UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

FACULDADE DE ENGENHARIA — CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA

FELIPE ARRONES PEDRAZZI

OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA E AUTOMAÇÃO DE SISTEMAS DE BOMBEAMENTO EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA: ESTUDO DE CASO E PROPOSTA DE CONTROLE PARAMETRIZÁVEL

Ilha Solteira

2026

FELIPE ARRONES PEDRAZZI

OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA E AUTOMAÇÃO DE SISTEMAS DE BOMBEAMENTO EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA: ESTUDO DE CASO E PROPOSTA DE CONTROLE PARAMETRIZÁVEL

Trabalho de Graduação apresentado à Faculdade de Engenharia do Câmpus de Ilha Solteira – UNESP, como requisito obrigatório para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Guilherme de Azevedo e Melo

Coorientador: Prof. Dr. Fábio Cosme Rodrigues dos Santos

Ilha Solteira

2026

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

Pedrazzi, Felipe Arrones.
P372o Otimização energética e automação de sistemas de bombeamento em estações de tratamento de água: estudo de caso e proposta de controle parametrizável / Felipe Arrones Pedrazzi. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2026
77 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira, 2026

Orientador: Guilherme de Azevedo e Melo
Coorientador: Fábio Cosme Rodrigues dos Santos
Inclui bibliografia

1. Saneamento. 2. Deslocamento de carga. 3. Automação industrial. 4. Estação de tratamento de água.

Sandra Montibeller - CRB-8/060/2025

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Câmpus de Ilha Solteira

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Aos seis dias do mês de julho do ano de dois mil e vinte e seis, o discente ***Felipe Arrones Pedrazzi,*** matriculado sob o nº 201054884, tendo como banca examinadora o seu orientador, *o Prof. Dr. Guilherme de Azevedo e Melo, o Prof. Dr. Carlos Antonio Alves e o Prof. Dr. Fábio Bertequini Leão,* apresentou o Trabalho de Graduação intitulado: **"OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA E AUTOMAÇÃO DE SISTEMAS DE BOMBEAMENTO EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA: ESTUDO DE CASO E PROPOSTA DE CONTROLE PARAMETRIZÁVEL"**, obtendo a nota 9,5 (nove e meio) e conceito aprovado.

Prof. Dr. Guilherme de Azevedo Melo
- orientador -

Felipe Arrones Pedrazzi
- discente -

Prof. Dr. Carlos Antonio Alves
- Membro da Banca -

Fábio Bertequini Leão
Prof. Dr. Fábio Bertequini Leão
- Membro da Banca -

Faculdade de Engenharia – Departamento de Engenharia Elétrica
Avenida Professor José Carlos Rossi, 1370 - CEP 15.385-000, Ilha Solteira - SP - Brasil
Tel (18) 37431150 - Fax (18) 3742-2735 - www.feis.unesp.br

Aos meus pais, Sidmar e Margarete e à minha família, pelo apoio incondicional ao longo de toda esta jornada acadêmica. Em especial às minhas avós *Adelia e Irene que foram pilares fundamentais para mim.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço, antes de tudo, aos meus pais e à minha família, que sempre me apoiaram em cada decisão tomada ao longo da graduação e que me ofereceram, nos momentos mais difíceis, a base emocional e o incentivo que viabilizaram a conclusão deste curso, e a minha namorada, pelo amor, paciência e apoio incondicional ao longo de toda esta jornada acadêmica. Aos amigos que acompanharam essa trajetória de perto, meu reconhecimento por compreenderem os períodos de ausência e por celebrarem comigo cada conquista.

Agradeço ao meu orientador Prof Dr. Guilherme de Azevedo e Melo e meu coorientador Prof Dr. Fábio Cosme Rodrigues dos Santos, pelos exímios ensinamentos e correções realizadas em conjunto.

À Sabesp e ao seu corpo técnico, pelo suporte na concessão de dados e conhecimento prático para o desenvolvimento deste estudo. De forma especial, agradeço:

Ao Engenheiro Eletricista Nilson, pela prontidão e clareza ao sanar as dúvidas complexas relativas às faturas e à estrutura tarifária da ETA Vargem Grande.

Ao Engenheiro Mecânico e Supervisor da ETA Vargem Grande, Lucas, pela receptividade e pelo acompanhamento essencial no processo de coleta dos dados que fundamentaram esta pesquisa.

Declaração de Uso de Inteligência Artificial

Declaro que utilizei a ferramenta de inteligência artificial Google Gemini exclusivamente como apoio às atividades de formatação e organização deste trabalho, sem substituição da autoria intelectual do conteúdo apresentado.

O uso da ferramenta limitou-se às seguintes finalidades:

- Adequação de elementos textuais e estruturais às normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT);
- Auxílio na elaboração e organização de cronogramas e planejamentos de atividades;
- Suporte na análise e interpretação dos dados obtidos durante o desenvolvimento do trabalho.

Todas as informações geradas ou sugeridas pela ferramenta foram revisadas, verificadas e validadas pelo autor, que assume integral responsabilidade pelo conteúdo final apresentado, pelas análises realizadas e pelas conclusões obtidas.

RESUMO

A crise hídrica que atingiu a Região Metropolitana de São Paulo entre 2014 e 2016 evidenciou a vulnerabilidade do abastecimento da maior metrópole do país e impulsionou a diversificação de mananciais, da qual resultou o Sistema Produtor São Lourenço (SPSL), inaugurado em 2018 e responsável pelo abastecimento de diversos municípios da região oeste da Grande São Paulo. Como a operação contínua desse sistema depende de processos eletrointensivos de bombeamento, e como o saneamento responde por parcela expressiva do consumo nacional de energia elétrica, sendo a eletricidade uma das principais componentes dos custos operacionais do setor, é apresentado um diagnóstico energético da Estação de Tratamento de Água (ETA) Vargem Grande, unidade central do SPSL, a partir de dados operacionais obtidos pelo sistema supervisório Elipse® ao longo de um semestre de operação. Foram processados dados horários de potência ativa, vazão e nível dos motores de recalque, distribuídos em dois grupos hidráulicos com alturas manométricas distintas. O Indicador de Eficiência Energética (IEE) obtido para a estação já se encontra abaixo do limite de referência estabelecido pelo PROCEL/Sanear, evidenciando um desempenho energético satisfatório e servindo como linha de base para futuras avaliações. A unidade opera sob a Modalidade Tarifária Azul, que exige a contratação independente de uma demanda para o posto de ponta e de outra para o posto fora de ponta. Como contribuição aplicada, propõe-se uma estratégia de deslocamento de carga implementada em Texto Estruturado (ST) na plataforma Codesys®, baseada em uma biblioteca parametrizável de blocos de função, que utiliza a capacidade de armazenamento dos reservatórios de distribuição para antecipar o bombeamento a horários de menor custo, elevando os níveis antes da ponta e reduzindo a operação dos conjuntos motobomba durante esse intervalo. Os dois reservatórios de distribuição considerados são geridos de forma independente, por meio de setpoints específicos de nível e bloqueio seletivo, sem comprometer o revezamento operacional baseado em horímetro. A modulação fina dos conjuntos motobomba apoia-se nos inversores de frequência (VFD), atualmente instalados em apenas parte das bombas, recurso de eficiência energética no controle de vazão cuja extensão às demais bombas ampliaria os ganhos da estratégia. A aplicação da estratégia possibilita reduzir de forma expressiva o bombeamento durante o Horário de Ponta, com foco especial na renegociação da demanda contratada junto à distribuidora, mecanismo central para a obtenção de economia financeira. A arquitetura segue as diretrizes do Plano de Integração dos Sistemas Operacionais (PISO 2.0) e foi concebida para ser replicada em outras unidades do Sistema São Lourenço sem alterações no código-fonte. Os resultados permitem inferir a viabilidade técnica da estratégia, preservando a continuidade operacional do sistema e a segurança do abastecimento da população atendida.

Palavras-chave: Eficiência energética. Saneamento. Deslocamento de carga. Automação industrial. Estação de tratamento de água.

ABSTRACT

The water crisis that affected the São Paulo Metropolitan Region between 2014 and 2016 exposed the vulnerability of the country's largest metropolis and drove the diversification of water sources, which resulted in the São Lourenço Water Production System (SPSL), inaugurated in 2018 and responsible for supplying several municipalities in the western region of Greater São Paulo. Because the continuous operation of this system relies on energy-intensive pumping processes, and because the sanitation sector accounts for a significant share of national electricity consumption, with electricity being one of the main components of the sector's operating costs, an energy assessment is presented of the Vargem Grande Water Treatment Plant (WTP), the central unit of the SPSL, based on operational data obtained through the Elipse® supervisory system over a semester of operation. Hourly data on active power, flow rate, and level were processed for the pumping motors, distributed across two hydraulic groups with distinct manometric heads. The Energy Efficiency Indicator (EEI) obtained for the plant already lies below the reference threshold established by PROCEL/Sanear, indicating a satisfactory energy performance and serving as a baseline for future evaluations. The unit operates under the Blue Tariff Modality, which requires separate contracted demands for the peak and off-peak periods. As an applied contribution, a load shifting strategy is proposed, implemented in Structured Text (ST) on the Codesys® platform and based on a parameterizable library of function blocks, which uses the storage capacity of the distribution reservoirs to anticipate pumping to lower-cost periods, raising their levels before the peak period and reducing the operation of the motor-pump sets during that interval. The two distribution reservoirs considered are managed independently, through specific level setpoints and selective blocking, without compromising the operational rotation based on running-hour meters. The fine modulation of the motor-pump sets relies on the variable frequency drives (VFDs) currently installed on only part of the pumps, an energy-efficiency resource for pump flow control whose extension to the remaining pumps would enhance the strategy. Applying the strategy makes it possible to substantially reduce pumping during the peak period, with particular emphasis on renegotiating the contracted demand with the utility, the central mechanism for achieving financial savings. The architecture follows the guidelines of the Operational Systems Integration Plan (PISO 2.0) and was designed to be replicated in other units of the São Lourenço System without changes to the source code. The results allow inferring the technical feasibility of the strategy, preserving the operational continuity of the system and the supply security of the population served.

Keywords: Energy efficiency. Sanitation. Load shifting. Industrial automation. Water treatment plant.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BEP	*Best Efficiency Point* (Ponto de Melhor Eficiência)
CCO	Centro de Controle Operacional
CLP	Controlador Lógico Programável
CSV	*Comma-Separated Values* (Valores Separados por Vírgula)
DUT	*Data Unit Type* (Tipo de Unidade de Dados)
EEAT	Estação Elevatória de Água Tratada
EEI	*Energy Efficiency Indicator* (sigla em inglês equivalente a IEE)
ETA	Estação de Tratamento de Água
FB	*Function Block* (Bloco de Função)
FBD	*Function Block Diagram* (Diagrama de Blocos Funcionais)
FIT	Transmissor de Vazão
HFP	Horário Fora de Ponta
HP	Horário de Ponta
IEC	*International Electrotechnical Commission*
IEE	Indicador de Eficiência Energética
IHM	Interface Homem-Máquina
IoT	*Internet of Things* (Internet das Coisas)
JSON	*JavaScript Object Notation*
KSB	Klein, Schanzlin & Becker (fabricante de bombas)
LD	*Ladder Diagram* (Diagrama *Ladder*)
LIT	Transmissor de Nível
MGEM	Módulo de Medição de Energia
MQTT	*Message Queuing Telemetry Transport*
OADC	Diretoria de Operações de Águas e Distribuição da Capital
PCE	Painel de Controle de Estação
PID	Proporcional, Integral e Derivativo

PISO	Plano de Integração dos Sistemas Operacionais
PIT	Transmissor de Pressão
PLC	*Programmable Logic Controller* (equivalente em inglês a CLP)
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
QoS	*Quality of Service* (Qualidade de Serviço)
RAT	Reservatório de Água Tratada
RMSP	Região Metropolitana de São Paulo
Sabesp	Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
SCADA	*Supervisory Control and Data Acquisition*
SFC	*Sequential Function Chart*
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
SPSL	Sistema Produtor São Lourenço
ST	*Structured Text* (Texto Estruturado)
TAC	Teste de Aceitação de Campo
TAF	Teste de Aceitação de Fábrica
TCP/IP	*Transmission Control Protocol/Internet Protocol*
TLS	*Transport Layer Security* (Segurança da Camada de Transporte)
TUSD	Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição
UNESP	Universidade Estadual Paulista
VFD	*Variable Frequency Drive* (Inversor de Frequência)
VGP	Vargem Grande Paulista
WTP	*Water Treatment Plant* (sigla em inglês equivalente a ETA)

Sumário

1 INTRODUÇÃO 12
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 14
2.1 Estação elevatória de Água Tratada e Bombas Centrífugas 14
2.2 Inversores de Frequência (VFD) 17
2.3 Controladores Lógicos Programáveis e Linguagens IEC 61131-3 19
2.4 Interface Homem-Máquina (IHM) e Sistema Supervisório 21
2.5 Protocolo MQTT e Plataforma Node-RED® 23
2.6 Tarifação Horo-Sazonal e Estratégia de Load Shifting 24
2.7 Indicador de Eficiência Energética (IEE) 25
3 METODOLOGIA E PROPOSTA DE CONTROLE 27
3.1 Objetivos 28
3.1.1 Objetivo Geral 28
3.1.2 Objetivos Específicos 28
3.2 Caracterização do Sistema Estudado 29
3.2.1 Sistema Produtor São Lourenço (SPSL) e ETA Vargem Grande 29
3.2.2 ETA Vargem Grande: Infraestrutura de Bombeamento 30
3.2.3 Plataforma HYDRIA® e Arquitetura de Automação 32
3.3 Materiais e Métodos 32
3.3.1 Dados Operacionais e Período de Análise 33
3.3.2 Cálculo do IEE e Análise Tarifária 34
3.4 Proposta de Controle Parametrizável 34
3.4.1 Arquitetura da Solução 35
3.4.2 Lógica em Texto Estruturado (ST) 36
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 39
4.1 Diagnóstico Energético: Perfil de Consumo 39
4.2 Indicador de Eficiência Energética (IEE) 41
4.3 Viabilidade Técnica do *Load Shifting* 43
4.4 Proposta de Controle: Resultados 45
4.5 Análise Econômica 46
4.6 Implementação Prática da Camada de Monitoramento em Node-RED® 47
4.6.1 Configuração do Broker MQTT 48
4.6.2 Arquitetura dos Fluxos de Aquisição de Dados 49
4.6.3 Validação do Fluxo de Dados 51
4.6.4 Dashboard de Supervisão 52
5 CONCLUSÃO 55
REFERÊNCIAS 57

APÊNDICE A – CÓDIGOS-FONTE EM TEXTO ESTRUTURADO (ST).....59
ANEXO A – CAPTURAS DE TELA DA IMPLEMENTAÇÃO E SIMULAÇÃO 68

1 INTRODUÇÃO

O saneamento básico representa um dos pilares fundamentais da saúde pública e do desenvolvimento humano. No Brasil, a prestação desse serviço depende de extensas redes de captação, tratamento, reservação e distribuição de água, operadas continuamente por companhias estaduais e municipais que enfrentam um duplo desafio: garantir abastecimento confiável a populações crescentes e controlar custos operacionais em ascensão. A energia elétrica, insumo indispensável ao bombeamento em todas as etapas do ciclo, é o fio condutor que articula diretamente esses dois objetivos.

A crise hídrica que atingiu a Região Metropolitana de São Paulo entre 2014 e 2016 expôs a fragilidade do sistema de abastecimento da maior metrópole do país. O Sistema Cantareira atingiu volumes negativos de operação em agosto de 2014, colocando em risco o abastecimento de cerca de 9 milhões de habitantes. Esse evento impulsionou um programa de diversificação de mananciais sem precedentes na história da Sabesp, do qual nasceu o Sistema Produtor São Lourenço (SPSL), inaugurado em 2018 com capacidade de 6,4 m³/s para atender 1,4 milhão de habitantes em sete municípios da região oeste da Grande São Paulo.

A operação contínua do SPSL, cuja unidade central é a ETA Vargem Grande Paulista, depende de conjuntos de bombeamento eletrointensivos. O setor de saneamento responde por 2% a 3% do consumo nacional de energia elétrica (≈ 12 TWh/ano), e as despesas com eletricidade representam a segunda maior componente dos custos operacionais das concessionárias, superadas apenas pelos gastos com pessoal (BRASIL ENERGIA, 2024; SNIS, 2023). A estrutura tarifária *horo-sazonal*, que cobra até 49% a mais pelo quilowatt-hora no Horário de Ponta (18h–21h), amplifica o impacto financeiro da operação de grandes motores nessa janela, criando oportunidade objetiva para estratégias de gestão de demanda (ANEEL, 2021).

Este Trabalho de Graduação apresenta um diagnóstico energético da ETA Vargem Grande, fundamentado em seis meses de dados operacionais reais do sistema supervisório (julho–dezembro de 2025), e propõe uma estratégia de *load shifting* (deslocamento de carga para fora do horário de ponta tarifário), implementada diretamente na plataforma HYDRIA® (Codesys®/IEC 61131-3), sem necessidade de *hardware* adicional. A estratégia aproveita os inversores de frequência (VFD) atualmente instalados nas bombas 6 e 7, principal recurso de controle eficiente da velocidade das bombas. A solução é parametrizável e concebida para

replicação nas demais unidades do Sistema de abastecimento da Sabesp sem alteração do código-fonte (LEWIS, 1998; SANTOS, 2024).

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os tópicos a seguir abordam os princípios mecânicos do bombeamento de água, os sistemas de automação industrial, os protocolos de comunicação e a estrutura tarifária brasileira.

2.1 Estação elevatória de Água Tratada e Bombas Centrífugas

A Estação Elevatórias de Água Tratada (EEAT) é uma instalação responsável pelo recalque da água tratada dos reservatórios de água tratada aos pontos de distribuição, operando ininterruptamente e concentrando a maior parcela do consumo energético de uma concessionária de saneamento. A configuração típica de uma EEAT, com conjuntos motobomba instalados em paralelo, é ilustrada na Figura 1, permitindo a modulação da vazão conforme a demanda (TSUTIYA, 2006; SANTOS, 2024).

Figura 1 - Estação Elevatória de Água Tratada (EEAT) — configuração típica com conjuntos motobomba em paralelo

Fonte *- Becati Montagens (2015)*

Operando ininterruptamente e concentrando a maior parcela do consumo energético de uma concessionária de saneamento (TSUTIYA, 2006). O equipamento central é a bomba centrífuga, que converte energia mecânica em energia hidráulica pela força centrífuga do rotor. Seus componentes principais são a carcaça em espiral, o rotor, o eixo, os mancais e o sistema de vedação por gaxeta ou selo mecânico. Em ETAs de grande porte, como a ETA Vargem Grande, empregam-se bombas de carcaça bipartida horizontalmente, instaladas em paralelo para modular a vazão conforme a demanda (MACINTYRE, 1997; SANTOS, 2024).

O desempenho de uma bomba centrífuga é descrito pelas suas curvas características, obtidas em ensaio normalizado de bancada, realizado a rotação constante: para cada vazão Q imposta ao circuito de teste, medem-se diretamente a altura manométrica H, por meio de manômetros instalados na sucção e no recalque, e a potência no eixo P, por meio de um torquímetro ou dinamômetro acoplado ao eixo de acionamento da bomba. A curva de rendimento η × Q não é obtida por medição direta, mas calculada ponto a ponto a partir dessas duas grandezas efetivamente medidas, pela razão entre a potência hidráulica útil transferida ao fluido e a potência no eixo P medida no mesmo ponto de ensaio, conforme a Equação 1 (MACINTYRE, 1997):

$$Ph = \rho\, g\, Q\, H \qquad (1)$$

em que Ph é a potência hidráulica (W), ρ é a massa específica da água (kg/m³), g é a aceleração da gravidade (m/s²), Q é a vazão (m³/s) e H é a altura manométrica (m). Em unidades práticas usuais, com Q em m³/h, H em m e Ph em kW, a Equação 1 equivale à Equação 2:

$$Ph[kW] = Q[m^3/h] \times H[m] / 367 \qquad (2)$$

O rendimento é então calculado pela Equação 3:

$$\eta = Ph / P \qquad (3)$$

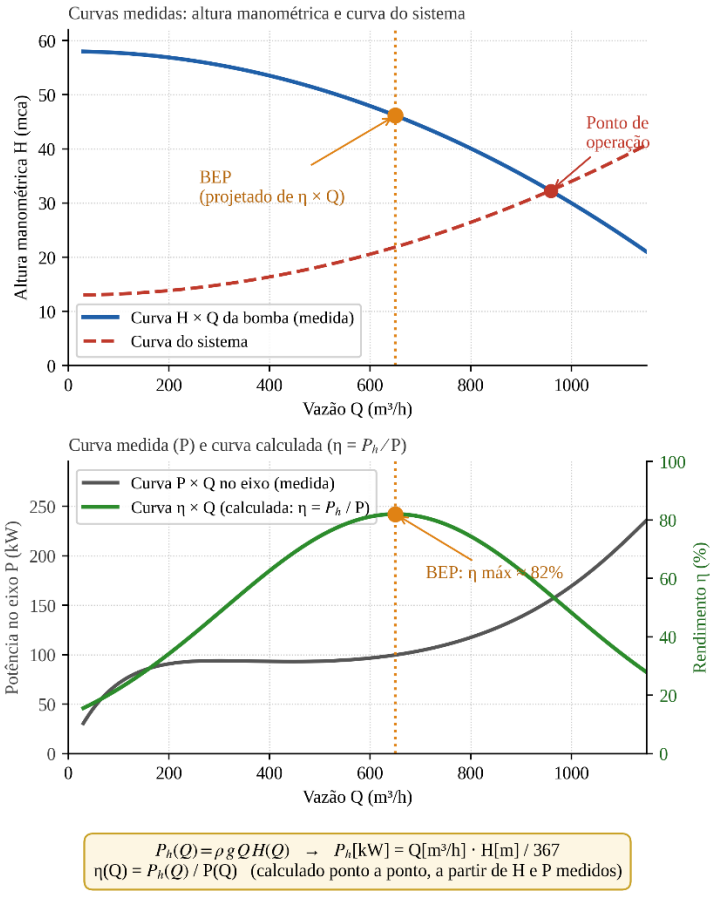
sendo esse o rendimento hidráulico (também chamado de global) da própria bomba; não se trata, portanto, do rendimento elétrico do motor de acionamento, que é um parâmetro distinto, obtido separadamente pelo fabricante do motor. O ponto onde a curva H × Q da bomba intersecta a curva de carga do sistema (a qual representa a altura estática somada às perdas de carga da tubulação) define o ponto de operação real da instalação, o qual depende tanto da bomba quanto do sistema hidráulico a que ela está conectada. Já o *Best Efficiency Point* (BEP) é uma característica exclusiva da bomba, correspondente à vazão em que essa curva calculada de rendimento (η × Q) atinge o valor máximo, sendo, portanto, um ponto diferente do ponto de operação, embora a condição ideal de projeto seja aproximar um do outro. Nessa vazão de melhor rendimento, a energia consumida por metro cúbico bombeado é mínima. Operar significativamente fora do BEP, seja por vazão superior ou inferior à ótima, implica menor rendimento, recirculação interna e desgaste prematuro de selos e mancais (VOLK, 2013; DMB BOMBAS, 2025).

