

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ENGENHARIA DE ENERGIA

**EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO:
ANÁLISE DE ALTERNATIVAS PARA REDUÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA**

por

Andressa Jaskulski

Monografia apresentada à Comissão de Graduação do Curso de Engenharia de Energia da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Bacharel em Engenharia de Energia.

Porto Alegre, março de 2022.



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
ENGENHARIA DE ENERGIA

**EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO:
ANÁLISE DE ALTERNATIVAS PARA REDUÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA**

por

Andressa Jaskulski

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
BACHAREL EM ENGENHARIA DE ENERGIA.
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA

Prof. Flávio Antônio Becon Lemos
Coordenador do Curso de Engenharia de Energia

Orientador: Prof. Dr. Maicon Jaderson Silveira Ramos

Coorientadora: Profa. Dra. Mariana Resener

Banca examinadora:

Prof^a. Dr^a. Bibiana M. P. Ferraz – DELAE / UFRGS

Eng. MSc. Flávio Eduardo Soares e Silva – CORSAN

Prof. Dr. Maicon J. S. Ramos – DELET / UFRGS

JASKULSKI, A. **Eficiência Energética em Estação de Tratamento de Esgoto: Análise de alternativas Para Redução do Consumo de Energia Elétrica.** 2022. 25. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia de Energia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

RESUMO

O setor de saneamento básico no Brasil é responsável por uma grande demanda de energia elétrica. Dentro de uma estação de tratamento de esgoto (ETE), cerca de 15% a 40% do gasto financeiro total é referente ao gasto com energia elétrica. Em uma ETE é possível reduzir o gasto de energia com atualização dos equipamentos, controle da operação, melhoramento do processo de transferência de oxigênio e adição controlada de oxigênio ao processo por meio de sopradores com vazão controlada. Este trabalho apresenta alternativas para redução do gasto em energia elétrica por meio de atualizações de processos e melhor aproveitamento dos recursos na operação da ETE Guarani, localizada no município de Capão da Canoa, no Rio Grande do Sul. A partir dos processos e dados coletados, foi modelada a operação dos três conjuntos de sopradores responsáveis pela operação dos dois filtros aerados e quatro alternativas foram analisadas. Considerando a viabilidade de implementação das alternativas, uma delas foi aplicada em campo, sendo comparada com o cenário antes da ação de eficiência energética. A alternativa implementada faz uso da configuração de *multispeed* nos inversores de frequência e trouxe quatro faixas de operação possíveis, tornando possível que a potência entregue aos sopradores seja proporcional à vazão de entrada da ETE. Pelo método de Medição e Verificação (M&V) foi caracterizado o processo e obtido uma redução de 9,16% no consumo de energia. Essa redução foi possível ser feita sem a necessidade de aquisição de novos equipamentos, apenas com a mudança da operação nos sopradores.

PALAVRAS-CHAVE: Eficiência Energética, Estação de Tratamento de Esgoto, Saneamento.

JASKULSKI, A. **Energy Efficiency in a Wastewater Treatment Plant: Analysis of Alternatives to Reduce Electricity Consumption**. 2022. 25. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia de Energia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

ABSTRACT

The primary sanitation sector in Brazil is responsible for a great demand for electricity. Within a wastewater treatment plant (WWTP), about 15% to 40% of the total financial expenditure is related to electricity. In a WWTP, it is possible to reduce energy expenditure by updating equipment, controlling the operation, improving the oxygen transfer process, and controlling the addition of oxygen to the process through blowers with controlled flow. This work presents alternatives to reduce energy costs through process updates, and better use of resources in the operation of the WWTP Guarani, located in the municipality of Capão da Canoa, in Rio Grande do Sul. From the processes and data collected, the operation of the three sets of blowers responsible for the operation of the two aerated filters was modeled, and four alternatives were analyzed. Considering the feasibility of implementing the alternatives, one of them was applied in the field, being compared with the scenario before the energy efficiency action. The alternative implemented uses the multispeed configuration in the frequency inverters and brought four possible operating ranges, making it possible for the power delivered to the blowers to be proportional to the WWTP inlet flow. Using the Measurement and Verification (M&V) method, the process was characterized, and a 9,16% reduction in energy consumption was obtained. This reduction was possible without the need to purchase new equipment, just by changing the operation of the blowers.

KEYWORDS: Energy Efficiency, Wastewater Treatment Plant, Sanitation.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	2
2.1	Processos de uma estação de tratamento de esgoto	2
2.2	Inversores de frequência no acionamento de aeradores	4
2.3	Sistemas de aeração	4
2.4	Metodologia de M&V	5
2.5	Resolução CONAMA	6
3	METODOLOGIA	6
3.1	Caracterização da estação de tratamento de esgoto avaliada	7
3.2	Proposição de alternativas	10
3.2.1	Alternativa 1	10
3.2.2	Alternativa 2	11
3.2.3	Alternativa 3	12
3.2.4	Alternativa 4	12
3.3	Acionamento dos inversores com relé temporizador	13
3.4	Metodologia M&V para eficiência energética	15
4	ANÁLISE DOS RESULTADOS	16
4.1	Cenário 1	16
4.2	Cenário 2	17
4.3	Comparação entre os dois cenários	17
5	CONCLUSÃO	19

1 INTRODUÇÃO

Atualmente no Brasil os índices de abastecimento de água e esgotamento sanitário são de países subdesenvolvidos. Cerca de 92,9% da população brasileira tem acesso à água e 61,9% ao sistema de esgotamento sanitário (SNIS, 2019). Segundo esse mesmo diagnóstico, esses índices variam bastante de acordo com a região do Brasil e dos centros urbanos. No caso do Sudeste, o índice de coleta de esgoto chega a ser de 83,7% nas zonas urbanas, enquanto o índice total da coleta de esgoto é de 79,5%, mostrando o alto índice de coleta fora das zonas mais povoadas do Sudeste. O total de coleta de esgoto para a região Sul é de 46,3%, ficando abaixo da média brasileira.

No setor de tratamento de esgoto, de 15% a 40% dos custos operacionais são gastos com energia elétrica, representando o segundo maior gasto da estação (METFALF et al, 2016). Segundo SNIS (2019), em alguns casos a despesa com energia elétrica é a segunda maior, ficando atrás apenas da folha de pagamento. Ainda segundo o SNIS (2019), os gastos em energia elétrica no setor de saneamento atingiram R\$ 7,12 bilhões, totalizando um consumo de 13,26 TWh em todo o Brasil, sendo dividido em 11,84 TWh com abastecimento de água e 1,42 TWh com esgotamento sanitário. O consumo de energia no sistema de esgotamento sanitário (SES) ainda é muito abaixo quando comparado ao consumo do sistema de abastecimento de água (SAA), representando apenas 10,71%, corroborado pelo índice de população atendida pelo abastecimento água que é muito maior do que o esgotamento sanitário. Esse panorama tende a mudar com as metas de universalização do esgoto. Os gastos com energia elétrica cresceram 15% em relação ao ano de 2018 frente um aumento de consumo de energia elétrica de apenas 2,7% e 1,3% para água e esgoto, respectivamente (SNIS, 2019). Esse acréscimo de tarifas evidencia a necessidade das empresas de reduzir o consumo de energia elétrica nos sistemas de saneamento.

Nas estações de tratamento de esgoto (ETEs), o consumo de energia é muito variável e depende do tipo de tratamento empregado. Segundo a Agência Nacional de Águas - ANA (2017), os dois tipos mais utilizados de ETEs são Lagoa Anaeróbia + Lagoa Facultativa e Reator Anaeróbio com 77% e 68% de eficiência no tratamento de esgoto, respectivamente. Em todos os processos há potencial para redução de gastos com energia elétrica, seja no processo em si da estação ou nos sistemas de esgotamento sanitário. Segundo o Departamento de Energia dos Estados Unidos, do inglês *Department of Energy* (DOE, 2017), o maior consumo de energia do processo de tratamento de esgoto está alocado nas fases primária e secundária do processo, em que há estações de bombeamento na fase primária e tanques de aeração com sopradores na fase secundária. Juntos, esses dois processos são responsáveis por dois terços a três quartos do consumo de energia de uma ETE.

Segundo Metcalf et al. (2016), há quatro formas de reduzir o consumo de energia associada ao sistema de aeração dos processos de lodos ativados: (i) realizar o controle da taxa de aeração de forma a coincidir com a demanda real e oxigênio; (ii) utilizar sopradores eficientes e dimensionados adequadamente; (iii) utilizar difusores com maior eficiência de transferência de oxigênio para o processo e (iv) controle de carga orgânica alimentada no reator biológico.

