BIOENERGIA INTELIGENTE: O PAPEL DA AUTOMAÇÃO NA EVOLUÇÃO DO TRATAMENTO DE LODO EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO

Rodrigo Votre[(1)]
Tecnólogo em Automação (UTFPR). Pós-graduado em Mecatrônica (PUC-PR) e Mestre em Meio Ambiente Urbano e Industrial (UFPR).
Lucio Fabiano Ramos[(2)]
Engenheiro Eletricista (CEFET-PR) e Pós-graduado em Gestão Estratégia de Negócios (FGV).
Gilnei de Andrade[(3)]
Técnico em Eletrotécnica(CEFET-PR).
Max Wilson Ortega Peres Junior[(4)]
Técnico em Mecânica (SENAI – PR), Tecnólogo em Fabricação Mecânica (SENAI – PR) e Pós-graduado em Engenharia de manutenção (UNINTER-PR)

Endereço[(1)]**:** Rua Francisco Nunes, 2055 – Prado Velho – Curitiba – Paraná - 80215202- Brasil – Telefone: +55 (41) 991160174 - e-mail: rvotre@sanepar.com.br

RESUMO

Este documento reporta a implementação, operação, funcionamento e otimizações tecnológicas das plantas de bioenergia da Sanepar, usina de biogás da ETE Belém localizada em São José dos Pinhais e a planta de secagem térmica de lodo de esgoto da ETE Atuba Sul, localizada em Curitiba. O tratamento de esgoto doméstico gera quantidades significativas de lodo, representando um dos maiores desafios para os prestadores de serviços de saneamento, que enfrentam altos custos, riscos operacionais e ambientais associados ao seu manejo, descarte e logística. As plantas, em operação plena desde 2023, são exemplos de inovação e sustentabilidade, pois tratam-se de sistemas tecnológicos integrados de última geração, que utilizam como fontes renováveis o biogás proveniente do tratamento anaeróbio do esgoto doméstico, o lodo seco pelo próprio sistema e biomassa a base de madeira no caso da secagem térmica e o esgoto doméstico misturado a resíduos orgânicos, como restos de frutas e resíduos de peixe para biodigestão do lodo e geração de biogás na usina da ETE Belém. Esses sistemas não apenas reduzem as emissões de gases de efeito estufa, mas também materializam os princípios da economia circular, transformando resíduos em recursos energéticos valiosos e contribuindo com a agenda da transição energética sustentável.

PALAVRAS-CHAVE: bioenergia, inovação tecnológica, transição energética

INTRODUÇÃO

O tratamento de esgoto é uma etapa fundamental na gestão de recursos hídricos, visando a proteção da saúde pública e a preservação do meio ambiente. Contudo, esse processo gera subprodutos significativos, entre os quais o lodo de esgoto se destaca. O lodo é composto principalmente por biomassa microbiana resultante da degradação da matéria orgânica presente no esgoto, e sua produção está diretamente relacionada ao aumento da eficiência dos sistemas de tratamento. Trata-se de um resíduo não perigoso, com composição rica em matéria orgânica e nutrientes, o que o torna apto para aproveitamento agronômico e energético, desde que tratado adequadamente (ANDREOLI et al, 2021).

A Companhia de Saneamento do Paraná (Sanepar) é uma empresa de economia mista de capital aberto, com Personalidade Jurídica de Direito Privado e controlada pelo Governo do Estado do Paraná.

Em 2023, a Sanepar destinou 379.044 toneladas de lodo, sendo 33% para aterros e 34% para a agricultura, destacando a dependência dessas práticas tradicionais. A legislação, como a Política Nacional de Resíduos Sólidos, prioriza a redução, reutilização e reciclagem dos resíduos, e alternativas como a secagem térmica e a codigestão de lodo que estão sendo exploradas para reduzir o volume e gerar biogás (SANEPAR, 2023).

Este trabalho aborda os desafios enfrentados pela companhia na gestão do lodo, um subproduto gerado durante o tratamento de esgoto, com implicações significativas para a saúde pública, as emissões atmosféricas e o meio ambiente, o qual tem um alto custo operacional envolvido para deságue e destinação final, além de comprometer a vida útil de aterros (SANEPAR 2024). A Sanepar, que opera em 345 municípios, busca alternativas sustentáveis e eficientes para a destinação desse lodo gerado, que inclui práticas como a disposição em aterros sanitários, coprocessamento e utilização agrícola. O trabalho apresenta também a forma como as tecnologias de automação e indústria 5.0 possibilitam que estes sistemas sejam controlados de forma otimizada, trazendo eficiência operacional, ganho ambiental do tratamento e correta disposição do lodo.

O artigo apresenta dois sistemas de bioenergia da Sanepar, usina de biogás da ETE Belém que recebe o lodo da ETE e faz codigestão com resíduos orgânicos e o sistema de secagem térmica da ETE Atuba Sul. Esses sistemas foram otimizados e se utilizam de soluções automatizadas para monitoramento em tempo real, operacionalização e controle da performance dos processos, incluindo parâmetros operacionais como: quantidade de lodo recebido da ETE, quantidade de lodo digerido após o desaguamento, volume total de biogás, consistência torta de lodo, porcentagem de sólidos clarificado do desaguamento, teor de metano, consistência de lodo na saída do adensamento mecânico e geração de energia elétrica.

OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é demonstrar o desenvolvimento de inovações tecnológicas de automação e indústria 5.0 aplicadas ao controle operacional e monitoramento preditivo nos sistemas de bioenergia da Sanepar, especificamente na usina de biogás da ETE Belém e no Sistema de Secagem Térmica da ETE Atuba Sul. Busca-se eliminar a subjetividade humana na coleta de dados através da integração de um sistema supervisório otimizado, capaz de realizar a leitura direta de variáveis de condição e rastrear indicadores qualitativos, de performance e de manutenção em tempo real. Com essa modernização analítica, o trabalho demonstra a viabilidade técnica e operacional do biogás de Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) como uma fonte energética renovável de alta confiabilidade, promovendo a gestão eficiente de resíduos alinhada à economia circular e à transição energética.

METODOLOGIA UTILIZADA

Este trabalho relata a implementação de sistemas modernos e instiga uma reflexão sobre as soluções inovadoras necessárias para a gestão integrada de lodo de esgoto e biogás e como esses assuntos evocam a agenda de transição energética sustentável.

Considerado como um tema material pela Sanepar, a gestão de resíduos sólidos aborda o conjunto total de ações para realizar a coleta, transporte, tratamento, destinação e disposição dos resíduos gerados nas operações.

Um dos principais subprodutos do tratamento de efluentes é o lodo sanitário, o qual tem um alto custo operacional envolvido para deságue, transporte e destinação final, além de comprometer a vida útil de aterros. O tratamento e disposição final do lodo custa cerca de 20% a 40% do custo operacional de toda estação. (TISUTYA, 2001).

O aproveitamento energético do biogás também está alinhado a outro tema material da companhia, a mudança climática, onde o assunto se tornou pauta interna, abrindo espaço às oportunidades de alavancar projetos e definir estratégias (SANEPAR 2024).

Sendo assim, como resultado da busca incessante de boas referências de economia circular, surgiram na Sanepar os projetos e implantações dos sistemas de bioenergia da usina de biogás da ETE Belém e do sistema de secagem térmica da ETE Atuba Sul.

Na ETE Belém, (Figura 1), temos um sistema de codigestão anaeróbico, que utiliza o lodo da estação de tratamento e demais resíduos orgânicos, como gorduras, restos de peixes e rejeito de frutas e verduras para potencializar a digestão do lodo, mitigando o volume de lodo gerado e que amplia a oferta de biogás para geração de energia elétrica.

