

Paulo Afonso da Mata Machado (1)

Engenheiro Civil pela Escola de Engenharia da UFMG. Pós-graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental pela Escola de Engenharia da UFMG. Master in Environmental Science and Engineering pela Rice University (Houston/Texas). Ex-engenheiro da Petrobras. Ex-engenheiro da COPASA-MG. Aposentado no Serviço Público Federal pelo Banco Central do Brasil.

José Nelson de Almeida Machado (2)

Engenheiro Civil pela Escola de Engenharia de UFMG. Pós-graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental pela Escola de Engenharia da UFMG. Ex-superintendente de Apoio Técnico da Copasa. Ex-diretor geral da AGB Peixe Vivo. Consultor de Gestão de Saneamento e Recursos Hídricos.

Endereço (1): Rua Alagoas, 314/603 – Bairro Boa Viagem – Belo Horizonte/MG – Brasil – CEP: 30130-162 - Telefones: (31) 3213-9282; (31) 99970-7354 - e-mail: pauloafonsomatamachado@gmail.com.br.

PALAVRAS-CHAVE: Potabilização de Efluente, Reúso Potável Direto, Carência de Água, Potabilização de Esgoto, Refinaria REGAP.

RESUMO

A carência de água está aumentando cada vez mais no planeta. O Brasil, que se julgava isento desse problema, por concentrar cerca de 12% da água doce do planeta, vem sofrendo cada vez mais com as mudanças climáticas. Ultimamente, tem sido desenvolvida a prática de reúso da água para fins considerados menos nobres, preservando-se a água potável para consumo humano. Entretanto, se tal prática vier a ser executada em maior escala, exigirá reservatórios e rede independentes dos reservatórios e da rede de água potável. Além disso, o incremento de consumo de água potável tem se mostrado superior ao correspondente aumento populacional. Diante disso, a Organização Mundial de Saúde (OMS) tem aconselhado o reúso potável, ou seja, as águas servidas deverão ser tratadas em grau suficiente para serem utilizadas como água potável. Embora recomendado pela OMS, tem havido resistência ao reúso potável no Brasil, sob a alegação de que ainda não existe legislação específica para tal finalidade, embora a Constituição Federal declare que algo somente é vedado quando existe norma específica proibitória e o Ministério da Saúde (MS) reconheça que, para ser considerada potável, seja suficiente que a água atenda ao padrão de potabilidade estatuído em portaria do MS e não ofereça riscos à saúde, independentemente de sua origem. Este trabalho aborda o caso da estação de tratamento de esgoto de Ibirité – MG (ETE Ibirité), que se encontra com a primeira etapa em funcionamento e produz água de reúso não potável. Com algumas modificações no projeto, a segunda etapa da ETE Ibirité poderá se transformar em uma estação de potabilização de efluentes (EPE), usando como fonte principal de água bruta o efluente da Refinaria Gabriel Passos (REGAP). Estando concluída e após entrar em operação, essa estação será a primeira do gênero na América Latina a produzir água não apenas legalmente potável, mas, principalmente, água segura para o consumo humano.

PALAVRAS-CHAVE: Potabilização de Esgoto, Reúso Potável Direto, Potabilização de Efluente, Carência de água.

INTRODUÇÃO

A potabilização de efluentes é feita em diversos países. No Brasil, não é praticada porque existe o receio de não haver legislação que autorize tal prática.

Ledo engano.

Neste país, para que alguma coisa seja proibida, é preciso haver lei específica para tal, como estabelece o art. 5º, II, da CONSTITUIÇÃO FEDERAL: *Ninguém será obrigado a fazer ou deixar de fazer alguma coisa senão em virtude de lei.*

Por outro lado, para que a água seja considerada potável, é suficiente que atenda à Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021 (doravante denominada PORTARIA), que, em seu artigo 5º, traz as seguintes definições:

Água potável: água que atenda ao padrão de potabilidade e que não ofereça riscos à saúde; Água para consumo humano: água potável destinada à ingestão, preparação de alimentos e à higiene pessoal, independentemente da sua origem. (O grifo é nosso.)

Portanto, de acordo com o dispositivo em vigor, pouco importa a origem da água para ser considerada potável. Basta que, depois de tratada, atenda ao padrão de potabilidade estabelecido na PORTARIA e não ofereça riscos à saúde. A única restrição é com relação a águas brutas, se a concentração de *Escherichia coli* for superior a 1000 células/100 mL. Nesse caso, pode ser exigido que a turbidez do efluente filtrado seja mais baixa se outras condicionantes não forem atendidas (PORTARIA, art. 29).

De Lukas van Vuuren, engenheiro da primeira EPE do planeta, inaugurada em 1968, em Windhoek, Namíbia: *Água deve ser considerada por sua qualidade, não por sua história*. (ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DE SAÚDE, 2017)

De José Carlos Mierzwa, presidente do Centro Internacional de Referência em Reúso da Água - CIRRA: *O reúso potável é o encurtamento do processo natural de reciclagem da água, cuja recuperação natural não acompanha a demanda de grandes centros urbanos. Ao invés de pegarmos o esgoto e o tratarmos em nível não tão elevado, com potencial inclusive de contaminar os mananciais, nós podemos usar novas tecnologias de tratamento e com isso encurtamos o ciclo de recuperação da qualidade da água*. (JORNAL da USP NO AR, 2021)

De HESPANHOL e MACHADO (2018): *As águas de qualidade inferior, tais como esgotos de origem doméstica, águas de lavagem de filtros de sistemas de tratamento de água, efluentes industriais, águas de drenagem agrícola e águas salobras eram consideradas como fontes alternativas para usos menos restritivos. Hoje, com o uso de tecnologias apropriadas, a Organização Mundial de Saúde (OMS) considera que a água dessas fontes pode abandonar sua condição de qualidade inferior para se transformar em água potável e, portanto, uma solução sustentável será a de tratar e reusar os esgotos já disponíveis nas áreas urbanas para complementar o abastecimento público*.

No presente trabalho, estamos apresentando como estudo de caso a proposta de construção de uma EPE por adaptação da segunda etapa da ETE Ibitité, cuja primeira etapa está em funcionamento. A vazão especificada de 140 L/s pelo projeto da empresa CONCREMAT (2011), doravante denominado PROJETO, ainda não foi atingida para a primeira etapa e não se espera que venha a sê-lo nos próximos 5 a 6 anos.

A Figura 1 apresenta uma foto da primeira etapa da ETE Ibitité, onde se observa a área onde o tratamento é realizado e onde está prevista a execução da segunda etapa.

No presente trabalho, vai ser mostrado como a segunda etapa da ETE Ibitité poderá se transformar em uma estação de potabilização de efluentes (EPE).



Figura 1: Estação de Tratamento de Esgoto de Ibirité (1ª etapa).

Fonte: *Google Earth*.

A Tabela 1 apresenta medições feitas na primeira etapa da ETE Ibirité.

Tabela 1: Concentrações médias na ETE Ibirité (1ª etapa).

| PARÂMETROS | UNIDADES | MÉDIAS EM 2021 | | MÉDIAS EM 2022 | |
|-------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | | ENTRADA | SAÍDA | ENTRADA | SAÍDA |
| Vazão | L/s | | 93,75 | | 107,7 |
| DBO ₅ | mg/L | 188,6 | 6,0 | 198,2 | 6,1 |
| DQO | mg/L | 426,9 | 28,6 | 461,9 | 30,6 |
| SST | mg/L | 200,7 | 9,2 | 208,5 | 7,1 |
| NTK | mg/L | 43,5 | 4,3 | 46,9 | 3,3 |
| N orgânico | mg/L | 12,7 | 3,1 | 12,6 | 2,4 |
| N amoniacal | mg/L | 30,8 | 1,2 | 34,3 | 0,9 |
| Nitrato | mg/L | | 12,2 | | 15,4 |
| Sulfeto | mg/L | 0,6 | <0,10 | 0,7 | <0,10 |
| Sulfato | mg/L | 41,9 | 40,0 | 48,6 | 43,8 |
| Fósforo | mg/L | 5,9 | 1,6 | 5,3 | 1,9 |
| OD MBBR 1 | mg/L | | 3,5 | | 3,1 |
| OD MBBR 2 | mg/L | | 3,4 | | 3,1 |
| OD convencional 1 | mg/L | | 3,8 | | 3,7 |
| OD convencional 2 | mg/L | | 3,9 | | 4,5 |
| IVL | mL/g | | 135,0 | | 137,5 |
| Turbidez | uT | | 4,6 | | 5,7 |
| E. coli | células/100 mL | 4,5x10 ⁷ | 9,0x10 ⁴ | 1,5x10 ⁷ | 2,6x10 ⁴ |
| Lodo primário | m ³ /dia | | 23,95 | | 32,04 |
| Lodo secundário | m ³ /dia | | 112,68 | | 80,48 |
| Lodo terciário | m ³ /dia | | 4,73 | | 3,31 |
| Lodo flotado | m ³ /dia | | 12,72 | | 15,06 |

| | | | |
|-------------------|---------|---------|---------|
| Energia produzida | kWh/mês | 13.850 | 15.803 |
| Energia comprada | kWh/mês | 102.504 | 137.900 |
| Energia consumida | kWh/mês | 116.353 | 153.703 |

Fonte: Dados divulgados com base na Lei nº 12.527/2011 (Lei de Acesso à Informação).

Propomos que a segunda etapa seja executada tendo como água bruta o efluente tratado da refinaria Gabriel Passos – REGAP, que será complementado pelo esgoto de Ibirité assim que a vazão da EPE atingir 140 L/s.

OBJETIVOS

São objetivos deste trabalho:

- Apresentar um método efetivo para combater a carência de água aproveitando recursos como esgoto e efluente industrial, que são obtidos no próprio local de consumo;
- Explicitar, por meio de um estudo de caso, que a transformação de uma estação de reúso não potável em uma estação de potabilização de efluentes pode ser feita com modificação ou acréscimo de apenas algumas unidades;
- Demonstrar que o reúso potável é economicamente viável pois centraliza em uma única estação o tratamento de esgoto e/ou efluentes industriais e o tratamento de água de abastecimento.

Não é objetivo do trabalho fazer o dimensionamento das unidades de tratamento modificadas ou acrescentadas no estudo de caso apresentado.

METODOLOGIA UTILIZADA

De acordo com o programa PEQUENAS EMPRESAS. GRANDES NEGÓCIOS (12.07.2022) da Rede Globo, já existe em Singapura cerveja feita com esgoto potabilizado. Portanto, não será discutida a metodologia utilizada em outros países para potabilizar efluentes sanitários ou industriais.

HESPANHOL (2015) informa que o reúso potável direto, além de resolver o problema da qualidade, que deixa a desejar em muitas estações de tratamento de água convencionais, produz segurança do abastecimento, considerando que o esgoto sanitário e os efluentes industriais são produzidos próximo ao local de consumo, dispensando longas e custosas adutoras, que coletam água de áreas algumas vezes afetadas por estresse hídrico. Ele faz a seguinte previsão:

É inexorável que, dentro de no máximo uma década, a prática do reúso potável direto, utilizando tecnologias modernas de tratamento e sistemas avançados de gestão de riscos e de controle operacional, será, apesar das reações psicológicas e institucionais que a constroem, a alternativa mais plausível para fornecer água realmente potável.