Algumas ações realizadas pela SABESP (2009) em busca de eficiência energética reduziram os gastos e melhoraram os índices de aproveitamento. As ações foram realizadas nas ETEs ABC e Parque Mundo Novo, no estado de São Paulo. As ações tomadas nas estações de tratamento foram a revisão/substituição dos sopradores, limpeza do material sedimentado nos tanques e revisão nos sistemas de distribuição de ar em busca de vazamentos. Além disso, foram implantados sistemas automáticos de controle de oxigênio dissolvido (OD) no efluente. Esse sistema impede que os sopradores insiram uma quantidade de ar exagerada no tanque. Com essas ações os índices de consumo de energia por metro cúbico de esgoto tratado da ETE Parque Mundo Novo foram reduzidos de 0,324 kWh/m³ para 0,290 kWh/m³, a ETE ABC foi de 0,601 kWh/m³ para 0,380 kWh/m³.

Alterações no modo de operação da ETE também podem trazer redução nos gastos com energia elétrica. No caso da ETE Icaraí, no estado do Rio de Janeiro, um tanque inutilizado foi usado para armazenar o esgoto durante o período de horário de ponta, em que a tarifa é mais cara. Essa ação trouxe uma redução de 27% na fatura mensal de energia elétrica da estação (JORDÃO, 2008).

Diante de um cenário onde o preço da energia tem subido ano após ano, concatenado com a necessidade imediata de aumento dos índices de saneamento básico brasileiro, é fundamental buscar ações que atenuem o crescimento dos custos com energia elétrica em ETAs e ETEs. Assim sendo, o objetivo geral desse trabalho é avaliar a eficiência energética de uma estação de tratamento de esgoto (ETE), a fim de propor uma ação capaz de melhorar os processos e propor a redução do gasto com energia elétrica. Para tanto, dados reais de uma ETE são considerados no estudo de caso, a partir dos quais são propostas ações de eficiência energética e estimativas de redução do consumo de energia elétrica.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Processos de uma estação de tratamento de esgoto

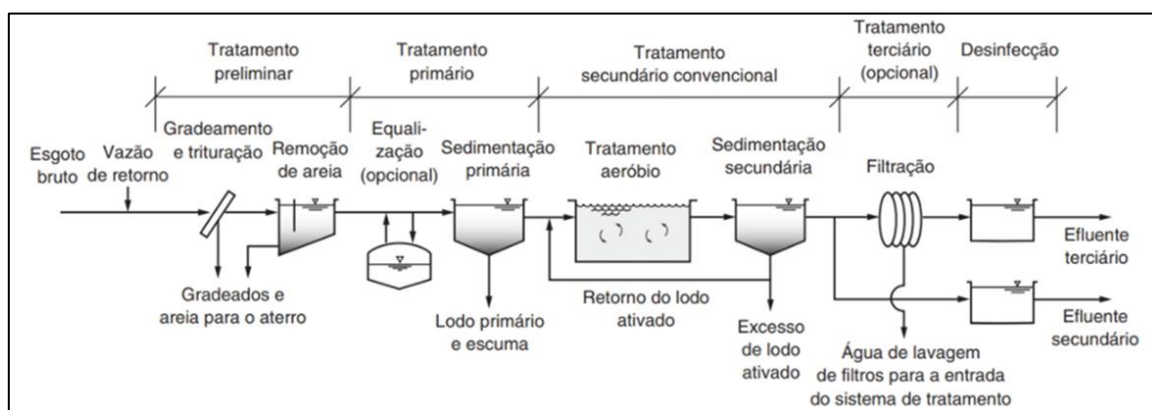
O tratamento do esgoto, nas cidades, é feito por ETEs. Normalmente o esgoto é coletado da cidade por uma rede coletora e bombeado até a ETE. Segundo Von Sperling (1996), as estações possuem pelo menos 3 etapas: tratamento preliminar, tratamento primário, tratamento secundário e, algumas vezes, tratamento terciário.

O tratamento preliminar é responsável pela retirada dos sólidos grosseiros através do gradeamento, e retirada da areia por um desarenador (ou removedor de areia). Essa etapa é necessária para proteção equipamentos. O tratamento primário é destinado à remoção de sólidos em suspensão sedimentáveis. Esse processo é feito por meio de um decantador primário em que o líquido passa em uma velocidade baixa permitindo que os sólidos sedimentem gradualmente até o fundo, formando lodo (VON SPERLING, 1996).

O tratamento secundário tem como principal função remover a matéria orgânica. Esse processo é concebido de forma a acelerar o processo que ocorreria naturalmente, para isso é usada uma etapa biológica. A base desse processo é que o material orgânico do esgoto sirva de alimento para os microrganismos fazendo com que a matéria orgânica seja convertida em gás carbônico, água e material celular. Essa decomposição biológica da matéria orgânica requer a presença e oxigênio como componente fundamental dos processos aeróbios. Há também o tratamento por processos anaeróbios em que não requer oxigênio para o tratamento. Por último o tratamento terciário objetiva a remoção de nutrientes, patogênicos, compostos não biodegradáveis, metais pesados, entre outros (VON SPERLING, 1996).

Para Metcalf *et al.* (2016), tem-se quatro processos básicos no tratamento biológico convencional, os quais são ilustrados na Figura 1. A partir da Figura 1, pode-se observar que as partículas sólidas e a areia são retiradas no tratamento preliminar. O lodo primário é produzido na sedimentação primária e o lodo secundário é produzido no tratamento aeróbio secundário, em que há excesso de lodo ativado.

Figura 1. Tratamento biológico convencional.



Fonte: METCALF *et al.*, 2016.

Segundo ANA (2017), os principais processos biológicos da etapa secundária para o tratamento de esgoto são: lagoas de estabilização, sistemas de lodo ativado e variantes, sistemas anaeróbios e sistemas aeróbios com leito fixo. Dentre esses processos, será apresentado o sistema de lodo ativado e variantes. Os sistemas de lodo ativado se dividem em: lodo ativado convencional, em bateladas ou com aeração prolongada. Esse sistema é mais utilizado em grandes cidades por serem mais compactos e produzem efluente de boa qualidade. É um sistema mais complexo de ser projetado, construído e operado, além de requerer uma grande quantidade de oxigênio para a degradação da matéria orgânica. O oxigênio necessário para o tratamento ocorre por meio de aeração artificial que consome uma grande quantidade de energia (ANA, 2017).

No processo de lodo ativado convencional a concentração de biomassa no tanque de tratamento aeróbio é bastante alta em função do excesso de lodo ativado que retorna ao tanque. Nesse tanque há a entrada contínua de alimento para os microrganismos, na forma de DBO (demanda biológica de oxigênio) dos esgotos, fazendo com que as bactérias cresçam e se reproduzam continuamente. Essa biomassa (lodo) permanece mais tempo no sistema do que o líquido fazendo com que os microrganismos consumam mais matéria orgânica do esgoto e isso garante uma elevada eficiência da remoção de DBO. O tempo de retenção do líquido é de 6 a 8 horas (VON SPERLING, 1996).

O processo de lodo ativado com aeração prolongada possui o mesmo princípio, porém no processo convencional o lodo permanece de 4 a 10 dias, enquanto na aeração prolongada esse período é de 20 a 30 dias. Além da idade do lodo, o processo de retenção do líquido no reator também é maior, em torno de 16 a 24 horas, criando a necessidade de um tanque maior e mais tempo de aeração artificial. Esse maior tempo de retenção do líquido faz com que haja uma menor disponibilidade de alimento, fazendo com que as bactérias comecem a utilizar do próprio material celular para sua manutenção, melhorando a eficiência da redução da demanda biológica de oxigênio (DBO) (VON SPERLING, 1996).

Segundo Metcalf *et al.* (2016), em uma ETE cada processo tem uma parcela de instrumentos que são responsáveis pelo consumo de energia. As principais etapas do processo e os instrumentos existentes na estação são:

- **Bombeamento e tratamento preliminar:** bombas dosadoras, bombas de transferência, peneiras, trituradores, sopradores para pré-aeração e caixas de areia aeradas, coletores de detritos, bombas de detritos;
- **Tratamento primário:** floculadores, raspadores de clarificadores, bombas de lodo e espuma, sopradores para canais de aeração;

- **Tratamento secundário (biológico):** sopradores para aeração, aeradores mecânicos, bombas para filtros percoladores, acionamento de distribuidores de vazão em filtros percoladores, raspadores dos clarificadores, bombas para o retorno e o descarte de lodo.

2.2 Inversores de frequência no acionamento de aeradores

Os sistemas de aeração são divididos em quatro tipos de sopradores, segundo Metcalf *et al.* (2016): centrífugo de estágio único, centrífugo de estágios múltiplos, turbo de alta velocidade e de deslocamento positivo. Os sopradores centrífugos são os mais utilizados e tem características similares às bombas centrífugas de baixa velocidade. Em ETEs os sopradores devem promover uma larga faixa de vazões de ar com uma faixa estreita de pressões. Usualmente são utilizados conjuntos de sopradores para conseguir suprir essa larga faixa de vazão de ar. Uma alternativa é a redução e velocidade dos sopradores para conseguir ter essa variação na vazão. Os métodos para variação da vazão de ar são: desvio ou divisão do fluxo de ar, estrangulamento da entrada, difusor de carga ajustável, motor com rotação variável e operação paralela de diversas unidades de sopradores (METCALF *et al.*, 2016).

