocorrências e comentários, fotos de ocorrências, instâncias de turno, passagens, tarefas por turno com seus modelos e fotos); controle de estoque (produtos químicos, entradas, saídas e contagens físicas); e rastreabilidade (*log* de auditoria, *log* de manutenção e histórico de versões de parâmetros).

Uma característica fundamental do modelo é a preservação imutável dos limites legais aplicáveis no momento da coleta de uma amostra para análise laboratorial. Para tanto, a entidade de análise armazena, além das chaves estrangeiras para o parâmetro e para o método utilizado, cópias dos valores mínimo e máximo vigentes no instante do registro. Eventual atualização posterior dos limites pelo Gestor não altera os valores aplicados às análises previamente registradas, garantindo a rastreabilidade temporal exigida pela legislação ambiental. O mesmo princípio orienta a auditoria de alterações em parâmetros, que mantém histórico de todas as versões aplicadas ao longo do tempo.

3.3 TECNOLOGIAS UTILIZADAS

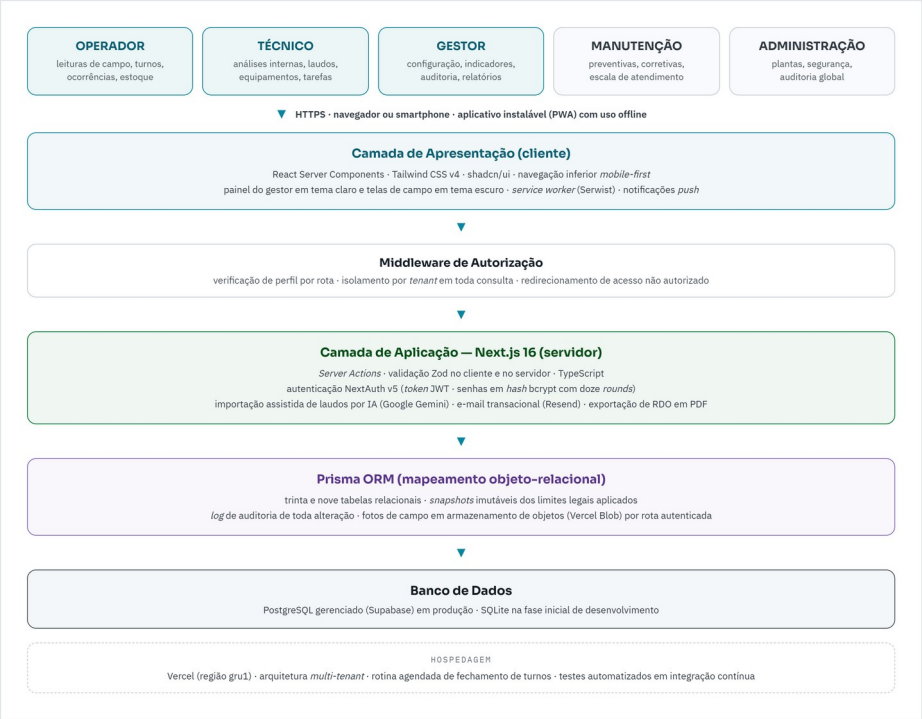
A solução foi implementada como aplicação web *full-stack*, escolha justificada pela necessidade de uso simultâneo por múltiplos perfis em dispositivos distintos sem necessidade de instalação local. A arquitetura adotada baseia-se em renderização no servidor com hidratação no cliente, modelo conhecido como *React Server Components*, que combina a renderização tradicional do servidor com a interatividade dos aplicativos de página única. A separação entre apresentação, regra de negócio e persistência seguiu os padrões consolidados de arquitetura de aplicações corporativas (FOWLER, 2002; MARTIN, 2017).

O ambiente de execução utiliza o *framework* Next.js versão 16, que provê roteamento por sistema de arquivos, otimizações automáticas de carregamento e suporte nativo a *Server Actions*, mecanismo que permite executar funções no servidor a partir de formulários no cliente sem necessidade de criação manual de *endpoints* de interface de programação. A linguagem TypeScript foi adotada em todo o código-fonte, conferindo verificação estática de tipos e prevenindo classes inteiras de erros em tempo de execução. A camada de acesso ao banco de dados utiliza Prisma como mapeador objeto-relacional. O banco de dados de produção é o PostgreSQL, provisionado no Supabase, com a aplicação implantada na plataforma Vercel; o SQLite foi empregado apenas na fase inicial de desenvolvimento, pela simplicidade de configuração, e a migração para o PostgreSQL foi conduzida sem alteração do código de negócio, apenas pela substituição da configuração de conexão.

A autenticação utiliza NextAuth versão 5, com armazenamento de senhas em *hash* gerado por algoritmo bcrypt configurado com doze *rounds* de *salt* e *tokens* de sessão emitidos em formato JWT. A camada de validação dos dados de entrada utiliza a biblioteca Zod, aplicada tanto no cliente quanto no servidor para garantir integridade das informações persistidas; as boas práticas de segurança em aplicações web tomaram como referência o OWASP Top 10 (OWASP FOUNDATION, 2021). A interface de usuário foi construída com Tailwind CSS para estilização utilitária e componentes da biblioteca shadcn/ui para elementos de formulário e navegação, e os gráficos de tendência foram implementados com a biblioteca Recharts, com linhas de referência destacando os limites legais aplicáveis.

A plataforma foi habilitada como aplicação web progressiva (PWA) instalável, por meio de *service worker* gerenciado pela biblioteca Serwist, e incorpora notificações *push*, envio de e-mail transacional, armazenamento de fotos em nuvem por meio de serviço de objetos (Vercel Blob) e importação assistida de laudos laboratoriais por inteligência artificial, com extração estruturada de dados de arquivos PDF por meio de modelo de linguagem (Google Gemini). A arquitetura geral do sistema é apresentada na Figura 1.