As curvas características típicas de uma bomba centrífuga são ilustradas na Figura 2: o painel superior mostra a curva H × Q medida em conjunto com a curva do sistema, evidenciando

o ponto de operação; o painel inferior mostra a curva de potência no eixo P × Q, também medida, e a curva de rendimento η × Q, calculada a partir das duas grandezas medidas, com a localização do BEP.

O BEP é obtido a partir da curva de rendimento calculada pelo fabricante: identifica-se, no eixo das abscissas, a vazão em que a curva η × Q atinge seu ponto mais alto e projeta-se essa vazão sobre a curva de altura manométrica (H × Q), obtendo-se a altura correspondente ao BEP. Como esse rendimento é calculado a partir da altura manométrica e da potência no eixo medidas durante o próprio ensaio de bancada, ele descreve exclusivamente o desempenho hidromecânico do conjunto rotor e carcaça, isto é, quanto da potência mecânica recebida no eixo é efetivamente convertida em energia hidráulica útil. Operar na vazão do BEP corresponde, portanto, ao menor consumo específico de energia da bomba propriamente dita, ainda que o consumo elétrico final da instalação também dependa do rendimento do motor e das perdas na rede de alimentação.

Figura 2 – Curva característica de bomba centrífuga — curvas medidas (H × Q e P × Q), curva calculada (η × Q) e ponto BEP



Fonte: *Elaborado pelo autor (2026)*

As Leis de Afinidade (ou Leis de Semelhança) estabelecem que, para uma mesma geometria de rotor, a vazão é proporcional à rotação ($Q \propto n$), a altura manométrica é proporcional ao quadrado da rotação ($H \propto n^2$) e a potência absorvida é proporcional ao cubo da rotação ($P \propto n^3$). A relação cúbica entre potência e rotação é o fundamento energético do uso de inversores de frequência. Definindo x como a redução fracionária da rotação, a economia relativa de potência absorvida é dada pela Equação 4:

$$\Delta P = 1 - (1 - x)^3 \qquad (4)$$

Aplicando uma redução de 20% na rotação (x = 0,20), obtém-se:

$$\Delta P = 1 - (1 - 0{,}20)^3 = 1 - (0{,}80)^3 = 1 - 0{,}512 = 0{,}488$$

ou seja, aproximadamente 49% menos potência consumida, impacto que nenhum outro método de controle de vazão consegue oferecer (ELETROBRAS, 2018; VOLK, 2013).

2.2 Inversores de Frequência (VFD)

Os inversores de frequência (Variable Frequency Drive, ou VFD) são os equipamentos responsáveis pelo controle preciso da velocidade dos motores de bombeamento, representando o principal recurso tecnológico para a eficiência energética em ETAs. Na Figura 3 é apresentado um inversor de frequência WEG CFW700, modelo amplamente empregado em sistemas de saneamento, incluindo as unidades operadas pela Sabesp.

Figura 3 – Inversor de Frequência WEG CFW700 — equipamento típico em sistemas de saneamento

Fonte: *WEG (2026)*

O inversor de frequência (*Variable Frequency Drive*, ou VFD) não constitui um conversor CA/CA direto, mas um conjunto composto por três estágios: um retificador na entrada (conversor CA/CC), um filtro passa-baixas formado por indutor série e capacitor em derivação (*shunt*) e um inversor na saída (conversor CC/CA). O barramento CC produzido pelo retificador alimenta o estágio inversor, que sintetiza uma tensão alternada de frequência e amplitude variáveis. Embora a entrada e a saída do conjunto sejam em corrente alternada, internamente não ocorre conversão CA/CA, e sim a sequência CA/CC seguida de CC/CA. Esse arranjo permite ajustar simultaneamente a frequência e a tensão de saída para controlar com precisão a velocidade de motores de indução trifásicos.

Um aspecto relevante do estágio retificador de entrada é a distorção harmônica que ele introduz na corrente drenada da rede. Como a ponte retificadora conduz apenas nos instantes em que a tensão de linha supera a tensão do barramento CC, o inversor absorve corrente de forma não senoidal, concentrada em pulsos próximos aos picos de tensão, o que gera componentes harmônicas de ordem ímpar, predominantemente a 5ª, a 7ª, a 11ª e a 13ª, segundo a relação $h = 6k \pm 1$ característica dos retificadores de seis pulsos. Essa distorção é quantificada pela Taxa de Distorção Harmônica de corrente (THDi), que, em acionamentos de seis pulsos sem mitigação, pode ultrapassar 40%. Entre suas consequências estão o aquecimento adicional de condutores e transformadores, a redução do fator de potência real pela parcela de distorção e o risco de ressonância com bancos de capacitores instalados na planta. Para enquadrar a instalação nos limites estabelecidos pela norma IEEE 519 e pelo Módulo 8 do PRODIST, empregam-se medidas de mitigação como reatores de linha na entrada, indutores no barramento CC, filtros harmônicos passivos e retificadores de doze ou dezoito pulsos, recorrendo-se, em aplicações de maior exigência, a retificadores ativos (*active front end*). Em estações de grande porte como a ETA Vargem Grande, o controle dessa distorção é essencial para preservar a qualidade da energia e evitar penalizações associadas ao baixo fator de potência (MAMEDE FILHO, 2019; SILVA; FIGUEIRA; FLORIAN, 2026)**.**

No saneamento, o VFD permite que as bombas operem próximas ao BEP ao longo de toda a faixa de demanda, evitando o desperdício característico do controle por estrangulamento de válvulas. Adicionalmente, os VFDs oferecem partida suave, reduzindo os afundamentos de tensão associados à elevada corrente de partida dos motores e mitigando o estresse mecânico, além de proteção integrada do motor e comunicação digital nativa.

Modelos de última geração incorporam funcionalidades específicas, tais como o *sleep mode*, ou seja, o desligamento automático quando a vazão demandada é mínima e o *setpoint* de nível está atendido, bem como o preenchimento gradual de tubulação, que evita transientes hidráulicos na partida. Essas funções contribuem para reduzir o número de partidas e paradas dos conjuntos motobomba, prática que favorece estratégias de gestão de demanda no entorno do Horário de Ponta (SANTOS, 2024).

2.3 Controladores Lógicos Programáveis e Linguagens IEC 61131-3

O Controlador Lógico Programável (CLP) é o equipamento central dos sistemas de automação industrial, projetado para operar em ambientes adversos com latência determinística. Seu funcionamento baseia-se no ciclo de varredura (*scan*), composto pelas três etapas a seguir:

- leitura síncrona de todas as entradas;
- execução sequencial do programa aplicativo;
- atualização das saídas atualização das saídas

Esse ciclo repete-se com periodicidade típica de 1 a 50 ms, garantindo que ações de controle ocorram com latência previsível, requisito essencial em aplicações críticas como saneamento (LEWIS, 1998; FRANCHI, 2013). O CLP Wago PFC 200 é apresentado na Figura 4, equipamento empregado nas ETAs automatizadas pela Sabesp no âmbito do sistema HYDRIA®.

Figura 4 – CLP Wago PFC 200 — equipamento utilizado em ETAs Sabesp

Fonte: *WAGO (2026)*

Em ETAs, o CLP é responsável pela execução em tempo real de toda a lógica de controle: acionamentos, intertravamentos, controle PID, revezamento de bombas e, no âmbito deste trabalho, a gestão de demanda tarifária por *load shifting*.

A norma IEC 61131-3, publicada pela *International Electrotechnical Commission* em 1993, estabelece cinco linguagens de programação para CLPs, divididas em textuais (Lista de Instruções (IL) e Texto Estruturado (ST)) e gráficas, como o Diagrama *Ladder* (LD), Diagrama de Blocos Funcionais (FBD) e Sequenciamento Gráfico de Funções (SFC) (LEWIS, 1998). Um exemplo de programa em ST é apresentado na Figura 5.

Figura 5 – Texto Estruturado (ST) — lógica de bloco de função no ambiente Codesys®/HYDRIA®

FB_SelecaoMotor

```
FOR i := 1 TO 7 DO
    arAcionar[i] := FALSE;
END_FOR;
iAcionados := 0;

(* Selecao iterativa: a cada passagem, escolhe o motor de menor
   horimetro que esteja disponivel, nao bloqueado e ainda nao
   acionado neste ciclo *)
WHILE iAcionados < iMotoresNecess DO
    rMenorHorim     := 1.0E10;
    iMotorEscolhido := 0;

    FOR i := 1 TO 7 DO
        (* Verifica elegibilidade do motor i *)
        bElegivel := arDisponivel[i] AND NOT arAcionar[i];
        IF (i <= 5) AND bBloqueioG1 THEN bElegivel := FALSE; END_IF;
        IF (i >= 6) AND bBloqueioG2 THEN bElegivel := FALSE; END_IF;

        IF bElegivel AND (arHorimetros[i] < rMenorHorim) THEN
            rMenorHorim     := arHorimetros[i];
            iMotorEscolhido := i;
        END_IF;
    END_FOR;

    IF iMotorEscolhido > 0 THEN
        arAcionar[iMotorEscolhido] := TRUE;
        iAcionados := iAcionados + 1;
    ELSE
        EXIT;   (* nao ha mais motor elegivel *)
    END_IF;
END_WHILE;
```

Fonte: *Elaborado pelo Autor (2026)*

O Texto Estruturado (ST) é a linguagem adotada neste trabalho para a lógica de load shifting, por três razões:

a) suporte nativo no Codesys®/HYDRIA®;

b) adequação para laços de repetição (FOR), ordenação de arrays (Bubble Sort) e manipulação de estruturas de dados;

c) legibilidade superior em algoritmos complexos quando comparado ao Ladder (LEWIS, 1998; SANTOS, 2024).

2.4 Interface Homem-Máquina (IHM) e Sistema Supervisório

A Interface Homem-Máquina (IHM) é o componente de interação direta entre o operador em campo e o processo automatizado. Exibe em tempo real pressões, vazões, níveis, *status* de motores e alarmes ativos. Uma IHM instalada no Painel de Controle de Estação (PCE) típico de uma ETA Sabesp é mostrada na Figura 6, exibindo em tempo real os parâmetros operacionais e permitindo intervenções manuais sem necessidade de acesso ao ambiente de programação do CLP (SANTOS, 2024).

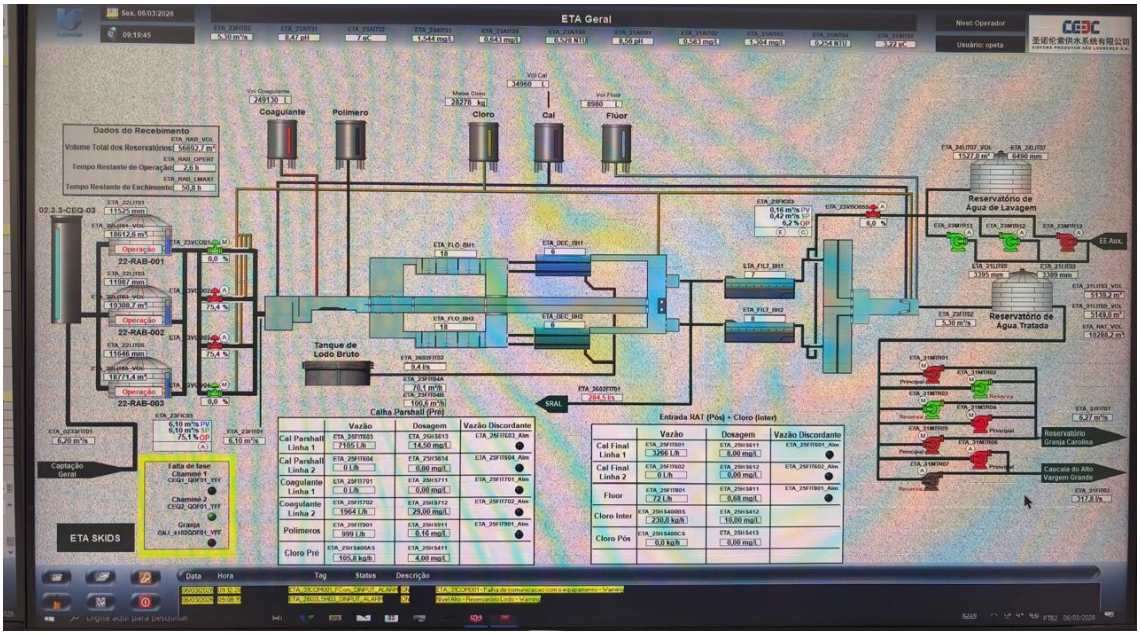
Figura 6 – Interface Homem-Máquina (IHM) instalada no Painel de Controle de Estação (PCE)

Fonte: *Elaborado pelo autor (2026)*

Um exemplo de tela operacional de sistema supervisório em alta performance é apresentado na Figura 7, baseado nas diretrizes da norma ISA-101.

O Sistema de Supervisão e Aquisição de Dados (SCADA) (*Supervisory Control and Data Acquisition*) centraliza a operação de múltiplas unidades distribuídas em um Centro de Controle Operacional (CCO). O conceito de IHM de alta performance, formalizado pela norma ISA-101 e baseado em paletas de cor sóbrias, representações esquemáticas e gráficos de tendência incorporados às telas operacionais, orienta o desenvolvimento das interfaces do Sistema São Lourenço (SANTOS, 2024).

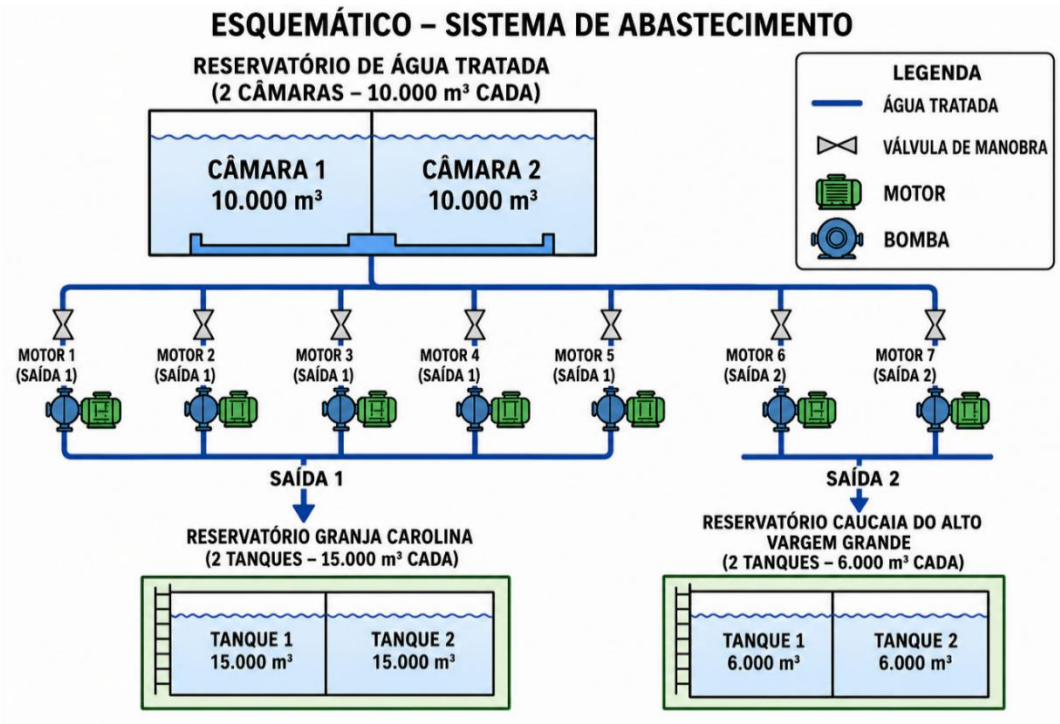
Figura 7 – Sistema supervisório em alta performance — monitoramento centralizado de reservatórios do SPSL



Fonte: *Supervisório Elipse (SABESP,2026)*

Na Figura 8 observa-se um esquemático de forma simplificado do sistema de abastecimento estruturado. O sistema é composto por um Reservatório de Água Tratada (RAT), dividido em duas câmaras com capacidade de 10.000 m³ cada, totalizando 20.000 m³ de armazenamento.

Figura 8 – Esquemático – Sistema de abastecimento SPSL



Fonte: *Elaborado pelo autor (2026)*

A partir do RAT, a água tratada é encaminhada para sete conjuntos motobomba responsáveis pelo abastecimento dos reservatórios de distribuição. Os motores MTR01 a MTR05 compõem o Grupo 1, destinado ao recalque para o Reservatório Granja Carolina, constituído por dois tanques de 15.000 m³, totalizando 30.000 m³ de capacidade de armazenamento. Esses conjuntos operam em paralelo, permitindo o revezamento dos equipamentos e a adequação da vazão conforme a demanda do sistema.

Os motores MTR06 e MTR07 formam o Grupo 2**,** responsável pelo bombeamento para o Reservatório Caucaia do Alto Vargem Grande, composto por dois tanques de 6.000 m³**,** totalizando 12.000 m³ de capacidade. Diferentemente dos motores do Grupo 1, esses dois conjuntos são equipados com inversores de frequência (Variable Frequency Drives – VFDs)**,** que possibilitam o controle contínuo da velocidade dos motores por meio da variação da frequência de alimentação elétrica. Essa característica permite ajustar a vazão bombeada de acordo com a demanda do sistema, reduzindo o consumo específico de energia, minimizando esforços mecânicos durante partidas e paradas e proporcionando maior flexibilidade operacional.

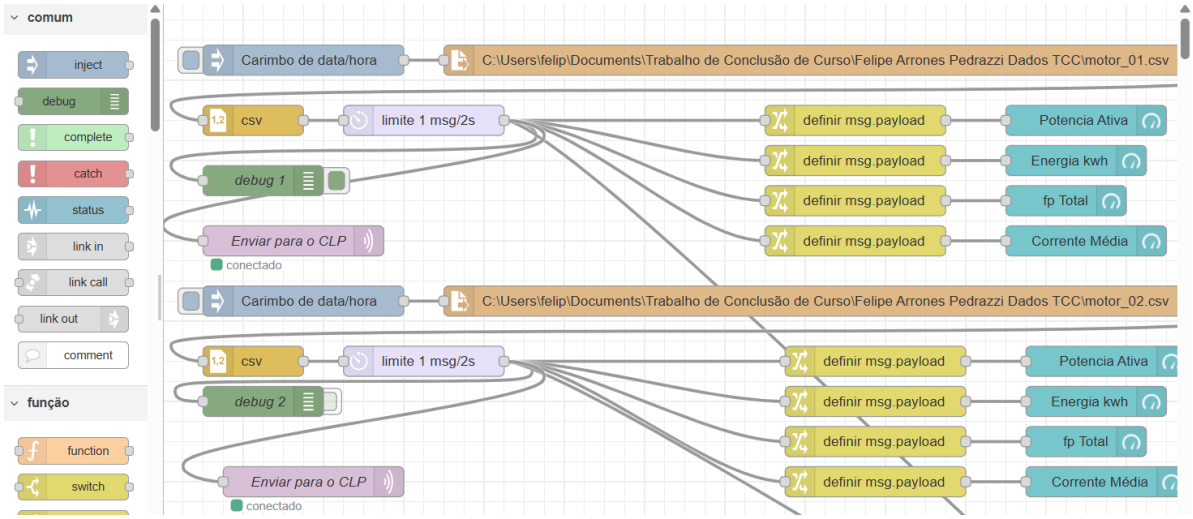
2.5 Protocolo MQTT e Plataforma Node-RED®

O protocolo MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*) é um protocolo de comunicação leve, padronizado pela ISO/IEC 20922:2016, que opera no paradigma *publish/subscribe*: dispositivos publicam dados em tópicos hierárquicos a um servidor central (*broker*), que os distribui automaticamente a todos os clientes inscritos. Esse desacoplamento entre produtores e consumidores de informação permite adicionar novos pontos de monitoramento sem reconfigurar os existentes, característica valiosa em sistemas distribuídos como o SPSL (HILDEBRAND, 2020).

