Capítulo 33

Tecnologia e Trabalho na Água Digital: Gestão de Alarmes, Carga Cognitiva e Projeto de Situações de Trabalho em Estações de Tratamento de Água — Revisão Narrativa e Protocolo de Análise Ergonômica do Trabalho

Technology and Work in Digital Water: Alarm Management, Cognitive Load and Work Situation Design in Water Treatment Plants — A Narrative Review and an Ergonomic Work Analysis Protocol

Eduarda Regina Carvalho

Universidade Paulista (UNIP), Instituto de Ciências Exatas e Tecnológicas (ICET).

Resumo: A digitalização das estações de tratamento de água (ETAs) desloca o trabalho de operação da manipulação direta de equipamentos e produtos químicos para a supervisão de telas, alarmes e indicadores, sem eliminar a exposição ocupacional a agentes como o cloro. Este estudo, de natureza teórico-metodológica, apresenta uma revisão narrativa com busca orientada (2020–2026) sobre automação e carga cognitiva, gestão de alarmes, riscos ocupacionais em serviços de água, o marco normativo brasileiro em transição, e propõe um protocolo de análise ergonômica do trabalho (AET) para ETAs digitalizadas. A revisão indica que as ironias da automação permanecem atuais; que a literatura sobre alarmes e carga cognitiva provém sobretudo de outros setores industriais; que os estudos sobre trabalhadores de água e esgoto destacam riscos químicos, de espaço confinado e musculoesqueléticos, com pouca evidência sobre fatores cognitivos e psicossociais; e que a NR-1, a NR-17 e a proposta de revisão do Anexo 11 da NR-15 abrem uma janela para análises integradas do trabalho real. O protocolo articula quatro frentes: a observação da atividade, a análise de registros de alarmes do SCADA, as medições ambientais e o projeto participativo com simulação, e parte de indicadores definidos previamente, o que permite confrontar a atividade real com a tarefa prescrita e relacionar a carga de alarmes à exposição química. Sua contribuição está em oferecer a prestadores de serviços de água um roteiro replicável para transformar situações de trabalho, e não apenas descrevê-las. Recomenda-se aplicá-lo em estudos de casos múltiplos, com prestadores de portes e graus de automação distintos, de modo que serviços de pequeno porte possam adaptá-los às suas realidades.

Palavras-chave: ergonomia situada; estações de tratamento de água; gestão de alarmes; digitalização; saúde e segurança do trabalho.

Abstract: The digitalization of water treatment plants (WTPs) shifts work from direct handling of equipment and chemicals to the supervision of screens, alarms and indicators, without eliminating occupational exposure to agents such as chlorine. This theoretical-methodological article presents a narrative review with a guided search (2020–2026) on automation and cognitive load, alarm management, occupational risks in water services and the Brazilian regulatory framework in transition, and proposes an ergonomic work analysis (EWA) protocol for digitalized WTPs. The review indicates that the ironies of automation remain current; that the literature on alarms and cognitive load comes mostly from other industrial sectors;

DOI: 10.47573/aya.5379.3.33.33

that studies on water and wastewater workers emphasize chemical, confined-space and musculoskeletal risks, with little evidence on cognitive and psychosocial factors; and that Brazilian regulations (NR-1, NR-17) and the proposed revision of NR-15 Annex 11 open a window for integrated analyses of real work. The protocol combines observation of activity, analysis of SCADA alarm records, environmental measurements, and participatory design with simulation, using predefined indicators, to compare real activity with prescribed tasks and relate alarm load to chemical exposure. It offers utilities a replicable roadmap to transform work situations, not merely describe them. Application in multiple case studies with utilities of different sizes and levels of automation is recommended, so that small-scale services can adapt them to their own realities.

Keywords: situated ergonomics; water treatment plants; alarm management; digitalization; occupational health and safety.

INTRODUÇÃO

O debate sobre tecnologia e trabalho costuma privilegiar o emprego, a jornada e as plataformas digitais. Menos atenção recebe o trabalho de quem opera infraestruturas essenciais que foram digitalizadas sem deixar de ser perigosas. As estações de tratamento de água (ETAs) são um caso exemplar: sensores, supervisão e aquisição de dados (SCADA) e, mais recentemente, modelos preditivos e gêmeos digitais passam a mediar a operação, enquanto produtos químicos como o cloro, tanques e casas de química continuam presentes. Uma revisão recente sobre a transformação digital em serviços de água aponta que o gargalo central não é tecnológico, mas de capacidade das organizações e de sua força de trabalho (Grigg, 2025).

Carvalho (2026) discutiu, em ensaio conceitual, a cloração digitalizada sob a perspectiva da ergonomia situada e ambiental, comparando limites normativos e propondo um modelo que articula tarefa prescrita, atividade real, ambiente físico-químico e mediação tecnológica. O presente artigo complementa esse ensaio, voltando-se à gestão de alarmes, à carga cognitiva e ao protocolo de análise do trabalho. Seu foco recai sobre três pontos que ali foram apenas esboçados: a gestão de alarmes e a carga cognitiva do operador; a evidência recente sobre riscos ocupacionais em serviços de água; e a transição do marco normativo brasileiro, que inclui, desde 2024, os riscos psicossociais no gerenciamento de riscos ocupacionais. A partir dessa revisão, propõe-se um protocolo de análise ergonômica do trabalho (AET) para ETAs digitalizadas.