Figura 1 - Visão geral da arquitetura do sistema



Fonte: elaboração própria (2026).

3.4 SEGREGAÇÃO DE PERFIS E AUTORIZAÇÃO

A segregação de responsabilidades entre os perfis foi implementada em duas camadas complementares. A primeira camada utiliza um *middleware* de roteamento que intercepta cada requisição e verifica, com base no *token* de sessão, se o perfil do usuário possui permissão para acessar a rota solicitada, redirecionando para uma página de acesso negado em caso negativo. A segunda camada atua dentro de cada ação de servidor, validando explicitamente o perfil antes de qualquer operação de leitura ou escrita sensível.

Esta abordagem em duas camadas evita que mudanças no roteamento criem vulnerabilidades de autorização: ainda que o *middleware* seja desabilitado por engano, as ações individuais continuam a verificar permissões. O Gestor, por sua natureza administrativa, recebe permissões de leitura sobre as rotas dos demais perfis, permitindo supervisão sem perda de segregação para operações de escrita, que permanecem restritas aos perfis específicos. O isolamento entre *tenants* é aplicado em cada consulta ao banco, e um teste automatizado atua como guardião de integração, impedindo consultas que não filtrem pelo *tenant*.

3.5 ESTRATÉGIA DE DESENVOLVIMENTO ITERATIVO

O desenvolvimento foi conduzido de forma iterativa, organizado em fases sequenciais com funcionalidades complementares. Cada fase entregou um conjunto coeso de funcionalidades, com critérios de aceite explícitos e testes automatizados. A organização em fases permitiu controle granular do escopo, rastreabilidade de decisões técnicas e validação progressiva da arquitetura.

A primeira fase estabeleceu a estrutura base do projeto, com configuração de ferramentas de qualidade e infraestrutura de testes. A segunda fase implementou autenticação e controle de acesso, incluindo a obrigatoriedade de troca de senha no primeiro acesso e limitação de tentativas para prevenção de ataques de força bruta. A terceira fase consolidou o núcleo inicial do modelo de dados e a inserção de dados de referência alinhados aos parâmetros da Resolução CONAMA. As fases subsequentes adicionaram, de forma incremental, os módulos de configurações administrativas, leituras de campo, análises laboratoriais, equipamentos e manutenções, ocorrências, turnos, painéis consolidados, auditoria, *hardening* de segurança e polimento da interface mobile. As funcionalidades complementares de tarefas por turno e controle de estoque químico foram incorporadas a partir de demandas operacionais identificadas durante a evolução do trabalho, e o modelo de dados evoluiu progressivamente até as trinta e nove tabelas atuais, à medida que novos módulos, como

importação de laudos por inteligência artificial, notificações *push* e relatório diário de operação, foram integrados.

3.6 ESTRATÉGIA DE TESTES

A estratégia de testes adotou três abordagens complementares. Os testes unitários, escritos com a biblioteca Vitest, cobrem funções puras de lógica de negócio, como cálculo de não-conformidade, verificação de vencimento de manutenções preventivas, cálculo de estoque atual, normalização de datas para comparação de turnos e cálculo de prazos por severidade de ocorrência. Os testes de integração e de ponta a ponta, apoiados nas bibliotecas Vitest e Playwright, validam o fluxo completo entre formulários, ações de servidor e persistência em banco, incluindo cenários de permissão por perfil, isolamento entre *tenants* e uso em dispositivos móveis. Por fim, o critério de tipos do TypeScript em modo estrito atua como uma terceira linha de defesa, prevenindo, em tempo de compilação, classes inteiras de erros de uso indevido de interfaces. Os atributos de qualidade perseguidos alinham-se ao modelo de qualidade de produto da norma ISO/IEC 25010, cuja segunda edição, de 2023, substituiu a versão de 2011 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2023).

4. RESULTADOS OBTIDOS

4.1 VISÃO GERAL DA SOLUÇÃO

O sistema desenvolvido resultou em uma plataforma web responsiva composta por treze módulos funcionais integrados, distribuídos entre os perfis de usuário previstos. O código-fonte totaliza cerca de trinta e oito mil linhas em TypeScript, organizadas em mais de trezentos arquivos. A camada de persistência abrange trinta e nove tabelas relacionais. A suíte de testes automatizados reúne cerca de cento e cinquenta casos executados com Vitest, complementados por testes de ponta a ponta com Playwright, cobrindo desde cálculos de conformidade até validações de fluxo de passagem de turno, controle de acesso por perfil e isolamento entre *tenants*.

Cabe destacar que o sistema constitui um protótipo funcional em estágio de desenvolvimento. Embora todos os módulos descritos a seguir estejam implementados e cobertos por testes automatizados, a validação em ambiente operacional real, com operadores em campo durante período prolongado, encontra-se prevista como etapa subsequente e não constituiu objeto deste trabalho. Validação dessa natureza depende de acordo formal com a estação receptora, que inclua autorização para uso e divulgação de dados operacionais e ambientais, condição que delimitou o escopo aqui apresentado. Os resultados apresentados referem-se, portanto, às funcionalidades efetivamente construídas e verificadas em ambiente de desenvolvimento, e não a métricas de operação em produção. A Tabela 3 relaciona os módulos entregues e os perfis responsáveis por sua operação.