A interface de programação visual por fluxos do Node-RED® é exemplificada na Figura 9.

O Node-RED® é um ambiente de programação visual por fluxos, em que nós conectados por linhas representam o fluxo de dados, mantido pela *OpenJS Foundation*. Amplamente empregado como camada intermediária entre CLPs industriais e plataformas de visualização ou *analytics*, o Node-RED® é proposto neste trabalho para: calcular o IEE em tempo real a partir de dados MQTT e exibir um *dashboard* gerencial com os indicadores energéticos dos sete motores. (SCHWAB, 2016; HILDEBRAND, 2020).

Figura 9 – Node-RED® — programação visual por fluxos para integração industrial e IoT



Fonte: *Elaborado pelo autor (2026)*

2.6 Tarifação Horo-Sazonal e Estratégia de Load Shifting

O sistema tarifário brasileiro para unidades consumidoras do Grupo A atendidas em média e alta tensão, é regido pela estrutura horo-sazonal definida pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) na Resolução Normativa nº 1.000/2021. Essa estrutura diferencia o custo da energia e da demanda conforme o horário de utilização, segmentando o dia em dois postos tarifários: o horário de ponta (HP), correspondente a três horas consecutivas de maior carregamento do sistema elétrico, definidas pela distribuidora (para a concessionária que atende a ETA Vargem Grande, das 18h00 às 20h59 em dias úteis), e o horário fora de ponta (HFP), que abrange as demais horas do dia, finais de semana e feriados (ANEEL, 2021; MAMEDE FILHO, 2017).

Na Modalidade Tarifária Azul, em que a ETA Vargem Grande está enquadrada (Subgrupo A2), aplicam-se tarifas distintas de demanda para a ponta e para fora de ponta, sendo a demanda na ponta substancialmente mais onerosa. A componente de energia (TE) e a tarifa de uso do sistema de distribuição (TUSD) também possuem valores diferenciados por posto. A unidade opera, ainda, no Ambiente de Contratação Livre (ACL), no qual a parcela de energia é adquirida por contrato bilateral junto a comercializadora, enquanto a parcela de fio (TUSD) e a demanda permanecem reguladas pela distribuidora. Essa configuração tarifária é precisamente o que fundamenta a estratégia de deslocamento de carga descrita a seguir, cujo objetivo é reduzir a potência demandada e o consumo no horário de ponta (ELETROBRAS, 2018; NEOENERGIA, 2025).

A estratégia de *load shifting* (deslocamento de carga) aplicada ao saneamento combina duas ações operacionais complementares:

(i) pré-enchimento dos reservatórios de distribuição: elevar o nível dos reservatórios Granja Carolina (R1, 30.000 m³) e Caucaia do Alto (R2, 12.000 m³) ao *setpoint* de 90% de suas capacidades nas horas imediatamente anteriores à ponta (15h00 às 17h59), aproveitando a tarifa mais favorável do HFP para acumular reserva hidráulica;

(ii) bloqueio seletivo e diferenciado de motores na ponta: impedir ou reduzir o acionamento dos motores de cada grupo durante 18h00 às 20h59, mantendo apenas o bombeamento mínimo necessário enquanto os reservatórios de distribuição são drenados de forma controlada.

Cada reservatório atua como "bateria hidráulica" do seu respectivo grupo: carregado antes da ponta e drenado durante ela, sustentando o abastecimento das cidades a jusante enquanto os conjuntos motobomba operam em regime reduzido (ELETROBRAS, 2018; MAMEDE FILHO, 2017).

A existência de dois reservatórios de distribuição com capacidades e demandas distintas implica que a redução de bombeamento durante a ponta é diferenciada por grupo: o Grupo 2, cujo reservatório (12.000 m³) possui autonomia proporcionalmente maior em relação à demanda da rede a jusante, pode ter bombeamento reduzido em até 71%; o Grupo 1, com reservatório de maior capacidade absoluta (30.000 m³) mas menor autonomia relativa à sua demanda, suporta redução de apenas 10%. Essa diferenciação é o elemento central da estratégia e é detalhada na análise de viabilidade técnica (Seção 4.3).

2.7 Indicador de Eficiência Energética (IEE)

O Indicador de Eficiência Energética (IEE) é o padrão do setor para avaliação quantitativa do desempenho energético de sistemas de saneamento, definido como a razão entre a energia elétrica consumida e o volume de água efetivamente bombeado no mesmo período. A equação 5 demonstra a fórmula utilizada para cálculo (TSUTIYA, 2006):

$$IEE = E / V \quad [kWh/m^3] \tag{5}$$

em que kWh é a energia elétrica consumida e m³ é o volume de água bombeado no mesmo intervalo de tempo. O IEE é sensível a praticamente todos os fatores que influenciam a

eficiência do sistema: altura manométrica, rendimento das bombas, perdas no sistema elétrico, regime de operação e vazamentos. Valores de referência do PROCEL (Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica)/Sanear situam sistemas eficientes entre 0,15 e 0,40 kWh/m³ para alturas manométricas moderadas; valores superiores a 0,60 kWh/m³ indicam ineficiências significativas que justificam intervenção técnica (TSUTIYA, 2006; SNIS, 2023; ELETROBRAS, 2018).

3 METODOLOGIA E PROPOSTA DE CONTROLE

Este capítulo apresenta o desenvolvimento do trabalho, contemplando os objetivos da pesquisa, a caracterização do sistema estudado, os materiais e métodos empregados, a proposta de controle parametrizável e a análise econômica da solução desenvolvida. O estudo foi conduzido a partir da avaliação do desempenho operacional e energético da Estação de Tratamento de Água (ETA) Vargem Grande Paulista, integrante do Sistema Produtor São Lourenço (SPSL), com foco na identificação de oportunidades de redução do consumo de energia elétrica durante os períodos de maior custo tarifário.

Inicialmente, são apresentados os objetivos, geral e específicos, que orientaram a pesquisa, cujo embasamento técnico foi consolidado no capítulo de Fundamentação Teórica. Em seguida, é realizada a caracterização da infraestrutura da ETA Vargem Grande Paulista, incluindo seus sistemas de bombeamento, reservação e automação, bem como a arquitetura da plataforma HYDRIA® utilizada pela Sabesp.

Posteriormente, são descritos os procedimentos metodológicos adotados para a coleta, o tratamento e a análise dos dados operacionais extraídos do sistema supervisório, abrangendo o período de julho a dezembro de 2025. A partir desses dados, são calculados indicadores de desempenho energético e avaliadas as condições operacionais dos grupos de bombeamento, permitindo a identificação do potencial de aplicação de estratégias de gerenciamento da demanda elétrica.

Com base nos resultados obtidos, é apresentada uma proposta de controle parametrizável para implementação de uma estratégia de *load shifting*, fundamentada no pré-enchimento dos dois reservatórios de distribuição, a saber, Reservatório Granja Carolina (30.000 m³, Grupo 1) e Reservatório Caucaia do Alto / Vargem Grande Paulista (12.000 m³, Grupo 2), e no bloqueio seletivo e independente de cada grupo de motores durante o Horário de Ponta. A solução foi concebida para integração à plataforma HYDRIA®, utilizando a linguagem Texto Estruturado (ST) conforme a norma IEC 61131-3, preservando a arquitetura de automação atualmente empregada pela companhia

Por fim, é realizada uma análise técnica e econômica da estratégia proposta, considerando a autonomia hidráulica do sistema, os dados históricos de operação e a estrutura

tarifária vigente para consumidores do Grupo A, de modo a estimar os benefícios operacionais e financeiros decorrentes da sua implementação.

3.1 Objetivos

O objetivo geral estabelece o propósito central da pesquisa, enquanto os objetivos específicos detalham as etapas necessárias para atingir o objetivo principal e fundamentar a avaliação técnica, operacional e econômica da proposta de controle energético aplicada à Estação de Tratamento de Água Vargem Grande Paulista.

3.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver e avaliar uma proposta de controle parametrizável para otimização energética da Estação de Tratamento de Água Vargem Grande Paulista, por meio da implementação de uma estratégia de *load shifting* na plataforma HYDRIA® (Codesys®/IEC 61131-3), fundamentada em diagnóstico quantitativo do perfil energético obtido a partir de dados históricos do sistema supervisório.

3.1.2 Objetivos Específicos

Inicialmente, realizou-se o diagnóstico energético da ETA Vargem Grande Paulista com base nos dados históricos do sistema supervisório referentes ao período de julho a dezembro de 2025, determinando-se o Indicador de Eficiência Energética (IEE) global da unidade e por grupo de bombeamento. Em seguida, caracterizou-se o enquadramento tarifário da instalação na Modalidade Tarifária Azul, Subgrupo A2, avaliando-se a participação dos custos de energia no Horário de Ponta.

Com base nos resultados obtidos, foi desenvolvida uma lógica de controle parametrizável em Texto Estruturado (ST) para implementação de uma estratégia de *load shifting*, contemplando o bloqueio seletivo de conjuntos motobomba e o pré-enchimento dos reservatórios Granja Carolina (30.000 m³) e Caucaia do Alto/Vargem Grande Paulista (12.000 m³), com o objetivo de deslocar o consumo energético para períodos de menor custo tarifário. A estratégia considera o controle independente dos reservatórios, utilizando setpoints e comandos específicos para cada grupo de motores.

A viabilidade técnica da proposta foi avaliada por meio da análise da autonomia hidráulica dos reservatórios, considerando suas capacidades de armazenamento, as vazões médias de demanda e os critérios operacionais adotados. Adicionalmente, estimaram-se os benefícios econômicos decorrentes da aplicação da estratégia, quantificando-se o potencial de redução dos custos com energia elétrica e da demanda contratada.

Por fim, propôs-se uma arquitetura complementar de monitoramento baseada em MQTT e Node-RED®, destinada à disponibilização de indicadores energéticos em tempo real para apoio à operação e à tomada de decisão, em consonância com os conceitos de digitalização industrial e Indústria 4.0 aplicados ao setor de saneamento.

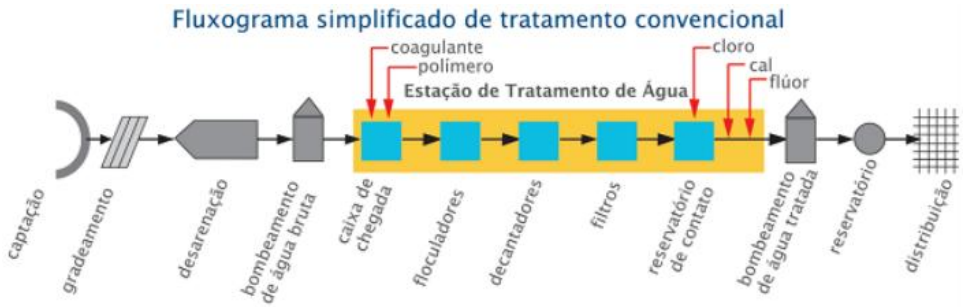
3.2 Caracterização do Sistema Estudado

Esta seção descreve o Sistema Produtor São Lourenço e a ETA Vargem Grande Paulista, caracterizando a infraestrutura de bombeamento estudada e a plataforma HYDRIA® empregada na automação das unidades operacionais da Sabesp.

3.2.1 Sistema Produtor São Lourenço (SPSL) e ETA Vargem Grande

O Sistema Produtor São Lourenço (SPSL) é o maior investimento em infraestrutura hídrica da Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (Sabesp), com aporte de R$ 2,21 bilhões. Inaugurado em 2018, o sistema capta água do Rio São Lourenço e a trata na ETA Vargem Grande antes de distribuí-la por 83 km de adutoras, atendendo 1,4 milhão de habitantes em sete municípios da região oeste da Grande São Paulo. O fluxograma simplificado de uma ETA convencional é apresentado na Figura 10, representando as etapas de coagulação, floculação, decantação, filtração e desinfecção presentes na ETA Vargem Grande (SABESP, 2023).

Figura 10 – *Fluxograma simplificado de uma ETA convencional — etapas do processo de tratamento*



Fonte: *Adaptado de Santos (2024, p. 18)*

O sistema atende 1,4 milhão de habitantes em sete municípios: Vargem Grande Paulista, São Roque, Itapevi, Jandira, Barueri, Carapicuíba e parte de Cotia (SABESP, 2023).

A ETA Vargem Grande possui capacidade de tratamento de 6,4 m³/s e conta com 12 floculadores, 12 decantadores, 16 filtros e dois Reservatórios de Água Tratada (RAT) com 10.000 m³ cada. O bombeamento de saída para as adutoras é realizado pelos sete motores de recalque objeto deste estudo (SABESP, 2023).

3.2.2 ETA Vargem Grande: Infraestrutura de Bombeamento

Os sete motores de recalque (MTR01–MTR07) estão organizados em dois grupos hidráulicos com características distintas, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – *Parâmetros operacionais dos motores MTR01–MTR07 (jul.–dez./2025)*

Motor	Grupo	H (mca)	Pot. máx. obs. (kW)	Horas op.	Energia (kWh)	IEE do grupo (kWh/m³)
MTR01	1	39,3	1.061	2.557	2.498.989	0,1092
MTR02	1	39,3	921	665	501.658	0,1092
MTR03	1	39,3	927	359	255.807	0,1092
MTR04	1	39,3	1.001	3.199	2.837.951	0,1092
MTR05	1	39,3	1.014	2.682	2.439.853	0,1092
MTR06	2	118,2	526	644	250.525	0,3631
MTR07	2	118,2	629	3.459	1.362.868	0,3631
TOTAL	—	—	—	**13.565**	**10.147.651**	—

Fonte: *Elaborado pelo autor com base nos dados do supervisório (2026)*

A coluna "Pot. máx. obs." registra a maior potência ativa instantânea observada para cada motor ao longo do semestre analisado, extraída diretamente do sistema supervisório; trata-se, portanto, de uma grandeza operacional medida, e não da potência nominal de placa do motor, que representa a capacidade máxima de projeto do equipamento. Os dados coletados para este trabalho limitaram-se às variáveis elétricas e hidráulicas monitoradas pelo supervisório (potência ativa, corrente, frequência e status operacional), não incluindo um levantamento sistemático dos dados nominais de placa dos sete motores (tensão nominal,

corrente nominal, rotação síncrona, número de polos, rendimento e fator de potência nominais). Essa ausência constitui uma limitação do escopo de dados disponibilizado pelo supervisório e é apontada como recomendação para trabalhos futuros, mediante consulta direta às fichas técnicas dos fabricantes junto à área de manutenção eletromecânica da Sabesp. De forma geral, motores de indução trifásicos de média tensão nesta faixa de potência (500 kW a 1.100 kW) apresentam fator de potência nominal, isto é, medido diretamente em seus terminais, tipicamente entre 0,85 e 0,92, e rendimento nominal entre 0,94 e 0,97 (MAMEDE FILHO, 2017); valores de referência que auxiliam a contextualizar os resultados apresentados na Seção 4.6, nos quais o fator de potência medido no ponto de entrega da instalação aparece corrigido por bancos de capacitores operados por empresa terceirizada.

O **Grupo 1** (MTR01–MTR05) opera com altura manométrica de 39,3 mca, sendo responsável pelo recalque para os reservatórios intermediários de distribuição próximos à ETA. A operação típica envolve 2 a 3 motores em paralelo com revezamento por horímetro. O **Grupo 2** (MTR06–MTR07) opera com altura manométrica de 118,2 mca, servindo reservatórios elevados e distantes, como Caucaia do Alto e Vargem Grande Paulista, em regime de revezamento com um motor operando e um reserva (SABESP, 2023).

No que se refere ao acionamento, observa-se que, no momento, apenas os motores MTR06 e MTR07, pertencentes ao Grupo 2, possuem inversores de frequência (VFD) instalados. As demais bombas, MTR01 a MTR05, do Grupo 1, operam em velocidade fixa, com partida direta ou por soft starter, de modo que o controle de vazão se restringe ao acionamento ou desligamento dos conjuntos. Por esse motivo, a modulação contínua de vazão no horário de ponta está disponível apenas no Grupo 2, enquanto a redução de bombeamento no Grupo 1 ocorre pelo bloqueio seletivo de motores, o que limita a granularidade do ajuste de carga.

A fundamentação teórica apresentada na Seção 2.2 sustenta a viabilidade técnica de estender os inversores de frequência às bombas do Grupo 1. Como a potência absorvida por uma bomba centrífuga varia com o cubo da rotação, de acordo com as leis de afinidade expressas na Equação 4, pequenas reduções de velocidade resultam em economias expressivas de energia, benefício hoje inacessível aos motores de velocidade fixa do Grupo 1, que respondem pela maior parte do consumo da estação. A adoção de VFDs nesses conjuntos permitiria mantê-los operando próximos ao ponto de melhor eficiência (BEP) ao longo de toda a faixa de demanda, substituir o controle por estrangulamento e as partidas diretas por partida suave, reduzindo os afundamentos de tensão e o estresse mecânico, e, sobretudo, viabilizar uma

redução gradual e mais profunda do recalque durante a ponta, em lugar do bloqueio discreto atualmente empregado. Esse ganho potencial deve ser ponderado frente ao investimento nos equipamentos e à necessidade de mitigação da distorção harmônica que os retificadores de entrada introduzem na rede, discutida na Seção 2.2, especialmente diante da elevada potência dos motores do Grupo 1.

As medições de vazão total são realizadas pelo transmissor FIT-01 (Transmissor de Vazão) na saída da ETA; os níveis dos dois RATs são monitorados pelos transmissores LIT-09 e LIT-03 (Transmissores de Nível). Dados de potência ativa, corrente, frequência e *status* operacional são registrados continuamente pelo supervisório.

3.2.3 Plataforma HYDRIA® e Arquitetura de Automação

O HYDRIA® é a plataforma SCADA/PLC (*Programmable Logic Controller*) desenvolvida e operada pela Sabesp para automação de suas ETAs e EEATs. Baseado no ambiente Codesys®, compatível com a norma IEC 61131-3, integra: CLPs locais, responsáveis pela lógica de controle em tempo real, rede Ethernet TCP/IP industrial e sistema supervisório centralizado nos Centros de Controle Operacional (CCOs). A programação dos CLPs é realizada em ST e FBD, com bibliotecas reutilizáveis compartilhadas entre as ETAs do sistema (SANTOS, 2024).

A lógica de *load shifting* proposta neste trabalho é concebida como extensão das bibliotecas existentes do HYDRIA®, garantindo consistência arquitetural com o sistema em operação e facilitando futura replicação nas demais unidades do Sistema São Lourenço sem alteração do código-fonte base (LEWIS, 1998).

3.3 Materiais e Métodos

Esta seção detalha os procedimentos metodológicos adotados para a coleta, o processamento e a análise dos dados operacionais da ETA Vargem Grande.

A metodologia integra seis conjuntos articulados de procedimentos, cujos resultados são apresentados, respectivamente, nas Seções 4.1 a 4.6:

1. caracterização do perfil de consumo dos sete motores de recalque ao longo do semestre;
2. cálculo do Indicador de Eficiência Energética (IEE) mensal e médio por grupo hidráulico, comparado às referências do PROCEL/Sanear;

3. simulação hora a hora do balanço hídrico de cada reservatório durante a janela de ponta;
4. implementação da lógica de controle parametrizável em Texto Estruturado e sua validação em ambiente simulado no Codesys®;
5. comparação sistemática entre a demanda contratada vigente e a demanda medida por posto tarifário (ponta e fora de ponta), de modo a verificar a existência de folga contratual ou de eventos de ultrapassagem, seguida da consolidação dos ganhos financeiros anuais decorrentes da renegociação da demanda e do deslocamento de carga;
6. implementação prática da camada de monitoramento em Node-RED®, com fluxos de aquisição via MQTT e *dashboard* interativo.

3.3.1 Dados Operacionais e Período de Análise

Os dados utilizados nesta pesquisa foram extraídos do sistema supervisório da ETA Vargem Grande Paulista, cobrindo o período de julho a dezembro de 2025, totalizando 184 dias consecutivos e representando o perfil operacional típico da estação fora do período de férias coletivas. Para cada um dos sete motores (MTR01–MTR07), foram coletadas séries temporais com resolução de 1 hora das seguintes variáveis: potência ativa (kW), corrente (A), frequência (Hz), *status* operacional (ligado/desligado/falha), nível dos RATs (LIT-09 e LIT-03, em metros e percentual) e vazão total na saída da ETA (FIT-01, em m³/h). Os dados foram exportados em formato CSV e processados em linguagem Python com as bibliotecas pandas, numpy e matplotlib. O período totalizou aproximadamente 82,6 milhões de m³ bombeados.

A Tabela 2 sintetiza os parâmetros metodológicos adotados nesta análise, incluindo o período coberto, a resolução temporal das séries históricas e as variáveis processadas para cada motor.