O reúso potável direto tem, sobre o reúso não potável, a vantagem de sensível redução do custo de outorga criado pelo art. 38, VI, da Lei Federal 9.433, de 8 de janeiro de 1997. No reúso potável direto, a outorga para captação de água se limita à vazão suplementar, que é necessária porque a relação água-esgoto se situa em torno de 0,8 e, por isso, a vazão média de consumo é superior à vazão média de descarte de esgoto em cerca de 25%. A outorga para lançamento de efluente, quando necessária, se limita à vazão destinada a diminuir a salinidade da água.

No estudo de caso apresentado, não haverá necessidade de vazão suplementar, pois a estação de potabilização de efluentes - EPE utilizará o efluente industrial da Refinaria Gabriel Passos – REGAP e o esgoto sanitário de Ibirité.

A ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DE SAÚDE (2017) publicou orientações sobre como criar uma estação de potabilização de efluentes e como evitar reações adversas ao consumo de seu efluente tratado. Segundo a OMS, uma ampla campanha de informação deve ser feita antes da execução da EPE.

A primeira etapa da ETE Ibirité está em funcionamento, com previsão de que seu efluente venha a ser usado como água de reúso industrial. Para isso, o PROJETO determina limites para a concentração de alguns

parâmetros no efluente final, conforme consta na Tabela 2, onde também se apresentam os correspondentes valores médios verificados.

Tabela 2: Limites do PROJETO e valores médios no efluente da ETE Ibirité.

| PARÂMETRO | UNIDADE | LIMITE | MÉDIA 2021 | MÉDIA 2022 |
|--|----------------|--------|---------------------|---------------------|
| Demanda bioquímica de oxigênio de 5 dias (DBO ₅) | mg/L | ≤5 | 6,0 | 6,1 |
| Demanda química de oxigênio (DQO) | mg/L | ≤15 | 28,6 | 30,6 |
| Fósforo | mg/L | ≤1 | 1,6 | 1,9 |
| Sólidos suspensos totais (SST) | mg/L | ≤5 | 9,2 | 7,1 |
| Nitrogênio total Kjeldahl (NTK) | mg/L | ≤2 | 4,3 | 3,3 |
| Nitrato (como N) | mg/L | ≤8 | 12,2 | 15,4 |
| Nitrogênio total (NT) | mg/L | ≤10 | 16,5 | 18,7 |
| Coliformes termotolerantes | células/100 mL | ≤1.000 | 4,5x10 ⁷ | 1,5x10 ⁷ |

Notas:

1 – Os valores médios observados em 2021 e em 2022 não atendem a nenhum dos parâmetros do PROJETO, mas a câmara MBBR, o filtro de disco e o tratamento por radiação UV não estavam em funcionamento.

2 – A PORTARIA não especifica limites para DBO₅, DQO, fósforo ou SST.

3 – A PORTARIA não estabelece limite para NTK, mas apenas para amônia: 1,2 mg/L.

4 – A PORTARIA estabelece limite de 10 mg/L para nitrato.

Fontes: PORTARIA e PROJETO.

A PORTARIA não especifica limite para NT, mas, em seu art. 39, limita a combinação das concentrações de nitrato e nitrito:

$$A*[\text{NO}_3^-] + B*[\text{NO}_2^-] \leq 1 \quad (1)$$

Em que A é o inverso da concentração máxima de nitrato e B o inverso da concentração máxima de nitrito.

Na EPE, A = 0,125, pois a concentração máxima de NO₃⁻ especificada no PROJETO é 8 mg/L e B =1, pois a concentração máxima de NO₂⁻ é 1 mg/L conforme o Anexo 9 da PORTARIA.

A Tabela 3 faz uma comparação entre as unidades da ETE Ibirité e as unidades da proposta da EPE Ibirité. A primeira coluna da tabela divide o tratamento na ETE em seis grupos de tratamento: tratamento preliminar, tratamento primário, tratamento biológico, tratamento físico-químico, desinfecção e unidades complementares e tratamento sólido.

A segunda coluna da Tabela 3 apresenta as unidades da proposta para a EPE Ibirité em cinco grupos de tratamento, de vez que o tratamento primário não será realizado, por ser prejudicial ao tratamento biológico.

A Tabela 3 não faz referência à estação de tratamento de despejos industriais (ETDI) da REGAP, porque esta se encontra em funcionamento. Após serem modificadas algumas de suas unidades, o efluente da ETDI deverá ser direcionado à EPE.

Tabela 3: Unidades de tratamento da ETE Ibirité e da EPE Ibirité.

| ETE IBIRITÉ | EPE IBIRITÉ |
|------------------------------|-----------------------|
| TRATAMENTO PRELIMINAR | |
| Grades | Grades |
| Medidor Parshall | Medidor Parshall |
| Desarenadores aerados | Desarenadores aerados |
| Peneiras | Peneiras |
| | Tanque de equalização |
| Desodorizador | Desodorizador |

| | |
|--------------------------------------|---------------------------------------|
| Leito de secagem | Leito de secagem |
| Aterro sanitário | Aterro sanitário |
| TRATAMENTO PRIMÁRIO | |
| Decantadores primários | |
| TRATAMENTO BIOLÓGICO | |
| Câmara anóxica | 1ª câmara anóxica |
| Câmara MBBR | Câmara MBBR |
| | 2ª câmara anóxica |
| Câmara aeróbia convencional | Câmara aeróbia convencional |
| Decantadores secundários | Decantadores secundários |
| | Carvão ativado granular |
| TRATAMENTO FÍSICO-QUÍMICO | |
| Mistura rápida (menor) | Mistura rápida (maior) |
| Floculador | Floculadores |
| Decantadores terciários | Decantadores terciários |
| Filtro de disco | Filtro de disco |
| | Resinas de troca iônica |
| | Tanque de neutralização |
| | Flotador do tratamento físico-químico |
| | Tanque de distribuição |
| | Filtros de antracito e areia |
| | Reservatório elevado |
| DESINFECÇÃO E UNIDADES FINAIS | |
| Radiação UV | Radiação UV |
| | Cloração |
| | Fluoretação |
| | Correção de pH |
| TRATAMENTO SÓLIDO | |
| Adensador por gravidade | |
| Flotador do tratamento sólido | Flotador do tratamento sólido |
| Digestores primários | Wetland de lodo |
| Digestor secundário | |
| Centrífuga | Centrífuga |
| Secagem térmica | Secagem térmica |
| | Compostagem |
| Aterro sanitário | Aterro sanitário |

Notas:

- 1 – O efluente da REGAP se juntará ao esgoto depois de este passar pelas peneiras.
- 2 – Será acrescentado um tanque de equalização para que o esgoto e o efluente da REGAP se juntem.
- 3 – O tanque de equalização não precisará ser protegido por desodorizador porque o líquido será agitado pelos misturadores, facilitando a entrada de ar e evitando odores desagradáveis.
- 4 – Não haverá tratamento primário na EPE porque este não é recomendado quando se usa a desnitrificação, pois os decantadores primários diminuem a carga orgânica de 30 a 35%. (VON SPERLING, 2016, item 7.4.1)
- 5 – O tanque de mistura rápida terá volume muito menor que o indicado no PROJETO, que prevê tempo de detenção de mais de 12 minutos, pois a NBR 12.216, item 5.8.2, fixa em 5 segundos o tempo de detenção máximo para a mistura rápida.
- 6 – O PROJETO prevê apenas um floculador. Entretanto, a NBR 12.216, item 5.9.2, exige um mínimo de três floculadores em série.
- 7 – Como não haverá decantadores primários, não haverá adensador por gravidade.
- 8 – A unidade de carvão ativado granular terá por objetivo, dentre outros, a remoção de precursores de trihalometanos e de resíduos de óleo que possam ser carreados da estação de tratamento de despejos industriais (ETDI) da REGAP.

Fontes: Organização dos autores a partir de NBR 12.216, LIMA (2015) e SEMAD (2023).

As modificações farão com que a segunda etapa da ETE Ibirité, transformada em EPE, atenda às recomendações do PROJETO, e às exigências da PORTARIA GM/MS nº 888/2021 (doravante denominada PORTARIA).

A PORTARIA estabelece os seguintes padrões para a água ser considerada potável:

- Padrão bacteriológico;
- Padrão de turbidez;
- Padrão de substâncias inorgânicas;
- Padrão de substâncias orgânicas;
- Padrão de agrotóxicos e metabólitos;
- Padrão de subprodutos da desinfecção;
- Padrão de cianotoxinas;
- Padrão organoléptico.

Os poluentes orgânicos persistentes foram definidos na Convenção de Estocolmo de 22 de maio de 2001, que foi aprovada, no Brasil, pelo Decreto Legislativo 204 de 7 de maio de 2004. Não há, na PORTARIA, um padrão para poluentes orgânicos persistentes e a PORTARIA cita apenas os POPs listados na Tabela 4.

Tabela 4: Poluentes Orgânicos Persistentes (POPs) citados na PORTARIA.

| POLUENTE ORGÂNICO PERSISTENTE | UNIDADE | VMP | OBSERVAÇÃO |
|--------------------------------------|----------------|------------|--|
| Pentaclorofenol | µg/L | 9 | Substância orgânica |
| Lindano | µg/L | 2 | Agrotóxico |
| DDT + DDD + DDE | µg/L | 1 | O agrotóxico DDT é proibido no Brasil. |
| Clordano | µg/L | 0,2 | Agrotóxico |
| Aldrin + Dieldrin | µg/L | 0,03 | Agrotóxicos |

Fonte: PORTARIA.

Tanto o efluente da REGAP quanto o esgoto de Ibirité podem conter outros POPs além dos citados. Será conveniente, portanto, adotar a ausência de um deles como indicador da ausência dos demais, como ocorre com a *Escherichia coli* na indicação ou não de contaminação bacteriológica nos sistemas de distribuição de água.

A substância a ser usada como indicador da presença de POPs é o etinilestradiol, hormônio presente nos anticoncepcionais e frequente no esgoto sanitário. Não é tóxico, mas possui as demais propriedades características de um POP: semivolatilidade, persistência e bioacumulação e sua cadeia molecular, que exige 25 moléculas de O₂ para ser oxidada completamente, o tornam apto, estando ausente, a ser considerado indicador da ausência de POPs em geral.

Portanto, além dos padrões indicados na PORTARIA, deverá ser verificada a ausência, no efluente final, de resquícios de óleo.

O tratamento por radiação UV indicado no PROJETO não objetiva a inativação de todos os coliformes termotolerantes, mas de reduzir sua concentração ao limite de 1.000 células/mL. Entretanto, para que o efluente seja considerado água potável, será preciso que haja inativação e/ou eliminação de todos os microrganismos patogênicos. Por isso, é preciso que a absorvância de radiação UV seja de, no mínimo, 75%.

Para se obter esse índice de absorvância, torna-se necessário que o líquido chegue ao tratamento por radiação UV atendendo aos limites indicados na Tabela 5, onde constam, para efeito de comparação, os respectivos VMP indicados na PORTARIA.