Figura 1 - Usina de Biogás da ETE Belém



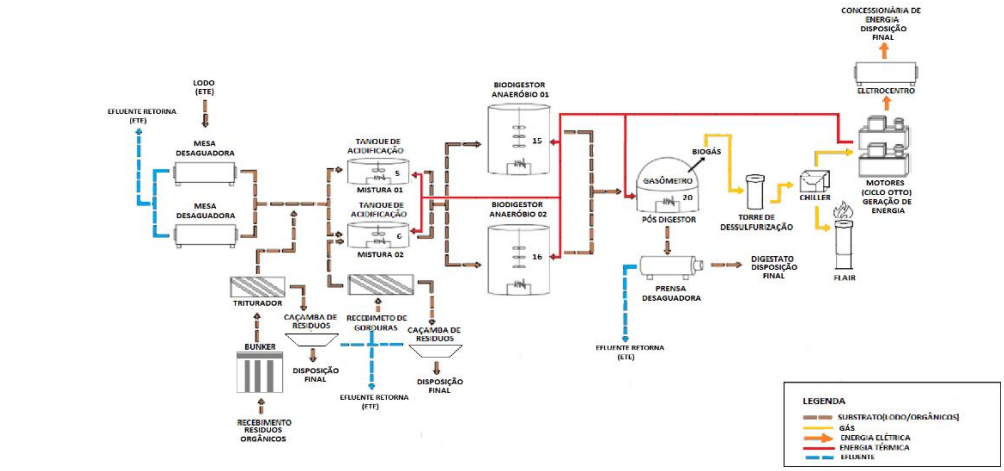
Fonte: SANEPAR 2026

A usina tem a capacidade de tratar 900 m³/dia de lodo de esgoto provenientes da ETE Belém e 150 toneladas dia de resíduos orgânicos, com possibilidade de geração de energia elétrica de até 2,8 MW de potência, 2 motogeradores de 1,4 MW/h cada, através da geração de biogás advinda de 02 biodigestores de 5.000 m³ cada, totalizando 10.000 m³ de digestores e um pós-digestor com capacidade de 3.400 m³.

A tecnologia empregada separa o material fibroso do orgânico, que é bombeado para os tanques de biodigestão e misturado com 900 m³ de lodo de esgoto por dia. A massa orgânica é o "alimento" para os microorganismos contidos nesse lodo. O lodo de esgoto com adição dos resíduos orgânicos é a perfeita combinação para geração do biogás de altíssima qualidade. A qualidade está atrelada diretamente à composição dos tipos de substratos recebidos na usina, sendo que, a digestão do lodo associada à codigestão dos resíduos orgânicos atualmente recebidos, tem gerado biogás composto majoritariamente de 62% de metano, composto ainda de dióxido de carbono, sulfetos de hidrogênio e uma variedade de outros compostos sulfurados e contaminantes.

A codigestão de resíduos sólidos orgânicos para produção de biogás apresenta vantagens em relação a digestão de um único substrato, como melhor rendimento do biogás e estabilização do lodo (SUKSONG et al., 2017). Na (Figura 2) é possível observar um fluxograma do sistema de codigestão. O processo consiste na digestão simultânea de diferentes substratos orgânicos, permitindo balanceamento de nutrientes (OJEA et al, 2023).

Figura 2 - Fluxograma Sistema de Codigestão ETE Belém Biogás



Fonte: SANEPAR, 2026

Enquanto que o sistema de secagem térmica, (Figura 3), é abordado como a implementação de um sistema inovador para lodo de esgoto, instalado na Estação de Tratamento de Esgoto Atuba Sul, em Curitiba-PR. Esse sistema destaca-se por utilizar, de forma combinada, fontes renováveis de combustíveis, antes considerados resíduos e destinados sem aproveitamento: biogás gerado e lodo de esgoto seco gerados na própria ETE, e biomassa de madeira. Ao promover a economia circular e de baixo carbono, essa iniciativa não apenas reduz o impacto socioambiental, mas também agrega segurança operacional, contribuindo para a diminuição das emissões de gases poluentes e dos custos com manejo e disposição final de lodo (POSSETTI, 2015).

Figura 3 - Sistema de Secagem Térmica da ETE Atuba Sul



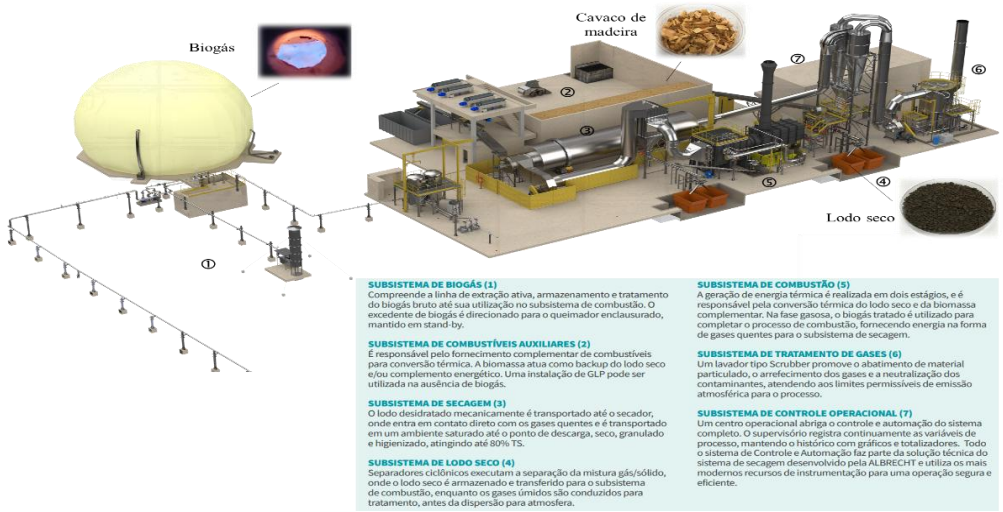
Fonte: SANEPAR, 2026

O objetivo principal da secagem térmica é a redução da quantidade de água presente na massa de lodo, com o propósito de diminuir o custo de transporte. Com a secagem térmica pode-se obter teores de sólidos da ordem de 90 a 95 %, e com isso reduzir significativamente a massa final de lodos gerados (DAVID, 2002).

A secagem térmica de lodo de esgoto emerge, portanto, como uma alternativa viável e sustentável, transformando resíduos em recursos energéticos e se posiciona como uma das principais alternativas para reduzir os custos intrínsecos ao gerenciamento do lodo em ETEs. Além da redução significativa do volume, o lodo seco apresenta características que propiciam o seu aproveitamento tanto como biossólido como insumo energético (RIETOW et al, 2021). Esse método não apenas reduz o volume de lodo a ser descartado, mas também possibilita a recuperação de biogás, que pode ser utilizado como fonte de energia térmica.

Na (Figura 4) é possível observar o diagrama esquemático do sistema de secagem térmica da ETE Atuba Sul, com a descrição das etapas dos processos.

Figura 4: Diagrama do Sistema de Secagem Térmica do lodo de esgoto da ETE Atuba Sul

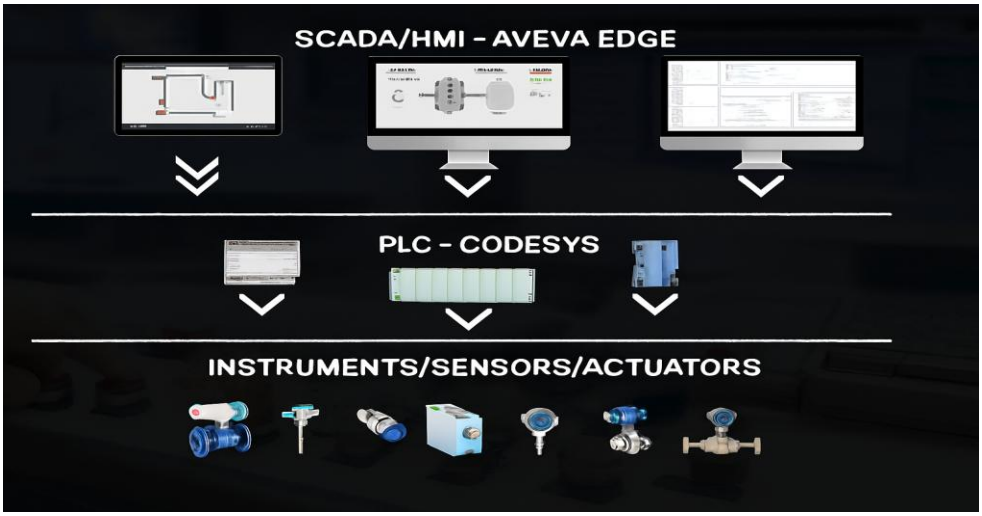


Fonte: ALBRECHT, 2024

O sistema processa cerca de 3.888 kg/h de lodo úmido, gerando 702 kg/h de lodo seco, com mais de 64% desse material sendo aproveitado para combustão no gerador de calor, fornecendo energia limpa e renovável e diminuindo significativamente a quantidade de lodo destinado a aterros sanitários, uma vez que ao final tem-se apenas 149 kg/h de cinzas. O biogás, anteriormente queimado sem recuperação, alimenta um gerador de calor, sendo convertido de forma altamente eficiente e reduzindo o lançamento de gases poluentes na atmosfera. O consumo médio de biogás é da ordem de 67 Nm^3/h e o de cavaco de madeira de 149 kg/h. A substituição de combustíveis convencionais por fontes renováveis geradas no local não apenas garante a sustentabilidade do sistema, mas atende a todos os parâmetros de emissão estabelecidos pelas autoridades ambientais, empregando água de reuso para purificação dos gases gerados no processo (ALBRECHT, 2024). Esse sistema de secagem se posiciona como um modelo pioneiro de gestão integrada de lodo e biogás, estabelecendo um referencial para soluções sustentáveis no setor de saneamento, especialmente no Brasil e em países em desenvolvimento.