Tabela 2 – Resumo dos parâmetros metodológicos adotados

Motor	kWh Ponta	kWh Fora Ponta	kWh Total	% Total	kVArh
MTR01	213.678	2.285.312	2.498.989	24,6%	790.150
MTR02	33.283	468.376	501.658	4,9%	146.152
MTR03	15.277	240.530	255.807	2,5%	72.820
MTR04	176.498	2.661.452	2.837.951	28,0%	843.686
MTR05	186.527	2.253.326	2.439.853	24,0%	714.483
MTR06	21.454	229.071	250.525	2,5%	108.047
MTR07	94.901	1.267.968	1.362.868	13,4%	418.815
SOMA	**741.617**	**9.406.034**	**10.147.651**	**100,0%**	**3.094.153**

Fonte: *Elaborado pelo autor (2026)*

3.3.2 Cálculo do IEE e Análise Tarifária

O IEE foi calculado utilizando a equação 6, separadamente para cada grupo hidráulico e para a estação total, seguindo a metodologia do PROCEL/Sanear (ELETROBRAS, 2018; TSUTIYA, 2006):

$$\Sigma(P_i \times \Delta t) / \Sigma(Q_i \times \Delta t) = IEE \quad [kWh/m^3] \qquad (6)$$

em que P_i é a potência ativa do motor i no intervalo Δt (1 hora) e Q_i é a vazão proporcional atribuída ao grupo nesse mesmo intervalo. Para o Grupo 2 (MTR06–MTR07), a vazão foi estimada pela diferença entre a vazão total medida pelo FIT-01 e a contribuição calculada para o Grupo 1, com base nos horímetros e nas curvas características dos equipamentos.

A análise tarifária estratificou o consumo em dois postos: ponta (18h–21h, dias úteis) e fora de ponta (demais horários). Para cada mês do período analisado, calculou-se:

(i) energia consumida na ponta (kWh);

(ii) participação percentual da ponta no consumo total;

(iii) custo diferencial aplicando as tarifas Neoenergia/Elektro vigentes (Modalidade Azul A2, Subgrupo A2) (ANEEL, 2021; NEOENERGIA, 2025).

(iv) comparação, mês a mês e por posto tarifário, entre a demanda contratada vigente e a demanda medida, de modo a identificar a folga contratual disponível e eventuais ocorrências de ultrapassagem, uma vez que, conforme o art. 301 da Resolução Normativa ANEEL nº 1.000/2021, a demanda efetivamente faturada corresponde ao maior valor entre a demanda medida e a demanda contratada, respeitada a tolerância de 5% sobre esta última antes da incidência da tarifa de ultrapassagem (ANEEL, 2021).

3.4 Proposta de Controle Parametrizável

Esta seção apresenta a arquitetura e a lógica da solução de controle parametrizável desenvolvida para implementação da estratégia de *load shifting* na plataforma HYDRIA®. A proposta foi concebida com base na topologia real do sistema de abastecimento da ETA Vargem Grande, que distribui a água tratada por meio de dois grupos de recalque independentes, cada qual destinado a um reservatório de distribuição específico: o Grupo 1 (motores MTR01 a

MTR05) alimenta o Reservatório Granja Carolina, composto por dois tanques de 15.000 m³ (capacidade total de 30.000 m³), enquanto o Grupo 2 (motores MTR06 e MTR07) alimenta o Reservatório Caucaia do Alto / Vargem Grande Paulista, composto por dois tanques de 6.000 m³ (capacidade total de 12.000 m³).

A existência de dois reservatórios de distribuição com capacidades e demandas distintas exige que a lógica de deslocamento de carga trate cada grupo de forma independente, tanto na definição dos *setpoints* de nível quanto na decisão de bloqueio dos motores. Essa independência é o princípio organizador de toda a arquitetura descrita a seguir, que abrange os blocos de função em Texto Estruturado, os parâmetros configuráveis e a integração com a camada de monitoramento via MQTT e Node-RED®.

3.4.1 Arquitetura da Solução

A solução de controle proposta foi concebida sob o princípio da parametrização total, de modo que a mesma base de código possa ser replicada em qualquer unidade do Sistema São Lourenço, ou em outras estações da Sabesp, sem alteração da lógica interna, bastando o ajuste dos parâmetros de configuração específicos de cada estação. A arquitetura organiza-se em três camadas funcionais desacopladas, comunicantes entre si pelo protocolo MQTT.

A camada de aquisição e análise histórica é executada fora do controlador, em ambiente Node-RED®. Essa camada é responsável pela leitura dos dados operacionais exportados do supervisório (arquivos CSV de potência ativa por motor, nível dos reservatórios de distribuição e vazões de recalque), pelo cálculo do perfil de carga horário médio da estação, pela simulação dos cenários de deslocamento de carga e pela determinação dos parâmetros otimizados de operação para cada reservatório: os *setpoints* de nível por faixa horária, a demanda-alvo para renegociação contratual e os limites de segurança hidráulica. Os resultados são publicados em tópicos MQTT hierárquicos, seguindo a nomenclatura padronizada da norma interna OADC008.

A camada de controle em tempo real é executada no CLP, na plataforma HYDRIA®/Codesys®. Um programa cliente MQTT inscreve-se nos tópicos publicados pelo Node-RED® e popula uma estrutura de dados tipada (*ST_LoadShiftConfig*), que armazena os parâmetros de ambos os reservatórios de distribuição. A lógica de controle, descrita na Seção 3.4.2, compara continuamente o horário corrente e o volume de cada reservatório com os respectivos *setpoints*, decidindo de forma independente o bloqueio ou a liberação de cada grupo

de motores. O Grupo 1 é bloqueado com base no nível do Reservatório Granja Carolina (R1), e o Grupo 2 é bloqueado com base no nível do Reservatório Caucaia do Alto (R2). Essa camada opera de forma autônoma: caso a comunicação com o Node-RED® seja interrompida, o CLP mantém os últimos parâmetros válidos recebidos, preservados pela propriedade de retenção (*retain*) das mensagens MQTT.

A camada de monitoramento e supervisão apresenta ao operador, por meio de um painel desenvolvido no Node-RED®, os indicadores energéticos em tempo real: o IEE instantâneo, a potência demandada acumulada na ponta, o nível percentual de cada reservatório de distribuição e alertas de consumo excessivo no horário de ponta. Essa camada não interfere na lógica de controle, limitando-se à visualização gerencial, o que garante que a operação permaneça segura mesmo na ausência do supervisório.

A separação entre as camadas de análise (Node-RED®) e de controle (Codesys®) é uma decisão arquitetural deliberada: o controlador não executa cálculos estatísticos sobre séries históricas, tarefa imprópria para um equipamento de tempo real, mas apenas aplica parâmetros previamente calculados. Essa divisão de responsabilidades confere robustez ao sistema e mantém a compatibilidade com as bibliotecas existentes do HYDRIA® (SANTOS, 2024; LEWIS, 1998).

3.4.2 Lógica em Texto Estruturado (ST)

A lógica de controle foi implementada em Texto Estruturado (ST), conforme a norma IEC 61131-3, organizada em um programa principal denominado *PRG_LoadShifting* e em blocos de função auxiliares reutilizáveis. O programa recebe como entradas o horário corrente do sistema, o volume de cada reservatório de distribuição (R1, obtido pelos transmissores LIT-01 e LIT-02 do Reservatório Granja Carolina, e R2, obtido pelo transmissor LIT do Reservatório Caucaia do Alto), o estado de cada motor e a estrutura de parâmetros *ST_LoadShiftConfig* recebida via MQTT. Como saídas, fornece os comandos de bloqueio ou liberação independentes para cada grupo de motores e os sinalizadores de estado da estratégia.

O núcleo da lógica é um seletor de *setpoint* por faixa horária, aplicado de forma independente a cada reservatório. A cada ciclo de varredura, o programa compara a hora corrente com as faixas definidas e seleciona o *setpoint* de nível ativo para R1 e R2: no período de pré-enchimento (15h00 às 17h59), adota-se o *setpoint* elevado de 90% da capacidade de cada reservatório, aproveitando as horas anteriores à ponta para acumular reserva hidráulica; no

horário de ponta (18h00 às 20h59, dias úteis), o *setpoint* é reduzido ao nível de religamento de 75%, permitindo que os reservatórios sejam drenados de forma controlada enquanto os motores de maior potência permanecem bloqueados; nos demais horários, mantém-se o *setpoint* de operação normal de 90%.

A decisão de bloqueio é tomada independentemente para cada grupo. Durante o horário de ponta, se o volume do Reservatório R1 estiver acima do nível de religamento (75% de 30.000 m^3 = 22.500 m^3), os motores MTR01 a MTR05 são bloqueados parcialmente, permitindo uma redução de bombeamento de 10%. Analogamente, se o volume do Reservatório R2 estiver acima do nível de religamento (75% de 12.000 m^3 = 9.000 m^3), os motores MTR06 e MTR07 são bloqueados, permitindo uma redução de até 71% no bombeamento. Essa diferenciação decorre da relação entre capacidade de armazenamento e demanda da rede a jusante de cada reservatório, detalhada na Seção 4.3.

Um intertravamento de segurança hidráulica sobrepõe-se a toda a lógica: durante o horário de ponta, o *setpoint* ativo é o nível de religamento (75%): enquanto o volume de qualquer reservatório permanecer acima desse valor, o grupo correspondente é mantido bloqueado, drenando a reserva acumulada no pré-enchimento. A histerese é dada justamente pela diferença entre o nível de pré-enchimento (90%) e o nível de religamento (75%), faixa de 15% que constitui o volume útil destinado ao deslocamento de carga. O nível de 70% não é o gatilho da redução de bombeamento, e sim um piso de segurança inferior ao religamento: caso, por demanda atípica, o volume caia abaixo de 75% e prossiga até 70% antes do fim da ponta, o intertravamento de emergência suspende o bloqueio e força o religamento imediato dos motores, sobrepondo-se à estratégia de eficiência. Assim, a redução do bombeamento ocorre na faixa entre 90% e 75%, e o limite de 70% atua apenas como proteção adicional contra o esgotamento do reservatório.

A estratégia preserva o critério de revezamento operacional por horímetro já adotado na estação: dentre os motores liberados para operação em cada grupo, o bloco FB_SelecaoMotor prioriza o acionamento daqueles com menor número acumulado de horas de funcionamento, equalizando o desgaste e prolongando a vida útil dos equipamentos.

Por ser parametrizável, a solução é instanciada uma única vez por estação, com os valores de capacidade de cada reservatório, *setpoints* horários, número de motores por grupo e horários de ponta carregados a partir da estrutura de configuração. A adaptação a uma nova

unidade reduz-se ao preenchimento dos parâmetros, sem qualquer modificação do código-fonte, em conformidade com a diretriz de replicabilidade do PISO 2.0.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os resultados obtidos a partir da aplicação da metodologia descrita no Capítulo 3 aos dados operacionais da ETA Vargem Grande Paulista, cobrindo o período de julho a dezembro de 2025. A análise está organizada em seis seções complementares que, em conjunto, fundamentam a viabilidade técnica e econômica da estratégia de *load shifting* proposta.

Inicialmente, na Seção 4.1, é apresentado o diagnóstico energético da estação, com a caracterização do perfil de consumo dos sete motores de recalque e a identificação do padrão de carga ao longo das 24 horas do dia, incluindo o comportamento espontâneo de redução de demanda já praticado pela operação no horário de ponta. Na Seção 4.2, são calculados e discutidos os Indicadores de Eficiência Energética (IEE) por grupo de bombeamento e para a estação como um todo, permitindo a comparação com os valores de referência do PROCEL/Sanear e a identificação de oportunidades de melhoria.

A Seção 4.3 avalia a viabilidade técnica do deslocamento de carga, considerando a topologia real do sistema de abastecimento com dois reservatórios de distribuição independentes: o Reservatório Granja Carolina (30.000 m³, Grupo 1) e o Reservatório Caucaia do Alto / Vargem Grande Paulista (12.000 m³, Grupo 2). A análise do balanço hídrico horário de cada reservatório determina a autonomia hidráulica disponível e os percentuais de redução de bombeamento sustentáveis durante as três horas de ponta tarifária. Em seguida, a Seção 4.4 apresenta os resultados da aplicação da lógica de controle desenvolvida, indicando, por meio de simulação, que os reservatórios permanecem dentro da faixa operacional segura e quantificando a redução de demanda contratada. A Seção 4.5 consolida os ganhos econômicos anuais decorrentes da implementação da estratégia, descontados os custos adicionais associados ao pré-enchimento dos reservatórios. Por fim, a Seção 4.6 documenta a implementação prática da camada de monitoramento em Node-RED®, com a arquitetura de fluxos de aquisição, a configuração do broker MQTT e o dashboard de supervisão.

4.1 Diagnóstico Energético: Perfil de Consumo

A análise do perfil de consumo da ETA Vargem Grande ao longo do período de julho a dezembro de 2025 revelou um padrão operacional consistente e fortemente determinado pela demanda de distribuição das redes a jusante dos dois reservatórios de distribuição. O consumo

total dos sete motores no semestre foi de 10.147.651 kWh, distribuído de forma marcadamente desigual entre os equipamentos: os motores MTR04, MTR01 e MTR05, todos pertencentes ao Grupo 1 (que alimenta o Reservatório Granja Carolina), concentraram 76,6% do consumo total, configurando-se como os equipamentos de recalque principal da estação. Os motores MTR02, MTR03 e MTR06, em contrapartida, responderam por apenas 9,9% do consumo, caracterizando-se como conjuntos de apoio ou reserva.

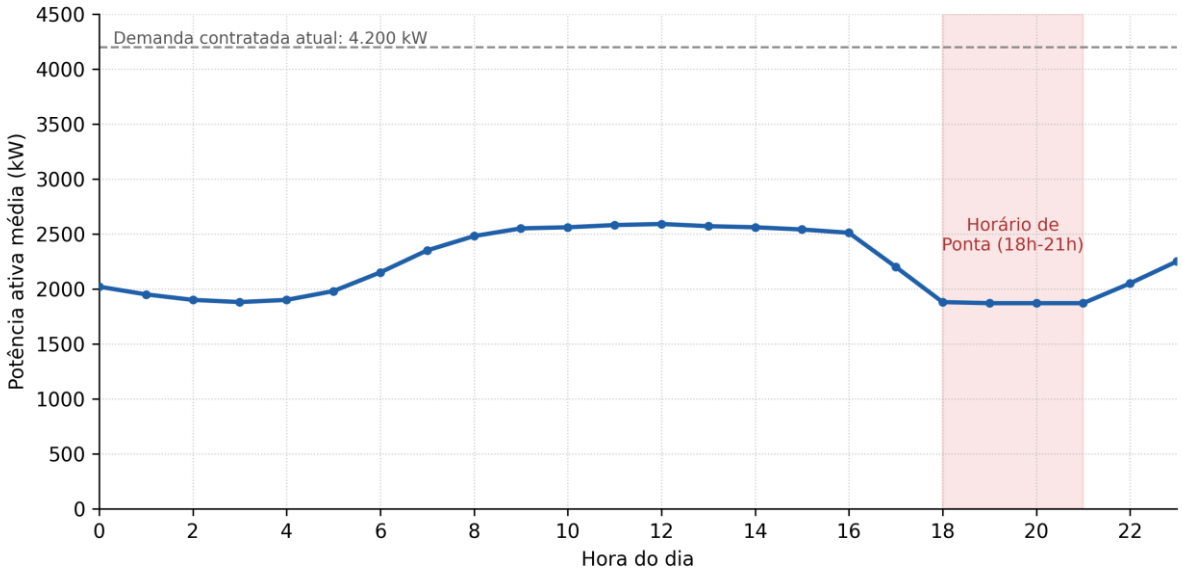
O perfil de carga horário médio, calculado para os 132 dias úteis do período, evidencia que a estação já pratica uma redução natural de carga no horário de ponta. A potência média demandada cai dos patamares diurnos, próximos de 2.500 kW a 2.600 kW entre 10h e 16h, para cerca de 1.870 kW no intervalo das 18h às 20h, recuperando-se a partir das 22h. Essa redução espontânea de aproximadamente 700 kW indica que a operação já incorpora, de forma não sistematizada, práticas de gestão de carga no horário de ponta, ainda que sem o suporte de uma lógica de controle dedicada.

No horário de ponta, o consumo dos sete motores totalizou 741.617 kWh no semestre, representando 7,3% do consumo total. O motor MTR01 foi o de maior consumo absoluto na ponta (213.678 kWh), seguido pelo MTR05 (186.527 kWh) e pelo MTR04 (176.498 kWh), todos do Grupo 1. A predominância do Grupo 1 no consumo de ponta é coerente com sua função de recalque principal para o Reservatório Granja Carolina e confirma que qualquer estratégia de deslocamento de carga deve incidir prioritariamente sobre esses equipamentos.

A demanda máxima medida na ponta ao longo do período foi de 3.491 kW, enquanto fora de ponta atingiu 3.655 kW, ambas inferiores à demanda contratada de 4.200 kW. A folga de 709 kW na ponta e de 545 kW fora de ponta representa capacidade contratada e remunerada que não é efetivamente utilizada, constituindo a principal oportunidade de redução de custo identificada no diagnóstico.

O perfil de carga horário médio da estação, ilustrado na Figura 11, evidencia visualmente essa redução espontânea de demanda no entorno do Horário de Ponta, ainda distante da demanda contratada de 4.200 kW ao longo de todo o dia.

Figura 11 – *Curva de carga horária média da ETA Vargem Grande (jul.–dez./2025)*



Fonte: *Elaborado pelo autor com base nos dados do sistema supervisório (2025)*

Essa folga contratual, no entanto, não se traduz automaticamente em economia financeira. Conforme o art. 301 da Resolução Normativa ANEEL nº 1.000/2021, a demanda efetivamente faturada em cada posto tarifário corresponde ao maior valor entre a demanda medida naquele mês e a demanda contratada vigente (ANEEL, 2021). Em outras palavras, deslocar o consumo para fora do Horário de Ponta reduz a demanda medida, mas não reduz, isoladamente, a parcela de demanda contratada já formalizada em contrato, a qual continua sendo integralmente faturada independentemente do uso efetivo. Por esse motivo, a estratégia de *load shifting* proposta neste trabalho é indissociável da renegociação da demanda contratada junto à distribuidora, detalhada na Seção 4.4, sem a qual a redução do pico de consumo não geraria, isoladamente, a economia financeira estimada na Seção 4.5.

4.2 Indicador de Eficiência Energética (IEE)

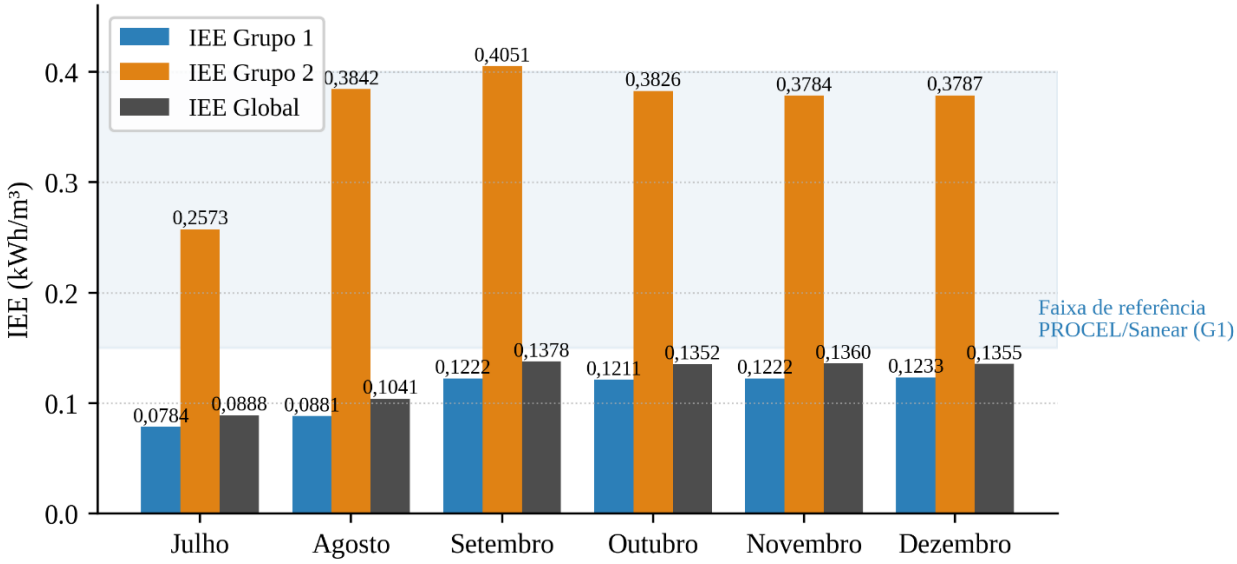
A análise da evolução mensal do IEE é apresentada na Tabela 3, que detalha a energia consumida e o volume bombeado por grupo ao longo dos seis meses. Estes dados também estão representados em forma de gráfico de barras na figura 12.