Tabela 5: Limites indicados para absorvância de 75% da radiação UV.

| PARÂMETRO | UNIDADE | LIMITES | | OBSERVAÇÕES |
|--|---------|-------------|---|---|
| | | FABRICANTES | PORTARIA | |
| Dureza total | mg/L | ≤120 | ≤300 | Dureza excessiva da água pode provocar precipitação de carbonato de cálcio sobre as lâmpadas. |
| Ferro | mg/L | ≤0,3 | ≤0,3 | Concentração excessiva de ferro pode provocar cor avermelhada à água, dificultando a passagem da radiação UV. |
| Manganês | mg/L | ≤0,05 | ≤0,1 | Concentração excessiva de manganês pode provocar cor amarelada à água, dificultando a passagem da radiação UV. |
| pH | | ≥6,5; ≤9,5 | | pH muito baixo pode provocar corrosão nas lâmpadas; pH muito alto pode provocar precipitação sobre as lâmpadas. |
| Sólidos em suspensão totais (SST) | mg/L | ≤10 | | Concentração excessiva de SST provoca aumento da turbidez, dificultando a passagem da radiação UV. |
| Sulfeto de hidrogênio (H ₂ S) | mg/L | ≤0,05 | ≤0,05 | Excesso de H ₂ S pode provocar corrosão dos bulbos das lâmpadas. |
| Tanino | mg/L | ≤0,1 | | Concentração excessiva de tanino pode provocar cor amarelada à água, dificultando a passagem da radiação UV. |
| Turbidez | uT | ≤1 | A turbidez máxima permitida para o efluente filtrado é de 0,5 uT em 95% das amostras se a média geométrica da concentração de E. coli nos últimos 12 meses for inferior a 1.000 células/100 mL. | Exige-se turbidez máxima de 0,3 uT para o efluente filtrado se a média geométrica da concentração de E. coli nos últimos 12 meses for igual ou superior a 1.000 células/100 mL. Pode ser mantido o limite de turbidez de 0,5 uT: Se houver redução de 99,7% na concentração de esporos de bactérias aeróbias; Se a média aritmética na concentração de oocistos nos pontos de captação for inferior a 1,0 célula/100 mL; Se for usado processo de desinfecção para remoção de oocistos com a mesma eficiência que a redução da turbidez (é o caso da radiação ultravioleta). |

Fontes: Speed Air Filtros e Equipamentos; Fast Filtros Purificação de Água; Technolamp e PORTARIA.

GRUPOS DE TRATAMENTO A SEREM FEITOS NA EPE IBIRITÉ

A EPE Ibirité demandará os seguintes grupos de tratamento:

TRATAMENTO DO EFLUENTE DA REGAP

O tratamento na estação de tratamento de despejos industriais da REGAP foi projetado para que seu efluente possa ser lançado no córrego Pintado e, de lá, seguir para a lagoa de Ibitité. Suas unidades de tratamento (Figura 2) são:

- Bacia de águas contaminadas;
- Separador de água e óleo;
- Tanque pulmão;
- Flotador por ar induzido;
- Bacia de aeração sul;
- Bacia de aeração norte;
- Lagoa de polimento.

O maior problema verificado com o efluente da ETDI são os resíduos de óleo que se incluem nos óleos e graxas minerais, limitados em 20 mg/L pelo art. 34, § 4º, V, 1 da RESOLUÇÃO CONAMA 357, de 17 de março de 2005 (doravante denominada CONAMA 357). Contudo, mesmo com esse limite respeitado, por ser menos denso que a água, o óleo presente no efluente da REGAP se acumula na superfície da lagoa de Ibitité, dando-lhe aparência ruim.

TRATAMENTO PRELIMINAR

Deverá ser acrescentado o tanque de equalização, que juntará o esgoto, após passar pelas peneiras, ao efluente da REGAP.

Serão as seguintes as unidades do tratamento preliminar:

- Grades;
- Medidor Parshall (para medir a vazão de esgoto que chegar à EPE);
- Desarenadores aerados;
- Peneiras;
- Tanque de equalização.

TRATAMENTO PRIMÁRIO

O tratamento primário será excluído para não prejudicar o tratamento biológico, pois reduziria a matéria orgânica disponibilizada para a desnitrificação.

TRATAMENTO BIOLÓGICO

O tratamento biológico deverá ser modificado em relação ao projeto, adotando-se o sistema Bardenpho de quatro estágios, que é mais eficiente na remoção de nitrogênio total. Para isso, deverá ser incluída uma segunda câmara anóxica.

Deverá também ser alterado tanto o sistema de recirculação como o descarte de lodo. A recirculação deverá ser feita para a primeira câmara anóxica a partir da câmara MBBR e não da câmara aeróbia convencional como consta no PROJETO.

Todo o lodo dos decantadores secundários será recirculado para a primeira câmara anóxica, de onde sairá o excesso de lodo para o wetland, embora conste no PROJETO que o excesso de lodo seja direcionado ao tratamento sólido. A primeira câmara anóxica deverá ser redimensionada para comportar essa vazão adicional.

Serão as seguintes as unidades do tratamento biológico:

- Primeira câmara anóxica;
- Câmara MBBR;
- Segunda câmara anóxica;

- Câmara aeróbia convencional;
- Decantadores secundários;
- Carvão ativado granular.

TRATAMENTO FÍSICO-QUÍMICO

O tratamento físico-químico terá o acréscimo de unidades para a dessalinização por resinas de troca iônica (resinas de troca iônica, tanque de neutralização) para melhoria das condições de descarte (flotador do tratamento físico-químico) e para a filtração (tanque de distribuição, filtros rápidos de dupla camada e reservatório de lavagem de filtros).

As unidades do tratamento físico-químico serão as seguintes:

- Mistura rápida;
- Flocladores;
- Decantadores terciários;
- Filtro de disco;
- Resinas de troca iônica;
- Tanque de neutralização;
- Flotador do tratamento físico-químico;
- Tanque de distribuição;
- Filtros rápidos de dupla camada;
- Reservatório de lavagem de filtros.

DESINFECÇÃO E UNIDADES COMPLEMENTARES

Além da desinfecção por radiação UV prevista no PROJETO, haverá a aplicação de ácido tricloroisocianúrico, a fluoretação, a correção de pH e o medidor Parshall.

As unidades de desinfecção e complementares serão as seguintes:

- Desinfecção por radiação ultravioleta;
- Aplicação de ácido tricloroisocianúrico;
- Fluoretação;
- Correção de pH;
- Medidor Parshall.

TRATAMENTO SÓLIDO

O tratamento sólido ficará reduzido, pois não haverá biodigestores. Serão as seguintes as unidades do tratamento sólido:

- Wetland de lodo;
- Flotador do tratamento sólido;
- Centrífuga;
- Secador térmico;
- Compostagem;
- Aterro sanitário.

DETALHAMENTO DAS UNIDADES DOS GRUPOS DE TRATAMENTO NA EPE IBIRITÉ

Serão as seguintes as unidades dos diversos grupos de tratamento para a potabilização dos efluentes:

EFLUENTE DA REGAP

O efluente da REGAP se divide em duas categorias: drenagem oleosa e drenagem não contaminada. Ambas são lançadas no córrego Pintado, de acordo com as normas de CONAMA 357.

Para que a drenagem oleosa da REGAP possa ser usada de forma eficiente na EPE, serão necessárias algumas modificações para aumentar sua eficiência de tratamento. (Figura 2)

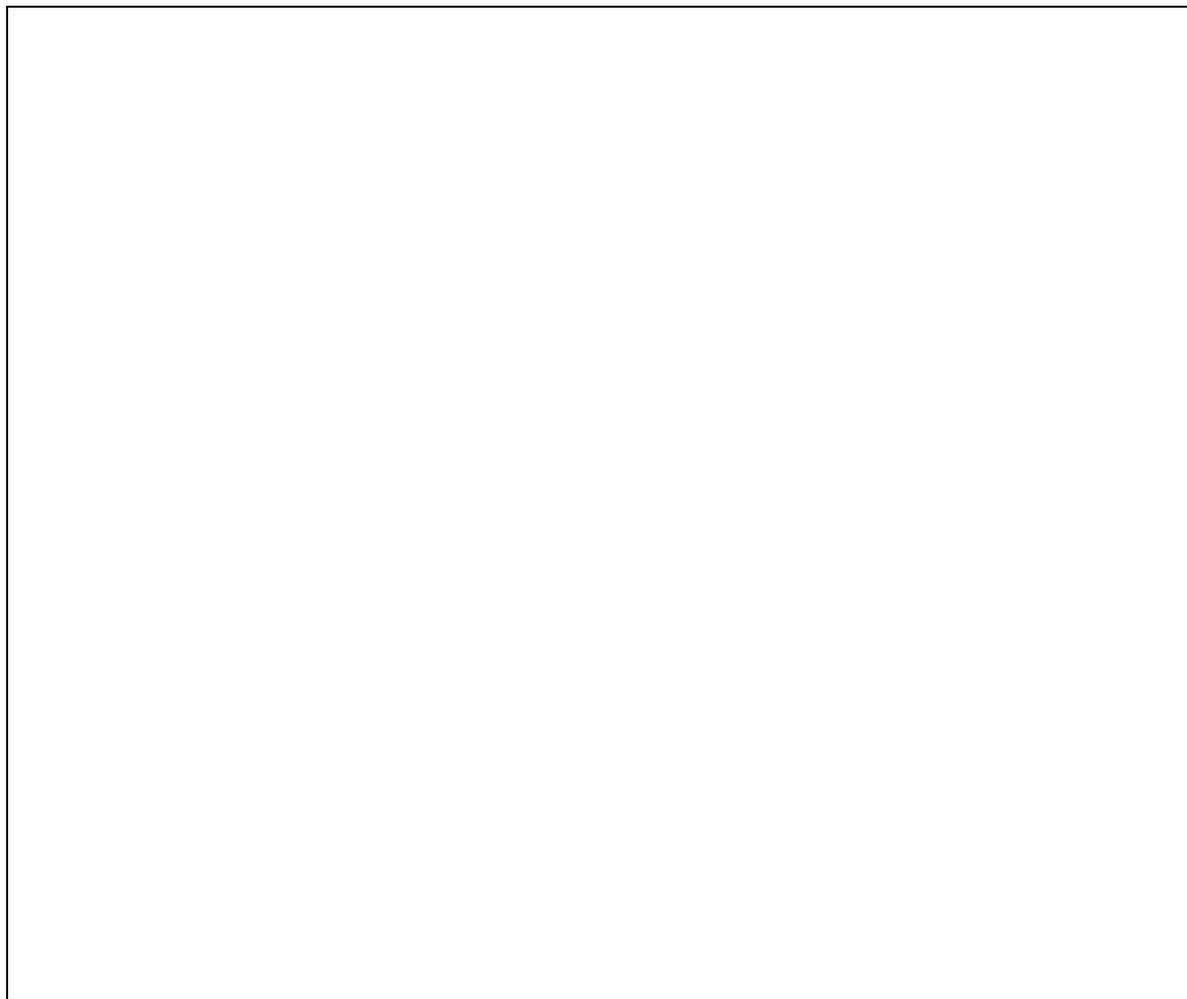


Figura 2: Modificações no tratamento do efluente da REGAP.

Fonte: Organização dos autores a partir do Parecer nº 88/SEMAD/SUPRAM CENTRAL-DRRA/2023.

DETALHAMENTO DO TRATAMENTO DA DRENAGEM OLEOSA DA REGAP

A drenagem oleosa da REGAP se direciona aos separadores de água e óleo (SAO), indo o excesso para a bacia de águas contaminadas. Estamos propondo que toda a drenagem oleosa vá para a BAC antes de ir para o SAO.

BACIA DE ÁGUAS CONTAMINADAS

A bacia de águas contaminadas (BAC) foi construída para receber o excesso de águas oleosas, com o objetivo de encaminhamento gradual ao SAO. Durante sua construção, foi necessário desviar o córrego do Patrimônio. Terminada a obra, o córrego retornou a seu leito, que passa por baixo da BAC, passando a fazer uma grande pressão de baixo para cima, que rompeu sua laje de fundo. Desse modo, o nível de água da BAC passou a ser regulado pelo NA do córrego do Patrimônio. Em épocas de chuvas intensas, esse nível sobe muito.