Muitas vezes os sistemas de aeração são projetados para uma demanda acima da necessária. Por isso há a necessidade de variação da vazão de ar para ter o melhor aproveitamento. Os inversores de frequência, segundo WEG (2016) são uma boa alternativa para essa variação. As vantagens do uso de inversores de frequência são a redução de custos, o aumento na produtividade e a eficiência energética.

Associada à eficiência energética, deve ser feito o controle da taxa de aeração para coincidir com a demanda real de oxigênio. Esse processo pode ser feito por meio de medidores de oxigênio dissolvido conectados ao inversor de frequência. Nessa configuração não há desperdício de oxigênio proveniente dos sopradores no tratamento. Além da redução de energia gasta, uma maior concentração do OD que o necessário pode resultar no arraste de oxigênio para as regiões aeróbias do processo, ou até a oxidação do carbono orgânico, o que torna necessária uma etapa de desoxigenação do processo (METCALF *et al.*, 2016).

2.3 Sistemas de aeração

A aeração é parte essencial no tratamento de esgoto. As estações que possuem um filtro aerado necessitam do fornecimento de oxigênio à flora bacteriana, sendo esta responsável pela degradação da matéria orgânica e dos nutrientes presentes nos efluentes. A aeração pode ser feita por agitadores superficiais no tanque ou por conjuntos motor-soprador. Com a utilização de sopradores vazão de ar é destinada ao bloco de tratamento de esgoto por meio de dutos e por fim distribuídos por meio de difusores.

Segundo Metcalf *et al.* (2016) os principais sistemas são: sistema de ar difuso, aeração mecânica e sistemas utilizando oxigênio de pureza elevada. Os dois modelos básicos de aeração de esgoto são a introdução de oxigênio através de difusores submersos ou a aeração por meio de agitadores superficiais. Tipicamente, a eficiência padrão de transferência de oxigênio aumenta com a profundidade em que o oxigênio é inserido no tanque. A aeração por ar difuso é a que encontra os maiores níveis de eficiência na transferência.

A aeração por ar difuso é dividida basicamente entre difusores não porosos, porosos e outros equipamentos de difusão. Os difusores não porosos produzem bolhas maiores o que reduz a eficiência de aeração, por outro lado possuem um menor custo e menos manutenção. Os difusores porosos possuem uma melhor eficiência por contarem com bolhas menores. O difusor de bolhas finas por placas, por exemplo, é o que possui a mais alta eficiência na transferência. Esse sistema possui painéis de grandes áreas no fundo dos tanques e criam bolhas ultrafinas que melhoram a transferência de oxigênio e a eficiência energética do sistema. As desvantagens desse sistema são as elevadas perdas de carga que podem afetar o desempenho dos sopradores e um custo maior de manutenção (METCALF *et al.*, 2016).

2.4 Metodologia de M&V

O Protocolo Internacional de Medição e Verificação de Performance (PIMVP) foi criado nos anos 90 com o intuito de padronizar as práticas de Medição e Verificação (M&V) empregadas em ações de eficiência energética e consumo eficiente das fontes de energia. Tal padronização foi feita buscando aplicar as melhores técnicas disponíveis, de modo a aumentar os investimentos em ações de eficiência energética.

Esse protocolo apresenta os princípios básicos aceitos em qualquer processo de M&V, porém não define as atividades para todas as aplicações. Para um processo de M&V adequado, cada projeto deve ser analisado individualmente dependendo das medições e das necessidades apresentadas. (EVO, 2012).

“Medição e Verificação” (M&V) é o processo de utilização de medições para determinar, de modo seguro, a economia real criada dentro de uma instalação individual por um programa de gestão de energia. A economia não pode ser medida diretamente, uma vez que representa a ausência de consumo de energia. Nesse caso a economia é determinada pela comparação do consumo medido antes e depois da implementação de um projeto, com ajustes adequados, tendo em conta alterações nas condições. (EVO, 2012).

Para a utilização do modelo M&V é necessário determinar as variáveis independentes, as quais são medidas que representam impacto mensurável no consumo de energia em um sistema. Esse dado normalmente é medido ou estimado. Além disso, é necessário apresentar a fronteira de medição do modelo, a qual determina o local em que será feita a análise.

A medição é feita em duas etapas. A primeira etapa consiste na medição antes da Ação de Eficiência Energética (AEE), no período da linha de base. Essa medição tem o objetivo de fazer a caracterização do consumo. Ela pode ou não incluir a medição das variáveis independentes, dependendo da opção do PIMVP empregada. A partir dessa medição é criado um modelo do consumo de energia, o que seja possível representar a instalação nas condições variadas de operação. A segunda medição é feita posteriormente à AEE. Essa medição incluirá a medição das variáveis independentes e determinará a economia. (ANEEL, 2014).

O protocolo PIMVP apresenta quatro opções para determinar a economia de energia. Essas opções são as opções A, B, C e D apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1. Visão geral das opções do PIMVP.

OPÇÃO A	Medição isolada	Medição e estimativa. Estima-se algumas condições de uso.
OPÇÃO B	Medição isolada	Medição de todos os parâmetros. Mede-se a energia e mede-se as variáveis independentes.
OPÇÃO C	Medição de toda a instalação	Necessita dos dados de ambos os períodos de medição disponíveis para a análise.
OPÇÃO D	Medição de toda a instalação	Faltam dados de um período de medição. Normalmente utilizadas para novas instalações

Fonte: Adaptado de Aneel, 2014.

Após a definição das variáveis independentes e da fronteira de medição, é necessário optar por alguma das opções apresentadas no Quadro 1. As duas primeiras opções são apresentadas para uma fronteira de medição na própria instalação. Em A e B há a necessidade de haver medidor de energia no local. As opções C e D são mais abrangentes, a fronteira está definida para toda a instalação. Nesse caso normalmente é utilizado os dados energéticos do medidor de entrada de energia.

2.5 Resolução CONAMA

A Resolução 357/2005 do CONAMA apresenta uma série de parâmetros que devem ser seguidos pelos efluentes. Os parâmetros de oxigênio dissolvido em lagoas de água doce são mostrados de acordo com a classe da lagoa no Quadro 2.

Quadro 2. Valores de referência para o oxigênio dissolvido.

Lagoa de água doce	Oxigênio Dissolvido
Classe 1	não inferior a 6 mg/L de O ₂
Classe 2	não inferior a 5 mg/L de O ₂
Classe 3	não inferior a 4 mg/L de O ₂
Classe 4	não inferior a 2 mg/L de O ₂

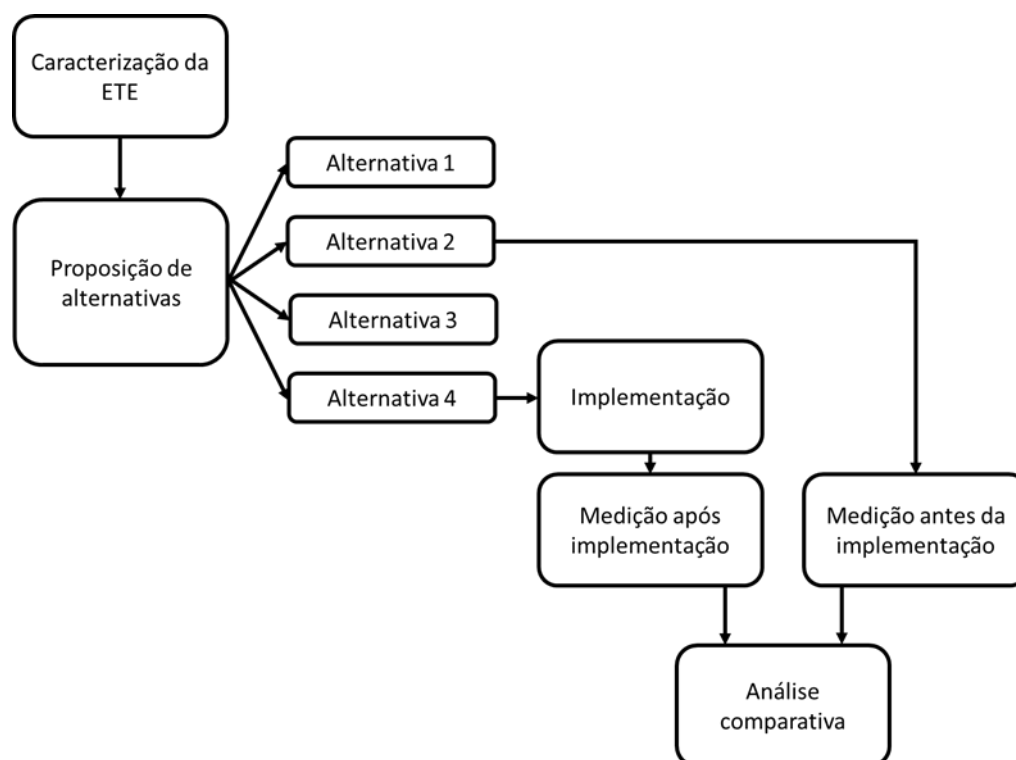
Fonte: Adaptado de Resolução 357/2005.