Para o funcionamento dessas plantas (ETE Belém Biogás e Secagem térmica ETE Atuba Sul) foram utilizadas ferramentas de Automação, (Figura 5), como sensores, Controladores Lógicos Programáveis (CLP's), Interfaces homem Máquina (IHM's) e sistemas supervisórios (SCADA) integrados via Interface de Programação de Aplicações (API) a sistemas de gestão de ativos empresariais (EAM), indústria 5.0, que monitoram as variáveis de entrada do processo como vazão, nível, pressão e temperatura e permitem monitorar e controlar os equipamentos como bombas, válvulas e posicionadores dos processos para o funcionamento programado dos sistemas. A automação do processo consiste em um conjunto de técnicas por quais se constroem sistemas ativos capazes de atuar com eficiência maximizada pelo uso de informações recebidas do meio sobre o qual atuam. (VOTRE, 2014).

Figura 5 - Sistemas de Automação



Fonte: VOTRE, 2014

RESULTADOS OBTIDOS

Nos sistemas de bioenergia , os principais atrativos para se justificar o investimento em Automação, residem na melhoria da qualidade do tratamento do lodo, por meio do monitoramento e controle em tempo real, redução de custos operacionais, como produtos químicos e substituição da operação nas unidades por operação remota, aumento da produção do biogás, estabilização do processo de digestão anaeróbica, redução dos custos operacionais, melhora da segurança da planta, otimização do uso da energia gerada, monitoramento contínuo e detecção precoce de problemas, geração de dados para a análise de longo prazo e alta disponibilidade operacional das plantas, além da possibilidade de gerenciamento de energia térmica, elétrica e de biogás, das medições precisas dos volumes de lodo e biogás e controle das variáveis dos processos, como indicadores operacionais e de manutenção, pressão, nível, vazão e temperatura.

A automação é fundamental para a otimização da produção, garantir a segurança, reduzir custos operacionais e aumentar a eficiência das plantas de biogás. Ela abrange diversas áreas, desde o monitoramento e controle dos processos biológicos até a gestão da energia gerada e a manutenção dos equipamentos.

Os principais usos da automação nos sistemas de biogás são:

- Monitoramento de parâmetros: Temperatura, PH, pressão, nível, vazão de biogás, composição do biogás (metano, CO2, H2S);
- Controle de alimentação: Dosagem automática de substratos, controle de vazão e mistura;
- Controle de agitação: Otimização da mistura para evitar formação de espuma e sedimentação;
- Controle de temperatura: Manutenção da temperatura ideal para a atividade microbiana;
- Sistema de alerta e segurança: Detecção de vazamentos de gás, sobrepressão, falhas em equipamentos;
- Controle de grupos geradores (CHO): Sincronização com a rede elétrica, otimização da produção de eletricidade e calor;
- Monitoramento do consumo de energia: Otimização do uso interno da energia gerada;
- Sistema de tratamento e compressão de biogás: Controle de qualidade do biogás;
- Monitoramento de equipamentos: Bombas, válvulas, agitadores, compressores, detectando falhas precocemente;
- Controle remoto: Supervisão e ajuste de parâmetros operacionais a distância.

A tecnologia de automação, é uma ferramenta poderosa para a obtenção da garantia da qualidade dos processos, bem como, visa uma otimização da rotina operacional que pode ser traduzida em aumentos de produtividade e redução de custos operacionais (VOTRE, 2014).

A usina de biogás da ETE Belém adota essas tecnologias que além de reduzir a emissão de gases poluentes, otimiza a produção de biogás, alinhando-se a princípios de sustentabilidade, produção mais limpa e eficiência energética. O processo automatizado e o monitoramento contínuo garantem o funcionamento eficaz da planta.
A usina também se destaca por seu papel na reciclagem de resíduos orgânicos que antes eram enviados para aterros sanitários. Empresas e indústrias geradoras de resíduos orgânicos podem ser clientes da usina de biogás da ETE Belém, contribuindo para a redução da poluição ambiental enquanto geram energia renovável.

Inspirada em práticas alemãs, a usina do Belém é um exemplo pioneiro de bioenergia de nova geração no Brasil, representando uma solução moderna e eficiente para a gestão de resíduos e produção de energia limpa (SANEPAR, 2023).

Até Setembro de 2024 a usina era composta por um sistema supervisório SCADA fechado, feito na Áustria e com alguns periféricos de controle descontinuados pelo mercado e apesar de funcional não dispunha de um controle assertivo, gerando retrabalhos, indisponibilidade operacional da planta e diversas dificuldades operacionais e de manutenção.

Quando a Sanepar adquiriu a usina de biogás de ETE Belém em 2023, foram realizados diversos diagnósticos operacionais, identificando gargalos e oportunidades de melhorias. Foi substituído o sistema SCADA e o controlador principal, por padrões adotados nos sistemas automatizados da Sanepar. Foram refeitas e transcritas lógicas operacionais que estavam em alemão e foram integrados na automação novos processos até então controlados localmente, como o moinho de martelos que tritura os orgânicos na entrada do processo, o sistema de deságue de lodo e o eletrocentro. Foi criada uma nova rede de comunicação em profinet entre os sistemas de instrumentação, acionamentos e controle, visando aumentar a disponibilidade e confiabilidade do sistema e foram desenvolvidas rotinas e lógicas operacionais no supervisório, uma inovação na Sanepar no controle de processos, que permitiram monitorar e controlar as variáveis do sistema térmico, assim como criar gráficos das grandezas operacionais. O sistema implementado permite fazer as análises operacionais incluindo parâmetros como: quantidade de lodo recebido da ETE, quantidade de lodo digerido após o desaguamento, volume total de biogás, consistência torta de lodo, porcentagem de sólidos clarificado do desaguamento, teor de metano, consistência de lodo na saída do adensamento mecânico e geração de energia elétrica, além das rotinas de manutenção, como lubrificação e troca de peças diretamente do supervisório integrado ao sistema de manutenção EAM e no Business Intelligence (BI) desenvolvido, (Figura 6), permitindo realizar pesquisas diárias, semanais, mensais , ou do tempo estimado em relação ao mesmo período de tempo pesquisado e o monitoramento, controle, acompanhamento das curvas de tendências do processo industrial e a transformação dos dados dos processos em informações valiosas tanto quantitativamente, como qualitativamente, que podem ser utilizados para apoiar decisões estratégicas da Sanepar.

Figura 6 - Business Inteligence (BI)



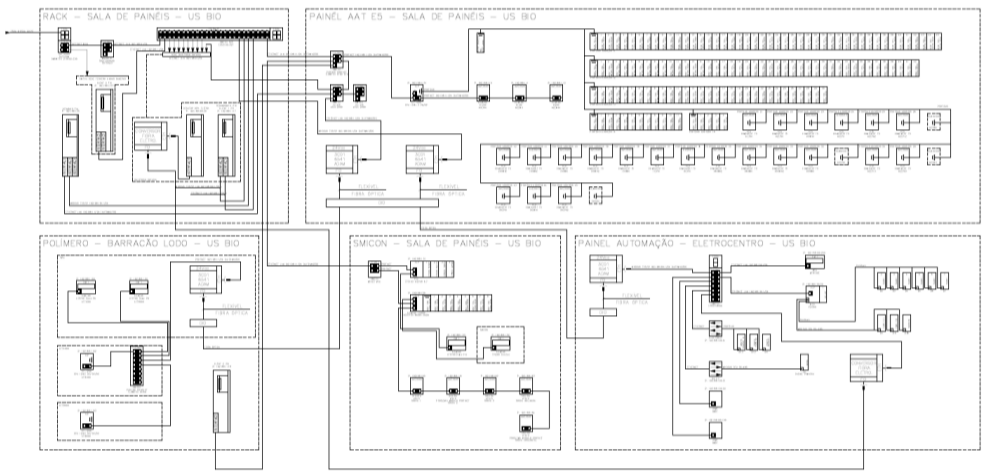
Fonte: Rotária do Brasil, 2025

Para o “retrofit” do sistema, foram utilizados: Supervisório IFIX 2023, com driver IGS 7.6-15 e controlador lógico digital (CLP) Siemens S71500 (CPU 1516-3 PN/DP), programado em TIA portal V.19 (programa aberto); com aquisição em profibus DP de 4 remotas ET200s existentes para aquisição de entradas digitais e analógicas dos instrumentos da planta em (4 -20 mA), responsáveis pelos valores de nível, pressão, vazão, temperatura e status dos equipamentos da planta e acionamentos das saídas das remotas do controlador, para comandar e controlar as válvulas de bloqueio. Foi executada também a atualização e integração tecnológica das redes industriais para o acionamento dos inversores de frequência da planta (22 inversores de frequência do fabricante KEB em Profibus DP e 4 inversores de frequência do fabricante Siemens em Profinet) que comandam o funcionamento dos conjuntos moto bombas da planta. Foi atualizada a documentação, com a inclusão do AS-Built e diagramas lógicos de controle (DLC), com atualização das modificações executadas.