O objetivo geral é sistematizar a literatura recente e propor um protocolo empírico exequível. Os objetivos específicos são: (a) revisitar as ironias da automação com literatura de 2020 a 2026; (b) descrever os fundamentos da gestão de alarmes e suas implicações para ETAs; (c) mapear a evidência sobre riscos ocupacionais de trabalhadores de água e esgoto; (d) situar o marco normativo brasileiro em transição; e (e) apresentar o protocolo de AET, com indicadores definidos a priori. O artigo não traz dados de campo, mas suas conclusões devem ser lidas como hipóteses de pesquisa e proposta metodológica.

REFERENCIAL TEÓRICO

As Ironias da Automação Revisitadas

As “ironias da automação” foram formuladas por Bainbridge (1983) para designar um paradoxo do projeto de sistemas automatizados: ao retirar do operador as tarefas rotineiras com o objetivo de reduzir a dependência da ação humana, a automação o deixa com o que o projetista não soube automatizar, isto é, monitorar o processo, detectar desvios e assumir o controle em situações raras e difíceis. Como essas intervenções ocorrem justamente quando as habilidades do operador estão menos exercitadas, o sistema passa a depender mais de uma competência que ele próprio contribui para enfraquecer.

Passadas quatro décadas, a formulação segue sendo retomada. Baxter *et al.* (2012) já perguntavam se as ironias continuavam fortes trinta anos depois, e Strauch (2018) concluiu que muitas permanecem sem solução. Pohl e Oehm (2022) mostram, a partir do exemplo de uma máquina de embalagem, como escolhas de projeto deixam o operador em monitoramento passivo, o que fragiliza a consciência situacional e as habilidades necessárias na intervenção.

Três conceitos ajudam a ler esse problema em ETAs. O primeiro é a complacência e o viés de automação, isto é, a tendência de reduzir a verificação independente quando o sistema é percebido como confiável (Parasuraman; Manzey, 2010). O segundo é a consciência situacional, entendida como percepção, compreensão e projeção do estado do sistema, que se deteriora quando o operador sai do circuito de controle (Endsley, 1995, 2017). O terceiro é a transparência dos sistemas automáticos: uma revisão sistemática de 17 estudos concluiu que apresentar ao operador o raciocínio e os resultados projetados do agente automático tende a beneficiar a consciência situacional e o desempenho, sem aumento sistemático de carga mental, ainda que os efeitos variem com a tarefa e com a forma de integração à interface (Van De Merwe; Mallam; Nazir, 2024). A implicação para ETAs é que modelos preditivos e sistemas de apoio à decisão, como os de formação de trihalometanos discutidos por Hogue *et al.* (2023), só tendem a ajudar se o operador compreender o que o modelo está fazendo.

Gestão de Alarmes e Carga Cognitiva

Alarmes são a principal forma pela qual um sistema supervisionado chama a atenção do operador. A literatura industrial identifica quatro causas principais de sobrecarga de alarmes: alarmes repetitivos (*chattering*) causados por ruído e perturbações, variáveis de alarme mal configuradas, projeto de alarmes isolado das variáveis relacionadas e propagação de anormalidades pelas conexões físicas do processo (Wang *et al.,* 2016). Levantamentos multissetoriais reunidos por esses autores registram médias de cerca de 2 a 33 alarmes por 10 minutos em operação normal e picos de 72 a 625 alarmes por 10 minutos em perturbações. Esses números vêm de indústrias de processo em geral e não de ETAs, o que reforça a necessidade de dados específicos do setor de água.

Como referência de desempenho, o guia EEMUA 191, da *Engineering Equipment and Materials Users Association* (associação britânica de usuários de equipamentos e materiais de engenharia), é frequentemente citado com uma média diária de, no máximo, 144 alarmes por operador, o que equivale a cerca de um alarme a cada dez minutos, e a literatura define inundação de alarmes como dez ou mais alarmes em dez minutos (EEMUA, 2013; Wang *et al.,* 2016). A norma ANSI/ISA-18.2, elaborada pelo *American National Standards Institute* (ANSI) em conjunto com a *International Society of Automation* (ISA), e a IEC 62682, da *International Electrotechnical Commission* (IEC), cuja segunda edição é de 2022, estruturam o ciclo de vida da gestão de alarmes, da filosofia e da racionalização ao monitoramento e à auditoria (ISA, 2016; IEC, 2022).

Em paralelo, a série ISO 11064, da *International Organization for Standardization* (ISO), trata do projeto ergonômico de centros de controle, incluindo layout, estações de trabalho, interfaces e ambiente (ISO, 2000). Os indicadores de desempenho de alarmes derivados desses documentos são particularmente úteis porque podem ser extraídos de registros históricos do SCADA, sem intrusão na atividade dos operadores.