Para reduzir a vazão da ETDI, será necessário desviar novamente o córrego e executar uma cortina de concreto que o impeça de retornar a seu leito por baixo da BAC. Em seguida, a BAC deverá ser esvaziada e limpada e, em seguida, reparada a fissura na laje.

A BAC é precedida por um desarenador. Deverá ser feito outro desarenador, de modo que um deles possa ser retirado de operação, mantendo-se o outro em funcionamento. Também deverá ser feito um dreno para conduzir o material que se acumula no fundo da BAC ao *landfarming*.

A borra dos tanques de armazenamento, que atualmente é conduzida à bacia de aeração sul, deverá passar a ser lançada na BAC, diminuindo-se, assim, um dos problemas que tem sido causa da presença de resíduos oleosos na lagoa de polimento.

Após essas modificações, todo o esgoto oleoso deverá ser direcionado à BAC. O efluente da bacia continuará a ser encaminhado ao SAO.

SEPARADORES DE ÁGUA E ÓLEO

Os separadores de água e óleo (SAO) recebem o efluente da BAC e a drenagem oleosa lançada diretamente sobre eles. São unidades em paralelo que, como o próprio nome indica, se destinam a fazer a separação, por gravidade, do óleo não emulsionado. Uma gota de óleo com 100 µm tem a velocidade ascensional média de 1,5 cm/min e pode ser facilmente capturada e direcionada ao *landfarming*. Todavia, uma gota de 20 µm tem a velocidade ascensional média de 0,75 cm/h, podendo ser arrastada pelo fluxo aquoso. Para evitar que gotas menores sejam arrastadas pelo fluxo, os SAO contêm recheios aglutinantes que capturam as gotas pequenas e as agregam em gotas maiores, com maior velocidade de ascensão. Com isso, os SAO têm permitido o atendimento ao art. 34, § 4º, V, 1 de CONAMA 357, que admite concentração de até 20 mg/L de óleos e graxas minerais nos efluentes lançados em corpos de água.

Com toda a drenagem oleosa da refinaria passando pela bacia de águas contaminadas antes de ir para o SAO e com a BAC não recebendo mais água do córrego do Patrimônio, será possível fazer um fluxo constante de entrada no SAO, que passará a ter melhor funcionamento.

CONAMA 357 admite até 20 mg/L de óleos e graxas minerais no efluente descartado, mas, no efluente de uma EPE, não é admissível a presença de óleo. Para que este deixe de chegar ao efluente da lagoa de polimento, sugerimos o acréscimo de duas unidades de SAO em paralelo, a jusante das atuais.

O efluente do SAO é direcionado ao tanque pulmão e o óleo removido é direcionado ao *landfarming*.

TANQUE PULMÃO

O objetivo do tanque pulmão é de regularizar o fluxo do líquido encaminhado do SAO ao flotor por ar induzido.

O óleo em suspensão e o lodo retirado do fundo do tanque pulmão são remetidos ao *landfarming*.

FLOTADOR POR AR INDUZIDO

Na unidade de flotação por ar induzido, as bolhas de ar geradas tendem a ir à superfície, levando o óleo e outras partículas em suspensão. Com a adição de coagulante químico, floculante e corretor de pH, as partículas dissolvidas que não flutam tendem a se agrupar e a se precipitar.

O lodo removido é dirigido ao *landfarming* e o efluente líquido vai para a bacia de aeração sul.

FOSSAS SÉPTICAS

As fossas sépticas são destinadas ao tratamento primário do esgoto sanitário. Seu efluente vai para o biodigestor e o lodo removido vai para leitos de secagem.

BIODIGESTOR E TANQUES DE ARMAZENAMENTO

O efluente das fossas sépticas é tratado no biodigestor. Os gases produzidos são liberados para a atmosfera e o lodo é removido para leitos de secagem. O efluente líquido é direcionado à bacia de aeração sul.

Também é lançado na BAS a borra dos tanques de armazenamento, recolhida por meio de caminhões tanque. Essa borra é um dos responsáveis pela presença de resíduos oleosos no efluente da lagoa de polimento. Por isso, os caminhões tanque deverão lançar esse resíduo na BAC, que estará apta a direcionar o lodo recolhido em seu fundo para o *landfarming*.

BACIA DE AERAÇÃO SUL (BAS)

A bacia de aeração sul possui aeradores de superfície para fornecer energia, com vistas a oxidar o efluente do tratamento por flotação, ao qual são adicionados tripolifosfato e cal para facilitar a precipitação dos sólidos.

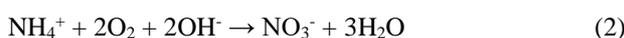
Um dos grandes problemas no tratamento do efluente da REGAP no passado foi a remoção de amônia para colocar o efluente da REGAP de acordo com o art. 34, § 5º, da CONAMA 357, o qual estabelece que um efluente lançado em corpo de água não pode ter concentração de nitrogênio amoniacal superior a 20 mg/L. A concentração de amônia na drenagem oleosa está acima desse limite.

A NBR 12.209, que trata do tratamento de esgoto, indica, em seu item 6.6.17, que, para se certificar da oxidação da amônia a nitrito e deste a nitrato, a relação alimento/microrganismo (A/M) deve ser, no máximo, de 0,35 para esgoto bruto ou decantado. A baixa relação A/M força os microrganismos a oxidar a amônia por carência de alimento.

Com o objetivo de se aumentar a concentração de microrganismos, reduzindo-se o índice A/M, é lançado na BAS o efluente do biodigestor e a borra dos tanques de armazenamento.

Com o fim de aumentar a concentração de microrganismos necessária ao processo de nitrificação, é feita a recirculação de uma parcela do efluente da unidade de biodiscos a ambas as bacias de aeração.

A transformação do nitrogênio amoniacal em nitrato é feita conforme a seguinte equação:



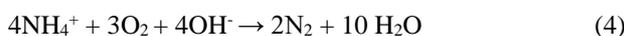
CONAMA 357 não faz restrição à concentração de nitrato no efluente lançado em um corpo de água. Por isso, não existe procedimento de controle de sua concentração no efluente da REGAP, apesar de NO_3^- ser o principal alimento de algas, tendo contribuído, no passado, para a eutrofização da lagoa de Ibirité quando esta recebia esgoto bruto.

O PROJETO (Tabela 2) especifica concentração máxima de NO_3^- de 8 mg/L na água para reúso. Esse limite é inferior ao previsto na PORTARIA (VMP de 10 mg/L). Para que o efluente da REGAP possa ser transformado em água potável e possa ser usado como água de reúso, deverá haver o processo de desnitrificação, cuja equação é a seguinte:



Para que haja nitrificação e desnitrificação, será conveniente dividir a BAS em duas zonas: a zona de montante, que funcionará em ambiente anóxico, onde ocorrerá a desnitrificação, e a zona de jusante, onde se localizarão os aeradores de superfície, que fornecerão o oxigênio requerido pelos microrganismos para realizar a conversão da amônia a nitrato. Da zona de jusante para a zona de montante deverá haver recirculação interna, com taxa mínima de 50%. Não se trata da razão ideal para remoção de nitrogênio, mas, como a BAS não foi projetada prevendo-se a recirculação, uma taxa maior poderia comprometer seu funcionamento.

A combinação das equações (1) e (2) fornece a equação global da nitrificação seguida de desnitrificação:



Com relação à alcalinidade, as equações (1) a (3) apresentam as seguintes informações:

- a) Nitrificação – Para cada unidade de NH_4^+ nitrificada, há necessidade de duas hidroxilas;
- b) Desnitrificação – Para cada unidade de NO_3^- reduzida a nitrogênio molecular, há a produção de uma hidroxila;
- c) Nitrificação e desnitrificação – Para cada unidade de NH_4^+ nitrificada e reduzida a nitrogênio molecular, há necessidade de apenas uma hidroxila.

O aumento da alcalinidade em ambas as bacias de aeração é feito por adição de bicarbonato ao efluente da unidade de biodiscos que retorna às bacias de aeração.

Com a divisão das bacias de aeração em zona anóxica e zona aeróbia, a recirculação deverá se dirigir da unidade de biodiscos para a zona aeróbia de ambas as bacias, porque na zona anóxica há produção de alcalinidade, como indicado na alínea “b” anterior. A divisão das bacias de aeração em zonas, além de aumentar a remoção de nitrogênio total, representará economia do bicarbonato adicionado ao efluente da unidade de biodiscos.

Na saída da BAS, deverá haver um anteparo para retenção de eventual resíduo de óleo em suspensão. Sólidos e óleo recolhidos deverão ser removidos para o *landfarming*.

O efluente da BAS segue para a bacia de aeração norte.

BACIA DE AERAÇÃO NORTE (BAN)

A BAN recebe o efluente da BAS e a recirculação de uma parcela do efluente da unidade de biodiscos para levar-lhe microrganismos e a alcalinidade proveniente da adição de bicarbonato naquela unidade.

Para que haja nitrificação e desnitrificação, será também conveniente dividir a BAN em duas zonas: a zona de montante, sem aeradores, conservará ambiente anóxico, em condições de remover parte do nitrato remanescente do tratamento na BAS; os aeradores serão concentrados na zona de jusante, em ambiente aeróbio, onde ocorrerá a conversão da amônia a nitrato.

Deverá haver recirculação interna, com taxa mínima de 50% com o objetivo de levar o nitrato produzido na zona de jusante, aeróbia, para a zona de montante, anóxica.

Na saída da BAN, há uma tela para retenção de sólidos e deverá haver também um anteparo para segurar o óleo em suspensão.

Sólidos e óleo recolhidos deverão ser removidos para o *landfarming*. O efluente da BAN segue para a unidade de biodiscos.

UNIDADE DE BIODISCOS

Os biodiscos são um processo aeróbio, em que o líquido passa por um tanque, em que há discos ligeiramente espaçados, montados num eixo horizontal, girando continuamente. Cerca de metade da área superficial fica imersa e o restante fica exposto ao ar, permitindo crescimento da biomassa aderida aos discos, formando um biofilme. Quando a espessura do biofilme aumenta, tende a se desprender, precipitando-se dentro do tanque.

O item 6.5.2 da NBR 12.209 especifica algumas regras para a unidade de biodiscos que não são cumpridas:

- Os biodiscos devem ser precedidos de remoção de sólidos grosseiros e de areia ou de decantação primária ou de outra unidade de remoção de sólidos em suspensão;
- Os biodiscos requerem o emprego de decantação secundária;
- Os biodiscos podem dispor de mais de um estágio em série, sendo que a carga orgânica aplicada máxima não deve exceder a 30 g/m².d no primeiro estágio e à carga orgânica de 15 g/m².d como média em todos os estágios;

Para maior eficiência, a unidade de biodiscos deveria ter sido inserida após a lagoa de polimento. Contudo, sua execução foi feita principalmente para que uma parcela da biomassa nela desenvolvida seja fornecida tanto à

BAS como à BAN por meio de recirculação de parte de seu efluente, objetivando maior eficiência do processo de oxidação da amônia.

Na vazão de recirculação, é feita adição de bicarbonato para suprir a alcalinidade consumida na nitrificação. Com a divisão das bacias de aeração em zonas anóxica e aeróbia, a adição de bicarbonato deverá ser dirigida à zona aeróbia de cada bacia, com seu consumo sendo reduzido em relação ao consumo atual.