A Resolução também classifica a classe da água. As lagoas de água doce Classe 1 são destinadas à preservação dos ambientes aquáticos e recreação com contato primário. Ela é destinada ao abastecimento humano desde que com tratamento simplificado. As lagoas doces de Classe 2 são destinadas ao consumo humano, desde que com tratamento convencional. Além disso também pode haver recreação com contato primário e atividade de pesca. Para o consumo da água das lagoas doces de Classe 3 existe a necessidade de um tratamento convencional ou avançado, uma vez que pode haver recreação com contato secundário. Dessa forma as lagoas de Classe 3 são usualmente destinadas à irrigação e à pesca. Por fim, as lagoas de Classe 4 não são destinadas ao consumo humano. São destinadas à navegação e à harmonia paisagística.

3 METODOLOGIA

A metodologia de análise aplicada neste trabalho consiste em caracterizar a estação de tratamento e verificar as possibilidades de melhorias. Após são apresentadas quatro alternativas. A partir destas, há a implementação da proposta e a medição e verificação das duas configurações utilizadas. A Figura 2 apresenta os passos da metodologia adotada.

Figura 2. Diagrama da metodologia empregada no trabalho.



Fonte: Elaborado pela autora.

3.1 Caracterização da estação de tratamento de esgoto avaliada

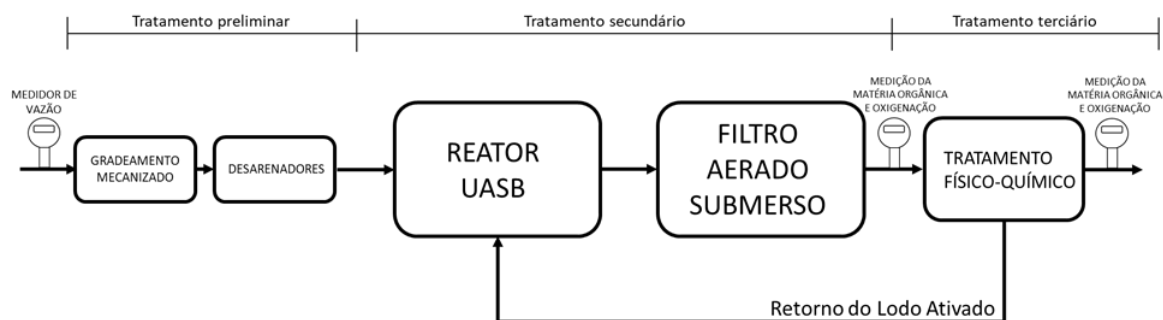
A ETE analisada neste estudo é a Estação de Tratamento de Esgoto Guarani, localizada no município de Capão da Canoa. Essa estação é de propriedade da CORSAN – Companhia Riograndense de Saneamento e é responsável pela operação da ETE. A estação está em operação desde o final do ano de 2019, tendo sido projetada para o tratamento de esgoto doméstico. No município de Capão da Canoa há duas estações de tratamento de esgoto, sendo essa a de maior capacidade, além de uma previsão de duplicação da ETE para os próximos anos, o que demonstra a importância desta estação.

A vazão de operação da ETE estabelecida pela Licença de Operação (LO) é de 128 litros/segundo, totalizando um volume máximo de 11.059 m³/dia de esgoto afluente à estação. É uma estação de tratamento terciário, sendo o modelo mais completo de tratamento de efluentes domésticos.

Na ETE Guarani as etapas do tratamento são realizadas da seguinte maneira, conforme ilustra a Figura 3:

- Tratamento preliminar: há um gradeamento mecanizado para a retirada dos sólidos e os desarenadores;
- Tratamento secundário: o tratamento secundário é realizado em duas etapas: um reator UASB anaeróbio seguido de um filtro biológico aerado submerso;
- Tratamento terciário: tratamento físico-químico com cloreto férrico.

Figura 3. Etapas do tratamento na ETE Guarani.



Fonte: Elaborado pela autora.

O foco deste trabalho é no filtro biológico aerado submerso em que há sopradores conectados para a inserção de oxigênio no tanque. Conforme dados de projeto, há dois tanques de 19,4 m de comprimento, com 13,5 m de largura. Dentro do tanque há 2,8 m de altura de britas, as quais são necessárias para a eficiência no tratamento. Além dessa altura de brita, há 0,6 m de um fundo falso e mais 0,2 m de altura sobre a brita, totalizando 3,6 m de altura do tanque. A vazão de ar para dentro dos dois tanques é dada por 3 sopradores de 25 cv (cavalo vapor) de potência. As Figuras 4 e 5 mostram a instalação da casa de bombas e os tanques aerados.

Figura 4. Casa dos sopradores.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 5. Tanques aerados.



Fonte: Elaborado pela autora

O projeto original previu um soprador para cada um dos dois tanques e um reserva, porém, no início da operação houve a necessidade de aumentar essa vazão de ar inicialmente projetada. Em razão da necessidade de aumentar a vazão de ar, optou-se por ligar os três sopradores simultaneamente para os dois tanques. Ainda, diferentemente do projeto original, os sopradores não operam o dia inteiro, sendo estes controlados por um timer que regula o tempo em que os sopradores ficam ligados/desligados.

Em ambos os tanques dos filtros biológicos há medidores automáticos de oxigênio dissolvido, sendo que, atualmente, ambos estão desligados por falta de calibração. No início da operação da estação de tratamento, em 2019, foi utilizada a metodologia de acionamento criada no projeto. Logo no início da operação foi constatado que os valores apresentados pelos medidores estavam incorretos, fazendo com que fossem inutilizados e as medições de OD viessem por meio de análises laboratoriais.

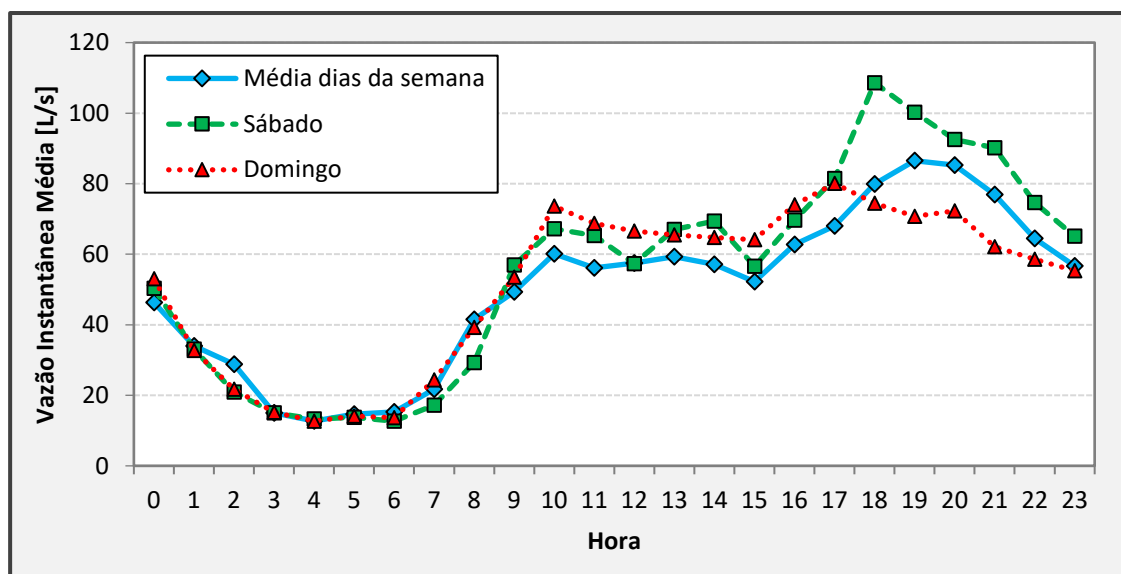
As vazões de entrada de afluente são monitoradas por medidores de vazão instalados na entrada da estação de tratamento de esgoto. Esse esgoto é originado nas Estações de Bombeamento de Esgoto (EBE), que são coletadas das redes. Nelas há um tanque que coleta o material e, conforme o nível do tanque, o esgoto é bombeado para a estação de tratamento. Portanto, a vazão de entrada na ETE não é constante, em função das estações de bombeamento. Para minimizar essa variação de entrada, é usado o valor médio de vazão ao longo de 1 hora. A Figura 6 apresenta a média horária da vazão de esgoto para os dias de semana, o sábado e o domingo.

Para caracterizar a produção de esgoto nos meses de verão, foi utilizada a vazão de entrada das duas ETEs que a mesma EBE bombeia, pois ainda há a variação das manobras realizadas na rede para direcionar o esgoto para cada uma das duas estações. Esse valor de vazão média de esgoto produzido foi obtido pelas médias horárias de cada dia da semana, de 05/12/2021 a 26/01/2022. O intervalo de tempo curto foi escolhido em função da grande variação presente nos meses de veraneio. Nos anos anteriores os valores obtidos pelos medidores não estavam de acordo com o esperado por falta de calibração.