Alarmes, porém, só explicam parte da carga cognitiva. Em uma sala de controle de ETA, o operador de painel combina supervisão de telas, comunicação com equipes de campo, registro de dados e decisões sobre dosagem, muitas vezes em turnos longos e com pouca redundância de pessoal. Instrumentos de carga mental como o NASA-TLX (Hart; Staveland, 1988) e observações da atividade permitem captar essa dimensão, e a ergonomia da atividade insiste que o indicador de carga deve ser lido em relação ao contexto organizacional em que a atividade se desenvolve (Guérin *et al.,* 2001).

Ergonomia Situada, Ergonomia Ambiental e Projeto de Situações de Trabalho

A ergonomia situada, de tradição francófona, distingue a tarefa prescrita da atividade real e entende o trabalho como gestão da variabilidade, e não como simples execução de procedimentos (Guérin *et al.,* 2001; Wisner, 1994). Daniellou (2005) discute como essa tradição articula a intervenção de campo e os modelos conceituais, e Daniellou (2007) mostra como a ergonomia pode conduzir projetos de concepção de sistemas de trabalho, antecipando a atividade futura em vez de corrigir situações já construídas. Em ETAs, isso significa que o projeto de uma nova sala de controle, de um conjunto de telas ou de uma hierarquia de alarmes deve ser discutido com os operadores a partir de cenários de ação futura.

A ergonomia ambiental, por sua vez, trata os fatores físicos e químicos do entorno como parte constitutiva da atividade. Uma perspectiva de sistemas, como a de Wilson (2014), e as abordagens sociotécnicas de segurança ajudam a integrar essas dimensões, e o conceito de Safety-II desloca o foco da busca de falhas para a compreensão de como o trabalho normalmente dá certo, com ajustes e adaptações cotidianas (Hollnagel, 2014). Também a literatura de Operador 4.0

sugere que tecnologias digitais podem ampliar a autonomia e a aprendizagem dos trabalhadores quando concebidas com eles, e que a modelagem de trabalhadores por dados exige cuidados éticos e transparência (Kaasinen *et al.,* 2020).

MÉTODO

Trata-se de uma revisão narrativa com busca orientada, de caráter exploratório. A busca foi realizada de maio a outubro de 2026, em buscadores de literatura científica e em páginas de editoras e repositórios de acesso aberto, com combinações de termos em português e inglês relativas a ETAs, automação, SCADA, gestão de alarmes, carga cognitiva, erro humano, saúde ocupacional de trabalhadores de água e esgoto e normas brasileiras de segurança e saúde no trabalho. Priorizaram-se publicações de 2020 a 2026, complementadas por obras clássicas e normas técnicas necessárias à fundamentação. Para o marco normativo, consultaram-se páginas oficiais e documentos de órgãos governamentais.

Como limitações, a busca não seguiu protocolo registrado, não incluiu bases pagas e teve viés para fontes de acesso aberto; os estudos não foram avaliados quanto ao risco de viés; e parte das fontes sobre alarmes provém de indústrias de processo e não do setor de água. Por isso, a seção seguinte apresenta o que a literatura permite afirmar e delimita o que são hipóteses. Em um segundo movimento metodológico, a partir da lacuna identificada, construiu-se o protocolo de AET descrito na seção 5, com base na literatura de ergonomia da atividade e nos requisitos de gestão de alarmes.

PANORAMA DO TRABALHO EM ETAS DIGITALIZADAS

Contexto Brasileiro e Transformação Digital

No Brasil, a Lei nº 14.026/2020 atualizou o marco legal do saneamento e fixou metas de universalização que pressionam prestadores a ampliar a cobertura e a eficiência dos serviços (Brasil, 2020). Essa pressão ocorre em um setor heterogêneo: a literatura aponta diferenças expressivas de eficiência e desempenho entre prestadores, com desafios específicos para os de menor porte (Cardoso, 2025). Grigg (2025) mostra, para o contexto internacional, que a transformação digital esbarra na escassez de pessoal com competências digitais, na perda de memória institucional com aposentadorias, na aversão organizacional ao risco e na dependência de pacotes comerciais, e que prestadores pequenos são os mais expostos. Para o trabalho, isso significa que a digitalização não chega de modo uniforme: convivem, no mesmo país, salas de controle centralizadas e estações operadas com sistemas manuais ou parcialmente automatizados, o que exige que qualquer investigação descreva com precisão o grau de automação de cada unidade.