O supervisório também faz a aquisição via fibra ótica e rede Profinet de outros subprocessos da usina que foram integrados na migração tecnológica realizada, conforme topologia de comunicação, (Figura 7):

- Sistema de moinho de martelos (Smicon) - CLP ET200S Profinet, CLP PILZ safety Profinet;
- Eletrocentro : CLP WEG 300 – ModbusTCP/IP;
- Desidratação : Prensa de lodo com CLP S71200 em Profinet e 2 Mesas desaguadora com CLP S71200 em Profinet.

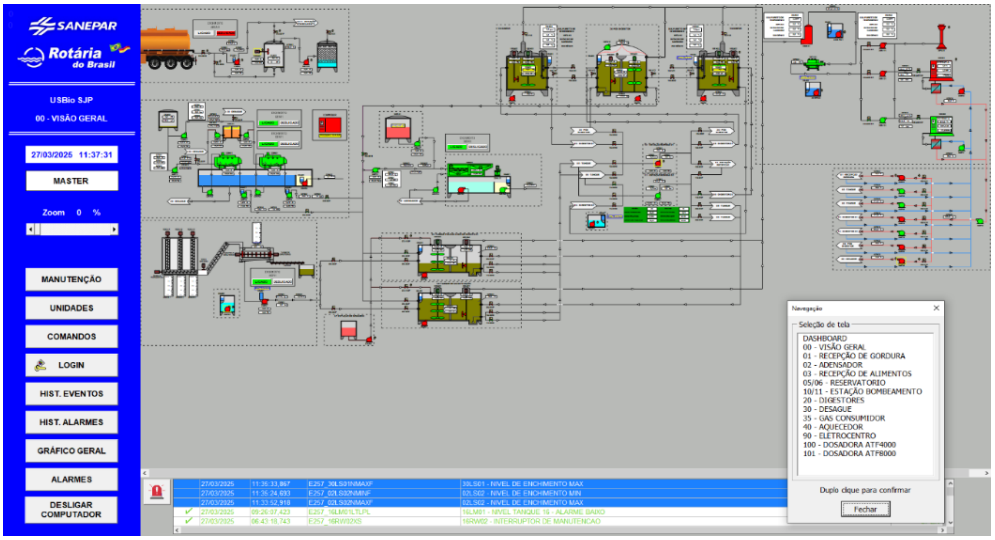
Figura 7 – Topologia de Comunicação



Fonte: SANEPAR, 2026

Na (Figura 8), temos a visão geral da usina de biogás da ETE Belém, com todos os subprocessos e periféricos do sistema onde podemos operar, monitorar e controlar a operacionalização e funcionamento da usina.

Figura 8 – Visão Geral do Supervisório da Usina de Biogás da ETE Belém



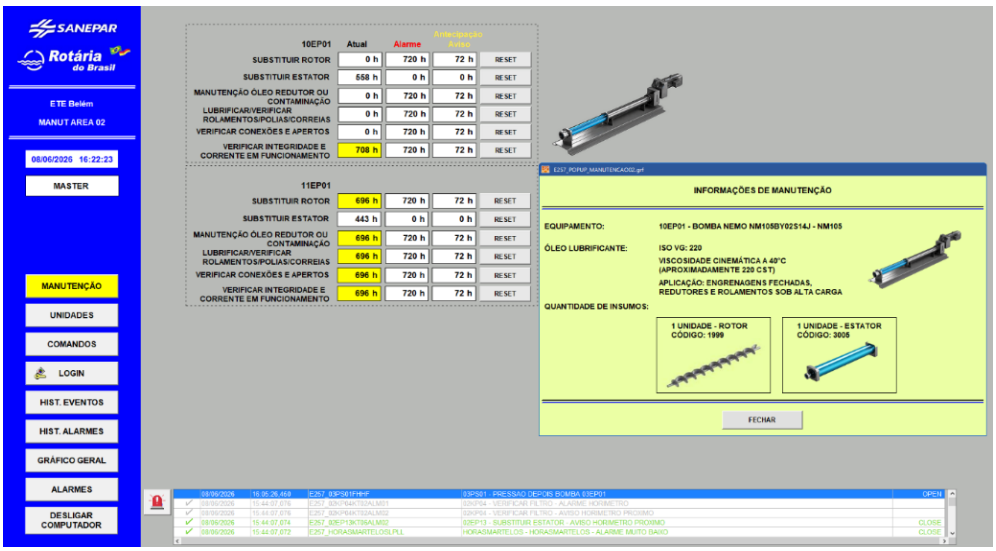
Fonte: SANEPAR 2025

Na (Figura 9), temos a tela de manutenção dos processos do supervisório, de onde é possível parametrizar e controlar os tempos de lubrificação ou troca de componentes do processo, trazendo facilidade às manutenções dos equipamentos eletromecânicos e ao controle assertivo da Usina. O plano de manutenção desenvolvido, foi integrado ao sistema de gerenciamento e manutenção de ativos EAM Fractal, criando uma interface entre os sistemas de tecnologia operacional e tecnologia da informação (TO/TI).

A transição para o modelo digitalizado permite uma visão analítica sem precedentes (ABECOM, 2024). A integração Supervisório-Fractal elimina o *gap* temporal entre a necessidade técnica e a emissão da ordem de serviço.

Ao contrário dos sistemas tradicionais que dependem de datas fixas e estimativas para a geração de Ordens de Serviço (OS), o Sistema integrado possibilita uma dinâmica baseada na condição real do ativo. Assim que o sistema detectar o atingimento de um limiar, uma Ordem de Serviço (OS) é aberta automaticamente, com a reserva de materiais e a notificação imediata da equipe técnica.

Figura 9: Tela de controle de manutenção



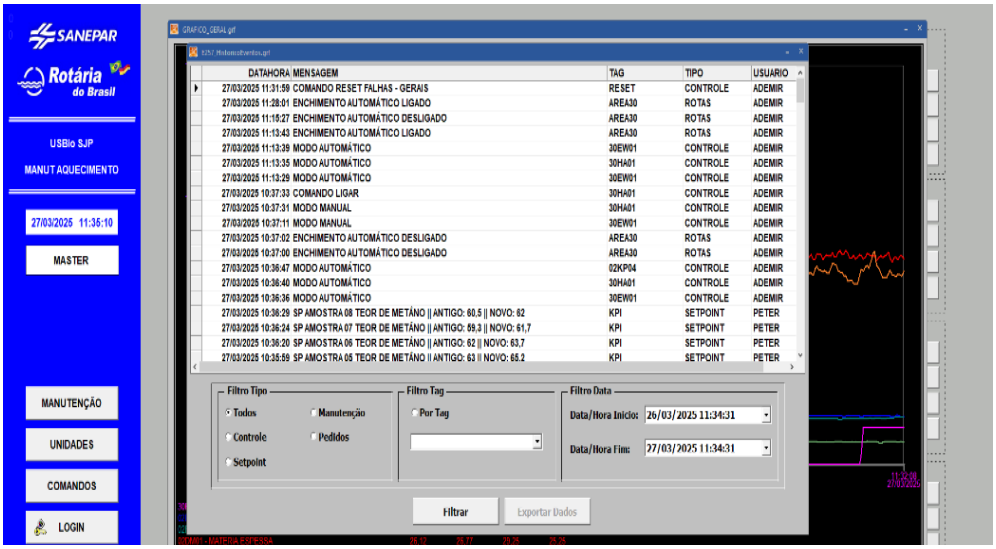
Fonte: SANEPAR, 2026

Nessa tela, ícone manutenção, é possível verificar quais subsistemas estão em alarme ou em falha, consultar as recomendações técnicas de cada componente, como tipo de óleo, filtros e peças e acompanhar o ciclo de funcionamento dos equipamentos eletromecânicos.