Tabela 3 – IEE mensal — energia consumida e volume bombeado por grupo

Mês	E. G1 (kWh)	Vol. G1 (m³)	IEE G1	E. G2 (kWh)	Vol. G2 (m³)	IEE G2	IEE Global
Julho	1.000.242	12.760.462	0,0784	202.748	787.941	0,2573	0,0888
Agosto	1.177.502	13.359.557	0,0881	293.369	763.524	0,3842	0,1041
Setembro	1.552.058	12.699.823	0,1222	299.870	740.160	0,4051	0,1378
Outubro	1.569.585	12.961.035	0,1211	282.345	738.021	0,3826	0,1352
Novembro	1.580.066	12.931.713	0,1222	279.249	737.917	0,3784	0,1360
Dezembro	1.654.806	13.421.120	0,1233	255.812	675.454	0,3787	0,1355
TOTAL	**8.534.258**	**78.133.710**	**0,1092**	**1.613.393**	**4.443.017**	**0,3631**	**0,1229**

Fonte: *Elaborado pelo autor com base nos dados do supervisório (2025)*

Figura 12 – *IEE mensal por grupo hidráulico e IEE global (jul.–dez./2025)*



Fonte: *Elaborado pelo autor com base nos dados do supervisório (2025)*

A diferença entre os grupos reflete diretamente a relação entre altura manométrica e consumo específico: o Grupo 2, com altura aproximadamente três vezes maior, apresenta IEE proporcionalmente superior. O Grupo 1 (0,1092 kWh/m³) situa-se inclusive abaixo do limite inferior da faixa de referência do PROCEL/Sanear (0,15 a 0,40 kWh/m³ para alturas manométricas moderadas), o que evidencia desempenho energético superior, coerente com sua baixa altura manométrica (39,3 mca); o Grupo 2 (0,3631 kWh/m³) encontra-se dentro dessa faixa (TSUTIYA, 2006; ELETROBRAS, 2018).

A análise da evolução mensal do IEE, apresentada na Tabela 3 e ilustrada na Figura 12, revela uma tendência consistente ao longo do semestre. O Grupo 1 apresentou seu melhor desempenho nos meses de julho (0,0784 kWh/m³) e agosto (0,0881 kWh/m³), elevando-se e estabilizando-se em torno de 0,122 kWh/m³ a partir de setembro. Essa variação está associada ao regime operacional dos motores: nos meses iniciais, observou-se menor participação dos motores MTR01 e MTR06, compatível com paradas para manutenção, o que reduziu o consumo proporcionalmente ao volume bombeado. O Grupo 2 manteve IEE mais estável, entre 0,2573 e 0,4051 kWh/m³, refletindo sua operação em altura manométrica significativamente superior.

A estabilização do IEE em torno de 0,123 kWh/m³ nos últimos quatro meses representa o regime operacional típico e pleno da estação, sendo este o valor mais representativo para fins de projeção e comparação.

4.3 Viabilidade Técnica do *Load Shifting*

A viabilidade técnica do deslocamento de carga foi avaliada considerando a topologia completa do sistema de bombeamento da ETA Vargem Grande, descrita na Seção 3.2.2, na qual o Grupo 1 recalca para o Reservatório Granja Carolina (R1) e o Grupo 2 para o Reservatório Caucaia do Alto / Vargem Grande Paulista (R2). As capacidades de cada reservatório e os parâmetros de controle adotados (setpoint de 90%, religamento de 75% e a banda morta correspondente) seguem o detalhamento das Seções 3.4.1 e 3.4.2.

A capacidade de armazenamento desses reservatórios de distribuição, em relação à vazão de demanda das respectivas redes, define a autonomia hidráulica disponível para a estratégia de deslocamento de carga. Diferentemente do Reservatório de Água Tratada (RAT) da ETA, que recebe a água tratada antes do recalque, os reservatórios de distribuição estão a jusante das bombas e atuam como pulmão hidráulico capaz de sustentar o abastecimento das cidades durante períodos de redução do bombeamento. Os parâmetros operacionais desses reservatórios estão sintetizados na Tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetros operacionais dos reservatórios de distribuição

Reservatório	**Capacidade total (m³)**	**SP 90% (m³)**	**Religamento 75% (m³)**	**Volume útil (m³)**
Granja Carolina (R1)	30.000	27.000	22.500	4.500
Caucaia do Alto / VGP (R2)	12.000	10.800	9.000	1.800

Fonte: *Elaborado pelo autor com base no esquemático do sistema de abastecimento da ETA Vargem Grande.*

A análise da demanda das redes a jusante, obtida a partir da vazão total medida pelo transmissor FIT-01 na saída da ETA e da decomposição por grupo descrita na Seção 3.3.2, no período de julho a dezembro de 2025, revelou que o Grupo 1 entrega em média 17.552 m³/h ao Reservatório Granja Carolina e o Grupo 2 entrega 988 m³/h ao Reservatório Caucaia do Alto. Durante o horário de ponta, essas vazões reduzem-se naturalmente para 15.036 m³/h e 843 m³/h, respectivamente. Considerando que, em regime permanente, a vazão de recalque corresponde à demanda das cidades atendidas, esses valores representam também a taxa de drenagem dos reservatórios caso o bombeamento seja reduzido.

Com o volume útil de cada reservatório (4.500 m³ para R1 e 1.800 m³ para R2) e a demanda da rede durante a ponta, calcula-se a parcela do consumo de ponta que pode ser suprida pelo estoque hidráulico acumulado: o reservatório R1 cobre apenas 10,0% da demanda das 3 horas de ponta, enquanto o reservatório R2 cobre 71,2%. Essa diferença é determinante para o dimensionamento da estratégia: o Grupo 2, com reservatório proporcionalmente maior em relação à sua demanda, pode ter bombeamento reduzido em até 71% durante a ponta; o Grupo 1, com reservatório menor em relação à sua demanda, suporta redução de apenas 10%.

A estratégia proposta consiste, portanto, na elevação do nível de ambos os reservatórios de distribuição ao *setpoint* de 90% nas horas imediatamente anteriores à ponta tarifária (entre 15h e 17h), seguida da redução diferenciada do bombeamento durante as 18h às 21h: redução de 10% no Grupo 1 e de 71% no Grupo 2. Ao final das três horas de ponta, ambos os reservatórios atingem exatamente o nível de religamento de 75%, momento em que a operação retorna ao regime pleno. A simulação hora a hora dessa estratégia é apresentada na Tabela 5.

Tabela 5 – Simulação da estratégia de load shifting nos reservatórios de distribuição

Horário	R1 Vol. (m³)	R1 % cap.	R2 Vol. (m³)	R2 % cap.	Posto
15h00 (pré-ench.)	27.000	90,0%	10.800	90,0%	fora ponta
18h00 (início ponta)	27.000	90,0%	10.800	90,0%	PONTA
19h00	25.500	85,0%	10.200	85,0%	PONTA
20h00	24.000	80,0%	9.600	80,0%	PONTA
21h00 (fim ponta)	22.500	75,0%	9.000	75,0%	fora ponta

Fonte: *Elaborado pelo autor. Drenagem linear sob redução de 10% do bombeamento G1 e 71% do bombeamento G2.*

A redução de bombeamento na ponta traduz-se em redução da potência elétrica demandada pela estação. Os valores de redução por grupo, a demanda projetada e o novo patamar de demanda contratada são sintetizados na Tabela 6.

Tabela 6 - Impacto da estratégia sobre a demanda de ponta

Parâmetro de demanda	**Valor**
Redução de demanda na ponta (Grupo 1)	164 Kw
Redução de demanda na ponta (Grupo 2)	218 Kw
Redução total na ponta	382 Kw
Demanda máxima medida (cenário atual)	3.491 Kw
Demanda projetada com a estratégia	3.109 Kw
Demanda contratada possível na ponta	3.300 Kw
Demanda contratada atual na ponta	4.200 Kw
Redução na demanda contratada de ponta	900 Kw

Fonte: *Elaborado pelo autor (2026)*

A nova demanda contratada possível na ponta resulta da aplicação de margem de segurança de 6% sobre a demanda projetada, arredondada para o múltiplo de 100 kW imediatamente superior. Essa margem foi fixada deliberadamente acima do limite de tolerância de ultrapassagem estabelecido pelo art. 301 da Resolução Normativa ANEEL nº 1.000/2021, segundo o qual a parcela de ultrapassagem, cobrada a uma tarifa correspondente a três vezes o valor da tarifa de demanda vigente, somente incide quando a demanda medida excede em mais de 5% a demanda contratada, por posto tarifário (ANEEL, 2021). Adotar uma margem de 6%, e não um valor rente ao limite de 5%, garante que eventuais picos operacionais não sistemáticos permaneçam dentro da faixa tolerada pela distribuidora, evitando a incidência da tarifa de ultrapassagem mesmo em cenários de variação sazonal de demanda. A redução de 900 kW em relação aos 4.200 kW atualmente contratados constitui o principal mecanismo de economia da estratégia, detalhado na Análise Econômica (Seção 4.5).

4.4 Proposta de Controle: Resultados

A estratégia de deslocamento de carga foi formalizada na arquitetura modular e parametrizável descrita na Seção 3.4, cujo código-fonte completo em Texto Estruturado consta no Apêndice A. Esta seção concentra-se nos resultados obtidos com a aplicação dessa lógica

aos dados operacionais históricos da ETA Vargem Grande. O tratamento independente de cada reservatório de distribuição, principal característica da proposta (Seção 3.4.1), foi o aspecto central avaliado na simulação.

A simulação indica que a estratégia mantém ambos os reservatórios de distribuição dentro da faixa operacional segura ao longo de todo o ciclo diário: o nível de religamento de 75% não é violado em nenhum dos reservatórios e a recuperação ao setpoint de 90% após a ponta ocorre em menos de duas horas, dentro do regime normal de bombeamento.

A demanda contratada projetada após a implementação é de 3.300 kW na ponta e 3.900 kW fora de ponta, totalizando uma redução de 1.200 kW na potência contratada (900 kW na ponta e 300 kW fora de ponta). Mantida a margem de segurança operacional de 6%, o histórico não apresenta nenhum evento em que a demanda medida atingiria os novos limites, o que confirma a robustez da renegociação proposta.

O intertravamento de segurança hidráulica, formalizado no Apêndice A, suspende imediatamente o bloqueio de motores caso o volume de qualquer reservatório atinja o nível de emergência de 70%, restabelecendo o regime normal de bombeamento. Esse mecanismo assegura que a economia tarifária jamais comprometa a segurança operacional do sistema.

4.5 Análise Econômica

A projeção dos ganhos econômicos anuais decorrentes da estratégia de *load shifting*, considerando a renegociação da demanda contratada e a migração do consumo para o horário fora de ponta, baseou-se no perfil de operação registrado entre julho e dezembro de 2025 e nas tarifas de demanda e energia vigentes para o Subgrupo A2 (NEOENERGIA, 2025).

A redução do bombeamento durante a ponta traduz-se em uma diminuição de aproximadamente 382 kW na potência elétrica demandada pela estação. Essa folga viabiliza a renegociação da demanda contratada para 3.300 kW na ponta e 3.900 kW fora de ponta, preservada a margem de segurança operacional. O detalhamento das reduções por grupo de motores e a estimativa de economia anual decorrente são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Estimativa de economia anual com a estratégia de *load shifting*

Componente	**Valor (R$/ano)**	**Observação**
Redução de demanda na ponta	186.948	Renegociação de 4.200 para 3.300 kW (–900 kW)
Redução de demanda fora ponta	37.080	Renegociação de 4.200 para 3.900 kW (–300 kW)
Subtotal: economia de demanda	224.028	Soma das reduções de demanda contratada
Custo adicional de energia	-139.344	Pré-enchimento dos reservatórios R1 e R2
Economia líquida anual	**84.684**	**Cenário com R1 e R2 a 90% antes da ponta**

Fonte: *Elaborado pelo autor com base nos dados do supervisório (2025) e tarifas Neoenergia/Elektro (2025)*

4.6 Implementação Prática da Camada de Monitoramento em Node-RED®

Para validar a arquitetura proposta na Seção 3.4.1 e demonstrar a integração entre as camadas de análise e controle, foi desenvolvida uma implementação prática da camada de monitoramento utilizando a plataforma Node-RED®. A implementação teve os seguintes objetivos:

- Demonstrar o fluxo de dados desde a leitura dos arquivos históricos exportados do supervisório HYDRIA® até sua publicação via protocolo MQTT para o CLP;
- Disponibilizar um painel de supervisão em tempo real para acompanhamento dos indicadores energéticos e operacionais dos sete motores e dos dois reservatórios de distribuição.

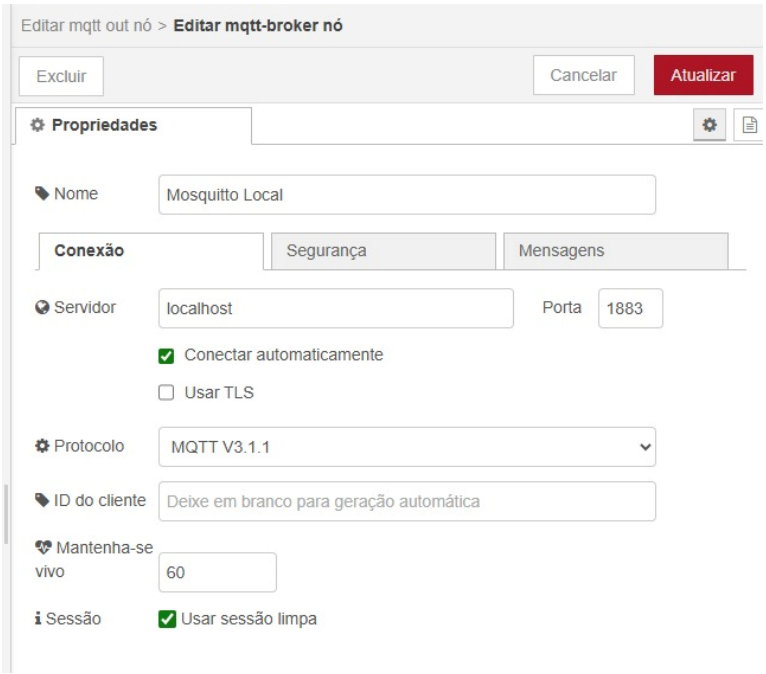
A solução foi estruturada nos seguintes blocos funcionais:

- Configuração do broker MQTT: estabelecimento da comunicação entre os componentes da arquitetura e gerenciamento da troca de mensagens;
- Aquisição e publicação de dados: leitura, processamento e envio das variáveis operacionais e energéticas para o ambiente de controle;
- Dashboard de supervisão: visualização em tempo real dos indicadores de desempenho, estados operacionais e variáveis de processo.

4.6.1 Configuração do Broker MQTT

A comunicação entre o Node-RED® e o CLP HYDRIA® foi estabelecida por meio do protocolo MQTT, conforme detalhado na Seção 3.4.1. O *broker* utilizado foi o Eclipse Mosquitto em execução local na máquina de desenvolvimento, configurado conforme apresentado na Figura 13. Os parâmetros adotados na configuração do nó MQTT seguem as recomendações da norma interna OADC008 da Sabesp para integração com a plataforma HYDRIA®: servidor *localhost* na porta padrão 1883, protocolo MQTT V3.1.1, conexão automática habilitada, e *keep-alive* de 60 segundos para detecção rápida de falhas de comunicação. A opção "Usar sessão limpa" foi mantida ativa para garantir que cada reconexão estabeleça um estado conhecido entre publicador e assinante.

Figura 13 – Configuração do nó mqtt-*broker* no Node-RED® — conexão com Mosquitto local



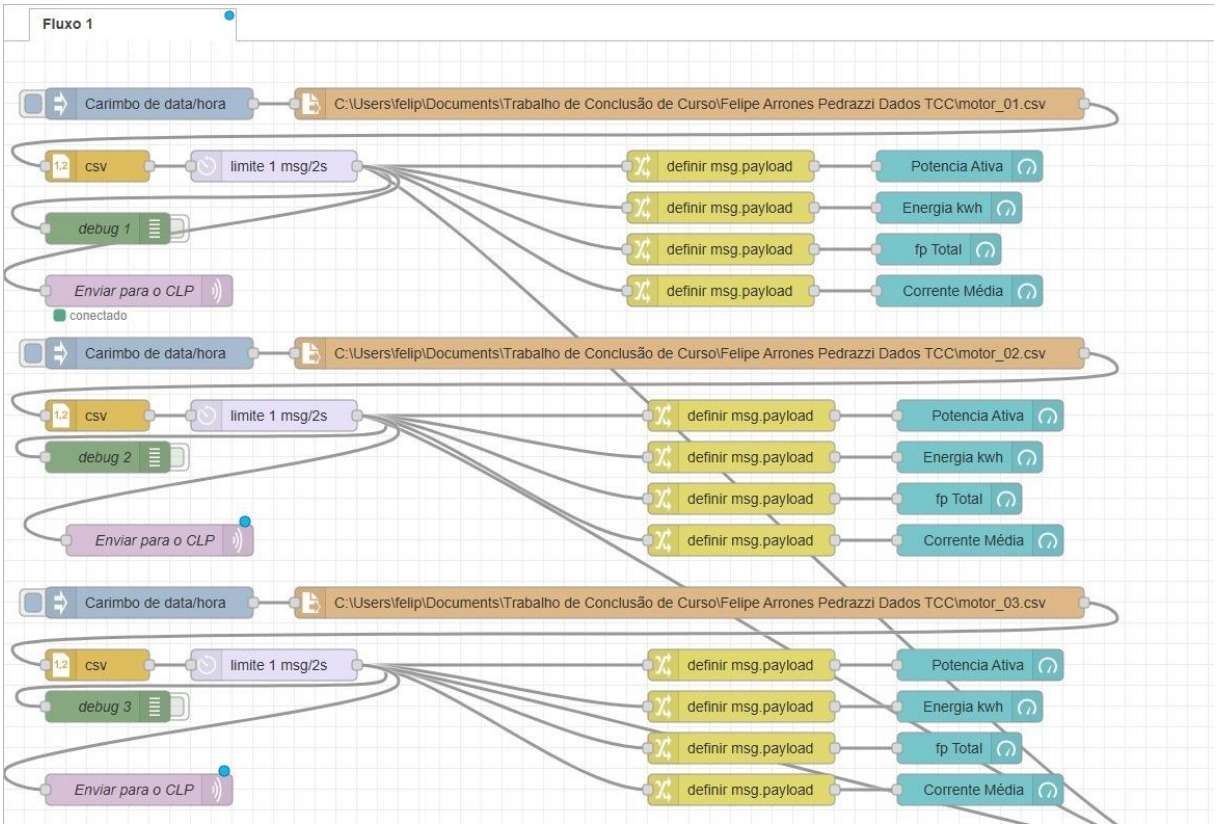
Fonte: *Elaborado pelo autor (2026)*

Em uma implantação operacional, o *broker* Mosquitto deve ser substituído pelo *broker* corporativo da Sabesp, com autenticação por usuário e senha, criptografia TLS habilitada e tópicos organizados conforme a hierarquia OADC008. A arquitetura do Node-RED® foi concebida de modo que essa transição se reduza ao ajuste dos parâmetros de servidor, porta e credenciais, sem alteração da lógica dos fluxos.

4.6.2 Arquitetura dos Fluxos de Aquisição de Dados

Os fluxos de aquisição foram organizados em uma estrutura modular, com um fluxo dedicado a cada um dos sete motores de recalque (MTR01 a MTR07) e um fluxo dedicado aos dois reservatórios de distribuição (R1, Granja Carolina; R2, Caucaia do Alto/ Vargem Grande Paulista). A visão geral do conjunto de fluxos implementados no ambiente Node-RED® é apresentada na Figura 14, evidenciando o padrão de organização adotado.

Figura 14 – Visão geral dos fluxos Node-RED® — leitura, processamento e publicação MQTT (motores 1 a 3)



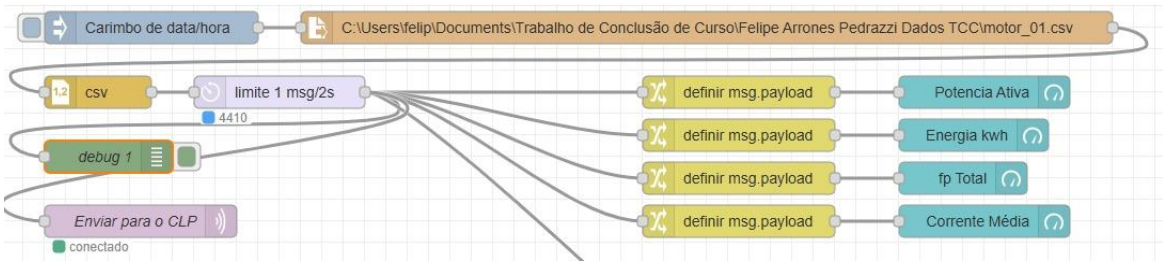
Fonte: *Elaborado pelo autor (2026). Recorte ampliado da área do diagrama de fluxos.*

Cada fluxo de motor segue o mesmo padrão de processamento. Um nó "Carimbo de data/hora" (*inject*) dispara o início da leitura do arquivo CSV correspondente ao motor (motor_01.csv a motor_07.csv), exportados previamente do supervisório com resolução horária para o período de julho a dezembro de 2025. O conteúdo do arquivo é processado pelo nó CSV, que converte cada linha em um objeto JavaScript contendo os campos *timestamp*, energia_kwh, fp_total, corrente_media_A e pot_ativa_kW. Em seguida, o nó "limite 1 msg/2s" controla a taxa de emissão de mensagens para não saturar o *broker* MQTT, simulando uma operação em tempo real ao longo do tempo histórico. Cada mensagem é então roteada para quatro nós paralelos do tipo "definir msg.*payload*", responsáveis por extrair o campo específico que foi

exibido em cada *gauge* do *dashboard* (Potência Ativa, Energia kWh, fp Total e Corrente Média), e simultaneamente publicada via MQTT por meio do nó "Enviar para o CLP", que utiliza o *broker* configurado conforme a Figura 13.