Tabela 3 - Módulos funcionais entregues e perfis responsáveis pela operação

Módulo	Perfil principal	Outros perfis com acesso
Leituras de campo	Operador	Gestor (visualização)
Análises laboratoriais	Técnico	Gestor (aprovação e visualização)
Importação de laudos por IA	Técnico / Gestor	Gestor (conferência e aprovação)
Equipamentos e manutenções	Técnico / Manutenção	Gestor (visualização)
Ocorrências	Operador (registro) / Técnico (resolução)	Gestor
Turnos e passagem de plantão	Operador	Gestor (auditoria e edição com justificativa)
Tarefas por turno	Operador (execução) / Gestor e Técnico (atribuição)	—
Estoque de produtos químicos	Operador (saída e contagem) / Gestor e Técnico (entrada)	—
Notificações *push*	Todos (por perfil)	—

Módulo	Perfil principal	Outros perfis com acesso
Painéis consolidados	Todos (visão por perfil)	—
Relatório diário de operação (RDO)	Gestor	—
Configurações administrativas	Gestor	—
Auditoria de alterações	Gestor	—

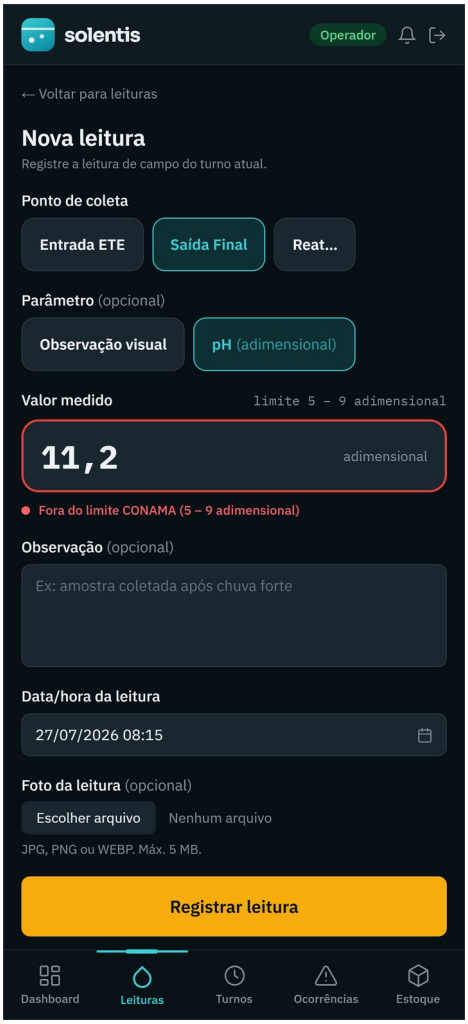
Fonte: elaboração própria (2026).

4.2 MÓDULO DE LEITURAS DE CAMPO

O módulo de leituras de campo é o ponto de entrada mais frequente do operador no sistema. A interface foi projetada para uso em *smartphone*, com campos amplos e teclado decimal acionado automaticamente nos campos numéricos. Ao selecionar um parâmetro previamente cadastrado, o sistema preenche automaticamente a unidade de medida correspondente e passa a comparar, em tempo real à medida que o operador digita, o valor inserido com os limites mínimo e máximo aplicáveis.

Caso o valor digitado ultrapasse algum dos limites, o campo é marcado visualmente com cor vermelha e o rótulo do limite, anteriormente exibido em tom neutro, passa a indicar Fora do limite CONAMA com a especificação dos valores aplicáveis. Esta detecção é puramente visual e antecede o envio, permitindo que o operador confirme conscientemente o registro de uma medição não-conforme ou, alternativamente, reconfira o instrumento de medição antes de submeter. A leitura é então persistida com indicador booleano de não-conformidade calculado de forma definitiva no servidor, sob a perspectiva dos limites realmente aplicáveis no momento. A Figura 2 apresenta a tela de registro com a marcação visual de valor fora do limite.

Figura 2 - Tela de registro de leitura com detecção de não-conformidade em tempo real



Fonte: elaboração própria (2026).

4.3 MÓDULO DE ANÁLISES LABORATORIAIS

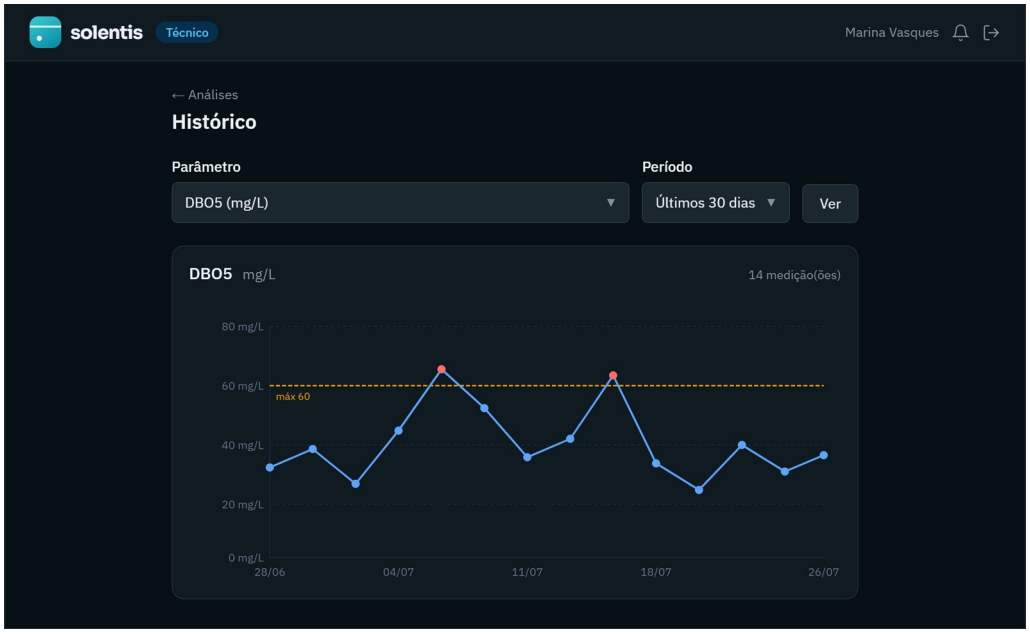
O módulo de análises laboratoriais segue lógica análoga ao módulo de leituras, com adaptações para o ciclo de vida típico de uma análise: registro inicial pelo técnico, com possibilidade de inclusão de laudo textual; fluxo de aprovação por outro técnico ou pelo gestor, formalizando a validação do resultado; e exibição em gráfico de tendência com linhas de referência marcando os limites legais.