Riscos Ocupacionais em Serviços de Água e Esgoto

Uma revisão sistemática de 2026, com 70 estudos e fontes publicados entre 1940 e 2025, identificou entre os principais perigos para trabalhadores de água e esgoto os agentes biológicos, os agentes químicos como o sulfeto de hidrogênio e o cloro, o ruído e a entrada em espaços confinados (Artuso *et al.,* 2026). Os acidentes mais graves envolveram espaços confinados e intoxicações; os efeitos respiratórios tiveram a evidência mais consistente, e a dor musculoesquelética foi muito prevalente, com prevalência de dor lombar em 12 meses de até 72,8%. Tempo de emprego, treinamento insuficiente, equipamentos de proteção inadequados e projeto inseguro das instalações associaram-se a maior risco. Os autores ressaltam que a maioria dos estudos é transversal, que os desfechos são heterogêneos e que a evidência sobre eficácia de intervenções é de certeza baixa ou muito baixa. Efeitos cardiovasculares e neuropsicológicos foram relatados de forma menos sistemática.

Em relação aos subprodutos da cloração, a literatura epidemiológica recente concentra-se no consumo de água. Uma revisão sistemática com metanálise de dose-resposta associou a exposição a trihalometanos (THM) na água potável a maior risco de câncer de bexiga (Helte *et al.,* 2025), e um levantamento global discutiu a qualidade química da água em termos de trihalometanos (Villanueva *et al.,* 2023). A exposição ocupacional por via aérea é mais estudada em outros ambientes: em piscinas cobertas suecas, por exemplo, a concentração média de clorofórmio no ar respirado foi de cerca de 11 µg/m³ e os níveis urinários aumentaram com as horas trabalhadas (Ragnebro *et al.,* 2023). Esse resultado não pode ser transposto para ETAs, mas mostra que a combinação entre medição pessoal e biomarcadores é viável e sugere uma lacuna: não se encontraram, na busca realizada, estudos que articulem medições de exposição a cloro e trihalometanos no ar de ETAs com as tarefas efetivamente realizadas pelos operadores.

Erro Humano e Confiabilidade na Operação

Um estudo com 38 operadores de 12 ETAs do sudeste da Polônia estimou probabilidades de erro humano com uma versão fuzzy-bayesiana do *Cognitive Reliability and Error Analysis Method* (CREAM), método de análise de confiabilidade cognitiva e de erros que estima a probabilidade de falha humana a partir das condições de desempenho da tarefa (Hollnagel, 1998), em seis cenários que abrangem captação, tratamento, reservação e bombeamento (Żywiec *et al.,* 2024). As probabilidades de erro humano (*HEP, human error probability*) variaram de 0,0005 a 0,0746 conforme o processo tecnológico, e os autores defendem que a análise de confiabilidade humana passe a integrar de forma permanente a avaliação de confiabilidade dos sistemas de abastecimento. O estudo cita literatura segundo a qual fatores humanos contribuem de forma expressiva para as falhas desses sistemas e inclui a qualidade da interface homem-máquina entre os fatores avaliados, mas não analisa alarmes em detalhe. O trabalho é relevante por mostrar que a abordagem é aplicável a ETAs; do ponto de vista da ergonomia situada, contudo, estimativas baseadas em questionários precisam ser complementadas pela observação da

atividade real, que revela estratégias de regulação e variabilidades que escapam a escalas de condições de desempenho.

Alarmes e Carga Cognitiva em ETAs: O Que se Sabe e o Que é Hipótese

Os dados quantitativos de desempenho de alarmes citados na seção 2.2 vêm de indústrias de processo e, como regra, não de ETAs. Em ETAs, é plausível que a centralização do monitoramento de várias unidades em um único centro de controle aumente o volume de alarmes por operador e a distância física em relação ao processo, e que alarmes de baixa criticidade, como oscilações de sensores de turbidez ou de cloro residual, gerem repetição e ruído. Essas, porém, são hipóteses derivadas da literatura de outros setores e dos próprios princípios da ergonomia, e não achados de pesquisa em ETAs. Testá-las exige acesso aos registros de alarmes e eventos dos sistemas, observação da atividade e conhecimento do contexto organizacional, e é esse o objetivo do protocolo da seção 5.

Marco Normativo Brasileiro em Transição

Três movimentos normativos recentes interessam ao tema. O primeiro é a inclusão dos fatores de risco psicossociais relacionados ao trabalho no gerenciamento de riscos ocupacionais da NR-1, pela Portaria MTE nº 1.419/2024 (Brasil, 2024). Segundo o cronograma divulgado pelo Ministério do Trabalho e Emprego, as alterações passaram a vigorar em 26 de maio de 2025, com período orientativo e possibilidade de autuação a partir de 26 de maio de 2026; o Ministério deixa a escolha da metodologia de avaliação a cargo das organizações e associa a implementação à NR-17, de ergonomia (Brasil, 2025). O segundo movimento é a consulta pública, encerrada em 2022, sobre a revisão dos anexos de agentes químicos da NR-15, que propõe substituir os limites de tolerância por limites de exposição ocupacional organizados em dois quadros, com referência a instituições internacionais; o cloro consta no quadro dos limites anteriores a 2022, com valor teto de 0,8 ppm (Brasil, 2022). Como se trata de proposta, a situação vigente deve ser verificada em cada análise. O terceiro é a manutenção do padrão de potabilidade da Portaria GM/MS nº 888/2021, que trata da água distribuída e não da exposição do trabalhador (Brasil, 2021).