O material removido é direcionado ao *landfarming* e o efluente da unidade de biodiscos vai para a lagoa de polimento.

LAGOA DE POLIMENTO

O tratamento do efluente da REGAP se encerra em uma lagoa facultativa, conhecida como lagoa de polimento (LAP).

As reações aeróbias se processam em sua superfície, enquanto as reações anaeróbias se processam perto de seu fundo. Essas reações provocam a degradação da matéria orgânica remanescente e a redução do lodo biológico, mas permanecem partículas de óleo.

Como o limite de 20 mg/L de óleos e graxas minerais permitido por CONAMA 357 não é tolerado na água potável, o líquido em tratamento na EPE deverá passar por leitos de carvão ativado para remoção do óleo remanescente.

LANDFARMING

O *landfarming* é um local onde é feita a aplicação dos resíduos de petróleo na superfície do solo. É periodicamente arado e gradeado para permitir a entrada de ar e a mistura mais uniforme do material, possibilitando sua degradação microbiológica.

O *landfarming* recebe o lodo de fundo do tanque pulmão e do flotador e mais a espuma das seguintes unidades:

- BAC;
- SAO;
- Tanque pulmão;
- Flotador;
- BAS;
- BAN;
- Biodiscos.

Recebendo tratamento intensivo antes de chegar à EPE, o efluente da REGAP não precisará passar por grades, desarenadores ou peneiras. Desse modo, apenas o esgoto direcionado à EPE passará por grades, desarenadores aerados e peneiras conforme a Figura 3.

O efluente do tratamento preliminar será encaminhado ao tratamento biológico.

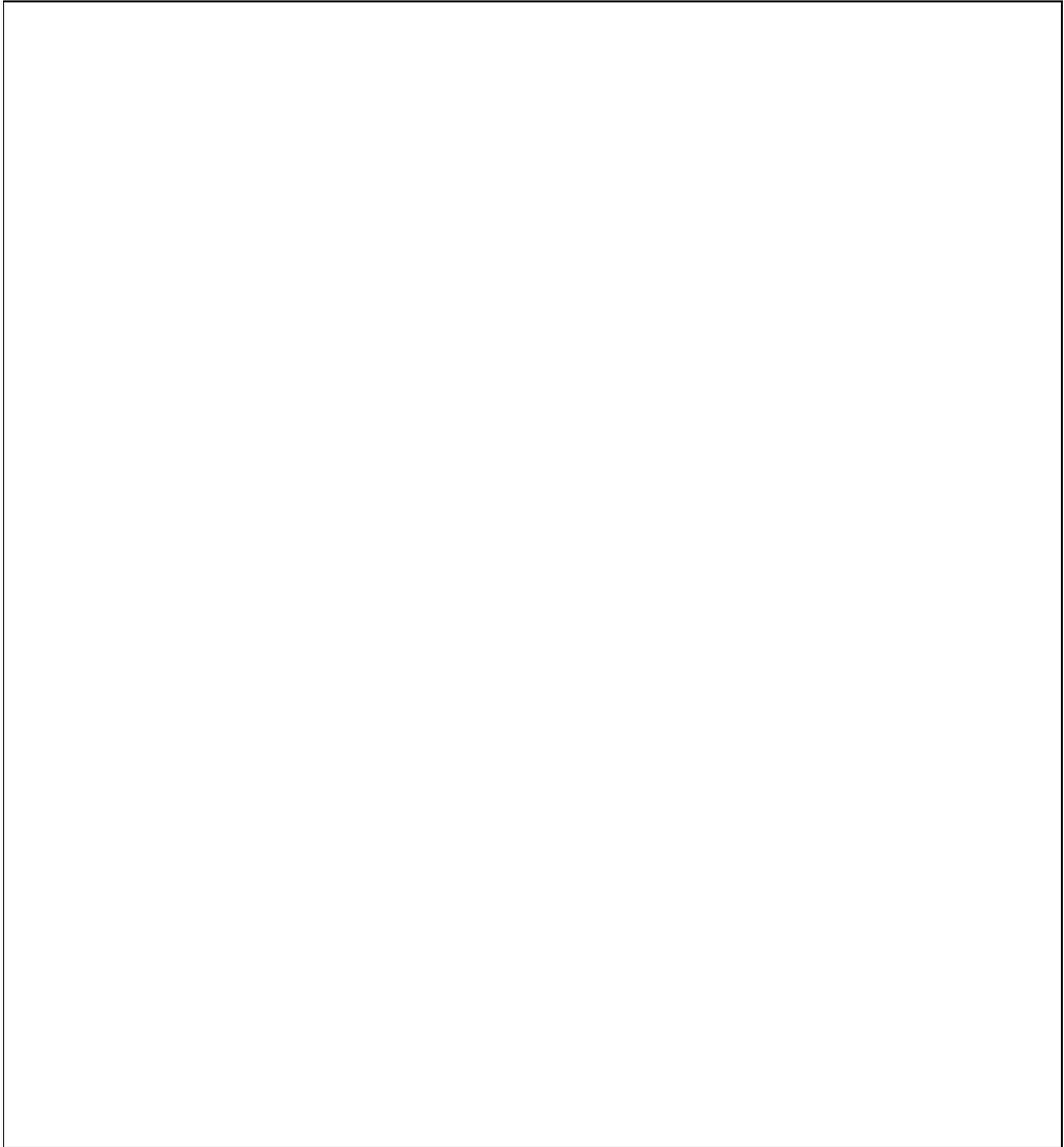


Figura 3: Tratamento preliminar

Fonte: Organização dos autores a partir do PROJETO.

Segue a descrição das unidades do tratamento preliminar:

EFLUENTE DA REGAP

O efluente da REGAP irá para a EPE, onde se juntará ao esgoto no tanque de equalização.

GRADES

As grades objetivam retirar o lixo do esgoto, comumente presente, mas que não deveria estar lá. De acordo com o PROJETO, as grades serão mecanizadas e protegidas por desodorizador.

Após passar pelas grades, o esgoto se dirigirá a um medidor Parshall. O material gradeado será removido e direcionado ao aterro sanitário.

MEDIDOR PARSHALL

O medidor Parshall objetiva medir a vazão de esgoto que chegar à EPE, cuja vazão, somada à vazão do efluente da REGAP, deverá estar em torno de 140 L/s.

O medidor Parshall será protegido por desodorizador.

Após passar pelo medidor Parshall, o esgoto deverá ir para os desarenadores aerados.

DESARENADORES AERADOS

Os desarenadores aerados deverão remover o material grosseiro em suspensão, particularmente a areia. Serão protegidos por desodorizador.

A espuma deverá seguir para o flotor do tratamento sólido. O material decantado deverá seguir para o leito de secagem e, em seguida. Seu efluente deverá seguir para as peneiras.

PENEIRAS

As peneiras deverão ter aberturas entre 0,25 e 10 mm. (NBR 12.209, item 6.1.8) e, de acordo com o PROJETO, deverão completar o tratamento preliminar.

O material removido deverá ser recolhido em caçambas e levado para o leito de secagem e seu efluente deverá ser dirigido ao tanque de equalização.

TANQUE DE EQUALIZAÇÃO

O tanque de equalização receberá o efluente da unidade de carvão ativado e o esgoto, depois de ter passado pelas peneiras. Esse tanque deverá ser provido de misturadores para facilitar a homogeneização do líquido. A agitação provocada pelos misturadores facilitará a entrada de ar no tanque, mantendo a condição aeróbia e, por isso, não precisará de desodorizador. Para evitar eventual condição anaeróbia, que poderia levar à formação de H₂S, o tempo de detenção no tanque não deverá ultrapassar 30 segundos para a vazão de 140 L/s.

O tanque de equalização possuirá duas câmaras contíguas de 2,1 m³ de volume, permitindo que uma delas seja retirada de operação, com a outra em funcionamento. A espuma recolhida deverá ser direcionada ao flotor do tratamento sólido e o efluente líquido, incluindo o lodo de fundo, se dirigirá ao tratamento biológico.

LEITO DE SECAGEM

O leito de secagem terá por objetivo possibilitar a retirada da umidade do material recolhido no tratamento preliminar antes de ir para o aterro sanitário.

ATERRO SANITÁRIO

O aterro sanitário visa o condicionamento adequado do material removido no tratamento preliminar e no tratamento sólido.

TRATAMENTO BIOLÓGICO

O tratamento biológico (Figura 4) deverá ser feito pelo sistema Bardenpho de quatro estágios, seguido por decantadores secundários.

A eficiência do sistema Bardenpho na remoção de nitrogênio total é igual ou superior a 90% (VON SPERLING, 2016, item 10.1.1, “c”), se, na entrada do tratamento, houver a relação $DBO_5/NO_3 \geq 4,5$.

Como deverá ser baixa a concentração de nitrogênio no efluente da LAP, o sistema Bardenpho será útil, principalmente, ao tratamento do esgoto.

O PROJETO prevê recirculação externa dos decantadores secundários para a câmara anóxica, com o excesso de lodo indo para o tratamento sólido, e recirculação interna da câmara aeróbia convencional também para a câmara anóxica.

Na EPE, a recirculação externa será total, não havendo remessa do excesso de lodo para o tratamento sólido e a recirculação interna será da câmara MBBR para a primeira câmara anóxica.

Dentro o princípio de barreiras múltiplas, será acrescentada uma unidade de carvão ativado granular, com o objetivo de remover eventuais resíduos de óleo que possam ter entrado na EPE e não tenham sido removidos pelo tratamento biológico, bem como eventuais compostos nitrogenados que estejam acima do especificado. O carvão ativado deverá, também, receber a água de lavagem de filtros rápidos, o material recolhido no filtro de disco e o efluente da centrífuga.