A manutenção moderna deve ser encarada como uma função estratégica, essencial para a competitividade das organizações, com conceitos baseados na Indústria 5.0, onde a transição de planos de manutenção estáticos, baseados em calendários, para modelos dinâmicos baseados na condição real do ativo trazem agilidade e evitam intervenções desnecessárias nos sistemas. (ERKAMP; BOKHORST; WORTMANN, 2023).

A (Figura 10) apresenta a tela de gerenciamento de alarmes da planta, responsável por consolidar o histórico e o log de eventos e acessos do sistema. A interface permite que o operador aplique filtros avançados por subsistemas, tipologia de falhas e períodos específicos, otimizando a análise de dados. Além disso, a tela viabiliza o *reset* (reinicialização) das condições operacionais já normalizadas e subsidia o planejamento das intervenções de manutenção necessárias.

Figura 10 – Tela de Gerenciamento de Alarmes

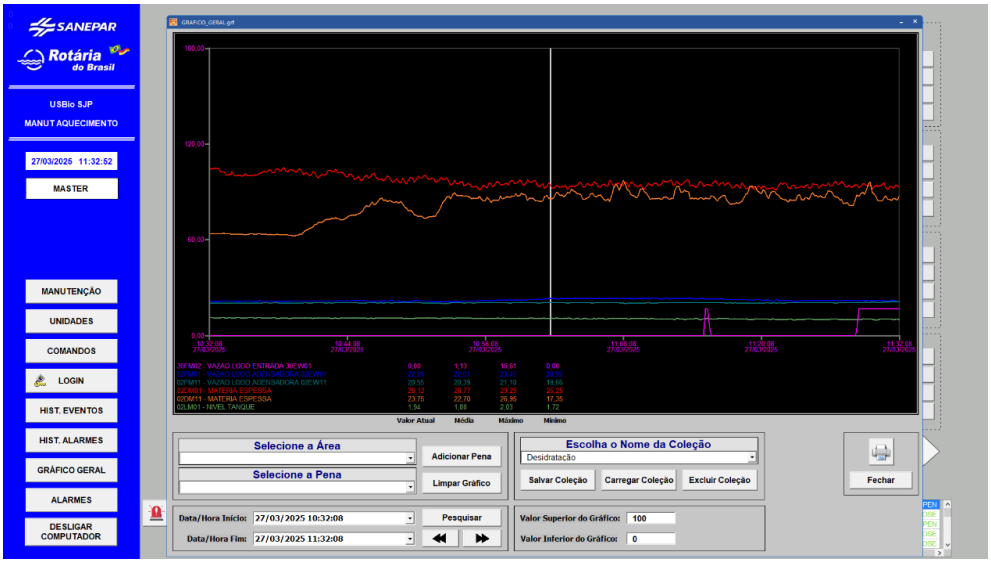


Fonte: SANEPAR 2025

A (Figura 11) ilustra a interface de gráficos dinâmicos implantada para o acompanhamento dos processos. Totalmente customizável, a tela expande a capacidade de supervisão por meio das seguintes funcionalidades:

- **Monitoramento em Tempo Real:** Plotagem e análise instantânea das principais variáveis analógicas e digitais do sistema;
- **Correlação de Instrumentos:** Cruzamento de dados para avaliar o comportamento simultâneo e o funcionamento dos sensores;
- **Lógica de Monitoramento Estratégico:** Criação de regras lógicas para comparar indicadores complementares, como o diferencial entre as temperaturas de entrada e saída;
- **Agrupamento por Coleções:** Organização de variáveis de interesse em grupos temáticos (coleções), agilizando o diagnóstico e a análise visual de setores específicos da planta.

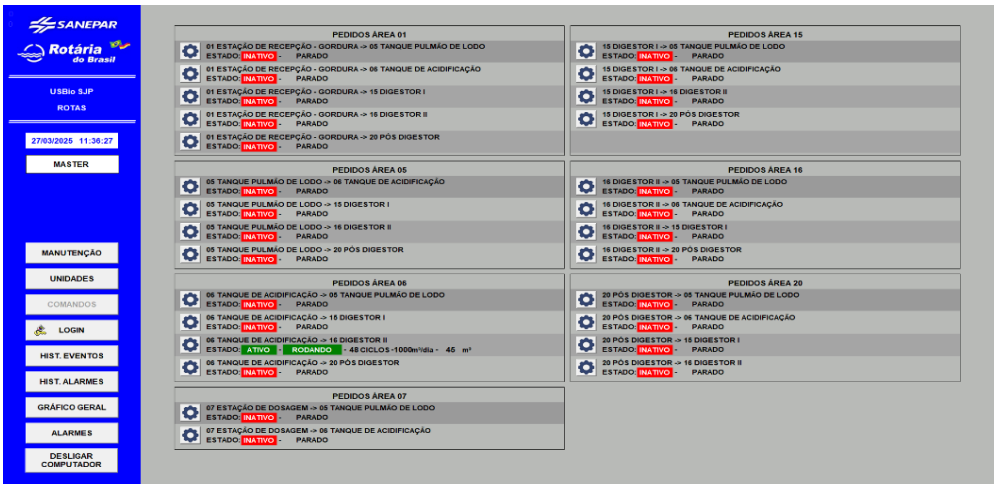
FIGURA 11 – Gráficos do Processo



Fonte: SANEPAR 2025

Foi desenvolvida também a rota de comandos dos subprocessos da usina, ilustrada no fluxograma operacional (Figura 12). Esta interface gráfica do tipo sinóptica, permite ao operador obter uma visão sistêmica e integrada de toda a planta, facilitando a execução e o acompanhamento das rotinas de acionamento. Por meio desse diagrama dinâmico, torna-se possível monitorar o sequenciamento lógico dos processos, identificar os caminhos de fluxo ativos, verificar o status de intertravamentos de segurança e gerenciar a operação de forma centralizada e intuitiva, mitigando erros humanos durante as manobras operacionais.

Figura12 – Fluxograma Operacional do Processo



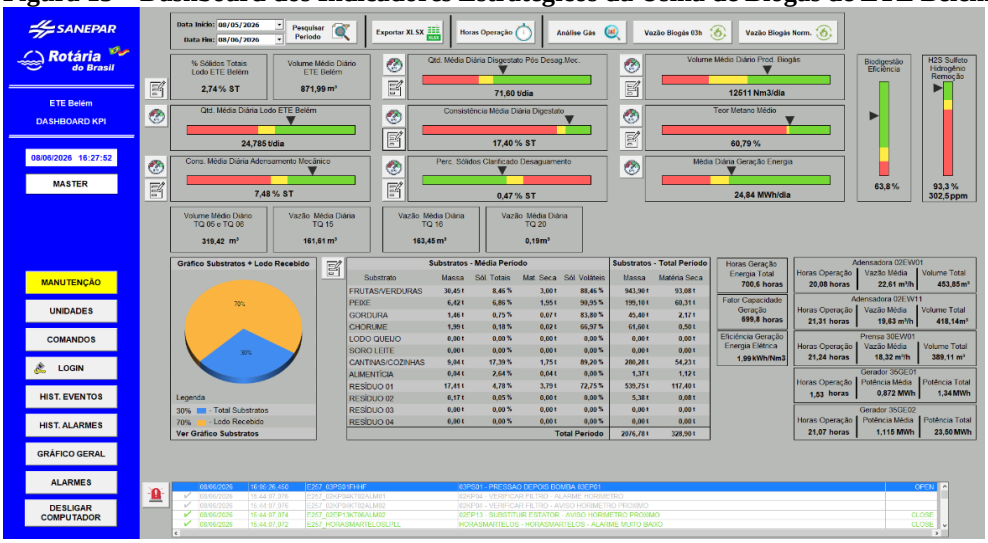
Fonte: SANEPAR 2025

Através das implementações e melhorias de automação, foi possível transcrever automaticamente as variáveis estratégicas do processo em indicadores operacionais (Figura 13). Essa estrutura facilita o monitoramento, o controle operacional, a gestão e a fiscalização do contrato de Operação e Manutenção (O&M). Além disso, o sistema viabiliza a avaliação qualitativa do balanço de massa com base no tipo e na quantidade de resíduos recebidos na usina.