Em conjunto, esses documentos deslocam a pergunta de segurança do trabalho do cumprimento isolado de limites para a análise do trabalho real, que integra exposição química, organização do trabalho e carga mental. Esse deslocamento aproxima o marco normativo da ergonomia da atividade e cria demanda por métodos aplicáveis a serviços de água, inclusive os de pequeno porte.

Síntese das Evidências e Lacunas

O Quadro 1 sintetiza a revisão e delimita as lacunas que orientam o protocolo.

Quadro 1 – Síntese das evidências da revisão e lacunas para ETAs digitalizadas.

Tema	O que a literatura revista indica	Lacuna para ETAs digitalizadas
Automação e supervisão	Ironias da automação persistem (Bainbridge, 1983; Strauch, 2018); complacência e viés de automação (Parasuraman; Manzey, 2010); monitoramento passivo enfraquece a consciência situacional (Pohl; Oehm, 2022).	Poucos estudos de campo em ETAs; pouco se sabe sobre perda de habilidades de diagnóstico em operadores de painel.
Alarmes e carga cognitiva	Quatro causas de sobrecarga e taxas elevadas em levantamentos multissetoriais (Wang et al., 2016); referências EEMUA 191, ISA-18.2 e IEC 62682.	Ausência de dados públicos de desempenho de alarmes em ETAs brasileiras.
Erro humano e confiabilidade	Probabilidades de erro de 0,0005 a 0,0746 em 12 ETAs polonesas (Żywiec et al., 2024).	Sem avaliação comparável no Brasil; estimativas não substituem a análise da atividade real.
Riscos ocupacionais	Riscos químicos, de espaços confinados e musculoesqueléticos; treinamento, proteção e projeto como moduladores (Artuso et al., 2026); clorofórmio no ar de piscinas (Ragnebro et al., 2023).	Faltam medições de cloro e de trihalometanos no ar de ETAs articuladas às tarefas.
Transformação digital e força de trabalho	Escassez de competências, gestão do conhecimento e aversão ao risco (Grigg, 2025); heterogeneidade dos prestadores brasileiros (Cardoso, 2025).	Efeitos da digitalização sobre formação e divisão do trabalho em prestadores de pequeno porte.
Marco normativo	Riscos psicossociais na NR-1 (Brasil, 2024); NR-17; proposta de revisão do Anexo 11 da NR-15 (Brasil, 2022).	Métodos de avaliação do trabalho real aplicáveis a serviços de água.

Fonte: elaborada pela autora, com base nas referências indicadas.

PROPOSTA: PROTOCOLO DE ANÁLISE ERGONÔMICA DO TRABALHO PARA ETAS DIGITALIZADAS

Delineamento

Propõe-se um estudo de casos múltiplos em três ou quatro ETAs de portes e graus de automação distintos, de modo a permitir comparação entre unidades com SCADA centralizado, SCADA local e operação predominantemente manual. A escolha dos casos depende de anuência formal dos prestadores e dos trabalhadores. O estudo seguirá a lógica da AET: análise da demanda, da tarefa prescrita e da atividade real, formulação de diagnóstico e, quando autorizado, projeto participativo

de transformações (Guérin *et al.,* 2001; Falzon, 2007). Antes de qualquer coleta, o projeto deve ser submetido a comitê de ética em pesquisa, nos termos da Resolução CNS nº 510/2016 (Brasil, 2016), com termo de consentimento livre e esclarecido e tratamento de dados conforme a legislação de proteção de dados pessoais.

Etapas e Instrumentos

Na primeira etapa, a análise da demanda envolve entrevistas com gestores, operadores, equipes de manutenção e laboratório e representantes dos trabalhadores, além da análise documental de procedimentos, organogramas, escalas de turnos e registros de ocorrências, de modo a reconstituir a tarefa prescrita. A segunda etapa consiste na observação sistemática da atividade em salas de controle e em campo, com registro de estratégias de regulação, interrupções, comunicações e ações fora do procedimento, acompanhada de verbalizações e, quando autorizado, de registros em vídeo para autoconfrontação com os operadores.

A terceira etapa trata dos registros de alarmes e eventos do SCADA, que serão extraídos de períodos representativos, incluindo a variação sazonal da qualidade da água bruta. Calculam-se indicadores derivados da gestão de alarmes (ISA, 2016; EEMUA, 2013; IEC, 2022): alarmes por operador por dia e por 10 minutos, episódios de inundação, alarmes permanentes, principais geradores e tempo até o reconhecimento. A quarta etapa trata do ambiente: medições de cloro no ar com detectores eletroquímicos fixos e portáteis, registro de condições térmicas e de ventilação e coleta de amostras de água e de ar para análise de trihalometanos por técnicas cromatográficas em laboratório parceiro, sempre cruzadas com tarefas, postos e horários observados.