Um dos fluxos individuais de aquisição implementados é detalhado na Figura 15, tomando o motor MTR01 como exemplo.

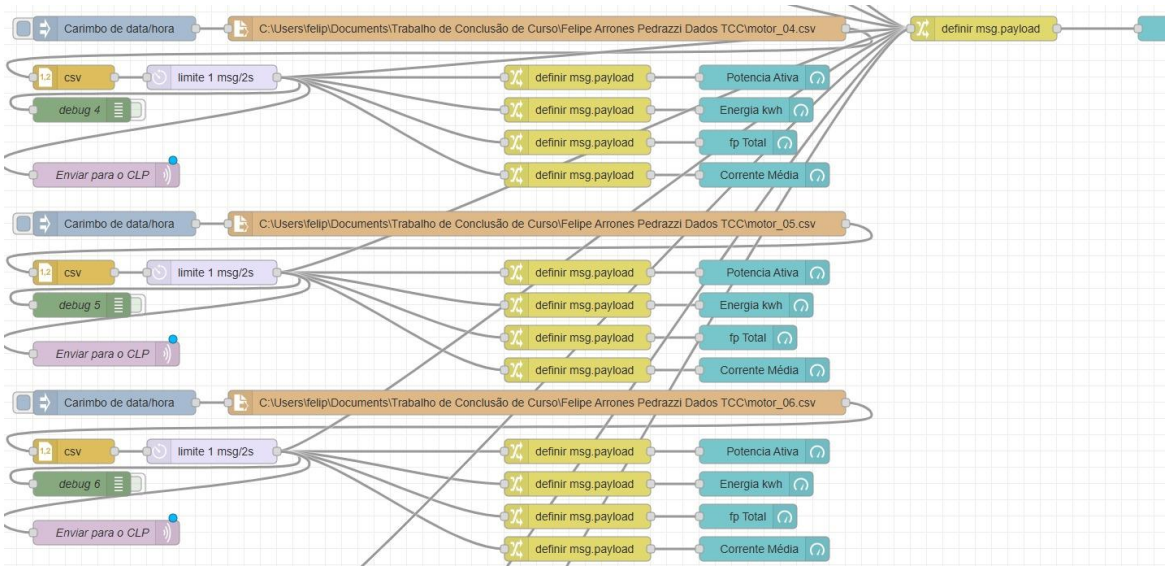
Figura 15 – Detalhe do fluxo de aquisição do motor MTR01 — leitura CSV, taxa limitada e publicação MQTT



Fonte: *Elaborado pelo autor (2026)*

Os fluxos referentes aos motores MTR04, MTR05 e MTR06 são detalhados na Figura 16, evidenciando a uniformidade do padrão adotado e a replicabilidade da estrutura. Cada motor possui seu próprio nó de envio MQTT, indicado pelo rótulo "Enviar para o CLP" e identificado pelo indicador visual de status de conexão (ponto verde quando conectado ao broker). Essa organização modular permite a adição ou remoção de motores sem impacto nos demais fluxos.

Figura 16 – Detalhe dos fluxos dos motores MTR04, MTR05 e MTR06

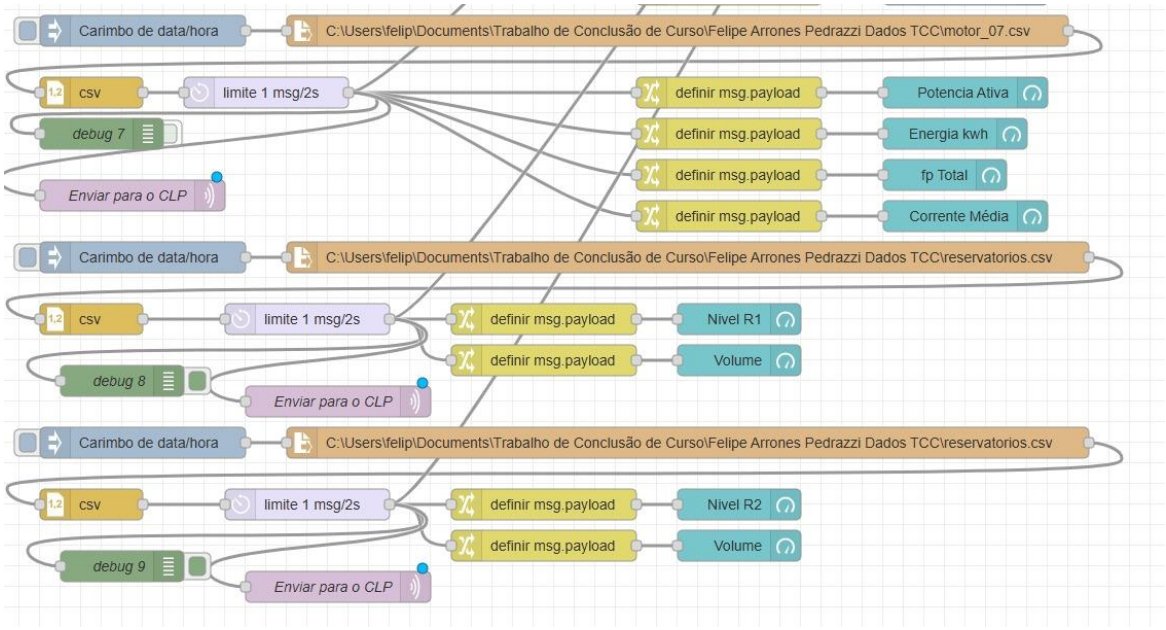


Fonte: *Elaborado pelo autor (2026)*

O fluxo correspondente ao motor MTR07 e, em destaque, os fluxos dedicados aos dois reservatórios de distribuição são apresentados na Figura 17. O arquivo reservatorios.csv

consolida as leituras dos transmissores de nível dos reservatórios Granja Carolina (R1) e Caucaia do Alto (R2), com os campos de nível instantâneo (em milímetros, conforme a leitura do transmissor LIT) e volume calculado (em metros cúbicos, obtido pelo produto entre nível e área da seção do reservatório). Os dois fluxos de reservatório seguem a mesma arquitetura dos fluxos de motor, garantindo consistência de implementação.

Figura 17 – Fluxo do motor MTR07 e fluxos dedicados aos reservatórios R1 e R2



Fonte: *Elaborado pelo autor (2026)*

4.6.3 Validação do Fluxo de Dados

A validação dos fluxos foi realizada por meio de nós "debug" inseridos imediatamente após o processamento CSV de cada motor e reservatório. Esses nós permitem inspecionar o conteúdo das mensagens em tempo real na barra lateral do Node-RED®, confirmando a correta interpretação dos arquivos de entrada e o sincronismo entre as diferentes fontes de dados. Um extrato da janela de depuração durante a execução do fluxo é apresentado na Figura 18, evidenciando a sequência temporal das mensagens emitidas pelo nó "limite 1 msg/2s" e a estrutura dos objetos *payload* recebidos.

Cada mensagem exibida na Figura 18 corresponde a uma hora do período analisado, com o *timestamp* no formato DD/MM/AAAA HH:MM e os campos de energia acumulada, fator de potência total, corrente média e potência ativa preservados conforme o registro original do supervisório. A inspeção dessas mensagens permitiu identificar e corrigir inconsistências

nos arquivos CSV originais, como linhas com campos vazios ou valores anômalos, antes da efetiva publicação MQTT.

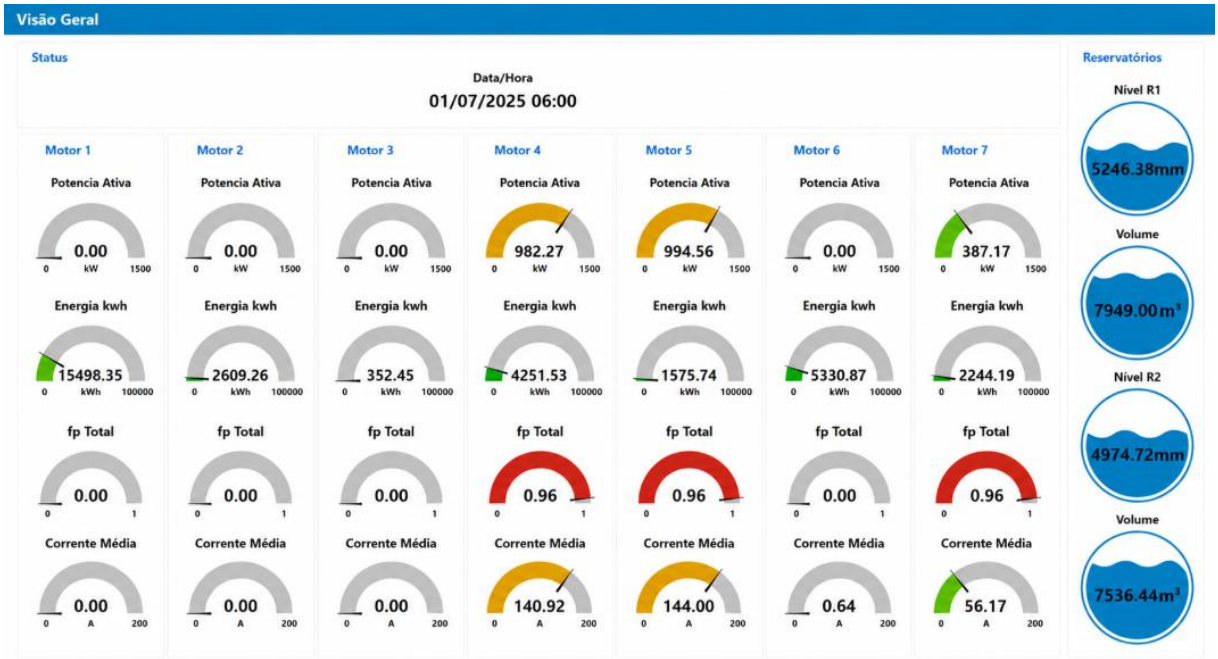
Figura 18 – Saída do nó de depuração — sequência temporal das leituras processadas

Fonte: *Elaborado pelo autor (2026)*

4.6.4 Dashboard de Supervisão

O *dashboard* de supervisão foi desenvolvido com a paleta de componentes nativa do Node-RED® *Dashboard*, organizado em uma única tela denominada "Visão Geral", estruturada em um painel de status com data e hora da leitura, um painel com os indicadores dos dois reservatórios de distribuição (nível, em milímetros, e volume, em metros cúbicos, de R1 e R2) e sete painéis individuais, um para cada motor de recalque (MTR01 a MTR07), cada qual com *gauges* semicirculares de Potência Ativa, Energia Acumulada, Fator de Potência (fp Total) e Corrente Média. O *dashboard* completo, em operação, é apresentado na Figura 19.

Figura 19 – Dashboard Node-RED® – Visão Geral, com os indicadores dos reservatórios R1 e R2 e dos sete motores de recalque



Fonte: *Elaborado pelo autor (2026)*

No momento da captura da Figura 19, o *dashboard* exibia o estado da estação às 06h00 do dia 1º de julho de 2025. Os motores MTR01, MTR02, MTR03 e MTR06 estavam desligados, com os *gauges* de Potência Ativa, fp Total e Corrente Média zerados (o pequeno valor residual de 0,64 A exibido para o MTR06 é compatível com ruído de medição do transdutor de corrente com o motor parado, e não com consumo real). Ainda assim, seus indicadores de Energia kWh permaneciam em valores não nulos (15.498,35 kWh, 2.609,26 kWh, 352,45 kWh e 5.330,87 kWh, respectivamente), pois representam a energia acumulada desde o início da janela de monitoramento, e não a potência instantânea, sendo grandezas distintas e complementares. Os motores MTR04 e MTR05, do Grupo 1, operavam em carga elevada (982,27 kW e 994,56 kW, respectivamente), com *gauges* de Potência Ativa e de Corrente Média (140,92 A e 144,00 A) na cor amarela, indicando operação próxima dos limites superiores da escala configurada para esses indicadores. O motor MTR07, do Grupo 2, operava em regime mais moderado (387,17 kW, *gauge* verde), com corrente média de 56,17 A. Os reservatórios de distribuição registravam, no mesmo instante, nível de 5.246,38 mm e volume de 7.949 m³ no Reservatório R1 (Granja Carolina) e nível de 4.974,72 mm e volume de 7.536,44 m³ no Reservatório R2 (Caucaia do Alto/Vargem Grande Paulista), ambos compatíveis com a operação regular fora do Horário de Ponta.

Os fatores de potência (fp Total) registrados para os três motores em operação (0,9591 para o MTR04, 0,9605 para o MTR05 e 0,9598 para o MTR07) são superiores à faixa típica de 0,85 a 0,92 observada nos terminais de motores de indução trifásicos sem compensação (MAMEDE FILHO, 2017). Essa diferença é coerente com a operação real da ETA Vargem Grande, que conta com empresa terceirizada responsável pela correção ativa do fator de potência, por meio de bancos de capacitores, de modo a manter o fator de potência medido acima do limite de referência de 0,92 estabelecido pelo art. 302 da Resolução Normativa ANEEL nº 1.000/2021 e evitar a cobrança de energia reativa excedente (ANEEL, 2021). Os valores exibidos no *dashboard* refletem, portanto, o fator de potência já corrigido no ponto de medição, e não o fator de potência intrínseco dos motores de indução isoladamente. Note-se que, embora os *gauges* de fp Total desses três motores estejam configurados na cor vermelha, essa coloração não indica uma condição de alarme: o esquema de cores genérico do modelo de *gauge* utilizado, herdado das demais grandezas, atribui vermelho a valores próximos do limite superior da escala e não foi recalibrado especificamente para o fator de potência, para o qual valores próximos de 1 são, na verdade, desejáveis. Registra-se, ainda, que os dados nominais de placa dos motores (tensão, corrente e rendimento nominais) não fizeram parte do escopo de coleta deste trabalho, conforme apontado na Seção 3.2.2, sendo recomendada sua obtenção junto à documentação técnica dos fabricantes em trabalhos futuros.

As cores dos *gauges* seguem, de resto, a paleta clássica da norma ISA-101 para IHM de alta performance, com verde indicando operação normal, amarelo indicando atenção (operação próxima dos limites) e vermelho indicando alarme, ressalvada a exceção do fp Total discutida acima. A organização em painéis individuais por motor facilita a comparação visual entre os sete conjuntos motobomba e permite ao operador identificar rapidamente desvios operacionais, tanto em termos de acionamento (motores ligados ou desligados) quanto de carregamento elétrico.

A implementação do *dashboard* em Node-RED® demonstra a viabilidade técnica da camada de monitoramento proposta na arquitetura geral do sistema (Seção 3.4.1) e fornece a base visual para a operação do supervisório paralelo proposto.

5 CONCLUSÃO

O desenvolvimento deste trabalho permitiu aprofundar o entendimento sobre a relação entre operação hidráulica, consumo de energia elétrica e automação em sistemas de abastecimento de água. A partir da análise da ETA Vargem Grande Paulista, unidade integrante do Sistema Produtor São Lourenço, foi possível identificar oportunidades concretas de otimização energética sem comprometer a confiabilidade operacional e a continuidade do abastecimento.

O diagnóstico energético realizado com base nos dados históricos do sistema supervisório permitiu caracterizar o desempenho dos grupos de bombeamento e compreender como a configuração hidráulica da estação influencia diretamente o consumo específico de energia. Os resultados obtidos demonstraram que a ETA apresenta níveis satisfatórios de eficiência energética quando comparados aos valores de referência do setor, evidenciando a qualidade operacional da instalação. Ainda assim, a análise detalhada revelou pontos específicos onde ações de gerenciamento da demanda podem gerar benefícios econômicos relevantes.

A avaliação da autonomia dos reservatórios de distribuição mostrou que a infraestrutura existente possui capacidade suficiente para suportar uma estratégia de deslocamento de carga durante o Horário de Ponta. A simulação desenvolvida confirmou que o pré-enchimento dos reservatórios, associado à redução controlada do bombeamento, permite diminuir significativamente a demanda elétrica da estação sem comprometer os níveis mínimos de segurança operacional, como o desabastecimento da população atendida, o esgotamento total (secagem) dos reservatórios de distribuição e a cavitação das bombas decorrente de operação com nível insuficiente, reforçando sua viabilidade técnica.

Com esse resultado é possível observar que os próprios elementos hidráulicos do sistema podem ser utilizados como ferramenta de gestão energética, transformando a reservação em um recurso estratégico para redução de custos.

Além dos ganhos econômicos estimados, constatou-se que a principal contribuição deste trabalho está no desenvolvimento de uma solução de controle parametrizável, concebida para ser facilmente adaptada a diferentes unidades operacionais. A utilização da plataforma HYDRIA® e da linguagem Texto Estruturado possibilitou a criação de uma arquitetura flexível, baseada em parâmetros configuráveis e não em alterações específicas de código,

favorecendo sua futura replicação em outras estações do Sistema São Lourenço e, potencialmente, em outras instalações da Sabesp.

Outro aspecto relevante foi a incorporação de mecanismos de segurança operacional à lógica proposta. O intertravamento baseado nos níveis dos reservatórios garante que qualquer benefício econômico obtido permaneça subordinado ao objetivo principal do sistema de abastecimento: fornecer água à população com segurança e continuidade. A análise dos dados históricos indicou que a estratégia pode ser aplicada sem riscos operacionais significativos, reforçando sua viabilidade técnica.

Do ponto de vista acadêmico e profissional, este trabalho representou uma oportunidade de integrar conhecimentos de automação industrial, sistemas supervisórios, eficiência energética, programação de CLPs e operação de sistemas de saneamento em uma aplicação real. A experiência de trabalhar com dados operacionais da ETA Vargem Grande Paulista permitiu compreender desafios que vão além dos conceitos teóricos, evidenciando a importância da análise de dados e da automação como ferramentas para a tomada de decisão em ambientes industriais.

Por fim, os resultados obtidos indicam que a estratégia proposta possui potencial para contribuir com a redução dos custos operacionais da estação e servir como base para futuras iniciativas de eficiência energética no saneamento. Como continuidade deste estudo, recomenda-se a realização de testes em campo para validação experimental da lógica desenvolvida, a ampliação das análises para diferentes cenários sazonais de consumo e a aplicação da metodologia em outras unidades operacionais, de modo a verificar a consolidação de uma abordagem padronizada de gestão energética para sistemas de abastecimento de água.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Resolução Normativa n. 1.000, de 7 de dezembro de 2021. Estabelece as Regras de Prestação do Serviço Público de Distribuição de Energia Elétrica. Brasília: ANEEL, 2021.

BRASIL ENERGIA. Saneamento responde por 2% a 3% do consumo nacional de energia elétrica. São Paulo: Brasil Energia, 2024. Disponível em: <https://brasilenergia.com.br>. Acesso em: abr. 2026.

DMB BOMBAS E VÁLVULAS. O que é o Best Efficiency Point (BEP) e por que ele é tão importante. 2025. Disponível em: <https://www.dmbbombas.com.br/bep>. Acesso em: abr. 2026.

ELETROBRAS; PROCEL. Manual de conservação de energia elétrica em sistemas de bombeamento. 3. ed. Rio de Janeiro: Eletrobras/PROCEL, 2018.

FRANCHI, C. M. Controladores lógicos programáveis. 5. ed. São Paulo: Érica, 2013.
HILDEBRAND, D. MQTT essentials: a lightweight messaging protocol for the Internet of Things. Birmingham: Packt Publishing, 2020.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 61131-3: programmable controllers. Part 3: programming languages. 3. ed. Geneva: IEC, 2013.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION; INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. ISO/IEC 20922:2016: information technology. Message queuing telemetry transport (MQTT) v3.1.1. Geneva: ISO/IEC, 2016.

INTERNATIONAL SOCIETY OF AUTOMATION. ANSI/ISA-101.01-2015: human machine interfaces for process automation systems. Research Triangle Park: ISA, 2015.

LEWIS, R. W. Programming industrial control systems using IEC 61131-3. London: IEE, 1998.

MACINTYRE, A. J. Bombas e instalações de bombeamento. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1997.

MAMEDE FILHO, J. Manual de equipamentos elétricos. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

NEOENERGIA ELEKTRO. Tarifas de energia elétrica: Subgrupo A2, Modalidade Azul. Campinas: Neoenergia Elektro, 2025. Disponível em: https://www.neoenergiaelektro.com.br. Acesso em: mar. 2026.

SABESP (Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo). Sistema Produtor São Lourenço. São Paulo: Sabesp, 2023. Disponível em: <https://www.sabesp.com.br>. Acesso em: mar. 2026.

SANTOS, R. D. Desenvolvimento de sistema de controle parametrizável para estações de bombeamento de água tratada. 2024. 98 f. Monografia (MBA em Automação Industrial).

Programa de Educação Continuada em Engenharia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2024.

SCHWAB, K. A quarta revolução industrial. Tradução Daniel Moreira Miranda. São Paulo: Edipro, 2016.

SILVA, Jeferson Aparecido Santana; FIGUEIRA, Ronaldo Gomes; FLORIAN, Fabiana. Análise das Distorções Harmônicas em Ambiente Industrial. In: Estudos Integrados em Engenharia: Inovação e Desempenho. [S. l.: s. n.], 2026. cap. 14, p. 180-198. DOI: 10.47573/aya.5379.3.13.14.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO (SNIS). Diagnóstico dos serviços de água e esgotos: 2023. Brasília: Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, Ministério do Desenvolvimento Regional, 2023.