A automação também permitiu a análise de indicadores qualitativos essenciais, tais como a eficiência de remoção de H_2S na torre de dessulfurização, a eficiência dos biodigestores e o rendimento da geração de energia elétrica. Com esses dados, torna-se possível traçar tendências do processo industrial, analisar a saturação do sistema de dessulfurização e programar alarmes automatizados para o acionamento do *flare* (queima de biogás).

Por fim, o indicador de eficiência da biodigestão atua diretamente no controle do balanço de massa, permitindo o monitoramento em tempo real do rendimento específico de metano (CH4), a estabilização na geração de biogás, a redução de lodo e a estabilidade da carga orgânica. Como resultado é possível prevenir a acidificação dos reatores e otimizar a vida útil dos motogeradores.

Figura 13 – Dashboard dos Indicadores Estratégicos da Usina de Biogás de ETE Belém



Fonte: SANEPAR 2026

Já o sistema de secagem térmica instalado na ETE Atuba Sul por sua vez, é um exemplo inovador de como a gestão sustentável de resíduos pode ser aplicada no tratamento de lodo de esgoto, utilizando fontes de energia renovável para reduzir o impacto ambiental e promover a economia circular. Esse sistema é alimentado por três matrizes energéticas: biogás, lodo seco e biomassa de cavaco de madeira, que, ao serem combinadas, aumentam a eficiência energética e minimizam a necessidade de combustíveis fósseis (ALBRECHT, 2024). Em operação desde 2023, o sistema tem se mostrado eficiente na redução do volume de lodo para destinação final, promovendo simultaneamente sua higienização.

O lodo de esgoto, com cerca de 20% de sólidos totais (80% de umidade), passa por uma etapa de desidratação mecânica antes de ser introduzido no sistema de secagem. No secador Bruthus®, o lodo úmido entra em contato com gases quentes gerados por um gerador de calor Drako®, que utiliza biogás, cavaco de madeira e lodo seco (ALBRECHT, 2024). O processo promove a evaporação da água do lodo, formando uma atmosfera saturada de vapor que facilita a secagem e promove o aquecimento da massa de lodo, permitindo significativas taxas de remoção de água, possibilitando a higienização do lodo e reduzindo a concentração de patógenos (ANDREOLI et al, 2021).

Após a secagem, os gases úmidos e contaminados com material particulado são encaminhados para separadores ciclônicos e, posteriormente, para um lavador de gases (scrubber). O lavador remove os contaminantes através de um processo de mistura com líquidos e um sistema de dosagem de álcali, utilizando água de reuso proveniente do tratamento de esgoto da própria ETE (ALBRECHT, 2024).

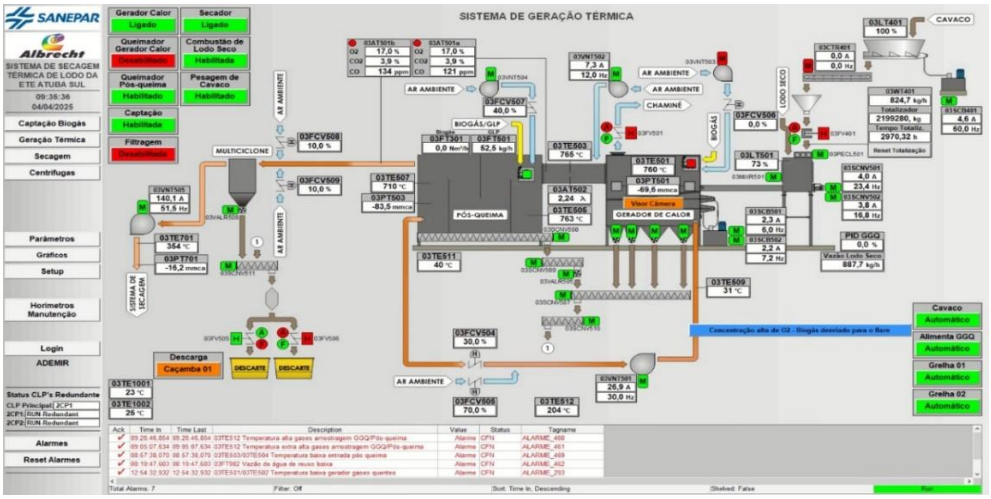
O sistema tem uma eficiência energética notável: parte do lodo seco gerado é reutilizada como combustível auxiliar para o próprio processo de secagem, devido ao alto poder calorifico que possui, enquanto outra parte é destinada a fertilizantes orgânicos ou enviada para caçambas. (POSSETTI et al, 2015).

O produto resultante é versátil, servindo como combustível auxiliar para o próprio sistema ou como matéria-prima para a produção de fertilizantes orgânicos. Cerca de 64% desse material está sendo utilizado como combustível, diminuindo drasticamente a quantidade de lodo destinado a aterros sanitários, tendo como produto final apenas cinzas. Além disso, o sistema utiliza o biogás rico em metano produzido nos reatores anaeróbios. Esse biogás, anteriormente queimado sem recuperação, alimenta um gerador de calor e junto com o lodo seco produz mais de 65% da energia térmica demandada pelo sistema. (SANEPAR 2023).

A planta foi comissionada utilizando diversas tecnologias de automação, onde foram utilizados sistema SCADA IFIX 2023, com dois controladores principais e redundância operacional e sistema de segurança a prova de falhas (*fail safety*), interligados a diversos controladores remotos que disponibilizam os dados de *IO's*

e variáveis redundantes de pressão, temperatura, vazão e nível da planta e controlam diversos inversores de frequência para os acionamentos das máquinas. Todos estes controles estão interligados a uma rede de comunicação Profinet em topologia em Anel, onde as etapas do processo são acompanhadas e permitem geração de gráficos e tendências do sistema supervisório. Na (Figura 14) temos a tela de supervisório do sistema de geração térmica.

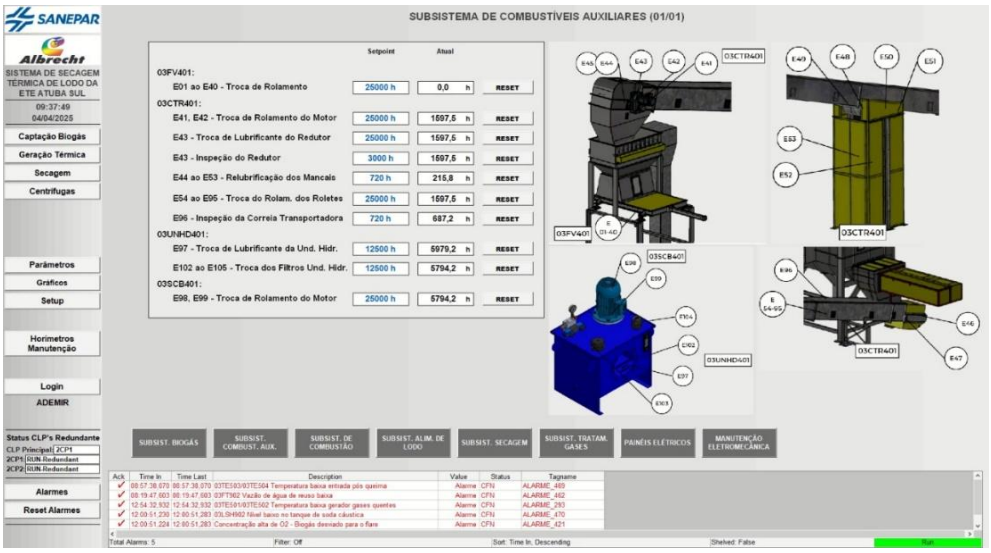
FIGURA 14 – Sistema de Geração Térmica



Fonte: SANEPAR, 2025

Na (Figura 15), é possível visualizar de forma expandida as TAG's das partes móveis dos equipamentos, e o controle de manutenção implementado, onde é possível acompanhar a manutenção preventiva do sistema, o tempo de funcionamento das partes móveis e tempos de lubrificação e troca de peças, inclusive com registro de eventos do horário e de qual operador efetuou o registro da ocorrência. Esse sistema está integrado ao sistema de gerenciamento EAM/ ERAT permitindo o controle automatizado da manutenção e o gerenciamento de ativos.