A partir das curvas de produção de esgoto acima é possível observar que o horário em que há um aumento da vazão é a partir das 9h da manhã. No período da tarde, em que a população costuma chegar em casa, é possível observar outra elevação a partir das 17h.

Na rotina da ETE são feitas coletas e diversas análises diárias. Como forma de quantizar o tratamento do esgoto, será utilizada a Matéria Orgânica, dada em mg/L de O₂. Essa matéria orgânica é proporcional à DQO (demanda química de oxigênio). Por análises feitas previamente pela CORSAN, a DQO corresponde a sete vezes o valor da matéria orgânica. Para dados do tratamento, esse valor da DQO deve permanecer abaixo de 150 mg/L.

Figura 6. Curva característica das vazões horárias.



Fonte: Elaborado pela autora.

3.2 Proposição de alternativas

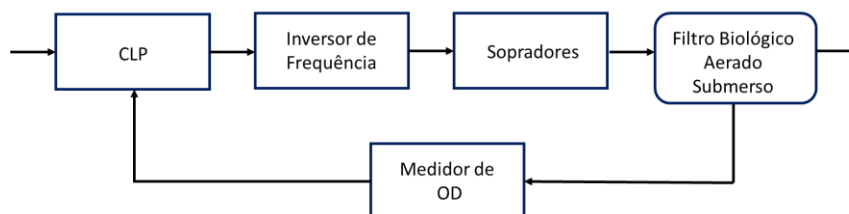
Para melhorar o processo e buscar uma redução no consumo energético, quatro alternativas são apresentadas. A primeira alternativa é a metodologia criada no momento do projeto. Essa alternativa é a mais adequada para controle do processo. As demais alternativas apresentadas são utilizadas pela falta de equipamento adequado. A segunda alternativa representa o modo de operação da ETE antes das alterações propostas. Todas essas três alternativas podem ser implementadas sem custos adicionais, bastando apenas alterar configurações de acionamentos dos inversores que controlam os sopradores.

3.2.1 Alternativa 1

A primeira alternativa é baseada na operação projetada. O controle da operação dos sopradores é feito com um controlador lógico programável (CLP) conectado aos três inversores. Além dos dados do inversor, o controlador também utiliza os dados do medidor de oxigênio dissolvido. Esse controle se dá pela medição da oxigenação e a variação da velocidade dos sopradores. Assim, quando a oxigenação estiver alta, a velocidade dos motores é reduzida fazendo com que haja a diminuição na potência e mantendo o nível de oxigênio pré-definido por um controlador proporcional integral derivativo (PID).

Os tanques contam com a presença de um medidor de oxigênio dissolvido instantâneo, a automatização do processo é feita para que os inversores de frequência dos conjuntos motor-soprador façam a variação da velocidade dos motores de acordo com a oxigenação presente no tanque. Na Figura 7 é mostrado o diagrama do processo.

Figura 7. Fluxograma de controle PID.



Fonte: Elaborado pela autora.

A partir da resolução 357/2005 do CONAMA que trata dos efluentes domésticos, os níveis de oxigênio devem estar acima de 2 mg/L de oxigênio dissolvido. A partir disso, os parâmetros para a variação da frequência do inversor são dados conforme Quadro 3 :

Quadro 3. Variação da frequência em função da oxigenação.

Oxigenação [mg/L]	Frequência do inversor
$\leq 1,0$	60 Hz
2,0	45 Hz
$\geq 3,0$	30 Hz

Fonte: Elaborado pela autora.

O medidor de oxigênio dissolvido envia ao inversor um sinal analógico de 4 a 20 mA. Dependendo do range do medidor, esse nível de 4 mA representa o mínimo de oxigenação, que é 0 mg/L e o dado de 20 mA significa um dado máximo de oxigenação, dependendo do tipo de sensor.

O sensor envia ao CLP um sinal analógico e o controlador que faz o acionamento do inversor de frequência. Esses dados vindos do sensor são tratados de forma contínua, fazendo com que a variação da frequência dos sopradores também seja contínua, dependendo do nível de oxigenação do tanque.

Nas análises preliminares foi constatado que o medidor de oxigênio dissolvido funcionava. Foram realizadas três análises de oxigenação na amostra e comparado com o valor obtido pelo medidor. Os valores obtidos na análise estavam condizentes com os lidos pelo sensor. Porém, com passar das horas a medição automática se mostrou ineficiente.

O material orgânico ficou acumulado no sensor fazendo com que ele obtivesse valores próximos de zero na medição do oxigênio. Para que essa operação funcionasse adequadamente, deveria haver limpezas preventivas do sensor algumas vezes ao longo do dia, inviabilizando a utilização desse sensor.

Em função do material orgânico que ficou acumulado no sensor foi possível observar que esse tipo de sensor não seria adequado para uma operação a longo prazo. A necessidade da troca do sensor traz outro problema: em uma empresa pública, o processo de aquisição de equipamentos pode demorar até seis meses. Portanto foi descartada essa alternativa no momento, mesmo sendo a melhor opção para o controle do processo.

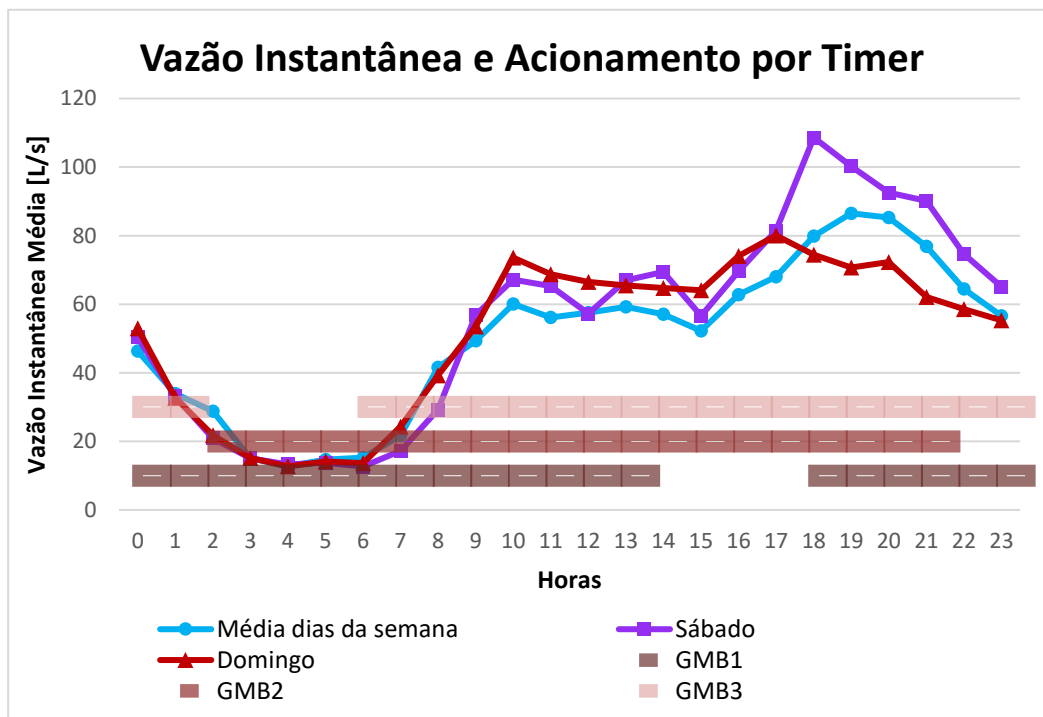
3.2.2 Alternativa 2

A segunda alternativa é a operação como é realizada atualmente. A operação dos aeradores é controlada via três programadores horários conectados na entrada de acionamento manual dos três inversores de frequência. No primeiro cenário os sopradores são acionados para operar dois em paralelo em horários em que a produção de esgoto seja mais baixa e os três sopradores em paralelo nos horários de pico.

A partir disso, foi estabelecido que das 6h às 14h e das 18h às 22h são os horários em que ficam os três sopradores ligados em paralelo para haver uma maior oxigenação no tanque aerado quando há uma

maior vazão de esgoto. No restante do dia ficam dois sopradores ligados, fazendo o revezamento para que ao longo do dia os três operem pela mesma quantidade de horas. Essa configuração de acionamento é apresentada na Figura 8 na forma de barras, mostrando um acionamento binário ao longo do dia.

Figura 8. Configuração atual do acionamento dos sopradores.



Fonte: Elaborado pela autora.

Pelo gráfico é possível observar que a partir das 6h, em que a vazão está abaixo de 20 L/s é utilizada a vazão máxima de ar disponível e, durante a tarde, em que a vazão está em torno de 60 L/s é usada uma vazão de ar reduzida.

3.2.3 Alternativa 3

A alternativa três é uma alteração apenas nos horários de acionamento. Como foi observado anteriormente, há a opção de reduzir ainda mais a vazão de ar entregue pelos sopradores no horário das 2h às 7h. Nesses horários a vazão de entrada de esgoto fica abaixo dos 20 L/s.