TSUTIYA, M. T. Abastecimento de água. 3. ed. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da USP, 2006.

VOLK, M. Pump characteristics and applications. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2013.

APÊNDICE A – CÓDIGOS-FONTE EM TEXTO ESTRUTURADO (ST)

Este apêndice apresenta o código-fonte completo dos programas e blocos de função em Texto Estruturado (ST), conforme a norma IEC 61131-3, desenvolvidos para a implementação da estratégia de *load shifting* e dos intertravamentos de segurança na plataforma HYDRIA®. O código foi escrito no ambiente Codesys® e organizado de forma modular, com cada bloco cumprindo uma função bem delimitada, em conformidade com os princípios de programação estruturada da norma e com as bibliotecas existentes do HYDRIA®. A seguir, descreve-se o propósito de cada programa e apresenta-se o respectivo código-fonte.

A.1 Estrutura de Dados *ST_LoadShiftConfig* (DUT)

A estrutura de dados *ST_LoadShiftConfig* é uma DUT (Data Unit Type) que centraliza todos os parâmetros de configuração da estratégia de *load shifting*. Os campos dessa estrutura são populados pelos tópicos MQTT publicados pelo Node-RED® durante a inicialização do sistema e após cada atualização de configuração. Essa centralização permite que toda a parametrização da estação esteja em um único ponto, facilitando a manutenção e a replicação para outras unidades.

```
TYPE ST_LoadShiftConfig :
STRUCT
   (* Capacidades dos reservatorios de distribuicao *)
   rCapTotalR1     : REAL := 30000.0;  (* Granja Carolina *)
   rCapTotalR2     : REAL := 12000.0;  (* Caucaia / VGP   *)
   (* Setpoints de nivel — Reservatorio R1 *)
   rSP_R1_Liga     : REAL := 22500.0;  (* 75% — religamento *)
   rSP_R1_Desliga  : REAL := 27000.0;  (* 90% — operacao    *)
   rSP_R1_MinSeg   : REAL := 21000.0;  (* 70% — emergencia  *)
   (* Setpoints de nivel — Reservatorio R2 *)
   rSP_R2_Liga     : REAL := 9000.0;   (* 75%               *)
   rSP_R2_Desliga  : REAL := 10800.0;  (* 90%               *)
   rSP_R2_MinSeg   : REAL := 8400.0;   (* 70%               *)
   (* Janela tarifaria de ponta *)
   iHoraPontaIni   : INT  := 18;       (* hora inicio ponta *)
   iHoraPontaFim   : INT  := 21;       (* hora fim ponta    *)
   iHoraPreEnchIni : INT  := 15;       (* inicio pre-ench.  *)
   (* Demanda contratada *)
   rDemContratadaP : REAL := 3300.0;   (* kW na ponta *)
   rDemContratadaFP: REAL := 3900.0;   (* kW fora ponta *)
```

```
    rDemAlarmePct   : REAL := 0.95;     (* alarme em 95% *)
    (* Flags de operacao *)
    bModoLS_Ativo   : BOOL := FALSE;    (* habilita load shift *)
    sVersaoConfig   : STRING(20);       (* timestamp config    *)
END_STRUCT
END_TYPE
```

A.2 Programa Principal *PRG_LoadShifting*

O programa *PRG_LoadShifting* é executado a cada ciclo de varredura do CLP e implementa o núcleo da lógica de deslocamento de carga. Sua função é determinar, com base na hora corrente e nos volumes dos reservatórios de distribuição, qual o *setpoint* ativo para cada reservatório e quais os comandos de bloqueio que devem ser aplicados a cada grupo de motores. O programa lê as variáveis de processo da estação e atualiza variáveis globais que são consumidas pelos blocos de função de comando dos motores.

```
PROGRAM PRG_LoadShifting
VAR
    cfg           : ST_LoadShiftConfig;
    rVolR1_Atual    : REAL;     (* leitura LIT-01 + LIT-02 do Granja *)
    rVolR2_Atual    : REAL;     (* leitura LIT do Caucaia / VGP     *)
    iHoraAtual      : INT;
    bDiaUtil        : BOOL;
    bEhPonta        : BOOL;
    bEhPreEnch      : BOOL;
    rSP_R1_Ativo    : REAL;
    rSP_R2_Ativo    : REAL;
    bBloqueioG1     : BOOL;     (* bloqueia motores 1-5 *)
    bBloqueioG2     : BOOL;     (* bloqueia motores 6-7 *)
END_VAR
 (* 1. Leitura das variaveis de processo *)
iHoraAtual := GetHora();        (* hora 0-23 do RTC do CLP *)
bDiaUtil   := EhDiaUtil();      (* TRUE para seg-sex sem feriado *)
 (* 2. Determinacao da faixa horaria ativa *)
bEhPonta   := bDiaUtil
            AND (iHoraAtual >= cfg.iHoraPontaIni)
            AND (iHoraAtual <  cfg.iHoraPontaFim);
bEhPreEnch := bDiaUtil
            AND (iHoraAtual >= cfg.iHoraPreEnchIni)
            AND (iHoraAtual <  cfg.iHoraPontaIni);
 (* 3. Selecao dos setpoints ativos por reservatorio *)
```

```
    IF bEhPonta THEN
       (* Durante a ponta: drenar ate nivel minimo de religamento *)
       rSP_R1_Ativo := cfg.rSP_R1_Liga;
       rSP_R2_Ativo := cfg.rSP_R2_Liga;
    ELSIF bEhPreEnch THEN
       (* Pre-enchimento: forca o nivel ao setpoint superior (90%) nas    *)    (* horas anteriores a ponta,
    garantindo reserva maxima ao iniciar  *)    (* a janela tarifaria (mesmo alvo da operacao normal, mas
    aplicado  *)    (* deliberadamente antes da ponta).                    *)
       rSP_R1_Ativo := cfg.rSP_R1_Desliga;
       rSP_R2_Ativo := cfg.rSP_R2_Desliga;
    ELSE
       (* Operacao normal: setpoint padrao com banda morta *)
       rSP_R1_Ativo := cfg.rSP_R1_Desliga;
       rSP_R2_Ativo := cfg.rSP_R2_Desliga;
    END_IF;
     (* 4. Comandos de bloqueio diferenciados por grupo *)
    IF cfg.bModoLS_Ativo AND bEhPonta THEN
       (* G1: bloqueia apenas se vol R1 acima do limite de religamento *)
       bBloqueioG1 := (rVolR1_Atual > cfg.rSP_R1_Liga);
       (* G2: bloqueia apenas se vol R2 acima do limite de religamento *)
       bBloqueioG2 := (rVolR2_Atual > cfg.rSP_R2_Liga);
    ELSE
       bBloqueioG1 := FALSE;
       bBloqueioG2 := FALSE;
    END_IF;
     (* 5. Sobreposicao por intertravamento de seguranca *)
    (* Se qualquer reservatorio cair abaixo do nivel de emergencia (70%),
      suspende o bloqueio imediatamente, mesmo no horario de ponta. *)
    IF (rVolR1_Atual <= cfg.rSP_R1_MinSeg) THEN
       bBloqueioG1 := FALSE;
    END_IF;
    IF (rVolR2_Atual <= cfg.rSP_R2_MinSeg) THEN
       bBloqueioG2 := FALSE;
    END_IF;
END_PROGRAM
```

A.3 Bloco de Função FB_IntertravamentoNivel

O bloco de função FB_IntertravamentoNivel implementa a lógica de proteção de nível dos reservatórios, garantindo que o nível mínimo de segurança nunca seja violado, independentemente da estratégia de controle ativa. Este bloco é instanciado uma vez para cada

reservatório monitorado, comparando o volume atual com os *setpoints* de operação, religamento e emergência, e emitindo os comandos correspondentes. Sua saída sobrepõe-se a qualquer outra lógica de controle, configurando a camada de segurança mais alta da arquitetura.

```
FUNCTION_BLOCK FB_IntertravamentoNivel
VAR_INPUT
   rVolAtual      : REAL;      (* volume medido m³ *)
   rSP_Liga       : REAL;      (* setpoint religamento *)
   rSP_Desliga    : REAL;      (* setpoint operacao *)
   rSP_MinSeg     : REAL;      (* nivel de seguranca *)
   bHabilitaLS    : BOOL;      (* permite load shift *)
END_VAR
VAR_OUTPUT
   bComandoLiga   : BOOL;      (* aciona bombas *)
   bComandoDesliga : BOOL;     (* desliga bombas *)
   bAlarmeNivelBaixo: BOOL;    (* alarme HMI *)
   bIntertravAtivo : BOOL;     (* ignora load shift *)
END_VAR
 (* Logica de histerese para evitar oscilacao *)
IF rVolAtual <= rSP_Liga THEN
   bComandoLiga := TRUE;
   bComandoDesliga := FALSE;
ELSIF rVolAtual >= rSP_Desliga THEN
   bComandoLiga := FALSE;
   bComandoDesliga := TRUE;
END_IF;
 (* Intertravamento de seguranca tem prioridade absoluta *)
IF rVolAtual <= rSP_MinSeg THEN
   bIntertravAtivo := TRUE;
   bAlarmeNivelBaixo := TRUE;
   bComandoLiga := TRUE;       (* forca acionamento *)
   bComandoDesliga := FALSE;
ELSE
   bIntertravAtivo := FALSE;
   bAlarmeNivelBaixo := FALSE;
END_IF;
END_FUNCTION_BLOCK
```

A.4 Bloco de Função FB_SelecaoMotor

O bloco de função FB_SelecaoMotor implementa o revezamento operacional dos motores de cada grupo, selecionando para acionamento aqueles com menor número acumulado de horas de operação. Essa lógica equaliza o desgaste mecânico dos equipamentos e prolonga sua vida útil, preservando uma prática operacional já adotada pela Sabesp. O bloco respeita os comandos de bloqueio recebidos do programa principal, garantindo que motores bloqueados pela estratégia de *load shifting* não sejam acionados mesmo se tiverem o menor horímetro.

```
FUNCTION_BLOCK FB_SelecaoMotor
VAR_INPUT
   arHorimetros    : ARRAY[1..7] OF REAL;  (* horas operacao acum. *)
   arDisponivel    : ARRAY[1..7] OF BOOL;  (* motor disponivel    *)
   bBloqueioG1     : BOOL;                 (* bloqueia M1-M5      *)
   bBloqueioG2     : BOOL;                 (* bloqueia M6-M7      *)
   iMotoresNecess  : INT;                  (* qtos motores ligar  *)
END_VAR
VAR_OUTPUT
   arAcionar       : ARRAY[1..7] OF BOOL;  (* motor a acionar     *)
END_VAR
VAR
   i, j            : INT;
   rMenorHorim     : REAL;
   iMotorEscolhido : INT;
   iAcionados      : INT;
   bElegivel       : BOOL;
END_VAR
(* Inicializacao das saidas *)
FOR i := 1 TO 7 DO
   arAcionar[i] := FALSE;
END_FOR;
iAcionados := 0;
(* Selecao iterativa: a cada passagem, escolhe o motor de menor
  horimetro que esteja disponivel, nao bloqueado e ainda nao
  acionado neste ciclo *)
WHILE iAcionados < iMotoresNecess DO
   rMenorHorim     := 1.0E10;
   iMotorEscolhido := 0;
   FOR i := 1 TO 7 DO
      (* Verifica elegibilidade do motor i *)
```

```
    bElegivel := arDisponivel[i] AND NOT arAcionar[i];
        IF (i <= 5) AND bBloqueioG1 THEN bElegivel := FALSE; END_IF;
        IF (i >= 6) AND bBloqueioG2 THEN bElegivel := FALSE; END_IF;
        IF bElegivel AND (arHorimetros[i] < rMenorHorim) THEN
           rMenorHorim := arHorimetros[i];
           iMotorEscolhido := i;
        END_IF;
     END_FOR;
  IF iMotorEscolhido > 0 THEN
        arAcionar[iMotorEscolhido] := TRUE;
        iAcionados := iAcionados + 1;
     ELSE
        EXIT;  (* nao ha mais motor elegivel *)
     END_IF;
  END_WHILE;
  END_FUNCTION_BLOCK
```

A.5 Bloco de Função FB_MonitorDemanda

O bloco de função FB_MonitorDemanda calcula a demanda elétrica integrada em janelas de 15 minutos, conforme a metodologia da ANEEL para apuração de demanda na fatura. Compara o valor integrado com os limites de demanda contratada (ponta e fora de ponta) e emite alarmes progressivos quando o consumo se aproxima do limite. Este bloco não atua diretamente sobre os motores, mas fornece sinalização ao operador e ao sistema supervisório, e pode acionar medidas adicionais de contingência caso a demanda real divirja da projetada.

```
  FUNCTION_BLOCK FB_MonitorDemanda
  VAR_INPUT
     rPotInstTotal   : REAL;      (* potencia ativa total (kW) *)
     bEhPonta        : BOOL;
     rDemContratadaP : REAL;
     rDemContratadaFP: REAL;
     rAlarmePct      : REAL;      (* fracao para alarmar *)
  END_VAR
  VAR_OUTPUT
     rDemandaInteg   : REAL;      (* demanda 15-min (kW) *)
     bAlarmeDemanda  : BOOL;
     bUltrapassagem  : BOOL;
  END_VAR
  VAR
     arAmostras      : ARRAY[1..900] OF REAL;  (* 1 amostra/s x 900s *)
```

```
    iIndice        : INT := 1;
    rSoma          : REAL;
    rLimite        : REAL;
    i              : INT;
    tmrAmostra     : TON;
END_VAR
 (* Amostragem a cada 1 segundo *)
tmrAmostra(IN := NOT tmrAmostra.Q, PT := T#1S);
IF tmrAmostra.Q THEN
    arAmostras[iIndice] := rPotInstTotal;
    iIndice := iIndice + 1;
    IF iIndice > 900 THEN
        iIndice := 1;  (* buffer circular *)
    END_IF;
END_IF;
 (* Calcula media movel deslizante de 15 minutos.                *) (* Aproximacao para fins de alarme
preventivo; a demanda faturada    *) (* pela ANEEL usa janelas fixas (nao deslizantes) de 15 minutos.     *)
rSoma := 0.0;
FOR i := 1 TO 900 DO
    rSoma := rSoma + arAmostras[i];
END_FOR;
rDemandaInteg := rSoma / 900.0;
 (* Define o limite ativo conforme posto tarifario *)
IF bEhPonta THEN
    rLimite := rDemContratadaP;
ELSE
    rLimite := rDemContratadaFP;
END_IF;
 (* Alarmes progressivos *)
bAlarmeDemanda := (rDemandaInteg >= rLimite * rAlarmePct);
bUltrapassagem := (rDemandaInteg >= rLimite);
 END_FUNCTION_BLOCK
```

A.6 Programa *PRG_MQTT_Subscriber*

O programa *PRG_MQTT_Subscriber* gerencia a recepção dos parâmetros de configuração publicados pelo Node-RED® via protocolo MQTT. Utiliza o bloco funcional cliente MQTT disponível na biblioteca padrão do Codesys® e popula a estrutura *ST_LoadShiftConfig* com os valores recebidos. A inscrição é configurada com QoS 1 (entrega garantida), e as mensagens de configuração são publicadas pelo Node-RED® com a *flag Retain*

ativa, de modo que o CLP recupere automaticamente os últimos parâmetros válidos ao reconectar, sem aguardar nova publicação do Node-RED®. Esse comportamento é fundamental para a robustez da solução em caso de falhas de comunicação.

```
PROGRAM PRG_MQTT_Subscriber
VAR
   fbMQTTClient    : MQTT_Client;
   fbSubscribe     : MQTT_Subscribe;
   cfg             : ST_LoadShiftConfig;
   sTopicoBase     : STRING(80) := 'sabesp/spsl/vgp/ls_config/';
   sTopicoRecebido : STRING(120);
   sPayloadJSON    : STRING(255);
   rValor          : REAL;
   bConectado      : BOOL;
END_VAR
(* Conexao com o broker MQTT *)
fbMQTTClient(
   xEnable       := TRUE,
   sBrokerAddress := '192.168.1.10',
   uiBrokerPort   := 1883,
   sClientID     := 'HYDRIA_VGP_CLP01',
   eQoS          := MQTT_QoS.AtLeastOnce,
   xConnected    => bConectado
);
 (* Inscricao nos topicos de configuracao *)
IF bConectado THEN
   fbSubscribe(
      xExecute := TRUE,
      sTopicFilter := CONCAT(sTopicoBase, '#'),  (* todos os subtopicos *)
      eQoS := MQTT_QoS.AtLeastOnce,
      sTopicReceived => sTopicoRecebido,
      sPayload       => sPayloadJSON
   );
   (* Parse do JSON recebido — campo "value" da mensagem *)
   rValor := ParseValorJSON(sPayloadJSON);
   (* Despacho por topico *)
   CASE GetSubTopico(sTopicoRecebido, sTopicoBase) OF
      'cap_r1_m3':        cfg.rCapTotalR1     := rValor;
      'cap_r2_m3':        cfg.rCapTotalR2     := rValor;
      'sp_r1_liga_m3':    cfg.rSP_R1_Liga     := rValor;
```

```
        'sp_r1_desliga_m3':  cfg.rSP_R1_Desliga  := rValor;
        'sp_r2_liga_m3':     cfg.rSP_R2_Liga     := rValor;
        'sp_r2_desliga_m3':  cfg.rSP_R2_Desliga  := rValor;
        'dem_contratada_p':  cfg.rDemContratadaP := rValor;
        'dem_contratada_fp': cfg.rDemContratadaFP:= rValor;
        'modo_ls_ativo':     cfg.bModoLS_Ativo   := (rValor > 0.5);
    END_CASE;
END_IF;
END_PROGRAM
```

A.7 Notas de Implementação

Os programas e blocos de função apresentados neste apêndice foram desenvolvidos no ambiente Codesys® e seguem rigorosamente a norma IEC 61131-3. A organização modular foi adotada de forma deliberada para permitir a reutilização dos blocos em diferentes instâncias e em outras estações do Sistema São Lourenço, sem alteração do código-fonte. O Programa Principal *PRG_LoadShifting* é executado a cada ciclo de varredura do CLP, tipicamente entre 50 ms e 100 ms, e seus comandos de bloqueio são lidos pelas demais lógicas de acionamento de motores existentes no HYDRIA®.

As funções utilitárias GetHora(), EhDiaUtil(), ParseValorJSON() e GetSubTopico(), referenciadas nos programas, são implementadas como funções auxiliares de biblioteca, responsáveis, respectivamente, pela leitura da hora corrente do relógio de tempo real (RTC) do CLP, pela verificação de dia útil, pela desserialização do campo de valor das mensagens JSON e pela extração do subtópico MQTT; não foram reproduzidas neste apêndice por brevidade.

A integração com o sistema supervisório é realizada por meio de variáveis globais expostas, as quais são monitoradas pela camada de SCADA do HYDRIA® e pelo painel de monitoramento desenvolvido em Node-RED®. Os parâmetros recebidos via MQTT são persistidos em memória retentiva do CLP, garantindo a continuidade de operação mesmo em caso de falha temporária da comunicação com o Node-RED®.

Para implantação em uma nova estação, o procedimento reduz-se ao seguinte:

(i) importar a biblioteca contendo a estrutura *ST_LoadShiftConfig* e os blocos de função descritos neste apêndice;

(ii) ajustar o arquivo de configuração JSON do Node-RED® com os parâmetros específicos da estação (capacidades dos reservatórios, número de motores por grupo, demanda contratada, modalidade tarifária);

(iii) executar o pipeline de análise no Node-RED® para gerar os *setpoints* otimizados;

(iv) verificar a recepção dos parâmetros no CLP por meio do visualizador de variáveis do HYDRIA®;

(v) habilitar a estratégia ativando o *flag* bModoLS_Ativo na configuração. Nenhuma alteração de código é necessária. Observa-se na tabela 8 um resumo dos programas criados no ambiente Codesys®.

A Tabela 8 resume os blocos de função e programas desenvolvidos no apêndice, com sua respectiva função na arquitetura da solução.

Tabela 8 – Resumo dos blocos de função e programas desenvolvidos

Bloco / Programa	**Tipo IEC 61131-3**	**Função**
ST_LoadShiftConfig	DUT (Struct)	Centraliza todos os parâmetros de configuração da estratégia, incluindo capacidades e *setpoints* independentes dos reservatórios R1 e R2
PRG_LoadShifting	PROGRAM	Programa principal: seleciona *setpoints* por faixa horária, emite bloqueios independentes por grupo e aplica intertravamento de segurança
FB_IntertravamentoNivel	FUNCTION_BLOCK	Proteção de nível por histerese com prioridade absoluta sobre a estratégia de *load shifting*; instanciado uma vez por reservatório
FB_SelecaoMotor	FUNCTION_BLOCK	Revezamento dos motores por horímetro, respeitando bloqueios independentes dos grupos G1 e G2
FB_MonitorDemanda	FUNCTION_BLOCK	Cálculo da demanda integrada em janelas de 15 minutos com alarmes progressivos de ultrapassagem
PRG_MQTT_Subscriber	PROGRAM	Recepção e despacho dos parâmetros de configuração via MQTT para a estrutura ST_LoadShiftConfig

Fonte: Elaborado pelo autor.