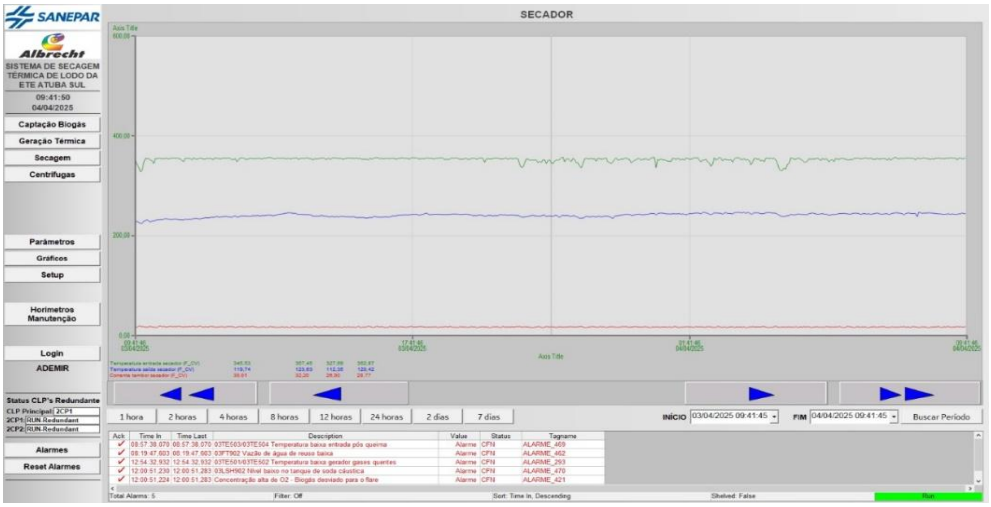
Figura 15 - Tela de Manutenção do Sub-sistema de Combustíveis Auxiliares



Fonte: SANEPAR, 2025

A (Figura 16), demonstra os gráficos do sistema de secagem, onde é possível comparar as variáveis do sistema e fazer o acompanhamento atemporal dos processos.

Figura 16 - Gráficos do Processo do Sistema de Secagem Térmica



Fonte: SANEPAR, 2025

O objetivo principal da secagem térmica é a redução da quantidade de água presente na massa de lodo, com o propósito de diminuir o custo de transporte caso esse material necessite ser transportado para outro local. Com a secagem térmica pode-se obter teores de sólidos da ordem de 90 a 95 %, e com isso reduzir significamente a massa final de lodos gerados (DAVID 2002).

Por decisão estratégica, a Sanepar contratou, em 2023, os serviços de operação e manutenção (O&M) para os seus sistemas de bioenergia, englobando a usina de biogás da ETE Belém e o sistema de secagem térmica da ETE Atuba Sul. Paralelamente, a companhia manteve um corpo técnico próprio, multidisciplinar e de alta qualificação. Essa equipe, composta por profissionais de operação, química, automação, engenharia elétrica e manutenção, é responsável por diagnósticos complexos, otimizações sistêmicas, prospecção de ampliações, além do controle, gestão e fiscalização dos contratos firmados.

No âmbito de sua atuação, o grupo conduziu um diagnóstico operacional e tecnológico aprofundado das plantas, mapeando as melhorias necessárias e elaborando os Termos de Referência (TR's) para o direcionamento das contratações. Adicionalmente, os profissionais definiram os requisitos lógicos de automação essenciais para o desenvolvimento de indicadores estratégicos, integrando ferramentas alinhadas à Indústria 5.0 para promover a sinergia entre o discernimento humano (*human-centricity*) e a inteligência de dados na tomada de decisões.

ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A estrutura abaixo consolida a discussão dividindo-a em três macrodimensões: **Eficiência do Processo Biotecnológico**, **Sinergia da Indústria 5.0 e Integração Supervisório-EAM**, e os **Ganhos Tripartites (Companhia, Corpo Técnico e Sociedade)** conduzidos pelo Ciclo de *Feedback* Contínuo.

1. **Eficiência Operacional e Confiabilidade do Processo de Biodigestão:**

Os resultados obtidos demonstram que a aplicação de tecnologias de automação e monitoramento contínuo em sistemas de biodigestão promovem ganhos significativos na eficiência operacional, confiabilidade do processo e aproveitamento energético do biogás. A instrumentação e controle de parâmetros críticos como vazão, pressão, temperatura, nível e composição do biogás atuam diretamente no amortecimento de oscilações biológicas. Essa estabilização do ecossistema microbiológico viabilizou uma produção uniforme e de maior qualidade, maximizando o potencial de geração de energia e mitigando perdas por falhas de controle.

Comparando resultados operacionais da Usina de Biogás da ETE Belém, primeiro semestre de 2026 em relação a 2025, é possível verificar, além do atendimento das metas do contrato, o aumento da eficiência dos processos:

- **Lodo Digerido Retirado:** Redução de **5,93%** (de 75,00 para 70,55 t/dia), mantendo-se acima da meta contratual de 63 t/dia;

- **Volume de Biogás:** Crescimento de **14,32%** (de 305.322,50 para 349.046,00 Nm³/mês), superando a meta de 306.000 Nm³/mês;
- **Qualidade do Biogás:** Concentração de metano mantida na faixa de **62,60%**, superando a meta de 61%, com redução do H_2S em **63,45 %** (de 72,26 para 26,41 ppm), mitigando o desgaste dos motogeradores de energia ao qual se recomenda trabalhar abaixo de 200 ppm.
- **Geração de Energia:** Aumento de **8,84%** (de 750,49 para 816,83 MWh/mês), superando a meta de 717 MWh/mês.

Esses resultados comprovam a otimização do processo biológico e a eficiência do balanço de massa na conversão do resíduo em bioenergia.

Adicionalmente, os dados corroboram a relevância da codigestão como estratégia complementar para o incremento de eficiência. Conforme observado por Ojea *et al.* (2023), a utilização simultânea de diferentes substratos otimiza a relação carbono/nitrogênio e melhora as condições microbiológicas do processo, refletindo em maiores rendimentos energéticos. Sob a perspectiva da sustentabilidade e da economia circular, a integração dessas variáveis via Controladores Lógicos Programáveis (CLPs) reduziu sensivelmente as intervenções corretivas em campo. O diagnóstico remoto e os alarmes automáticos anteciparam desvios e minimizaram os períodos de indisponibilidade das plantas, alinhando as operações da Sanepar às tendências globais de digitalização da Indústria 4.0 aplicadas à bioenergia.

2. A Transição para a Indústria 5.0 e Integração Supervisório-EAM:

Embora amparada na robustez de dados da Indústria 4.0, a maturidade do sistema expande-se ao incorporar os preceitos da Indústria 5.0. Este paradigma preconiza a harmonização entre o avanço tecnológico e os valores socioambientais, estabelecendo uma cooperação sinérgica que empodera a tomada de decisão humana (BREQUE; DE NUL; PETRIDIS, 2021). Na arquitetura desenvolvida, essa premissa materializou-se por meio do desenvolvimento de indicadores operacionais e qualitativos, do plano de manutenção embarcado no sistema SCADA e da integração nativa entre o Supervisório e o sistema de Gestão de Ativos (*Enterprise Asset Management* - EAM).

Esta convergência eliminou o *gap* temporal na cadeia de dados, estruturando um Ciclo de *Feedback* Contínuo que converte dados brutos de processo em inteligência estratégica para o monitoramento dos serviços de Operação e Manutenção (O&M). A transição do modelo de gestão reativo para o proativo viabiliza o ajuste fino de insumos em tempo real, como a dosagem de polímeros com base na consistência do lodo , gerando impacto imediato na redução do custo operacional (*OPEX*). Da mesma forma, o acompanhamento rigoroso e auditável das rotinas de manutenção preventiva (lubrificações e trocas de componentes) prolonga a vida útil de equipamentos críticos de alto valor, otimizando os investimentos de capital (*CAPEX*).

Os resultados do sistema de secagem térmica da ETE Atuba Sul apontam para otimização da **gestão de ativos**. Após a integração do plano de manutenção no supervisório integrado ao sistema EAM, houve uma redução de 75% **no tempo de gestão administrativa da manutenção**.

3. Consolidação dos Ganhos Estratégicos Tripartites:

A inteligência de dados gerada pelo sistema consolida benefícios mútuos e interdependentes, divididos em três esferas fundamentais:

- **Para a Companhia:** Garante o estrito *compliance* regulatório e o cumprimento de metas institucionais. A disponibilidade de dados auditáveis em tempo real assegura a rastreabilidade exigida pela norma **ISO 55000 (Gestão de Ativos)**, blindando a companhia contra penalidades regulatórias e fornecendo subsídios precisos para a alta gestão avaliar a performance dos contratos de O&M firmados com terceiros.
- **Para o Corpo Técnico:** Promove a centralidade humana ao eliminar erros de transcrição manual e extinguir o deslocamento constante de operadores para coletas locais. O fornecimento de informações confiáveis de insumos e procedimentos diretamente em *pop-ups* na tela de operação eleva a consciência situacional da equipe e confere agilidade aos diagnósticos.