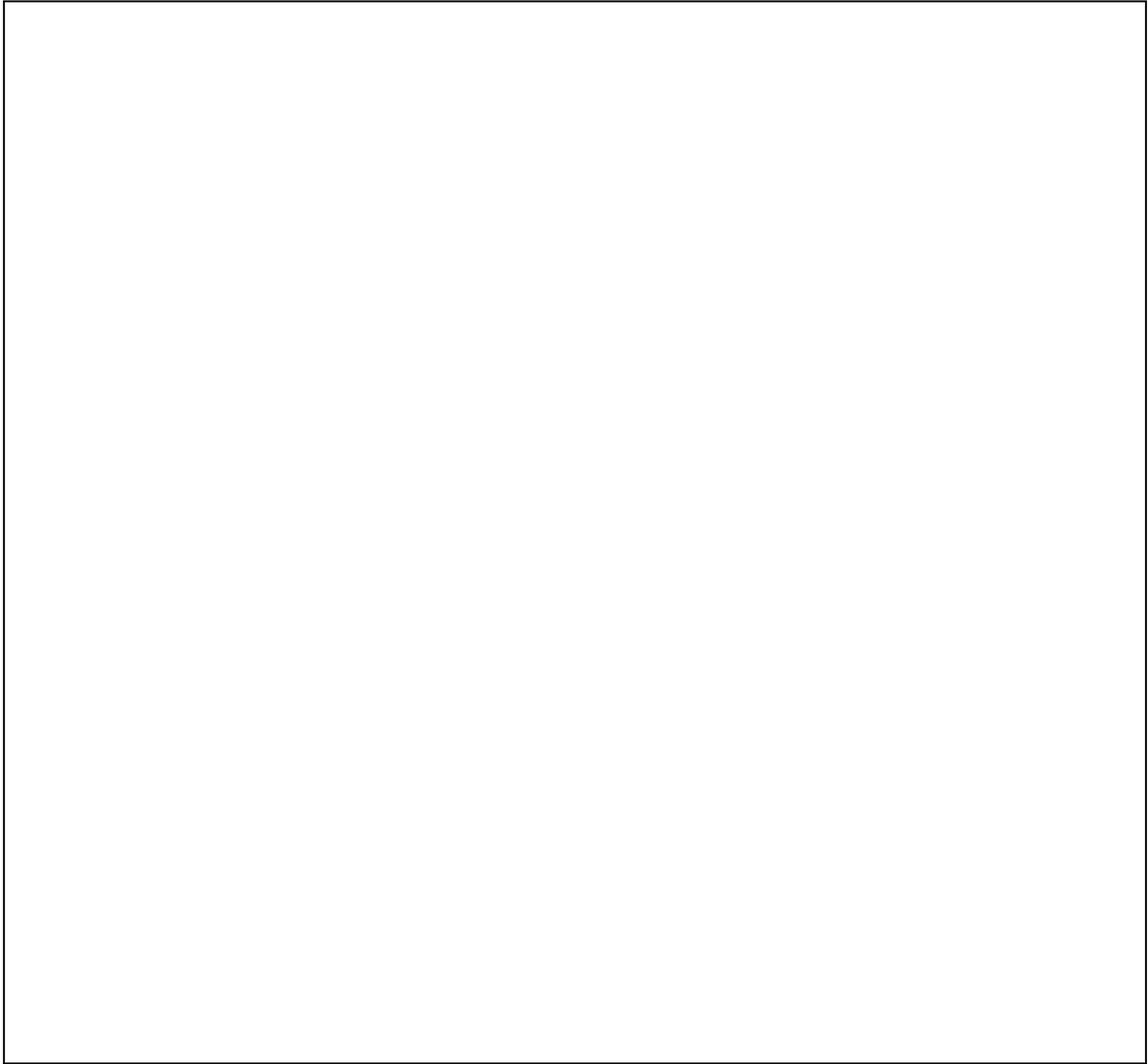


Figura 4: Tratamento biológico

Fonte: Organização dos autores com base em von SPERLING, 2016, item 10.1.1, “c”.

Segue o detalhamento das unidades do tratamento biológico.

PRIMEIRA CÂMARA ANÓXICA

De acordo com o sistema Bardenpho, a recirculação interna será proveniente da câmara MBBR e direcionada à primeira câmara anóxica.

O PROJETO prevê que o lodo dos decantadores secundários se divida em duas partes, com a maior parcela seguindo para a primeira câmara anóxica e o excesso de lodo indo para o tratamento sólido. Para aumentar a carga orgânica no início do sistema Bardenpho, será conveniente que todo o lodo precipitado nos decantadores secundários se direcione a essa câmara, de onde o excesso de lodo secundário sairá para o wetland e a espuma será encaminhada ao flotador do tratamento sólido.

O efluente da primeira câmara anóxica deverá ser direcionado à câmara aeróbia de fundo móvel ou câmara aeróbia MBBR.

CÂMARA MBBR

Recebendo o efluente da primeira câmara anóxica, a câmara aeróbia MBBR promoverá a oxidação da matéria orgânica e da amônia.

Parte de seu efluente se unirá ao efluente do tratamento preliminar, indo para a primeira câmara anóxica, devendo o restante seguir para a segunda câmara anóxica.

SEGUNDA CÂMARA ANÓXICA

O nitrato que não tiver sido reduzido a nitrogênio gasoso na primeira câmara anóxica poderá sê-lo na segunda câmara anóxica. A eficiência será menor porque a matéria carbonácea a ser utilizada será obtida, principalmente, por respiração endógena, ou seja, utilizando a própria biomassa.

O efluente dessa câmara, juntamente com o lodo, seguirá para a câmara aeróbia convencional e a espuma será removida para o flotor do tratamento sólido.

CÂMARA AERÓBIA CONVENCIONAL

Na câmara aeróbia convencional, haverá oxidação de parte da matéria orgânica ainda presente no líquido, bem como de parte da amônia restante. Contudo, seu objetivo principal será fazer com que o líquido passe aos decantadores secundários em condições aeróbias, restringindo eventual desnitrificação nos decantadores secundários, uma vez que isso provocaria a elevação do lodo, o que dificultaria sua sedimentação.

A Tabela 1 indica que as câmaras aeróbias convencionais das duas linhas de tratamento da primeira etapa da ETE Ibirité tiveram concentrações médias de oxigênio dissolvido a partir de 3,7 mg/L. É um valor muito alto para a segunda câmara aeróbia, pois provoca o crescimento desordenado de microrganismos, incluindo o aumento excessivo das bactérias filamentosas, produzindo espessamento do lodo e formação de espuma, com redução da eficiência da sedimentação. Pode ser essa a razão de valores elevados do índice volumétrico de lodo (IVL) na primeira etapa da ETE Ibirité. (Tabela 1)

Para evitar o desenvolvimento excessivo de bactérias filamentosas, a concentração de OD na câmara aeróbia convencional deverá ficar em torno de 0,5 mg/L.

O efluente da câmara aeróbia convencional seguirá para os decantadores secundários.

DECANTADORES SECUNDÁRIOS

Nos decantadores secundários, ocorrerá a precipitação do lodo, que retornará à primeira câmara anóxica. A espuma recolhida será direcionada ao flotor do tratamento sólido e o efluente líquido sairá próximo à superfície em direção à unidade de carvão ativado granular.

CARVÃO ATIVADO GRANULAR

O carvão ativado fará um polimento final do tratamento biológico, de modo que seu efluente apresente as seguintes concentrações máximas:

- Amônia $\leq 1,2$ mg/L (PORTARIA, Anexo 11);
- NTK ≤ 2 mg/L (PROJETO);
- Nitrito ≤ 1 mg/L (PORTARIA, Anexo 9);
- Nitrato ≤ 8 mg/L (PROJETO);
- $0,125 * [\text{NO}_3^-] + [\text{NO}_2^-] \leq 1$ mg/L (Portaria, art. 39);
- NT ≤ 10 mg/L (PROJETO);
- Óleos e graxas minerais: concentração nula.

Caso o efluente da EPE apresente valores discrepantes dos listados, as duas linhas de tratamento biológico deverão ser revistas. Uma opção poderá ser fazer com que se aumentem a taxa de aeração e a concentração de

OD na câmara MBBR. Outra opção poderá ser aumentar a taxa de recirculação da câmara MBBR para a primeira câmara anóxica.

Entretanto, não se espera que qualquer dessas premissas deixe de ser obedecida caso a EPE esteja funcionando adequadamente.

TRATAMENTO FÍSICO-QUÍMICO

O tratamento físico-químico diferirá do tratamento correspondente empregado na primeira etapa da ETE Ibirité nos seguintes pontos:

- O tanque de mistura rápida terá o volume reduzido para que seu tempo de detenção esteja de acordo com o previsto na NBR 12.216, item 5.8.2;
- Haverá três flocladores em cada linha de tratamento e não apenas um (NBR 12.216, item 5.9.2);
- O material recolhido nos poros das membranas do filtro de disco não retornará para a mistura rápida, mas para a unidade de carvão ativado;
- Serão introduzidas resinas de troca iônica para remover o excesso de cloreto de sódio;
- O líquido de regeneração das resinas irá para o tanque de neutralização;
- O efluente do tanque de neutralização irá para o flotador do tratamento físico-químico;
- O efluente líquido do flotador do tratamento físico-químico será descartado para o córrego Pintado e a espuma e o lodo recolhidos irão para a secagem térmica;
- A função do tanque de distribuição será juntar o efluente das resinas de troca iônica à vazão proveniente do filtro de disco destinada a manter a concentração salina mínima;
- Os filtros rápidos terão a função de preparar o líquido para o tratamento por radiação UV, devendo parte de seu efluente abastecer o reservatório de lavagem dos filtros;
- A água usada na lavagem dos filtros, a fração líquida da centrífuga e o material recolhido no filtro de disco retornarão para a unidade de carvão ativado.

A Figura 5 sintetiza o tratamento físico-químico a ser realizado.



Figura 5: Tratamento físico-químico.

Fonte: Organização dos autores a partir do PROJETO.

Será o seguinte o detalhamento das unidades do tratamento físico-químico:

MISTURA RÁPIDA

O efluente do tratamento biológico chegará ao tratamento físico-químico na unidade de mistura rápida. Além do efluente líquido dos decantadores secundários, será lançado no tanque de mistura rápida uma vazão constante de 1,5 m³/h, proveniente do lodo sedimentado nos decantadores terciários. Diferentemente do previsto no PROJETO, o tempo de detenção no tanque será de apenas 5 segundos, que é o tempo máximo permitido pela NBR 12.216 para um tanque de mistura rápida no tratamento para água potável.

O coagulante e o alcalinizante serão lançados no tanque de mistura rápida depois de ser feita a determinação das quantidades necessárias pelo ensaio de floculação. O PROJETO prevê o Al₂(SO₄)₃ como coagulante, mas deverá ser usado o FeCl₃ devido à sua maior eficiência e pela certeza de que o ferro será removido pelo conjunto coagulação, floculação, decantação terciária, filtro de disco, resinas de troca iônica e filtração em dupla camada, chegando à desinfecção com concentração inferior a 0,3 mg/L, que é o valor máximo recomendado para tratamento por radiação UV (Tabela 5). A dispersão do coagulante será feita com gradiente de velocidade entre 700 e 1.100 s⁻¹. (NBR 12.216, item 5.8.2)

O PROJETO especifica como alcalinizante não o Ca(OH)₂, mas o NaOH, com o objetivo de impedir aumento da dureza total, com eventual precipitação de CaCO₃ nas lâmpadas de radiação UV. Como o hidróxido de cálcio é mais eficiente que o hidróxido de sódio e a concentração de sódio é elevada no efluente da LAP, deverá ser usado o Ca(OH)₂, pois haverá remoção do cálcio pelo conjunto coagulação, floculação, decantação terciária,

filtro de disco, resinas de troca iônica e filtração em dupla camada, chegando o líquido à unidade de desinfecção por radiação UV com dureza cálcio inferior à que possa causar precipitação de CaCO_3 sobre as lâmpadas conforme a Tabela 5.

O efluente da mistura rápida irá para o floculador de montante.

FLOCULADORES

Como o tratamento físico-químico foi concebido no PROJETO tendo como único objetivo a remoção de fósforo, foi feita a previsão de um único floculador mecanizado em cada linha de tratamento. Todavia, em se tratando de produção de água potável, será necessário um mínimo de três floculadores em série, com tempo de detenção em cada um deles entre 30 e 40 minutos e com gradientes de velocidade decrescentes, variando entre 70 s^{-1} e 10 s^{-1} . (NBR 12.216, item 5.9.2)

O efluente do floculador de jusante irá para os decantadores terciários.

DECANTADORES TERCIÁRIOS

O PROJETO prevê dois decantadores terciários em cada linha de tratamento. A espuma e o lodo recolhido de seu fundo irão para o flotador do tratamento sólido, a menos da vazão de retorno de lodo de $1,5 \text{ m}^3/\text{h}$, que irá para o tanque de mistura rápida.

O efluente dos decantadores terciários irá para o filtro de disco.