Desse modo, a partir da 1h da manhã ficaria apenas um soprador ligado, às 7h entraria o segundo soprador e a partir das 17h ficariam os três sopradores acionados simultaneamente. Um dos problemas presente nessa alternativa é a variação do tempo de horas em que cada conjunto motor-soprador fica acionado. Nessa configuração o número de horas de acionamento não fica balanceada entre os três motores.

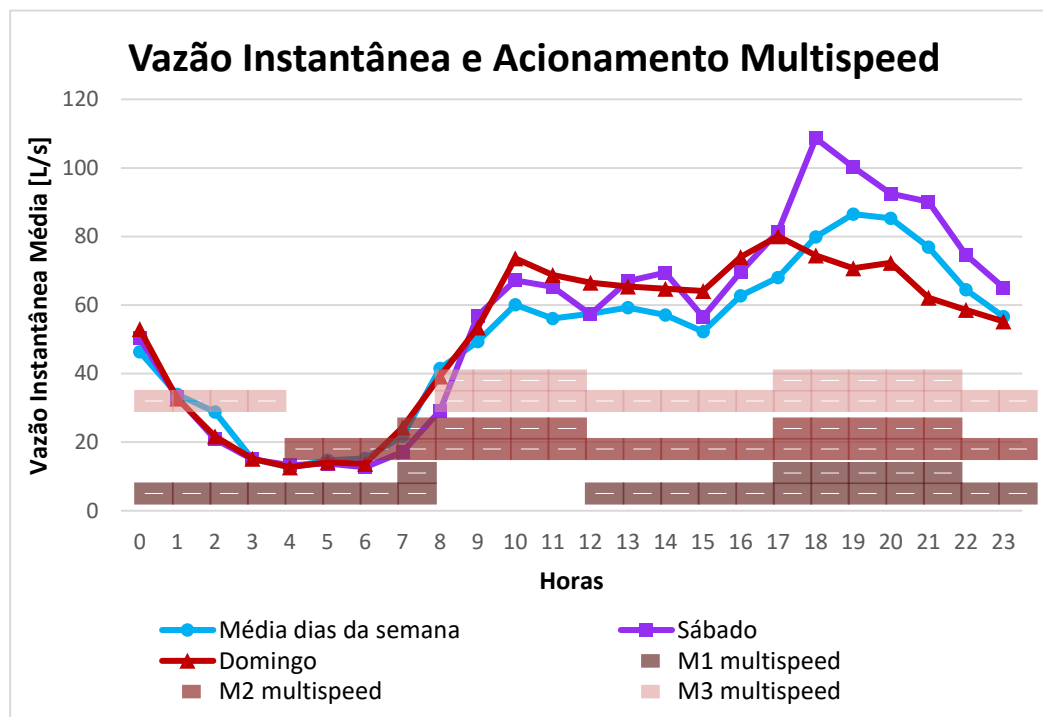
Além disso, há um longo período em que fica apenas a vazão de ar de um soprador. Essa vazão não é suficiente para aerar os dois blocos simultaneamente, portanto essa alternativa também foi descartada.

3.2.4 Alternativa 4

Com base na alternativa dois, em que é apresentada a operação anterior, é possível observar que os horários não estão bem ajustados à vazão de esgoto. Para criar uma variação da vazão de ar em função da vazão de esgoto, foi feita uma variação da potência dos três sopradores, criando 4 arranjos de potência a ser entregue aos sopradores.

Essa variação da potência é feita pela programação do *multispeed* nos inversores de frequência que controlam os sopradores. Assim cada soprador pode operar com 3.600 RPM ou 3.000 RPM, 60 Hz e 50 Hz respectivamente. Assim, foram utilizados os arranjos de 2 ou 3 sopradores em 60 Hz e 2 ou 3 sopradores em 50 Hz, totalizando 4 arranjos diferentes de acionamento. A Figura 9 ilustra o arranjo do acionamento com a vazão instantânea, onde as barras mostram os períodos de ligado/desligado dos grupos.

Figura 9. Configuração do acionamento dos sopradores por *multispeed*.



Fonte: Elaborado pela autora.

Conforme mostra a Figura 9, o acionamento do *multispeed* é feito para aumentar a potência e, proporcionalmente, aumentar a vazão de ar necessária para o tratamento. Ao iniciar o dia, à meia noite, permanecem dois motores em 50 Hz, a partir das 7 h são acionados dois motores em 60Hz aumentando a potência. No horário do almoço, a partir das 12 h são ligados os 3 grupos em paralelo, para o aumento da produção de esgoto proveniente do horário do almoço. No início do horário de pico, às 17 h são ligados os 3 motores em 60 Hz com a máxima potência disponível. Ao final do horário de pico, às 22 h, ficam os 3 grupos em 50 Hz para, à meia noite, retornar à configuração de dois sopradores em 50 Hz.

3.3 Acionamento dos inversores com relé temporizador

O acionamento dos conjuntos motor-sopradores é feito utilizando 3 inversores WEG CFW11, previamente conectados. O acionamento de cada inversor é controlado por um controlador horário. Esse controlador está conectado no acionamento manual do inversor, sendo acionado sempre localmente.

Para a inserção do controle *multispeed*, foi acrescentado mais um controlador horário. Esse controlador está conectado à bobina de uma contatora auxiliar, e as entradas NA são conectadas nos pinos 13 de cada um dos 3 inversores. Assim, no momento que o timer der o comando, vai energizar a bobina da contatora e irá fechar o contato do pulso dos três inversores para alterar a velocidade. A variação de velocidade irá ocorrer nos três inversores ao mesmo tempo, porém são os outros controladores que mandam o inversor ligar ou desligar. O Quadro 3.2 mostra os parâmetros aplicados para a inserção do controle.

Quadro 4. Parâmetros ajustados nos inversores para operação do controle por *multispeed*.

Parâmetro	Descrição	Valor
P0221	Sel. Referência LOC	008 =Multispeed
P0124	Ref. 1 Multispeed	3000 RPM
P0125	Ref. 2 Multispeed	3444 RPM
P0266	Função da Entrada DI4	13 = Multispeed

Fonte: Elaborado pela autora.

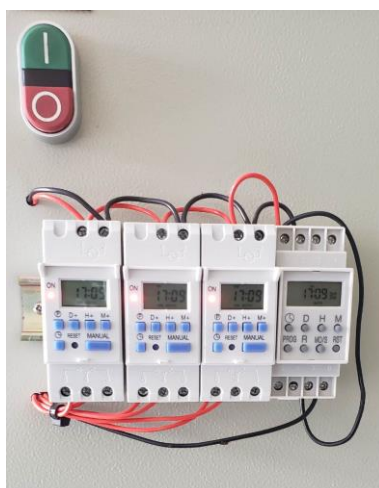
As Figuras 10 e 11 apresentam a instalação elétrica feita no quadro de comando dos inversores, onde na Figura 10 pode-se ver o quadro de comando e dois dos três inversores que controlam os sopradores. A Figura 11 ilustra o arranjo com os 4 controladores horários que foram conectados

Figura 10. Quadro de comando.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 11. Sistema de temporizadores utilizados.

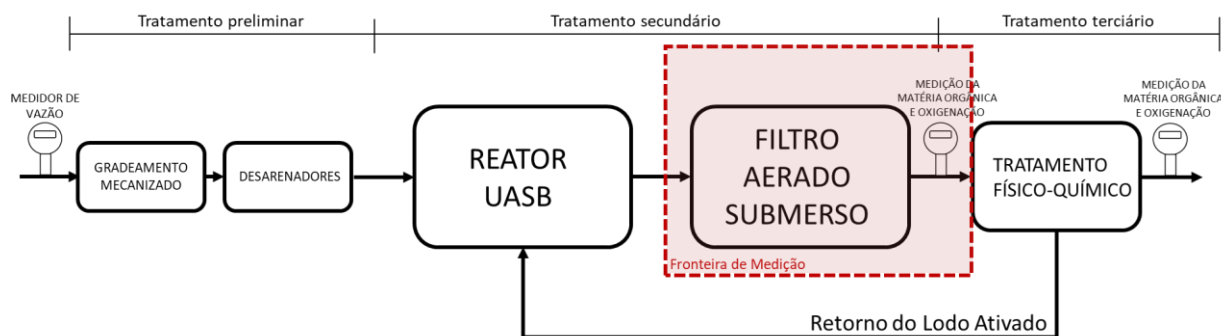


Fonte: Elaborado pela autora.

3.4 Metodologia M&V para eficiência energética

A fim de enquadrar esse trabalho em uma ação de eficiência energética de acordo com o protocolo internacional PIMVP, primeiramente foram avaliadas as variáveis independentes do processo. Essas variáveis são a vazão totalizada ao longo de um dia e a matéria orgânica, a qual é obtida por meio de coleta e análise laboratorial. Na rotina normal da ETE essa análise é realizada uma vez ao dia. A coleta é feita torno das 8h da manhã. Para a realização desse trabalho, foi solicitado à equipe responsável pela ETE que fizesse mais uma análise às 16h. A fronteira de medição do projeto é apresentada na Figura 12. Essa fronteira será o filtro aerado submerso.