A particularidade deste módulo está na preservação imutável dos limites aplicados. No momento do registro, o sistema consulta os valores mínimo e máximo vigentes para o parâmetro selecionado e os copia para a própria análise, em campos dedicados de limite aplicado. Eventual atualização posterior destes limites pelo gestor não altera o valor armazenado para análises previamente registradas, preservando a comparação realizada com o regime regulatório efetivamente vigente na data da coleta. Esta característica responde diretamente à exigência de rastreabilidade temporal da Resolução CONAMA nº 430/2011, frequentemente negligenciada em planilhas eletrônicas convencionais.

Complementarmente ao registro manual, o módulo incorpora a importação assistida de laudos laboratoriais externos. O gestor ou técnico submete o arquivo PDF do relatório de ensaio emitido pelo laboratório, e um modelo de linguagem (Google Gemini) extrai, de forma estruturada, parâmetros, valores, unidades, número do laudo e datas, apresentados para conferência humana antes da persistência. A extração preserva o mesmo princípio de imutabilidade, copiando os limites aplicáveis no momento do registro; valores ausentes no laudo são retornados como nulos, evitando preenchimento indevido, e cada análise externa mantém o texto do laudo e a identificação do laboratório de origem. Essa automação reduz o esforço manual de transcrição e alinha-se às

aplicações de inteligência artificial no monitoramento ambiental de efluentes (COROMINAS et al., 2018). A Figura 3 apresenta o gráfico de tendência de um parâmetro, com as linhas de referência que demarcam os limites legais aplicáveis.

Figura 3 - Gráfico de tendência de análises laboratoriais com linhas de referência indicando limites legais



Fonte: elaboração própria (2026).

4.4 MÓDULO DE EQUIPAMENTOS E MANUTENÇÕES

O módulo de equipamentos consolida o cadastro patrimonial dos componentes da estação de tratamento, classificados por categoria, como bombas, aeradores, filtros, medidores, dosadores e estruturas civis, e dotados de plano de manutenção preventiva configurável por frequência em dias. Ao concluir uma manutenção preventiva, o sistema executa uma transação atômica que registra a conclusão da preventiva atual e cria automaticamente a próxima, com data agendada igual à data de conclusão somada à frequência configurada para o equipamento. Esta automação elimina o esquecimento humano como vetor de falha do plano de manutenção.

Manutenções corretivas, deflagradas por evento não previsto, são registradas com prioridade explícita e responsável automaticamente preenchido com o técnico autenticado. O estado de cada manutenção corretiva, em andamento, concluída ou cancelada, é controlado por transições explícitas, prevenindo estados inconsistentes. Preventivas com data agendada anterior à data atual e ainda não concluídas são exibidas, no painel do técnico, com destaque visual em cor vermelha, sem necessidade de processamento em segundo plano: a condição de atraso é avaliada na própria consulta de exibição.

4.5 MÓDULO DE OCORRÊNCIAS

O módulo de ocorrências formaliza o registro de eventos não previstos identificados pelo operador em campo. Cada ocorrência é classificada quanto à severidade, em escala de quatro níveis, da qual o sistema deriva automaticamente um prazo de resolução: 24 horas para severidade crítica, 72 horas para alta, 168 horas para média e 720 horas para baixa. Estes prazos são configuráveis pelo gestor.

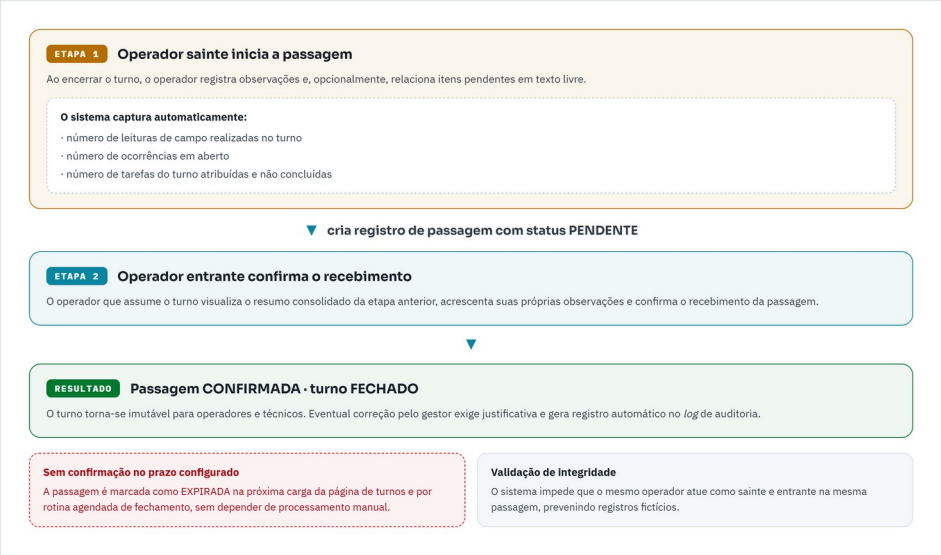
O operador pode anexar uma fotografia ao registro da ocorrência, com validação de tipo de arquivo (JPG, PNG ou WebP), limite de tamanho de 5 MB e armazenamento em serviço de objetos em nuvem (Vercel Blob), acessível apenas por rota autenticada, sem exposição de URL pública direta. O técnico, ao acessar o detalhe de uma ocorrência aberta, pode formalizar a resolução com a inclusão de notas explicativas obrigatórias, garantindo registro circunstanciado da intervenção. Ocorrências com prazo expirado e ainda em aberto são destacadas visualmente nas listagens com etiqueta de alerta.