FILTRO DE DISCO

Como a primeira etapa da ETE Ibirité não contém filtros de antracito e areia, o filtro de disco foi projetado para impedir que partículas de maiores dimensões cheguem ao tratamento por radiação UV, diminuindo a absorção dessa radiação.

O PROJETO prevê que os poros das membranas do filtro de disco tenham dimensões entre 10 e $200 \mu\text{m}$. Devido à elevada vazão de projeto, os poros das membranas foram fixados em $200 \mu\text{m}$, ou seja, ficarão retidos os sólidos com dimensões superiores a $0,2 \text{ mm}$.

O PROJETO estabelece que o material retido no filtro de disco seja conduzido constantemente ao tanque de mistura rápida para passar por nova coagulação, floculação e decantação, mas, na EPE, o material retido nesse filtro será direcionado à unidade de carvão ativado.

O efluente líquido do filtro de disco deverá seguir para as resinas de troca iônica.

RESINAS DE TROCA IÔNICA

A PORTARIA prescreve VMP de 250 mg/L para o cloreto e de 200 mg/L para o sódio. Como a ETE Ibirité foi projetada para tratar esgoto sanitário com baixa concentração salina, não foi prevista uma unidade para redução de sais.

A REGAP não mede a concentração de NaCl no efluente da LAP porque CONAMA 357 não lhe faz referência. LIMA (2015) fez três medições da concentração de cloreto no efluente da unidade de biodiscos da ETDI da REGAP, encontrando o valor médio de 342 mg/L . Por isso, será necessária uma unidade na EPE com o objetivo de remover o cloreto de sódio. Foram escolhidas as resinas de troca iônica não somente por sua eficiência, mas também porque poderão ser regeneradas sempre que ficarem saturadas.

Se o efluente final da EPE estiver com concentração de sais inferior a 30 mg/L , deverá haver remineralização, conforme recomenda o Regulamento Técnico para Águas Envasadas e Gelo, aprovado pela ANVISA por meio da Resolução nº 274, de 22 de setembro de 2005. Ao invés de se medir a concentração de sais, os fornecedores de aparelhos de osmose reversa indicam que ela pode ser feita de forma indireta: a remineralização será necessária caso a condutividade da água potável seja inferior a $5 \mu\text{S/cm}$.

Como a cloração, a fluoretação e a correção do pH afetarão a salinidade da água, a medição da condutividade deverá ser feita no efluente final. Assim, se esta estiver abaixo de 5 $\mu\text{S}/\text{cm}$, parte do efluente do filtro de disco será direcionada ao tanque de distribuição, sem passar pelas resinas de troca iônica.

O efluente das resinas de troca iônica seguirá para o tanque de distribuição, que precederá a filtração rápida, e o líquido usado na regeneração das resinas deverá ir para o tanque de neutralização.

TANQUE DE NEUTRALIZAÇÃO

O líquido usado na regeneração das resinas catiônicas e aniônicas, contendo cátions e ânions removidos, deverá seguir para o tanque de neutralização, onde o NaCl e os demais sais poderão ser recompostos.

A concentração de um ou mais metais pesados no tanque de neutralização poderá ficar superior à concentração limite prevista no § 4º do art. 34 de CONAMA 357. Por isso, o efluente desse tanque deverá seguir para o flotador do tratamento físico-químico.

FLOTADOR DO TRATAMENTO FÍSICO-QUÍMICO

Esse flotador terá a função de colocar o efluente do tanque de neutralização em condições de ser lançado no córrego Pintado, atendendo aos limites de CONAMA 357.

A espuma e o lodo removidos de seu fundo irão para a secagem térmica.

TANQUE DE DISTRIBUIÇÃO

O efluente das resinas de troca iônica seguirá para o tanque de distribuição, para onde também irá a parcela do efluente do filtro de disco destinada a manter a concentração salina mínima de 30 mg/L no efluente final da EPE.

Para manter a homogeneidade do líquido, o tanque de distribuição deverá dispor de misturador, que será acionado sempre que houver vazão oriunda diretamente do filtro de disco.

O tanque de distribuição alimentará os filtros rápidos de dupla camada.

FILTROS RÁPIDOS DE DUPLA CAMADA

Os filtros rápidos de antracito e areia terão a função principal de reter os protozoários patogênicos, particularmente os oocistos de *Cryptosporidium*, que são os menores protozoários contidos em meio líquido. Para isso, seu efluente deverá ter turbidez máxima de 0,5 uT. (Anexo 2 da PORTARIA)

Os filtros rápidos servirão, também, para conter eventuais excessos de metais pesados, dentro do princípio de barreiras múltiplas.

Parte do efluente dos filtros rápidos abastecerá o reservatório de lavagem desses filtros e o restante seguirá para o tratamento por radiação ultravioleta.

RESERVATÓRIO DE LAVAGEM DOS FILTROS RÁPIDOS

O reservatório para lavagem dos filtros rápidos será elevado para que a lavagem seja feita por gravidade. O líquido utilizado na lavagem dos filtros deverá retornar para a unidade de carvão ativado.

DESINFECÇÃO E UNIDADES COMPLEMENTARES

Apresentam-se, a seguir as unidades de desinfecção, bem como as unidades complementares (Figura 6):

- Desinfecção por radiação UV;

- Aplicação de ácido tricloroisocianúrico;
- Fluoretação;
- Correção de pH.

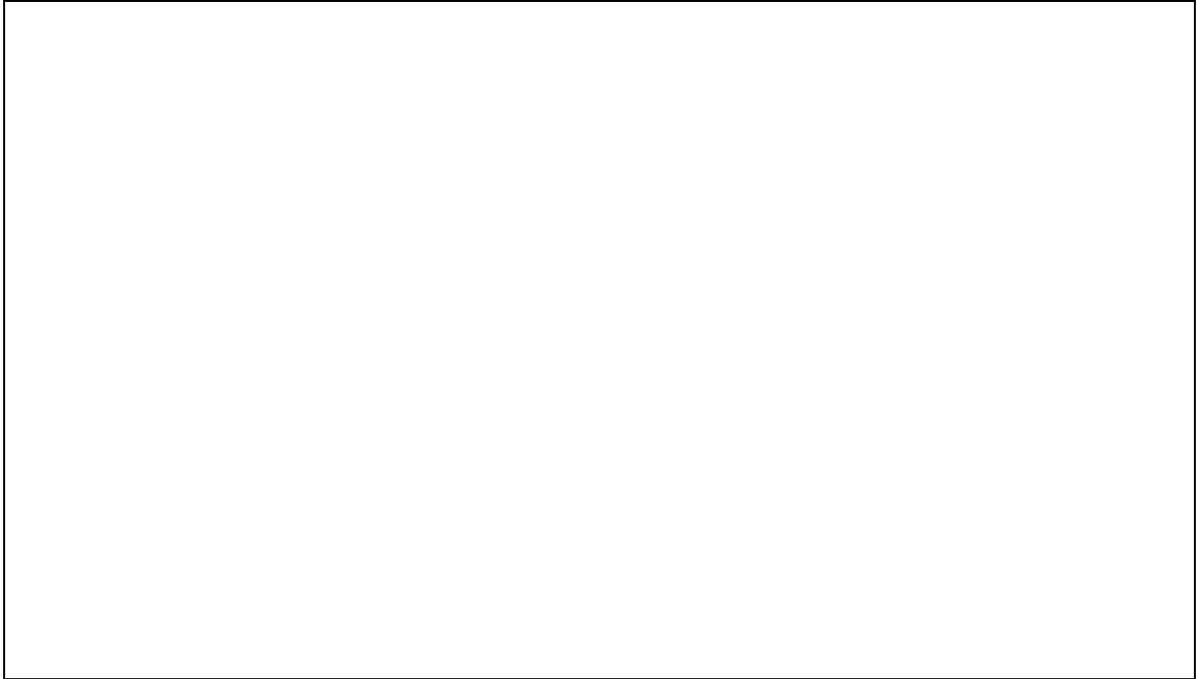


Figura 6 – Desinfecção e unidades complementares.

Fonte: Organização dos autores.

Haverá duas unidades de desinfecção: a unidade de radiação ultravioleta, que receberá o efluente da filtração rápida e a aplicação de ácido tricloroisocianúrico no efluente da unidade de radiação UV.

Pelo princípio de barreiras múltiplas, vírus, bactérias e fungos que ultrapassarem a série coagulação, floculação, decantação terciária, filtro de disco e filtração rápida deverão ser inativados pela radiação UV e eliminados pela aplicação de ácido tricloroisocianúrico ($C_3Cl_3N_3O_3$). A eliminação ou inativação dos protozoários patogênicos será processada pela coagulação, floculação, decantação terciária, filtro de disco, filtração rápida e pela desinfecção por radiação UV.

A cloração tradicional não é eficiente na eliminação de protozoários. Na EPE, será usado o ácido tricloroisocianúrico, que tem maior eficiência na desinfecção que o hipoclorito de cálcio, o hipoclorito de sódio e o cloro gasoso. Caberá, portanto, ao $C_3Cl_3N_3O_3$, dentro do princípio de barreiras múltiplas, fazer o polimento final da desinfecção.

Segue a descrição das unidades de desinfecção e complementares.

DESINFECÇÃO POR RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA

Para que haja boa absorção de radiação UV, o efluente da filtração rápida deverá atender aos limites indicados na Tabela 5 e se direcionará à unidade de desinfecção por radiação UV.

APLICAÇÃO DE ÁCIDO TRICLOROISOCIANÚRICO

A radiação ultravioleta será responsável por inativar microrganismos em geral, mas, como não deixa residual, não consegue eliminar contaminação posterior a sua aplicação. Por isso, a PORTARIA (art. 32) exige a manutenção de 0,2 mg/L de cloro residual livre, cloro residual combinado ou dióxido de cloro em toda a extensão do sistema de distribuição (reservatório e rede) e nos pontos de consumo.

A desinfecção final na EPE será feita pelo ácido tricloroisocianúrico, porque associa sua alta capacidade desinfetante à pequena afinidade de formação de compostos organoclorados prejudiciais. Desse modo, deverá ser mantido, no mínimo, 0,2 mg/L de cloro residual livre, pois a aplicação de compostos isocianuratos clorados deve seguir as diretrizes para utilização de cloro residual livre. (PORTARIA, art. 34)

Decorrido o tempo de contato após a aplicação de $C_3Cl_3N_3O_3$, o líquido seguirá para a fluoretação.

FLUORETAÇÃO

A fluoretação das águas de abastecimento reduz significativamente as cáries dentárias. O Quadro 1 do Anexo 1 do Anexo XXI da Portaria de Consolidação GM/MS nº 5/2017, do Ministério da Saúde, estabelece a concentração ideal de fluoreto em função da temperatura máxima da água potável. Quanto menor a temperatura máxima, maior deve ser a concentração de fluoreto. Contudo, deve ser levada em conta a concentração máxima de 1,5 mg/L de fluoreto estabelecida pela PORTARIA.

Embora as resinas de troca iônica tendam a remover o fluoreto, o operador deverá estar ciente de que o cálculo da dosagem a ser aplicada deverá considerar a concentração de fluoreto existente no efluente da cloração, limitando-se a completar a concentração necessária, o que representará uma economia do sal. O intervalo máximo para coleta de amostras deverá ser de duas horas. (PORTARIA, Anexo 13)

Depois de fluoretado, o líquido deverá passar por correção de pH.