A quinta etapa consiste na avaliação da carga mental e dos fatores psicossociais do trabalho. Para isso, emprega-se o NASA-TLX (*National Aeronautics and Space Administration Task Load Index*) (Hart; Staveland, 1988), instrumento destinado à mensuração subjetiva da carga de trabalho percebida, em conjunto com a avaliação dos fatores psicossociais por metodologia escolhida conforme as orientações do Ministério do Trabalho (Brasil, 2025), complementada por entrevistas sobre a percepção de risco dos trabalhadores.

Como a modelagem de trabalhadores a partir de dados levanta questões éticas (Kaasinen *et al.,* 2020), os indicadores de alarmes serão analisados no nível do sistema e da situação de trabalho, e não como avaliação individual de desempenho, e isso será explicitado aos participantes. A sexta etapa é o projeto participativo, com oficinas para construir cenários de ação futura e alternativas de layout da casa de química e da sala de controle, de telas e de hierarquia de alarmes (Daniellou, 2007; ISO 11064), com simulação de cenários e avaliação segundo princípios de projeto centrado no ser humano (ISO 9241-210).

Indicadores

O Quadro 2 reúne os indicadores definidos a priori, o que reduz o risco de que a análise seja orientada por achados posteriores e facilita a comparação entre unidades.

Quadro 2 – Indicadores do protocolo de AET para ETAs digitalizadas.

Dimensão	Indicadores	Fontes e instrumentos
Alarmes	Alarmes por operador por dia e por 10 min; episódios de inundação (10 ou mais em 10 min); alarmes permanentes; principais geradores; tempo até o reconhecimento.	Registros históricos do SCADA; ISA-18.2, EEMUA 191 e IEC 62682.
Atividade real	Estratégias de regulação; interrupções; ações fora do procedimento; tempo em tela e em campo.	Observação sistemática, verbalizações e autoconfrontação.
Carga e percepção	Carga mental percebida; fadiga; percepção de risco; fatores psicossociais.	NASA-TLX; entrevistas; metodologia conforme orientação do MTE.
Exposição	Cloro no ar por tarefa e picos; trihalometanos em água e ar.	Detectores eletroquímicos; análise cromatográfica em laboratório parceiro.
Segurança e confiabilidade	Incidentes e quase-incidentes; erros por cenário; probabilidade de erro humano.	Registros, entrevistas e técnica de análise de confiabilidade humana, como o CREAM.
Projeto	Avaliação de alternativas de layout, telas e alarmes por carga, exposição e viabilidade.	Oficinas participativas e simulação de cenários.

Fonte: elaborado pela autora.

Critérios de Rigor e Limites do Protocolo

A confiabilidade dos resultados dependerá da triangulação entre observação, registros do SCADA, medições ambientais e relatos dos trabalhadores, da validação dos diagnósticos com os próprios operadores e da descrição detalhada dos casos, que permite julgar a transferibilidade dos achados. Entre os limites previstos estão o número reduzido de casos, a possível alteração de comportamento pela presença do pesquisador, a variação sazonal de qualidade da água e a dependência de acesso a dados dos prestadores. A comparação de medições com limites normativos deve considerar a versão vigente das normas na data da coleta e as diferenças de jornada e de metodologia entre os documentos. Por fim, o protocolo não pretende estabelecer relações causais entre digitalização e saúde, mas descrever como o trabalho real, a exposição e a carga cognitiva se articulam em situações concretas.

DISCUSSÃO

A revisão mostra uma assimetria: há literatura consistente sobre ironias da automação, alarmes e carga cognitiva, mas ela provém sobretudo de outros setores; e há literatura crescente sobre riscos ocupacionais em serviços de água e esgoto, mas ela dá pouca atenção ao trabalho de supervisão digital. O ponto de

encontro entre as duas, a atividade real do operador de ETA que supervisiona telas, alarmes e modelos preditivos enquanto lida com a exposição química residual, é pouco estudado. É essa a lacuna que o protocolo busca preencher.

A discussão sobre o marco normativo mostra que o momento é oportuno. A inclusão dos riscos psicossociais na NR-1, o vínculo com a NR-17 e a proposta de revisão dos limites de exposição ocupacional ampliam a demanda por avaliações que integrem exposição, organização e carga mental. Para prestadores de pequeno porte, que dispõem de poucos recursos, um protocolo exequível e com indicadores claros pode funcionar como referência de método. Esse benefício, porém, depende de que a análise seja conduzida com os trabalhadores e de que seus resultados não sejam usados como avaliação individual, sob pena de gerar desconfiança e comprometer a própria qualidade dos dados.

Há também implicações para o projeto de situações de trabalho. Se as hipóteses da seção 4.4 se confirmarem, a racionalização de alarmes, a hierarquização de informações nas telas e a transparência dos modelos preditivos poderão reduzir a carga cognitiva e melhorar a capacidade de intervenção. Se não se confirmarem, o estudo terá produzido um retrato empírico de ETAs brasileiras que hoje inexiste. Em ambos os casos, as transformações devem ser discutidas com os operadores, que conhecem as variabilidades da água bruta e dos equipamentos e podem antecipar os efeitos das mudanças. Em relação ao trabalho desenvolvido por Carvalho (2026), a contribuição deste artigo é converter o referencial conceitual em desenho de pesquisa e em indicadores verificáveis.