4.6 MÓDULO DE TURNOS E PASSAGEM DE PLANTÃO

O módulo de turnos implementa a abertura, condução e fechamento de turnos operacionais com passagem de plantão estruturada em duas etapas. Na primeira etapa, o operador sainte registra suas observações e, opcionalmente, lista itens pendentes em texto livre. O sistema captura automaticamente, no mesmo registro, indicadores quantitativos do turno: contagem de leituras realizadas, contagem de ocorrências em aberto e contagem de tarefas atribuídas mas não concluídas. Na segunda etapa, o operador entrante visualiza o resumo consolidado e confirma o recebimento, com possibilidade de inclusão de suas próprias observações. Uma verificação adicional impede que o mesmo operador atue como sainte e entrante simultaneamente, prevenindo passagens fictícias.

Para passagens iniciadas mas não confirmadas dentro de prazo configurável, o sistema marca automaticamente o registro como expirado na próxima carga da página de turnos, garantindo que o estado do banco reflita a realidade temporal sem necessidade de processamento em segundo plano. Turnos confirmados tornam-se imutáveis para operadores e técnicos. Eventuais correções pelo gestor exigem justificativa explícita de pelo menos dez caracteres e geram automaticamente registro no *log* de auditoria com o estado anterior e o estado posterior dos campos alterados, em conformidade com a recomendação geral de rastreabilidade adotada pelo sistema. O fluxo é sintetizado na Figura 4.

Figura 4 - Fluxo de passagem de plantão estruturada em duas etapas



Fonte: elaboração própria (2026).

4.7 TAREFAS POR TURNO

Funcionalidade complementar incorporada ao escopo durante o desenvolvimento, o módulo de tarefas por turno permite que gestor ou técnico atribuam tarefas específicas a um turno aberto, direcionadas a um operador nomeado ou abertas a qualquer operador do plantão. O operador acessa a relação de tarefas a partir do próprio módulo de turnos e, ao concluir cada tarefa, pode anexar até três fotografias como comprovação visual da execução, com o mesmo regime de validação aplicado às fotografias de ocorrências.

Tarefas concluídas e tarefas marcadas como puladas são contabilizadas separadamente. Apenas tarefas com situação pendente entram no resumo automático do *checklist* da passagem de plantão, sinalizando trabalho a ser retomado pelo turno seguinte. Esta integração estabelece continuidade operacional explícita entre turnos, característica difícil de manter de forma confiável em registros manuais.

4.8 CONTROLE DE ESTOQUE DE PRODUTOS QUÍMICOS

O módulo de controle de estoque de produtos químicos, segunda funcionalidade complementar incorporada ao escopo, gerencia o ciclo de vida dos reagentes utilizados nos processos de tratamento, como cloro granulado, hipoclorito de sódio, cal hidratada, sulfato de alumínio e polímero catiônico, insumos associados às etapas de

desinfecção, correção de pH e coagulação-floculação (METCALF & EDDY, 2016). O cadastro inclui unidade de medida, descrição funcional e estoque mínimo, valor a partir do qual o sistema dispara alerta visual.

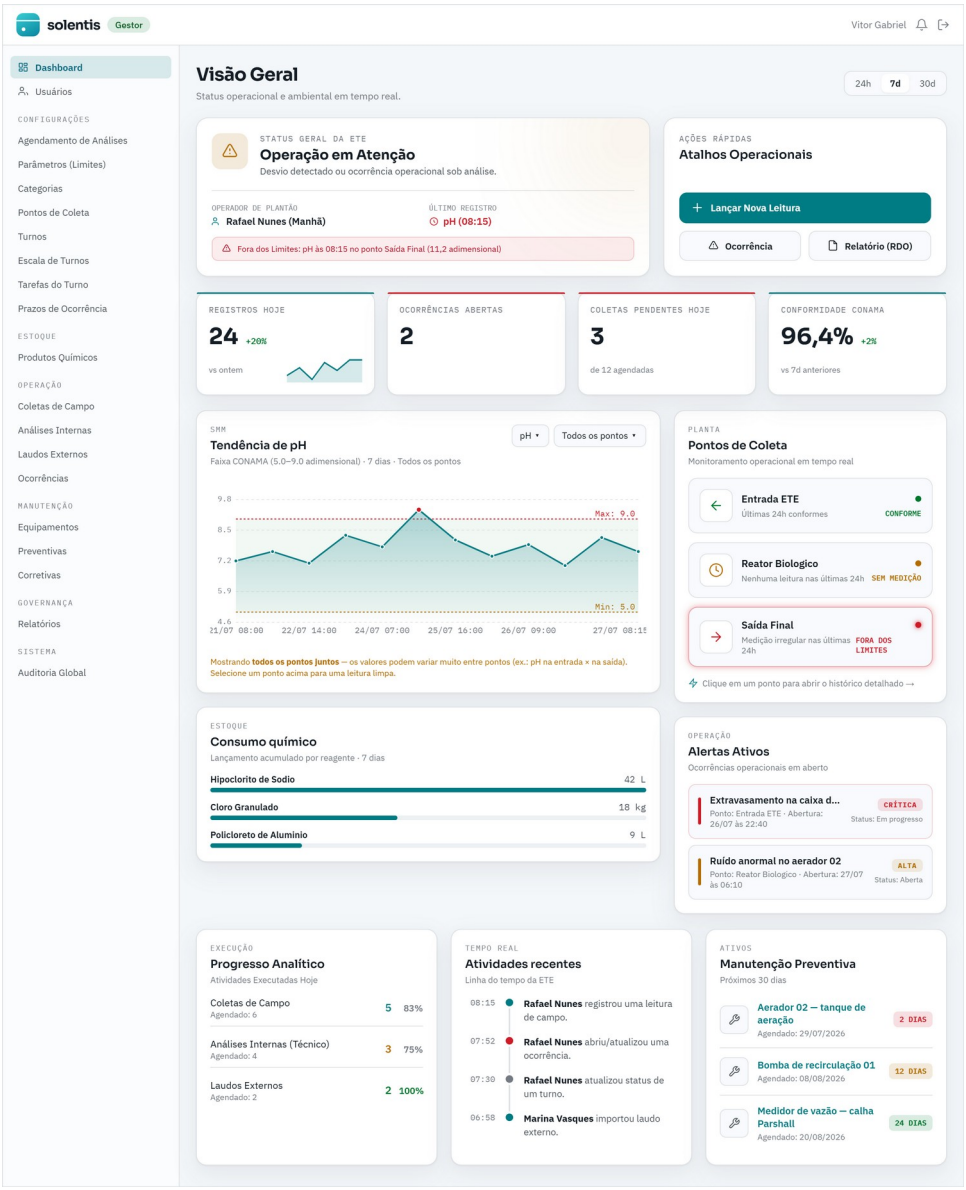
O fluxo operacional contempla três tipos de movimentação: entradas, registradas pelo gestor ou pelo técnico ao receber compra ou doação; saídas, registradas pelo operador a cada uso na dosagem; e contagens físicas, registradas pelo operador para refletir o estoque efetivamente presente no depósito. O sistema mantém duas visões do estoque: o estoque calculado, resultado da soma das entradas subtraída da soma das saídas, e o estoque físico, equivalente à última contagem registrada. O alerta de estoque baixo é disparado quando qualquer das duas visões fica abaixo do mínimo, capturando situações em que divergências entre o esperado e o real indicam consumo não registrado, perdas ou erros de operação. Saídas que resultariam em estoque calculado negativo são registradas com aviso visual em tom de alerta, sem bloquear a operação, em respeito à realidade de campo em que entradas eventualmente são lançadas posteriormente ao consumo.