ANEXO A – CAPTURAS DE TELA DA IMPLEMENTAÇÃO E SIMULAÇÃO

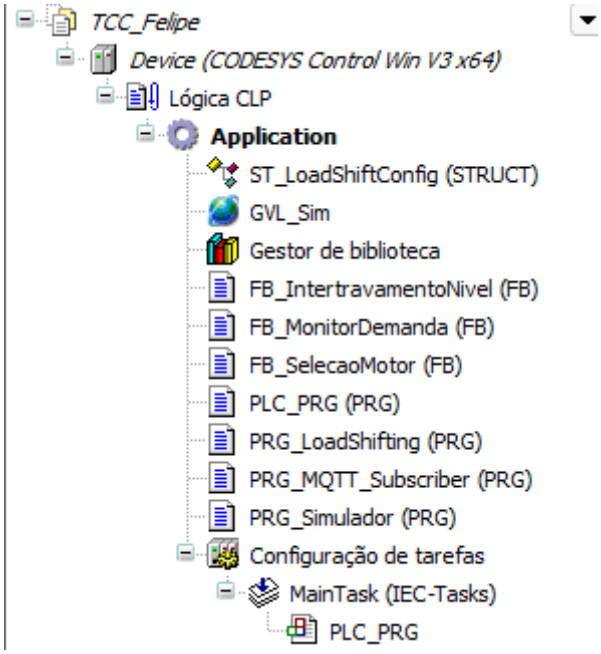
Este anexo reúne as capturas de tela do projeto implementado no ambiente Codesys® Control Win V3 x64 durante a execução em modo *online*, com os blocos descritos no Apêndice A em operação simulada. As figuras estão organizadas em sete seções temáticas: a estrutura do projeto (A.1), a estrutura de dados de configuração (A.2), os três cenários operacionais críticos, a saber, operação normal fora da ponta (A.3), entrada na janela tarifária de ponta com bloqueio ativo (A.4) e intertravamento de emergência por nível crítico (A.5); o bloco de monitoramento

de demanda em execução (A.6) e o algoritmo de revezamento operacional por horímetro (A.7). Em conjunto, as capturas comprovam o funcionamento integrado das camadas de configuração via MQTT, de controle em tempo real e de segurança descritas no Capítulo 3 e formalizadas no Apêndice A.

A.1 Estrutura do Projeto no Codesys®

A árvore do projeto no Codesys® é apresentada na Figura 20.

Figura 20 – Estrutura do projeto Codesys® — árvore Dispositivos com a organização modular implementada



Fonte: *Elaborado pelo autor (2026)*

A árvore do projeto evidencia a separação de responsabilidades descrita no Apêndice A. A estrutura de dados *ST_LoadShiftConfig* (DUT) centraliza os parâmetros de configuração; os blocos funcionais FB_IntertravamentoNivel, FB_MonitorDemanda e FB_SelecaoMotor encapsulam, respectivamente, a camada de segurança de nível, o cálculo de demanda integrada e o revezamento operacional por horímetro. O programa principal *PRG_LoadShifting*, executado ciclicamente pela *MainTask*, integra essas camadas. O programa auxiliar PRG_Simulador foi incluído exclusivamente para validação em ambiente virtual (Codesys® Control Win V3 x64).

A.2 Estrutura de Dados *ST_LoadShiftConfig*

A estrutura de dados *ST_LoadShiftConfig* é apresentada na Figura 21.

Figura 21 – Estrutura de dados *ST_LoadShiftConfig* com valores de inicialização carregados

```
TYPE ST_LoadShiftConfig :
STRUCT
    (* Capacidades dos reservatorios de distribuicao *)
    rCapTotalR1      : REAL := 30000.0;   (* Granja Carolina *)
    rCapTotalR2      : REAL := 12000.0;   (* Caucaia / VGP *)

    (* Setpoints de nivel - Reservatorio R1 *)
    rSP_R1_Liga      : REAL := 22500.0;   (* 75% - religamento *)
    rSP_R1_Desliga   : REAL := 27000.0;   (* 90% - operacao *)
    rSP_R1_MinSeg    : REAL := 21000.0;   (* 70% - emergencia *)

    (* Setpoints de nivel - Reservatorio R2 *)
    rSP_R2_Liga      : REAL := 9000.0;    (* 75% *)
    rSP_R2_Desliga   : REAL := 10800.0;   (* 90% *)
    rSP_R2_MinSeg    : REAL := 8400.0;    (* 70% *)

    (* Janela tarifaria de ponta *)
    iHoraPontaIni    : INT := 18;         (* hora inicio ponta *)
    iHoraPontaFim    : INT := 21;         (* hora fim ponta *)
    iHoraPreEnchIni  : INT := 15;         (* inicio pre-enchimento *)

    (* Demanda contratada *)
    rDemContratadaP  : REAL := 3300.0;    (* kW na ponta *)
    rDemContratadaFP : REAL := 3900.0;    (* kW fora ponta *)
    rDemAlarmePct    : REAL := 0.95;      (* alarme em 95% *)

    (* Flags de operacao *)
    bModoLS_Ativo    : BOOL := FALSE;     (* habilita load shift *)
    sVersaoConfig    : STRING(20);        (* timestamp config *)
END_STRUCT
END_TYPE
```

Fonte: *Elaborado pelo autor (2026)*

A DUT *ST_LoadShiftConfig* é apresentada com os valores de inicialização atribuídos localmente para fins de teste; em produção, esses valores são sobrescritos pelas mensagens MQTT publicadas pelo Node-RED®, conforme a arquitetura descrita na Seção 3.4.1. Observam-se: as capacidades totais dos reservatórios de distribuição (R1 = 30.000 m³, R2 = 12.000 m³); os três *setpoints* por reservatório, calibrados em 75% (rSP_Liga, religamento), 90% (rSP_Desliga, operação normal) e 70% (rSP_MinSeg, emergência); a janela tarifária de ponta das 18 às 21 h, com pré-enchimento iniciando às 15 h; os limites de demanda contratada (3.300 kW na ponta, 3.900 kW fora da ponta) com alarme a 95% da contratação. A *flag* bModoLS_Ativo permite habilitar ou desabilitar globalmente o *load shifting* sem alterar o código-fonte.

A.3 Cenário 1: Operação Normal Fora do Horário de Ponta

Neste cenário inicial, o relógio simulado é configurado em um horário típico do meio-dia, fora da janela tarifária de ponta, com o objetivo de estabelecer o estado-base de comparação. Espera-se ausência total de bloqueios e operação plena dos motores.

O estado da GVL_Sim no instante capturado é apresentado na Figura 22.

Figura 22 – GVL_Sim em modo *online* — relógio simulado às 12h20, dia útil (cenário fora da ponta)

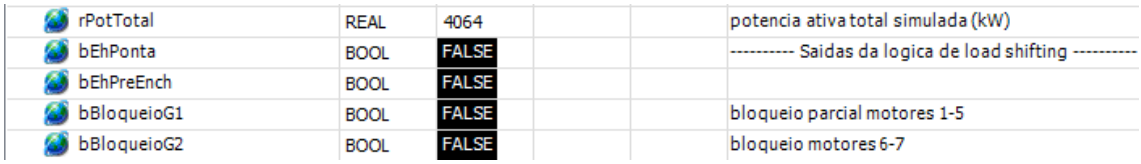
Expressão:	Tipo	Valor	Valor p...	Endere...
⊞ stConfig	ST_Loa...			
rMinutosPorSegundo	REAL	1		
iHora	INT	12		
iMinuto	INT	20		
bDiaUtil	BOOL	TRUE		

Fonte: *Elaborado pelo autor (2026)*

A variável global iHora = 12 e iMinuto = 20 indicam que o relógio simulado está fora da janela tarifária de ponta. O acelerador rMinutosPorSegundo = 1,0 mantém a simulação em tempo proporcional (1 segundo real ≡ 1 minuto simulado) e bDiaUtil = TRUE garante que a lógica de discriminação horária esteja ativa (em fins de semana e feriados, a estratégia de *load shifting* é integralmente desativada pela função EhDiaUtil()).

As saídas correspondentes do *PRG_LoadShifting* são apresentadas na Figura 23.

Figura 23 – Saídas do PRG_LoadShifting fora da ponta — operação normal, sem bloqueios



rPotTotal	REAL	4064			potencia ativa total simulada (kW)
bEhPonta	BOOL	FALSE			---------- Saidas da logica de load shifting ----------
bEhPreEnch	BOOL	FALSE			
bBloqueioG1	BOOL	FALSE			bloqueio parcial motores 1-5
bBloqueioG2	BOOL	FALSE			bloqueio motores 6-7

Fonte: *Elaborado pelo autor (2026)*

No instante capturado, a potência total demandada pelo sistema é rPotTotal = 4.064 kW, valor típico de operação plena. As *flags* bEhPonta = FALSE e bEhPreEnch = FALSE confirmam que nem a ponta nem a janela de pré-enchimento estão ativas. Consequentemente, ambos os comandos de bloqueio (bBloqueioG1 e bBloqueioG2) estão desativados, e os motores operam livremente conforme as lógicas existentes do HYDRIA®. Este é o estado-base que foi comparado aos cenários de ponta apresentados a seguir.

A.4 Cenário 2: Entrada na Janela Tarifária de Ponta com Bloqueio Ativo

O relógio simulado é avançado até o início da janela de ponta (18 h). Espera-se que a *flag* bEhPonta passe a TRUE e que os comandos de bloqueio sejam ativados em ambos os grupos, reduzindo significativamente a potência elétrica demandada pelo sistema.

O estado da GVL_Sim no início do horário de ponta é apresentado na Figura 24.

Figura 24 – GVL_Sim no início da ponta — 18h04, reservatórios próximos do *setpoint* superior

Fonte: *Elaborado pelo autor (2026)*

Decorridos alguns minutos da virada para o horário de ponta (iHora = 18, iMinuto = 4), os reservatórios encontram-se em níveis próximos ao *setpoint* de operação normal (rSP_Desliga = 90%): rVolR1 = 25.124,8184 m³ e rVolR2 = 10.010,0732 m³. Esse comportamento confirma a eficácia do pré-enchimento iniciado às 15 h, que garante a reserva hidráulica máxima imediatamente antes do início da ponta, premissa fundamental para sustentar a redução do bombeamento ao longo das três horas seguintes.

As saídas do PRG_LoadShifting durante a ponta são apresentadas na Figura 25.

Figura 25 – Saídas do PRG_LoadShifting durante a ponta — bloqueios ativos em ambos os grupos

Fonte: *Elaborado pelo autor (2026)*

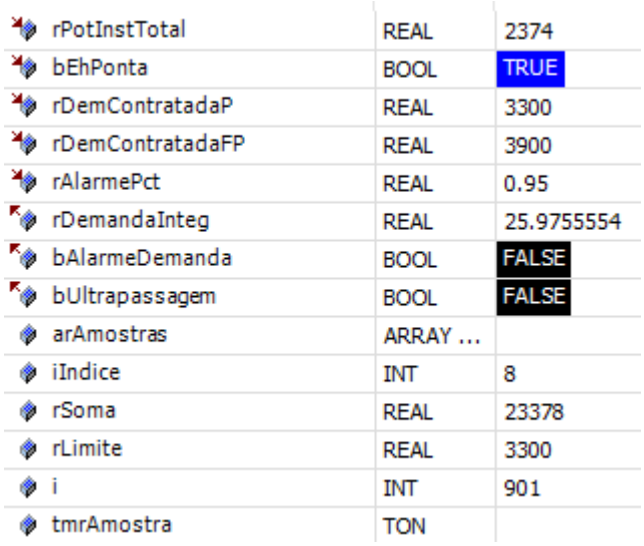
A potência total cai de 4.064 kW (fora da ponta, Figura 26) para rPotTotal = 2.374 kW, redução de aproximadamente 41,6% da carga elétrica do sistema. A *flag* bEhPonta = TRUE confirma a entrada na janela tarifária, e ambos os comandos de bloqueio (bBloqueioG1 e bBloqueioG2) encontram-se ativos. Os *setpoints* ativos rSP_R1_Ativo = 22.500 m³ e

rSP_R2_Ativo = 9.000 m³ correspondem ao nível de religamento (75%), ou seja, o sistema só volta a bombear se algum dos reservatórios cair abaixo desse limite. Esta é a essência operacional da estratégia de *load shifting* descrita na Seção 3.4.2.

A.5 Bloco FB_MonitorDemanda em Operação

O bloco FB_MonitorDemanda em execução é apresentado na Figura 26, com sua janela móvel de 15 minutos.

Figura 26 – Bloco FB_MonitorDemanda em execução — média móvel de 15 minutos da potência ativa



Fonte: *Elaborado pelo autor (2026)*

O bloco FB_MonitorDemanda implementa uma janela móvel de 900 amostras (1 amostra por segundo durante 15 minutos), calculando continuamente a demanda integrada equivalente ao indicador faturado pela ANEEL. No instante capturado, a potência instantânea é rPotInstTotal = 2.374 kW (coerente com a Figura 28) e a demanda integrada acumulada rDemandaInteg = 25.975554 kW reflete o regime transitório de partida: o iIndice = 8 indica que apenas 8 das 900 posições da janela estão preenchidas, e o somatório rSoma = 23378 está sendo dividido pela capacidade plena do vetor (900). Em regime permanente (após 15 minutos de execução), o valor de rDemandaInteg reflete fielmente a média móvel de 15 minutos. As *flags* bAlarmeDemanda e bUltrapassagem permanecem em FALSE, indicando operação dentro da contratação. O timer tmrAmostra (T#1s) garante a periodicidade da amostragem.

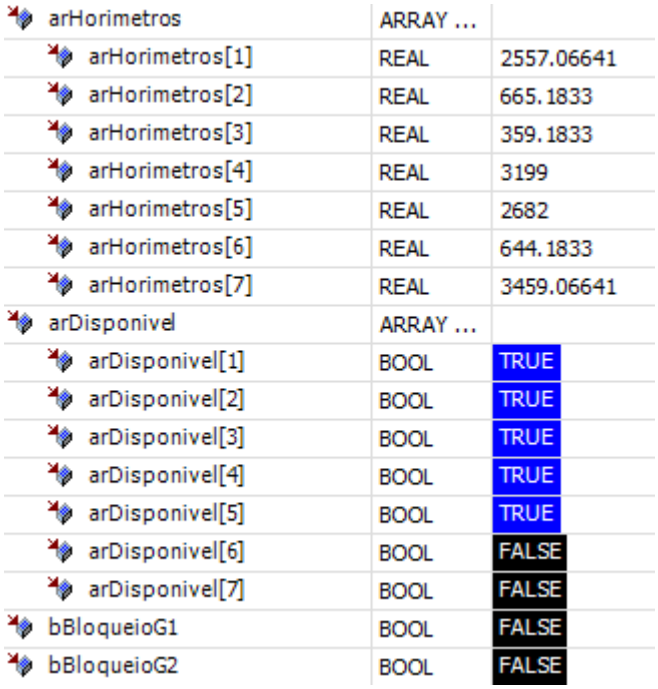
A.6 Bloco FB_SelecaoMotor: Revezamento Operacional por Horímetro

O bloco FB_SelecaoMotor é instanciado duas vezes no programa principal (uma para cada grupo de motores) e demonstra a reutilização do mesmo código com configurações

distintas (máscaras de disponibilidade arDispG1 e arDispG2). As capturas a seguir ilustram o algoritmo selecionando os motores com menor horímetro acumulado, equalizando o desgaste mecânico ao longo do tempo.

Os horímetros acumulados dos sete motores na instância fbSelG1 do bloco FB_SelecaoMotor são apresentados na Figura 27.

Figura 27 – Bloco FB_SelecaoMotor (instância Grupo 1) — horímetros acumulados dos sete motores



Fonte: *Elaborado pelo autor (2026)*

A instância fbSelG1 do bloco FB_SelecaoMotor é responsável pelo revezamento operacional entre os cinco motores do Grupo 1 (MTR01 a MTR05). O vetor arHorimetros armazena as horas de operação acumuladas de cada motor: MTR01 = 2.557 h, MTR02 = 665 h, MTR03 = 359 h, MTR04 = 3.199 h, MTR05 = 2.682 h, MTR06 = 644 h e MTR07 = 3.459 h (os motores 6 e 7 pertencem ao Grupo 2 e são ignorados nesta instância pela máscara arDispG1). A *flag* bBloqueioG1 = FALSE indica que esta captura foi feita fora do horário de ponta, com os motores do Grupo 1 elegíveis para acionamento.

A saída arAcionar do Grupo 1 é apresentada na Figura 28.

Figura 28 – Saída arAcionar do Grupo 1 — motores MTR02 e MTR03 selecionados pelo critério de menor horímetro

iMotoresNecess	INT	2
arAcionar	ARRAY ...	
arAcionar[1]	BOOL	FALSE
arAcionar[2]	BOOL	TRUE
arAcionar[3]	BOOL	TRUE
arAcionar[4]	BOOL	FALSE
arAcionar[5]	BOOL	FALSE
arAcionar[6]	BOOL	FALSE
arAcionar[7]	BOOL	FALSE

Fonte: *Elaborado pelo autor (2026)*

Com iMotoresNecess = 2, o bloco seleciona os dois motores do Grupo 1 com menor horímetro acumulado, garantindo o revezamento e a equalização do desgaste mecânico. O algoritmo identifica corretamente MTR03 (359 h, menor horímetro do grupo) e MTR02 (665 h, segundo menor): arAcionar[2] = TRUE e arAcionar[3] = TRUE. Os demais motores do grupo permanecem em FALSE.

A.7 Cenário 3: Intertravamento de Emergência por Nível Crítico

Este cenário, capturado aproximadamente 34 minutos após o início da ponta, simula a condição mais crítica do ponto de vista da segurança operacional: o esgotamento prematuro de um dos reservatórios durante a janela de bloqueio. Demonstra-se a atuação do bloco FB_IntertravamentoNivel, cuja saída sobrepõe-se ao comando de bloqueio do *load shifting* e força o religamento dos motores, preservando a integridade do abastecimento.

O cenário de emergência, em que o nível de R1 cai abaixo do limite de segurança, é apresentado na Figura 29.

Figura 29 – Cenário de emergência — R1 abaixo do nível de segurança (rSP_R1_MinSeg = 21.000 m³)

stConfig	ST_LoadShiftConfig	
rMinutosPorSegundo	REAL	1
iHora	INT	20
iMinuto	INT	19
bDiaUtil	BOOL	TRUE
rMinAcum	REAL	0
rVolR1	REAL	20150
rVolR2	REAL	9970.073

Fonte: *Elaborado pelo autor (2026)*

Às 20h19, período em que o sistema ainda se encontra dentro da janela de ponta (condição confirmada por bEhPonta = TRUE), o reservatório R1 registra o volume rVolR1 = 20.150 m³. Este valor permanece inferior ao limite de segurança estabelecido (70% da capacidade, rSP_R1_MinSeg = 21.000 m³). A variável bBloqueioG1 = FALSE evidencia que o intertravamento de nível continua a sobrepor o comando de bloqueio do algoritmo de *load shifting*, forçando o acionamento dos motores do Grupo 1 mesmo durante a vigência do horário tarifário mais oneroso. Em contrapartida, o Reservatório R2, aferindo um volume de 9.970,07 m³ (portanto, acima de seu limite de segurança de 8.400 m³), mantém a variável bBloqueioG2 = TRUE. Este cenário reitera a premissa de que a camada de segurança do sistema atua de maneira independente e hierarquicamente superior à estratégia de eficiência energética, um requisito inegociável para a viabilidade e confiabilidade operacional da solução. As sinalizações de alarme e intertravamento ativadas pelo bloco FB_IntertravamentoNivel são apresentadas na Figura 30.

Figura 30 – Sinalizações de alarme e intertravamento do bloco FB_IntertravamentoNivel

bEhPonta	BOOL	TRUE
bEhPreEnch	BOOL	FALSE
bBloqueioG1	BOOL	FALSE
bBloqueioG2	BOOL	TRUE
rSP_R1_Ativo	REAL	22500
rSP_R2_Ativo	REAL	9000
rVazaoBombG1	REAL	18036
rVazaoBombG2	REAL	244.470016
rDemandaR1	REAL	15036
rDemandaR2	REAL	843
bAlarmeNivelR1	BOOL	TRUE
bAlarmeNivelR2	BOOL	FALSE
bIntertravR1	BOOL	TRUE
bIntertravR2	BOOL	FALSE

Fonte: *Elaborado pelo autor (2026)*

As variáveis bAlarmeNivelR1 = TRUE e bIntertravR1 = TRUE ratificam a atuação contínua do bloco FB_IntertravamentoNivel em resposta ao estado crítico do Reservatório R1. Simultaneamente, bAlarmeNivelR2 e bIntertravR2 mantêm-se em FALSE, em estrita conformidade com o volume seguro do reservatório R2. A integração destas sinalizações com a interface do sistema supervisório HYDRIA® e com o *dashboard* desenvolvido em Node-RED® garante ao operador a rastreabilidade integral das ações de controle. Dessa forma, proporciona-se

visibilidade imediata da causa do acionamento dos conjuntos motobombas durante o horário de ponta, subsidiando a investigação de eventuais anomalias na rede de distribuição (como vazamentos ou picos de demanda imprevistos) que possam ter ocasionado o esvaziamento excessivo do reservatório.

O conjunto de capturas apresentado neste anexo evidencia que a arquitetura de *software* proposta no Capítulo 3 e formalizada no Apêndice A é funcional e implementável na plataforma HYDRIA®/Codesys® sem necessidade de *hardware* específico.