- **Para a Sociedade:** Potencializa o papel ambiental da Sanepar ao assegurar alta disponibilidade operacional voltada à descarbonização e mitigação de impactos. A transformação de lodo de esgoto e resíduos orgânicos em energia limpa consolida os conceitos de economia circular, reduzindo emissões atmosféricas e demonstrando o compromisso prático da instituição com a saúde pública, a sustentabilidade financeira e o meio ambiente.

Em suma, a modernização tecnológica aplicada à bioenergia traduz-se em maior estabilidade da queima, redução de custos com manutenção corretiva e fiscalização contratual baseada em fatos. Garante-se, assim, que cada recurso financeiro alocado na operação resulte no máximo retorno energético, financeiro e socioambiental.

CONCLUSÕES / RECOMENDAÇÕES

A presente pesquisa permitiu concluir que a automação aplicada aos sistemas de bioenergia constitui uma ferramenta altamente estratégica para a melhoria do desempenho operacional, energético e ambiental de plantas de biodigestão. As otimizações tecnológicas e lógicas implementadas nos sistemas de bioenergia da usina de biogás da ETE Belém e de secagem térmica da ETE Atuba Sul demonstraram que a transformação digital é um elemento fundamental para a modernização do saneamento ambiental. Ao integrar sensores inteligentes, Controladores Lógicos Programáveis (CLPs), comunicação remota e algoritmos de controle, o sistema SCADA deixou de ser um console de monitoramento passivo para se transformar em um motor de decisão prescritiva, promovendo estabilidade ao processo biológico, mitigando falhas e impulsionando a eficiência na produção e no aproveitamento do biogás.

Os resultados comprovam que a internalização da inteligência de dados permitiu o desenvolvimento, diretamente no supervisório, de indicadores operacionais de contrato, indicadores qualitativos de eficiência e um plano de manutenção automatizado (KPIs). Essa infraestrutura viabilizou o monitoramento remoto, gestão e fiscalização dos contratos de O&M baseada em fatos e dados auditáveis. Sob a ótica da gestão de ativos, a automatização das rotinas de manutenção e lubrificação reduziu os custos operacionais, mitigou erros de agendamento e aumentou a disponibilidade dos equipamentos. Na prática, a automatização liberou o corpo técnico de tarefas repetitivas de coleta manual, direcionando a força de trabalho para atividades de maior valor agregado, como o diagnóstico preditivo e a análise de causa raiz. Essa sinergia entre a precisão da automação e a capacidade analítica humana materializa com precisão os conceitos da Indústria 5.0 aplicados ao saneamento, onde a tecnologia atua como agente de empoderamento e centralidade do trabalhador.

Adicionalmente, verificou-se que a valorização energética do biogás e do lodo cumpre um papel disruptivo e sustentável. A usina da ETE Belém e o sistema de secagem da ETE Atuba Sul consolidam as diretrizes institucionais de economia circular ao priorizar o reuso, a reciclagem e a recuperação energética de resíduos orgânicos, mitigando emissões de gases de efeito estufa (notadamente o metano) e transformando passivos ambientais em ativos valiosos. Esse modelo não apenas assegura a viabilidade econômica dos empreendimentos por meio da redução de custos operacionais (OPEX) e proteção de capital (CAPEX), mas também alinha a Sanepar aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU para o acesso à energia limpa e ação climática global. A experiência bem-sucedida dessas plantas estabelece um referencial técnico e de governança nacional e internacional, servindo como justificativa sólida para novos investimentos em transição energética no setor de saneamento.

Como recomendações para a continuidade deste projeto e para o direcionamento de trabalhos futuros, sugere-se:

- **Desenvolvimento de novos indicadores qualitativos:** Disponibilidade hidráulica do sistema, Carga orgânica volumétrica (COV) e Crédito de Carbono;
- **Aplicação de Técnicas de Inteligência Artificial:** Desenvolver algoritmos de aprendizado de máquina (*machine learning*) integrados ao SCADA para a previsão de falhas em ativos críticos e otimização em tempo real do processo microbiológico;
- **Desenvolvimento de Modelos Digitais (*Digital Twins*):** Estruturar gêmeos digitais dos biodigestores para simulação de cenários operacionais complexos, ensaios de segurança e otimização preditiva das plantas;
- **Avaliação Econômica Escalonada:** Realizar análises financeiras comparativas detalhadas para quantificar os ganhos de Capex e Opex proporcionados pela automação em plantas de biodigestão de diferentes portes e capacidades de processamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABECOM. 16 Indicadores de Manutenção Industrial: performance e custos. 2024.
2. ALBRECHT EQUIPAMENTOS INDUSTRIAIS LTDA. Contato pessoal. , Novembro de 2024.
3. ANDREOLI, C. V.; BICO, A. K.; BITTENCOURT, S.; PEGORINI, E. S.; POSSETTI, G. R. C.; CERQUEIRA, P. L. W.; RIETOW, J. C.; AISSE, M. M. Valoração e gerenciamento de subprodutos sólidos do tratamento do esgoto. Parte A: Higienização e uso de lodo no solo – Nota Técnica 4 - Higienização de lodo via estabilização alcalina. Cadernos Técnicos Revista Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 2, n. 1, p. 45-58, 2021.
4. BREQUE, M.; DE NUL, L.; PETRIDIS, A. Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry. Brussels: European Commission, Directorate-General for Research and Innovation, 2021. Disponível em: https://data.europa.eu/doi/10.2777/308405. Acesso em: 12 jun. 2026.
5. DAVID, A. C. Secagem térmica de lodos de esgoto. Determinação da umidade de equilíbrio. 2002. 163 f. Dissertação (Mestrado em Energia). Programa de Interunidades de Pós-graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.
6. ERKAMP, J.; BOKHORST, J. A. C.; WORTMANN, J. C. Dynamic maintenance scheduling in Industry 5.0: A condition-based approach using digital twins. *International Journal of Production Research*, v. 61, n. 14, p. 4821-4838, 2023.
7. POSSETTI, G.R.C.; RIETOW, J.C.; GERVASONI, R.; ALTHOFF, C.A.; CARNEIRO, C de Janeiro, RJ: ABE. Investigação experimental de um sistema piloto de secagem térmica de lodo movido a biogás. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 28., Anais [...]. Rio S. 2015.
8. RIETOW, J. C.; POSSETTI, G.R.C.; LOBATO L.C.S.; ANDREOLI, C. V.;CARNEIRO, C.; BICO, A. K.; WAGNER, L.G.; AISSE, M. M. Valoração e gerenciamento de subprodutos sólidos do tratamento do esgoto. Parte A: Higienização e uso de lodo no solo – Nota Técnica 5 - Secagem e higienização térmica do lodo. Cadernos Técnicos Revista Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 2, n. 1, p. 59-74, 2021.
9. OJEA, A. P. C. S. MARENDA, T. HERNANDEZ, O. A. D. AISSE, M. M. Avaliação preliminar do desempenho de biogás de um digestor anaeróbio a partir da codigestão de lodo de ETE com resíduos orgânicos urbanos e industriais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 32., 2023, Belo Horizonte. Artigo. Belo Horizonte: Abes, 2023. p. 1-10.
10. SANEPAR - Companhia de Saneamento do Paraná. Relatório Integrado, 2023. Disponível em https://ri.sanepar.com.br/docs/Sanepar-2023-12-31-n8Wb9Gjn.pdf.
11. SANEPAR (2024). Inventário de Gases do Efeito Estufa – Resumo Executivo 2023. Curitiba, 35 p., 2024. Disponível em: https://site.sanepar.com.br/sustentabilidade/inventario-de-gases-de-efeito-estufa
12. SUKSONG, W. et al. Anaerobic Co-Digestion of Palm Oil Mill Waste Residues with Sewage Sludge for Biogas Production. Energy Procedia, p. 790, 26 maio 2017.
13. VOTRE, R. Automação no Controle de Perdas e Redução de Impactos Ambientais em Sistemas de Abastecimento de Água. Curitiba 2014. Dissertação. (Programa de Mestrado Profissional em Meio Ambiente Urbano e Industrial) - Universidade Federal do Paraná em parceria com o SENAI-PR e a Universidade de Stuttgart, Curitiba, 2014.
14. TISUTIYA M.T.Características de biossólidos gerados em estações de tratamento de esgotos. In: Biossólidos na agricultura. Capítulo 4. Sabesp, Escola Politécnica-USP, ESALQ-USP/Nupegel, UNESP-Jaboticabal. São Paulo, 2001.