4.9 PAINÉIS CONSOLIDADOS POR PERFIL

Os painéis consolidados foram implementados especificamente para cada perfil. O painel do operador exibe o turno ativo, a contagem de leituras realizadas no dia e atalhos para os módulos de uso mais frequente. O painel do técnico apresenta indicadores de manutenções preventivas vencidas, análises laboratoriais pendentes de aprovação, ocorrências em aberto sob sua responsabilidade e produtos químicos com estoque abaixo do mínimo.

O painel do gestor organiza a leitura da operação em quatro faixas. A primeira reúne o status geral da estação, que sintetiza a existência de desvios ou de ocorrências críticas em aberto, identifica o operador de plantão no momento e o último registro recebido, e disponibiliza atalhos para o lançamento imediato de leitura, para a abertura de ocorrência e para a emissão do relatório diário de operação. A segunda faixa apresenta quatro indicadores-chave de desempenho: total de registros do dia, com variação percentual em relação ao dia anterior e minigráfico dos últimos sete dias, ocorrências em aberto, coletas pendentes frente ao que foi agendado para o dia e percentual de conformidade com a Resolução CONAMA nº 430/2011 no período selecionado, que pode ser de vinte e quatro horas, sete ou trinta dias. A terceira faixa combina o gráfico de tendência do parâmetro escolhido, com faixa de conformidade sombreada e linhas de referência para os limites mínimo e máximo, o consumo acumulado de produtos químicos por reagente, o estado de cada ponto de coleta nas últimas vinte e quatro horas e a lista de ocorrências em aberto ordenadas por severidade. A quarta faixa consolida o progresso analítico do dia frente ao cronograma de amostragem, a linha do tempo das últimas atividades registradas em auditoria e as manutenções preventivas previstas para os trinta dias seguintes. Os alertas são reforçados por notificações *push*, despachadas por perfil no momento em que eventos relevantes, como o registro de uma medição não-conforme, são persistidos. A Figura 5 apresenta o painel do gestor.

Figura 5 - Painel consolidado do gestor com indicadores-chave, alertas operacionais e gráficos



Fonte: elaboração própria (2026).

4.10 SISTEMA DE AUDITORIA

O sistema de auditoria registra automaticamente, em tabela própria, as alterações em entidades sensíveis, como usuários, parâmetros de qualidade, ocorrências e passagens de turno confirmadas. Cada entrada armazena identificador da entidade alterada, ação realizada, identificador do usuário responsável, momento da alteração, estado anterior e estado posterior em formato textual estruturado e, quando aplicável, justificativa fornecida pelo usuário. A consulta ao *log* é disponibilizada exclusivamente ao gestor, com filtros por usuário, entidade alterada e período, e exibição expansível do estado anterior e posterior para cada registro selecionado. Esta funcionalidade responde às exigências de rastreabilidade próprias de sistemas que registram informações com implicações regulatórias, observadas ainda as obrigações relativas ao tratamento de dados pessoais dos usuários previstas na legislação vigente (BRASIL, 2018).

5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A adoção da arquitetura *mobile-first* como premissa de projeto mostrou-se compatível com o perfil de uso real previsto para o sistema. O operador, principal usuário em frequência de acesso, atua tipicamente em campo, em

deslocamento entre pontos de coleta ou estações de bombeamento, eventualmente sob luz solar intensa ou em locais sem assento estável para uso de computador. A interface responsiva, com elementos de toque suficientemente amplos e teclados contextuais adequados a cada tipo de campo, atende este perfil de uso sem necessidade de aplicativo nativo, simplificando manutenção e atualização (NIELSEN, 1993; KRUG, 2014). A aplicação foi habilitada como aplicação web progressiva instalável, com *service worker* que provê funcionamento parcial *offline* por meio de *cache* de recursos; a sincronização completa de gravações em modo *offline* permanece como refinamento futuro (MOZILLA DEVELOPER NETWORK, 2026).