Figura 12. Fronteira de medição para a metodologia M&V.



Fonte: Elaborado pela autora.

Essa fronteira pode ser determinada no filtro pois foi inserido um medidor diretamente conectado no barramento do acionamento dos sopradores presentes no filtro aerado submerso. Também de acordo com o protocolo a medição e avaliação da situação anterior à ação de eficiência energética e a situação posterior à ação de eficiência energética, foi inserido um Analisador de Energia da EMBRASUL modelo RE6000 com resolução de 10 milissegundos e precisão de 0,2% para a tensão e corrente. O analisador foi inserido no dia 01/02/2022 às 16h e retirado no dia 11/02/2022 às 17h. Foram realizadas medidas a cada 5 minutos e integralizadas ao longo de uma hora.

Para caracterizar a ação de eficiência energética, deve ser verificado qual ação o projeto está inserido. Como foram feitas análises apenas ao longo de um dia, uma extrapolação para o período de um mês é feita, a estratégia é a utilização da opção Tipo A, em que alguns dados são estimados.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

O analisar obteve resultados do dia 01/02/2022 ao dia 11/02/2022. As alterações foram realizadas no dia 09/02/2022 às 17h, portanto com a configuração após a ação de eficiência energética foi possível obter os resultados de um dia completo, no dia 10/02/2022.

Portanto as análises são apresentadas para os dias 03/02/2022 e 10/02/2022, duas quintas-feiras com tempo bom de sol e temperatura parecida. Os resultados são mostrados como:

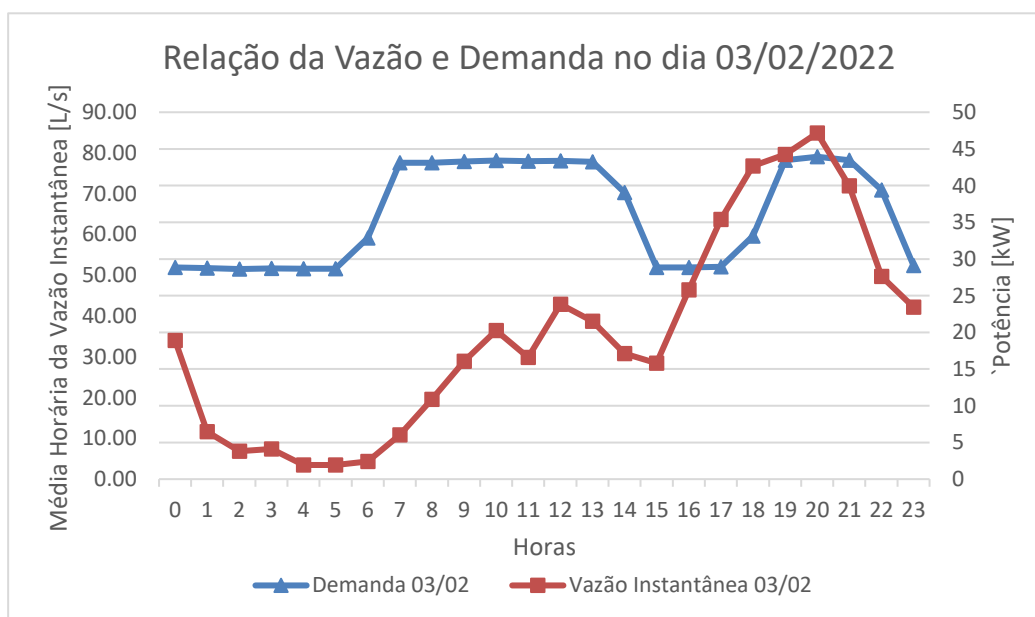
Cenário 1 – Antes de ação de eficiência energética, que foi apresentado como Alternativa 2;

Cenário 2 – Após a ação de eficiência energética, apresentado como Alternativa 4.

4.1 Cenário 1

O cenário anterior é caracterizado pelo acionamento de dois ou três grupos motor-soprador em paralelo, todos na potência máxima disponível. A Figura 13 apresenta essa demanda horária de energia requerida ao longo de um dia. O dia analisado no cenário anterior é quinta-feira dia 03/02/2022, nesse dia a vazão média horária de entrada de afluente na estação de tratamento de esgoto também é mostrada no gráfico.

Figura 13. Resultados da potência e vazão no cenário 1.



Fonte: Elaborado pela autora.

Conforme analisado anteriormente, o tratamento do esgoto se dá por meio da oxigenação provinda da aeração do tanque. Na medida em que a oxigenação é superior à necessária para o tratamento, é desperdiçada energia elétrica pois não irá reduzir mais matéria orgânica do que já está sendo reduzido, mostrando uma saturação. No horário das 6h da manhã, em que os três sopradores são ligados paralelamente há esse efeito. A vazão horária da madrugada é muito baixa, fazendo com que haja esse desperdício de energia elétrica.

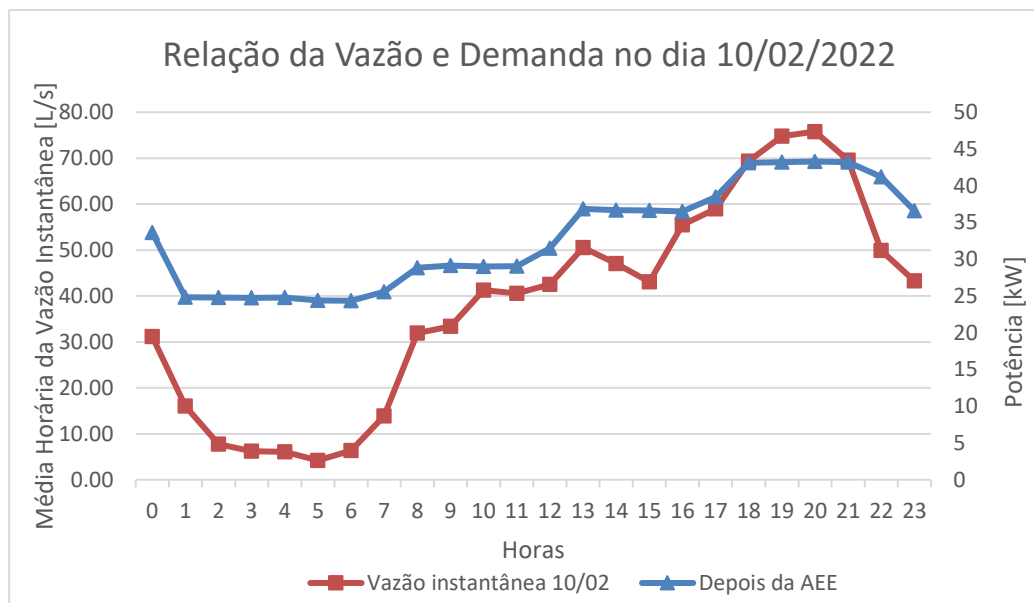
No horário da tarde, há uma deficiência de oxigenação no processo. Pelas análises o valor ainda está dentro do padrão aceitável, porém a matéria orgânica coletada no turno da tarde se mostra muito maior do que a que é coletada no início da manhã.

Ao total do dia 03/02 foram contabilizados 3047 m³ de esgoto afluente e cerca de 866,301 kWh na etapa do filtro aerado do processo.

4.2 Cenário 2

As alterações propostas apresentadas na Figura 14 mostram a variação da potência instantânea com a vazão afluyente na quinta-feira dia 10/02/2022.

Figura 14. Resultados da potência e vazão no cenário 2.



Fonte: Elaborado pela autora.

Pelo gráfico da Figura 14 é possível observar que a variação da potência está proporcional à variação da vazão. Com a configuração do *multispeed* é possível criar outras faixas de potência para fazer a variação da vazão de ar na entrada do filtro aerado.

No horário da madrugada, em que a vazão se mantém abaixo de 10 L/s a potência está próxima de 25 kW. No horário de maior vazão de entrada, em torno de 70 L/s, a potência é de 45 kW, valor máximo que pode ser obtido com os três sopradores. Para esse arranjo, no dia 10/02/2022 foram contabilizados 2921 m³ de esgoto e um consumo de 790,473 kWh em energia elétrica na etapa do filtro aerado.

4.3 Comparação entre os dois cenários

As análises de matéria orgânica são realizadas uma vez por dia no início da manhã. Excepcionalmente para as análises desse trabalho, foi feita mais uma coleta ao longo do dia, no horário das 16h. Esses dois valores diários são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Resultados da vazão e matéria orgânica nos dois cenários

	Antes da AEE (03/02/2022)		Após a AEE (10/02/2022)	
Vazão totalizada [m ³]	3.047		2.921	
Matéria Orgânica [mg/L O ₂]	28	38	31	21
Energia [kWh]	866.301		790.473	

Fonte: Elaborado pela autora.