A revisão realizada e aqui apresentada, é narrativa e não sistemática; a busca bibliográfica esteve sujeita a viés decorrente da priorização de fontes de acesso aberto; parte das evidências relativas a sistemas de alarme e carga cognitiva foi obtida em outros setores industriais, o que pode restringir sua generalização para o contexto estudado; a análise normativa reflete a situação conhecida entre maio e outubro de 2026, estando sujeita a futuras alterações regulatórias; e o protocolo proposto ainda não foi validado em campo. Apesar dessas limitações, a pesquisa possui relevância ao integrar contribuições da ergonomia, dos fatores humanos, da segurança de processos e da gestão de riscos em uma estrutura única de análise, suprindo uma lacuna frequentemente observada na avaliação de salas de controle. Além disso, o desenvolvimento do protocolo constitui uma contribuição original do estudo, ao sistematizar critérios, indicadores e procedimentos capazes de orientar diagnósticos futuros, apoiar a tomada de decisão em projetos e intervenções e servir como base para pesquisas posteriores voltadas à sua aplicação, validação e aperfeiçoamento em condições reais de operação.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A digitalização das ETAs reorganiza o trabalho, mas não elimina a exposição química nem a necessidade de intervenção humana qualificada. A revisão indica que as ironias da automação permanecem atuais, que os dados de desempenho

de alarmes e de carga cognitiva em ETAs são escassos e que o marco normativo brasileiro está em transição, com demanda por análises do trabalho real. O protocolo de AET proposto combina observação da atividade, registros do SCADA, medições ambientais e projeto participativo, com indicadores definidos a priori e considerações éticas observadas em todas as etapas da pesquisa. Recomenda-se sua aplicação em estudos de casos múltiplos, em parceria com prestadores de portes e graus de automação distintos, e a publicação aberta dos resultados, de modo que serviços de pequeno porte possam adaptá-los às suas realidades.

REFERÊNCIAS

ARTUSO, D. *et al.* Occupational hazards, injuries, and health outcomes among water and wastewater workers: a systematic review. **Applied Sciences**, v. 16, n. 17, art. 8553, 2026. DOI: 10.3390/app16178553.

BAINBRIDGE, L. **Ironies of automation**. Automatica, v. 19, n. 6, p. 775-779, 1983. DOI: 10.1016/0005-1098(83)90046-8.

BAXTER, G.; ROOKSBY, J.; WANG, Y.; KHAJEH-HOSSEINI, A. The ironies of automation… still going strong at 30? In: **European Conference On Cognitive Ergonomics**, 2012. Proceedings […]. 2012.

BRASIL. Conselho Nacional de Saúde. **Resolução nº 510, de 7 de abril de 2016**. Dispõe sobre as normas aplicáveis a pesquisas em Ciências Humanas e Sociais. Brasília, DF, 2016.

BRASIL. **Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020**. Atualiza o marco legal do saneamento básico. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2020.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021.** Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS nº 5/2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Brasília, DF, 2021.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **Consulta pública: proposta de revisão dos anexos sobre agentes químicos da Norma Regulamentadora nº 15** (NR-15). Participa + Brasil, 30 maio a 5 set. 2022. Disponível em: https://www.gov.br/participamaisbrasil/consulta-publica-anexos-nr-15.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **Portaria MTE nº 1.419, de 2024. Altera a Norma Regulamentadora nº 1 (NR-1) para dispor sobre os fatores de risco psicossociais relacionados ao trabalho**. Brasília, DF, 2024.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **Guia de informações sobre os fatores de risco psicossociais relacionados ao trabalho**. Brasília, DF: MTE, 2025.

CARDOSO, P. H. G. **Heterogeneidade, eficiência e desempenho dos serviços de água e esgoto no Brasil: uma revisão da literatura sobre o saneamento**

básico e seus desafios de universalização. Observatório de la Economía Latinoamericana, v. 23, n. 11, e12231, 2025. DOI: 10.55905/oelv23n11-078.

CARVALHO, E. R. **Água invisível, corpo exposto: trihalometanos, cloração e ergonomia ambiental e situada**. In: RIBEIRO, G. F. (org.). Ergonomia e qualidade de vida no trabalho: conceitos, métodos e aplicações. Guarujá: Editora Científica Digital, 2026. cap. 7. DOI: 10.37885/260922873.

DANIELLOU, F. **The French-speaking ergonomists' approach to work activity: cross-influences of field intervention and conceptual models.** Theoretical Issues in Ergonomics Science, v. 6, n. 5, p. 409-427, 2005.

DANIELLOU, F. **A ergonomia na condução de projetos de concepção de sistemas de trabalho.** In: FALZON, P. (ed.). Ergonomia. São Paulo: Blucher, 2007.

EEMUA. **EEMUA Publication 191: alarm systems – a guide to design, management and procurement.** 3. ed. London: Engineering Equipment and Materials Users Association, 2013.