A conformidade com a Resolução CONAMA nº 430/2011 foi tratada como motor de design e não como camada de relatório acoplada ao final. Esta decisão impactou positivamente a qualidade do modelo de dados: a preservação imutável dos limites aplicados, o registro de quem aprovou cada análise, a auditoria de alterações em parâmetros e a rastreabilidade integral das passagens de turno são características que dificilmente seriam reconstruídas com fidelidade *a posteriori*. Ao adotá-las como invariantes do projeto, e não como configuração opcional a cargo do cliente, eleva-se a confiabilidade da plataforma como registro operacional auditável. Essa confiabilidade, porém, é lógica e não criptográfica: o log de auditoria protege contra alteração pela interface da aplicação, mas não contra intervenção direta no banco por quem detenha credencial administrativa de infraestrutura. A assinatura digital dos registros e o encadeamento de resumos criptográficos permanecem como evolução necessária para uso probatório pleno.

A fase inicial de desenvolvimento adotou o banco SQLite pela simplicidade de configuração e portabilidade. A camada de abstração Prisma permitiu a posterior migração para o PostgreSQL, hoje em produção no Supabase, sem alteração do código de negócio (ABBOTT; FISHER, 2015). A plataforma pode ser iniciada em estações de pequeno porte com infraestrutura mínima e escalada à medida que a operação cresce. O ganho operacional dessa escolha é que a mudança de porte da estação não exige reescrita do sistema nem nova contratação, removendo uma barreira recorrente à digitalização em prestadores de menor escala.

A separação em perfis com permissões distintas reproduz a divisão de responsabilidades típica da operação de uma ETE, refletindo cargos e atribuições reconhecíveis pelo usuário final. Esta correspondência reduz o atrito de aprendizagem, dispensando treinamento extenso para que cada profissional reconheça suas responsabilidades dentro da plataforma. A capacidade do gestor de visualizar telas dos demais perfis, sem que isso o autorize a executar operações restritas, foi exercida com cautela: cada ação de servidor verifica explicitamente o perfil esperado, evitando que a permissão ampla de leitura se converta em vulnerabilidade de escrita.

Limitações remanescentes foram identificadas e mapeadas como evolução futura. Embora o sistema já dispare notificações *push* por perfil no registro de eventos relevantes, o disparo por correio eletrônico para não-conformidades ainda não está integrado ao mesmo fluxo. A sincronização completa de gravações em modo *offline*, além do *cache* de leitura já provido pela aplicação web progressiva, permanece em desenvolvimento. A abertura automática de turno no momento do *login* do operador foi catalogada para reavaliação após coleta de *feedback* estruturado em uso real. A aplicação de inteligência artificial ao monitoramento ambiental, já iniciada com a importação de laudos, tem potencial de expansão para outras rotinas.

A comparação sistemática com soluções comerciais existentes foge ao escopo deste trabalho e permanece como levantamento a realizar. O que se pode afirmar é que a plataforma cobre, com investimento inicial de desenvolvimento, o conjunto de requisitos descrito nas seções anteriores. O modelo proposto, baseado em código-fonte próprio e operando sobre infraestrutura mínima, oferece caminho viável para prestadores de menor porte digitalizarem sua operação sem comprometer a conformidade legal nem assumir contratos de licenciamento incompatíveis com sua escala financeira.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O sistema apresentado neste trabalho demonstra que é possível digitalizar a operação completa de uma Estação de Tratamento de Efluentes de pequeno e médio porte com tecnologias abertas, arquitetura moderna e foco explícito em conformidade regulatória. Os treze módulos funcionais entregues, que abrangem leituras de campo, análises laboratoriais, importação de laudos por inteligência artificial, equipamentos e manutenções, ocorrências, turnos e passagem de plantão, tarefas por turno, controle de estoque de produtos químicos, notificações *push*, painéis consolidados por perfil, relatório diário de operação, configurações administrativas e auditoria de alterações, somados à autenticação com troca obrigatória de senha e à gestão de usuários, cobrem o ciclo operacional efetivamente observado em ETEs reais.

Os objetivos específicos foram atendidos de forma verificável. O registro de leituras com detecção imediata de não-conformidade, previsto na alínea a, foi implementado no módulo de leituras de campo, com comparação em tempo real contra os limites vigentes. A preservação imutável dos limites aplicáveis na data da coleta, alínea b, materializou-se nos campos de limite aplicado da entidade de análise. O controle de manutenção com agendamento automático da preventiva seguinte, alínea c, opera por transação atômica no encerramento de cada ordem. A gestão de turnos com passagem de plantão estruturada e checklist automático, alínea d, foi entregue em fluxo de duas etapas com verificação que impede passagem fictícia. O controle de estoque com alerta por estoque calculado e por contagem física, alínea e, integra o módulo de produtos químicos. O log de auditoria com estados anterior e posterior em formato consultável, alínea f, acompanha as alterações em registros sensíveis. A arquitetura mobile-first, alínea g, orientou a interface desde a concepção e foi verificada em testes de ponta a ponta em dispositivos móveis.

A adoção de arquitetura *mobile-first*, da preservação imutável de limites legais, do registro automatizado de auditoria e da segregação rigorosa de responsabilidades por perfil constitui conjunto de práticas recomendado para outras iniciativas semelhantes. O custo de incorporar estes princípios desde a concepção é significativamente menor do que o de adaptá-los posteriormente, e o ganho em confiabilidade da plataforma como fonte de evidência regulatória justifica o investimento inicial.