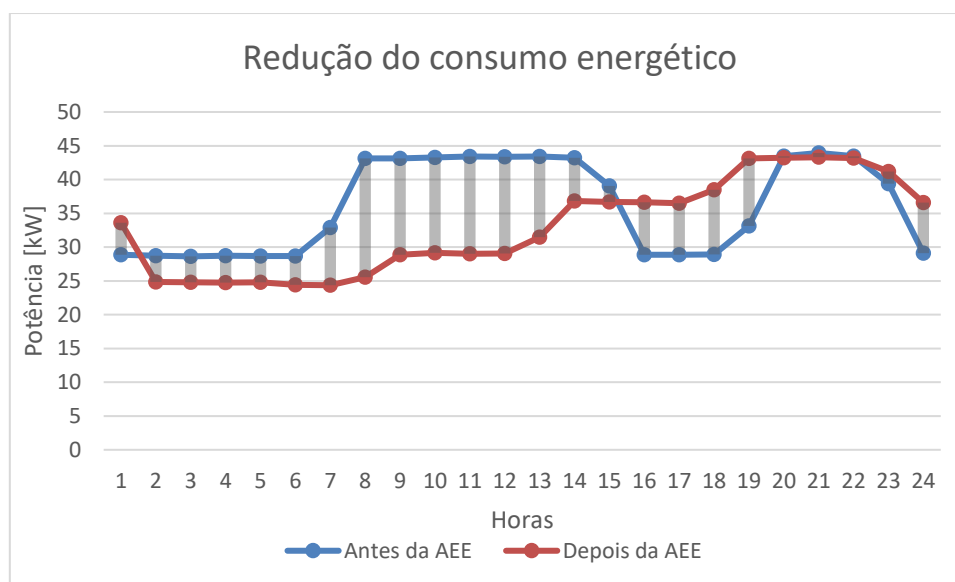
Conforme mostra a Tabela 1, as vazões totalizadas nos dois períodos estão muito próximas, então serão analisados os valores obtidos pelas análises, sem ser necessário a obtenção de um valor corrigido. Como pode ser observado, após as alterações a primeira análise resultou em um valor mais alto, como era

esperado em função da oxigenação excessiva a partir do horário das 6 h da manhã. Por outro lado, na análise da tarde, o arranjo posterior mostrou uma melhor eficiência na redução da matéria orgânica do filtro. Isso aconteceu, pois, a vazão de ar está condizente com a vazão de entrada de esgoto, ou seja, há uma maior oxigenação no horário em que há uma maior quantidade de afluente.

Cabe ressaltar que a matéria orgânica deve ficar abaixo de 21 mg/L de O₂. Como a fronteira de medição é no filtro aerado, essa matéria orgânica ainda sofrerá efeitos externos. Pela análise dos boletins mensais, o tratamento terciário retira em média 53% da matéria orgânica. Dessa forma, em ambos os cenários o parâmetro encontra-se dentro do estabelecido pelo órgão de fiscalização.

Considerando a análise pela M&V, a energia evitada do processo é apresentada na Figura 15, onde a redução é observada pela área dos gráficos. Pode-se observar que ao longo do dia o consumo anterior à AEE se mostrou mais alto, porém a partir das 15 h há uma inversão e o consumo posterior à ação é aumentado.

Figura 15. Comparação entre o consumo antes e depois da ação de eficiência energética.



Fonte: Elaborado pela autora.

Extrapolando ao longo de um mês, o consumo antes da AEE é de 25.989,025 kWh e após a ação esse valor é reduzido para 23.608,071 kWh. Essa redução representa 9,16% de redução no consumo energético.

Também foi realizada uma análise do custo da energia elétrica, sendo classificada entre horário de ponta e horário fora de ponta, conforme mostra a Tabela 2.

Tabela 2. Comparação entre os valores gastos para o cenário 1 e o cenário 2.

Tabela de valores CEEE	Cenário 1 - Antes da AEE			Cenário 2 - Depois da AEE	
	Preço	Quantidade (kWh)	Valor	Quantidade (kWh)	Valor
Consumo ponta	R\$ 2,33614	2.651,37	R\$ 6.193,97	2.746,53	R\$ 6.416,27
Consumo fora ponta	R\$ 0,53359	23.337,66	R\$ 12.452,81	20.861,55	R\$ 11.131,57
Adicional de bandeira vermelha P2 (por 100 kWh)	R\$ 20,29655	259,89	R\$ 5.274,88	236,08	R\$ 4.791,62
Total			R\$ 23.921,65		R\$ 22.339,47

Fonte: Elaborado pela autora.

Conforme dados da Tabela 2 a redução monetária foi de 6,61%. O valor difere da redução do consumo de energia elétrica devido ao aumento do consumo no horário de ponta.

5 CONCLUSÃO

A melhor alternativa para buscar a eficiência energética no bloco do filtro aerado submerso é a alternativa número um. Porém, o modelo do sensor empregado no projeto não é o mais adequado, tornando essa alternativa inviável até o presente momento. Na duplicação da estação de tratamento está previsto um novo modelo de sensor, o qual conta com sensor infravermelho para análise do oxigênio dissolvido.

Mesmo havendo o controle automatizado via controlador lógico programável no acionamento dos sopradores, foi optado pela utilização de programadores temporizados. Isso aconteceu, pois, até o momento da escrita deste trabalho, não foi possível ter acesso às interfaces de programação e ao suporte necessário para que seja feita manutenções ou trocas de horários. A utilização dos relés temporizados para fazer o controle de cada um dos três inversores e o quarto relé para habilitar o *multispeed*, trouxe autonomia. Assim os próprios operadores da ETE podem fazer essa troca de horários sem depender da equipe de manutenção e da utilização de computadores com interface para programação.

De ponto de vista econômico, ao ser avaliado ao longo de um ano, a economia é de aproximadamente R\$ 18.986,18. Essa economia foi implementada sem necessitar de aquisição de novos equipamentos, apenas considerando a troca da configuração de acionamento dos inversores. Essa alternativa apresentada se mostrou eficaz pois trouxe redução de consumo e uma melhora nos parâmetros de análise de matéria orgânica da estação de tratamento de esgoto.

Ao ser caracterizada as curvas de produção de esgoto pode-se analisar melhor o tratamento de esgoto. Ao ser apresentado ao operador responsável pela ETE, o mesmo, este se mostrou interessado em entender melhor essa caracterização para poder melhorar a dosagem dos produtos ao longo do dia, o que representa um de conhecimento do processo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). SECRETARIA NACIONAL DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Atlas de Esgotos: Despoluição de Bacias Hidrográficas**. Brasília: ANA, 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Programa de eficiência energética. 2015. Disponível em: < https://www.aneel.gov.br/programa-eficiencia-energetica/-/asset_publisher/94kK2bHDLPmo/content/medicao-e-verificacao-m-v-656831?inheritRedirect=false&redirect=https%3A%2F%2Fwww.aneel.gov.br%2Fprograma-eficiencia-energetica%3Fp_p_id%3D101_INSTANCE_94kK2bHDLPmo%26p_p_lifecycle%3D0%26p_p_state%3Dnormal%26p_p_mode%3Dview%26p_p_col_id%3Dcolumn-2%26p_p_col_pos%3D1%26p_p_col_count%3D2> Acesso em: 14 fevereiro 2022.

BRASIL. MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL. SECRETARIA NACIONAL DE SANEAMENTO – SNS. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS): 25º Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2019. Brasília: SNS/MDR, 2020. 183 p.: il.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução nº 357 de 17 de março de 2015. Disponível em: < <http://conama.mma.gov.br/>>

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY (DOE). Energy Data Management Manual for the Wastewater Treatment Sector. 2017.

EFFICIENCY VALUATION ORGANIZATION (EVO). Protocolo Internacional de Medição e Verificação de Performance. EVO 10000 – 1:2012 (Br). 2012. Disponível em: < http://www.abesco.com.br/wp-content/uploads/2015/07/PIMVP_2012-PTBR.pdf>. Acesso em 14 fevereiro 2022.

JORDÃO, E. P. Eficiência energética em tratamento de esgotos. Revista DAE, São Paulo, SP, v. 177, p. 15–19, 2008.

METCALF, L.; EDDY, H. P, *et. al.*. **Tratamento de Efluentes e Recuperação de Recursos**. 5 ed. Rio de Janeiro: McGraw Hill, 1984p. 2016

SABESP. **Projeto de Eficiência Energética nas ETEs ABC e Parque Novo Mundo**. In: Congresso Ambiental Expo, 1º, 2009, São Paulo. Apresentação.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 2º ed., UFMG, Belo Horizonte, 246p. 1996.

WEG. Motores de indução alimentados por inversores de frequência PWM. 2016. Disponível em: <<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h35/h10/WEG-motores-de-inducao-alimentados-por-inversores-de-frequencia-pwm-50029351-brochure-portuguese-web.pdf>> Acesso em 02 maio 2021.