ENDSLEY, M. R. **Toward a theory of situation awareness in dynamic systems**. Human Factors, v. 37, n. 1, p. 32-64, 1995.

ENDSLEY, M. R. **From here to autonomy: lessons learned from human–automation research**. Human Factors, v. 59, n. 1, p. 5-27, 2017.

FALZON, P. (ed.). **Ergonomia.** São Paulo: Blucher, 2007.

GRIGG, N. S. **Digital transformation in water utilities: status, challenges, and prospects.** Smart Cities, v. 8, n. 3, art. 99, 2025. DOI: 10.3390/smartcities8030099.

GUÉRIN, F. *et al.* **Compreender o trabalho para transformá-lo: a prática da ergonomia**. São Paulo: Blucher, 2001.

HART, S. G.; STAVELAND, L. E. **Development of NASA-TLX (Task Load Index): results of empirical and theoretical research.** In: HANCOCK, P. A.; MESHKATI, N. (ed.). Human mental workload. Amsterdam: North-Holland, 1988. p. 139-183.

HELTE, E. *et al.* Exposure to drinking water trihalomethanes and risk of cancer: a systematic review of the epidemiologic evidence and dose-response meta-analysis. **Environmental Health Perspectives,** v. 133, n. 1, art. 016001, 2025. DOI: 10.1289/EHP14505.

HOGUE, D.; MIRCHANDANI, P.; BOYER, T. H. Predictive capability of THM models for drinking water treatment and distribution. **Environmental Science: Water Research & Technology**, v. 9, n. 4, p. 1012-1025, 2023. DOI: 10.1039/D2EW00810D.

HOLLNAGEL, E. **Cognitive reliability and error analysis method (CREAM)**. Oxford: Elsevier, 1998.

HOLLNAGEL, E. **Safety-I and Safety-II: the past and future of safety management**. Farnham: Ashgate, 2014.

IEC. IEC 62682:2022: management of alarm systems for the process industries. 2nd ed. Geneva: **International Electrotechnical Commission**, 2022.

ISA. ANSI/ISA-18.2-2016: management of alarm systems for the process industries. **Research Triangle Park: International Society of Automation**, 2016.

ISO. ISO 11064-1:2000. Ergonomic design of control centres – Part 1: Principles for the design of control centres. **Geneva: International Organization for Standardization**, 2000.

ISO. ISO 9241-210:2019: ergonomics of human-system interaction – part 210: human-centred design for interactive systems. **Geneva: International Organization for Standardization**, 2019.

KAASINEN, E. *et al.* Empowering and engaging industrial workers with Operator 4.0 solutions. **Computers & Industrial Engineering,** v. 139, art. 105678, 2020. DOI: 10.1016/j.cie.2019.01.052.

PARASURAMAN, R.; MANZEY, D. H. **Complacency and bias in human use of automation: an attentional integration**. Human Factors, v. 52, n. 3, p. 381-410, 2010.

POHL, R.; OEHM, L. **Towards a new mindset for interaction design: understanding prerequisites for successful human–machine cooperation using the example of food production**. Machines, v. 10, n. 12, art. 1182, 2022. DOI: 10.3390/machines10121182.

RAGNEBRO, O. *et al.* **Chloroform exposure in air and water in Swedish indoor swimming pools – urine as a biomarker of occupational exposure.** Annals of Work Exposures and Health, v. 67, n. 7, p. 876-885, 2023. DOI: 10.1093/annweh/wxad035.

STRAUCH, B. **Ironies of automation: still unresolved after all these years.** IEEE Transactions on Human-Machine Systems, v. 48, n. 5, p. 419-433, 2018.

VAN DE MERWE, K.; MALLAM, S.; NAZIR, S. **Agent transparency, situation awareness, mental workload, and operator performance: a systematic literature review.** Human Factors, v. 66, n. 1, p. 180-208, 2024. DOI: 10.1177/00187208221077804.

VILLANUEVA, C. M. *et al.* **Global assessment of chemical quality of drinking water: the case of trihalomethanes.** Water Research, v. 228, art. 119388, 2023. DOI: 10.1016/j.watres.2022.119388.

WANG, J.; YANG, F.; CHEN, T.; SHAH, S. L. An overview of industrial alarm systems: main causes for alarm overloading, research status, and open problems. **IEEE Transactions on Automation Science and Engineering**, v. 13, n. 2, 2016. DOI: 10.1109/TASE.2015.2464234.

WILSON, J. R. **Fundamentals of systems ergonomics/human factors**. Applied Ergonomics, v. 45, n. 1, p. 5-13, 2014.

WISNER, A. **A inteligência no trabalho: textos selecionados de ergonomia.** São Paulo: Fundacentro, 1994.

ŻYWIEC, J.; TCHÓRZEWSKA-CIEŚLAK, B.; SOKOLAN, K. **Assessment of human errors in the operation of the water treatment plant.** Water, v. 16, n. 17, art. 2399, 2024. DOI: 10.3390/w16172399.