Como próximos passos, recomenda-se a validação do sistema em operação real, em estação de tratamento parceira, durante período mínimo de três meses, com coleta estruturada de *feedback* dos perfis de usuário, formalizada por instrumento que discipline a autorização de uso e de publicação dos dados gerados. Esta validação subsidiará ajustes finos de interface, refinamento de fluxos identificados como pouco intuitivos e priorização das funcionalidades mapeadas para evolução. Recomenda-se também a publicação progressiva da plataforma sob licença aberta, viabilizando contribuições da comunidade técnica do setor de saneamento e ampliando seu alcance como ferramenta de apoio ao cumprimento das metas estabelecidas pelo Novo Marco Legal do Saneamento Básico.

Finalmente, registram-se direções de evolução futura de complexidade crescente. A extração automatizada de informações de laudos laboratoriais, iniciada nesta versão com modelos de linguagem, pode ser ampliada e refinada, e o modo *offline* com sincronização posterior de gravações para situações de baixa conectividade representa evolução de horizonte próximo. A integração com sensores em campo, como sondas de oxigênio dissolvido, pH e potencial de oxirredução em linha, constitui perspectiva de prazo mais longo, condicionada à maturidade tecnológica, ao custo dos instrumentos e à confiabilidade da telemetria no ambiente agressivo de uma estação de tratamento. Em particular, a medição automatizada de parâmetros como a Demanda Bioquímica de Oxigênio permanece tecnicamente desafiadora, uma vez que o ensaio padrão requer cinco dias de incubação, configurando objeto de pesquisa e não de implementação imediata. A geração de relatórios formatados conforme exigências específicas de órgãos ambientais estaduais, já iniciada com o relatório diário de operação, complementa o conjunto de evoluções previstas. Tais desenvolvimentos consolidariam progressivamente a plataforma como ferramenta integral de apoio à operação e à conformidade ambiental em estações de tratamento de efluentes brasileiras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABBOTT, M. L.; FISHER, M. T. The art of scalability. 2. ed. Boston: Addison-Wesley, 2015.
2. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 12209: elaboração de projetos hidráulico-sanitários de estações de tratamento de esgotos sanitários. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.
3. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 9648: estudo de concepção de sistemas de esgoto sanitário. Rio de Janeiro: ABNT, 1986.
4. BRASIL. Agência Nacional de Águas (ANA). Atlas esgotos: despoluição de bacias hidrográficas. Brasília: ANA, 2017.
5. BRASIL. Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007. Estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 8 jan. 2007. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/l11445.htm. Acesso em: 25 mai. 2026.
6. BRASIL. Lei nº 13.709, de 14 de agosto de 2018. Lei Geral de Proteção de Dados Pessoais (LGPD). Diário Oficial da União, Brasília, DF, 15 ago. 2018.

7. BRASIL. Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020. Atualiza o marco legal do saneamento básico. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 16 jul. 2020. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/l14026.htm. Acesso em: 25 mai. 2026.
8. BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS): diagnóstico temático serviços de água e esgoto, visão geral. Brasília, DF: SNIS/MCID, 2023.
9. CHERNICHARO, C. A. L. Reatores anaeróbios. 2. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007.
10. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Consulta Pública nº 10/2025: proposta de alteração da Resolução CONAMA nº 430, de 13 de maio de 2011. Brasília, DF: MMA/CONAMA, 2025. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/consulta-publica. Acesso em: 28 jul. 2026.
11. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 18 mar. 2005.
12. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 16 mai. 2011.
13. COROMINAS, Ll.; GARRIDO-BASERBA, M.; VILLEZ, K.; OLSSON, G.; CORTÉS, U.; POCH, M. Transforming data into knowledge for improved wastewater treatment operation: a critical review of techniques. Environmental Modelling & Software, v. 106, p. 89-103, 2018.
14. EVANS, E. Domain-driven design: tackling complexity in the heart of software. Boston: Addison-Wesley, 2003.
15. FOWLER, M. Patterns of enterprise application architecture. Boston: Addison-Wesley, 2002.
16. INSTITUTO TRATA BRASIL. Ranking do saneamento. São Paulo: Instituto Trata Brasil, 2024.
17. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO/IEC 25010:2023: systems and software engineering, systems and software quality requirements and evaluation (SQuaRE), product quality model. 2. ed. Genebra: ISO, 2023.
18. JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. Tratamento de esgotos domésticos. 8. ed. Rio de Janeiro: ABES, 2017.
19. KRUG, S. Don't make me think: a common sense approach to web usability. 3. ed. Berkeley: New Riders, 2014.
20. MARTIN, R. C. Clean architecture: a craftsman's guide to software structure and design. Boston: Pearson, 2017.
21. METCALF & EDDY, INC. Tratamento de efluentes e recuperação de recursos. 5. ed. Porto Alegre: AMGH Editora, 2016.
22. MIERZWA, J. C.; HESPANHOL, I. Água na indústria: uso racional e reuso. São Paulo: Oficina de Textos, 2005.
23. MORAIS, J. L.; SIRTORI, C.; PERALTA-ZAMORA, P. G. Tratamento de chorume de aterro sanitário por fotocatálise heterogênea integrada a processo biológico convencional. Química Nova, v. 29, n. 1, p. 20-23, 2006.
24. MOZILLA DEVELOPER NETWORK. Web technology for developers: progressive web apps. [S. l.]: MDN Web Docs, [2026]. Disponível em: https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/Progressive_web_apps. Acesso em: 25 mai. 2026.
25. NIELSEN, J. Usability engineering. Boston: Academic Press, 1993.
26. OWASP FOUNDATION. OWASP Top 10: web application security risks. 2021. Disponível em: https://owasp.org/Top10. Acesso em: 25 mai. 2026.
27. PHILIPPI JR., A.; ROMÉRO, M. A.; BRUNA, G. C. (eds.). Curso de gestão ambiental. 2. ed. Barueri: Manole, 2014.

28. VON SPERLING, M. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. 4. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014.

29. VON SPERLING, M. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: lodos ativados. 4. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2016.