CORREÇÃO DE pH

A PORTARIA não prevê limites máximo ou mínimo para o pH da água potável. Contudo, como a cloração abaixa o pH da água, tornando-a corrosiva quando este cai a menos de 6,0, deverá ser feita a correção para o pH ficar próximo à neutralidade.

Na correção do pH, deverá ser usado o hidróxido de sódio, que aumenta a salinidade.

MEDIDOR PARSHALL

Encerrado o tratamento, haverá um medidor Parshall para indicar a vazão final da EPE.

Após passar pelo medidor Parshall, deverão ser coletadas amostras para verificação do atendimento às diretrizes da PORTARIA e do PROJETO, bem como para se constatar a ausência de etinilestradiol e a concentração salina mínima.

TRATAMENTO SÓLIDO

O tratamento sólido ficará bastante simplificado, pois não haverá adensador por gravidade, digestores, ou transporte de lodo. Também não haverá geração de energia térmica, mas o consumo de energia será bem menor do que consta na Tabela 1.

As unidades do tratamento de lodo serão as seguintes (Figura 7):

- Wetland de lodo;
- Compostagem
- Flotador do tratamento sólido;
- Centrífuga;
- Secagem térmica;
- Aterro sanitário

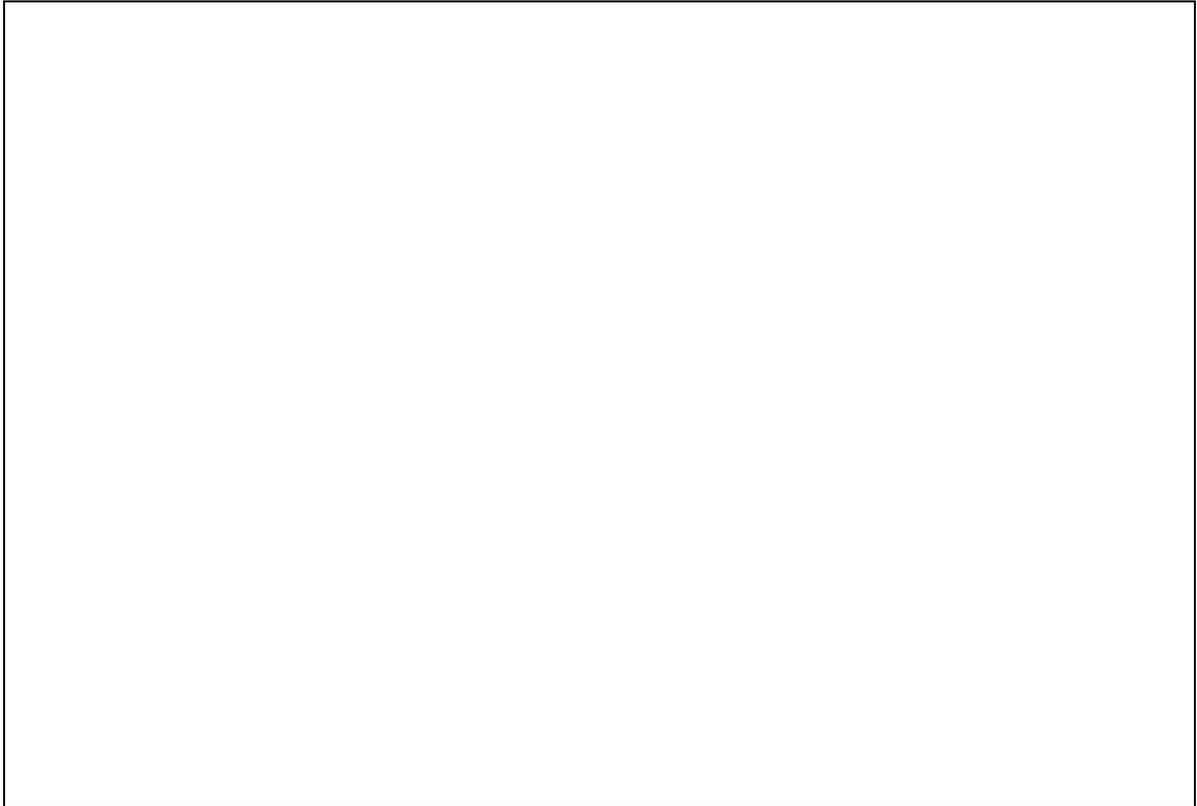


Figura 7: Tratamento sólido.

Fonte: Organização dos autores.

Segue o detalhamento das unidades do tratamento sólido.

WETLAND DE LODO

O wetland de lodo receberá o lodo secundário da primeira câmara anóxica de cada linha de tratamento. Seu dimensionamento deverá ser feito levando-se em consideração a taxa comumente utilizada de 40 kg de sólidos totais por m² de wetland por ano (40 kg ST/m².ano).

O efluente da REGAP contém alta concentração salina e, por isso, será conveniente que as plantas a serem utilizadas sejam do gênero *Paspalum haumanii* ou de outro tipo apropriado a absorver o excesso de sais.

O efluente líquido será encaminhado à centrífuga. O material recolhido de cada célula do wetland será removido em período de 5 a 10 anos e encaminhado para compostagem, para onde também irão os resíduos de poda da vegetação.

COMPOSTAGEM

Uma das vantagens do uso de wetland é a não necessidade de transporte do lodo para aterro sanitário.

O lodo do wetland será removido em um período de 5 a 10 anos e, como sairá digerido, poderá ser aplicado diretamente na compostagem para formação de adubo orgânico.

Os resíduos da poda das plantas também poderão ser conduzidos à compostagem.

FLOTADOR DO TRATAMENTO SÓLIDO

O flotador do tratamento sólido receberá:

- A espuma do tanque de equalização;
- A espuma da primeira e da segunda câmaras anóxicas;
- A espuma dos decantadores secundários;
- A espuma e a maior parte do lodo dos decantadores terciários.

A espuma e o lodo recolhido do fundo do flutuador do tratamento sólido irão para a secagem térmica. O efluente líquido será direcionado à centrífuga.

CENTRÍFUGA

A centrífuga receberá o efluente do wetland. Fará a separação do líquido, que será encaminhado para bombeamento à unidade de carvão ativado, sendo o material pastoso dirigido à secagem térmica.

SECAGEM TÉRMICA

O secador térmico recolherá a fração pastosa do efluente da centrífuga e a espuma e o lodo dos flutuadores do tratamento físico-químico e do tratamento sólido.

Depois de seco, o material será removido para o aterro sanitário.

RESULTADOS ESPERADOS

Para ser usado como água potável, o efluente da EPE deverá atender às exigências da PORTARIA e, para ser usado como água industrial, deverá atender aos requisitos especificados no PROJETO e reproduzidos na Tabela 2.

O efluente da EPE deverá demonstrar ausência de etinilestradiol e de óleo e graxas minerais, bem como ter salinidade mínima de 30 mg/L.

As exigências da PORTARIA para a água potável são agrupadas da seguinte forma:

- a) Padrão bacteriológico (Anexo 1);
- b) Turbidez do efluente filtrado (Anexo 2), como indicador da ausência de protozoários patogênicos;
- c) Substâncias químicas inorgânicas que podem causar risco à saúde humana (Anexo 9);
- d) Substâncias químicas orgânicas que podem causar risco à saúde humana, incluindo agrotóxicos e seus metabólicos (Anexo 9);
- e) Produtos secundários da desinfecção;
- f) Cianotoxinas (Anexo 10);
- g) Padrão organoléptico (Anexo 11).

São listadas, a seguir, as unidades da EPE encarregadas de atender a cada um dos grupos citados. O princípio das barreiras múltiplas estabelece que o atendimento de qualquer parâmetro não deve depender de uma única unidade.

PADRÃO BACTERIOLÓGICO

Bactérias e vírus: A maioria das bactérias e vírus patogênicos serão eliminados por competição nas câmaras de aeração. Grande parte desses microrganismos que ultrapassarem o tratamento biológico será removida por coagulação, floculação e decantação terciária. Os que não decantarem seguirão para o filtro de disco e, se passarem por ele, sofrerão a ação da filtração rápida. A maior parte dos espécimes não retidos na filtração rápida será inativada pela radiação UV. Os microrganismos restantes serão eliminados na aplicação de ácido tricloroisocianúrico, que é mais eficiente que o hipoclorito de sódio, o hipoclorito de cálcio e o cloro gasoso. O indicador da ausência de bactérias e de vírus patogênicos no efluente são os coliformes totais. (Anexo 1 da PORTARIA)

Protozoários: A coagulação, a floculação e a decantação terciária reduzirão a concentração de protozoários patogênicos. A primeira barreira efetiva contra protozoários patogênicos será a filtração rápida, pois se espera

que o efluente filtrado tenha turbidez máxima de 0,5 uT em 95% das amostras e de 1,0 uT nas demais amostras. A segunda barreira será o tratamento adequado por radiação ultravioleta, método que inativa microrganismos em geral, pois atua em seu DNA, retirando sua capacidade de reprodução e, portanto, tornando-os inócuos. A inativação de protozoários pela radiação UV é mais eficiente que a atuação do cloro.

Por outro lado, a radiação UV não deixa residual e, portanto, não garante ação contra eventuais contaminantes a jusante do tratamento. Por isso, deverá haver um mínimo de 0,2 mg/L de cloro residual livre em toda a extensão da rede de distribuição e nos pontos de consumo. (PORTARIA, art. 32)

TURBIDEZ DO EFLUENTE FILTRADO

Os oocistos de *Cryptosporidium* spp. são indicadores da presença ou ausência de protozoários patogênicos ativos por serem os menores protozoários presentes na água.

Como são caros os testes de laboratório que confirmam a ausência ou a inativação de protozoários, a PORTARIA admite substituí-los pela exigência de turbidez máxima do efluente filtrado, que deve ser de 0,3 uT em 95% das amostras e de 1,0 uT nas demais amostras. (PORTARIA, art. 29)

Se a turbidez do efluente filtrado for, em 95% das amostras, maior que 0,3 uT, mas menor ou igual a 0,5 uT, a PORTARIA considera que haverá ausência ou inativação de protozoários patogênicos se for verificada uma das seguintes situações:

- Média geométrica móvel nos pontos de captação, nos últimos 12 meses de monitoramento, menor que 1.000 *Escherichia coli*/100mL: poderá ser o caso do efluente da REGAP, mas, certamente, não será o caso do esgoto;
- Eficiência mínima de remoção de 2,5 log (99,7%) de esporos de bactérias aeróbias entre cada ponto de captação e o efluente final: a câmara MBBR e as unidades subsequentes estarão aptas a remover percentual de esporos de bactérias aeróbias maior que esse;
- Uso de processo de desinfecção que, comprovadamente, alcance a mesma eficiência de remoção de oocistos que a adoção do limite máximo de turbidez de 0,3 uT em 95% das amostras: a radiação UV é um processo de inativação de oocistos de grande eficiência.

Desse modo, será exigida turbidez máxima do efluente filtrado de 0,5 uT em 95% das amostras e de 1,0 uT nas demais amostras. Esse limite estará garantido pelas sucessivas unidades de tratamento biológico e físico-químico.

SUBSTÂNCIAS INORGÂNICAS QUE PODEM CAUSAR RISCO À SAÚDE HUMANA

O Anexo 9 da PORTARIA lista as seguintes substâncias químicas inorgânicas que podem causar risco à saúde humana: As, Ba, Cd, Cu, Cr, F⁻, Hg, Ni, NO₃⁻, NO₂⁻, Pb, Se, Sb e U. A essas substâncias, deverá ser acrescentado o bromato (VMP = 0,01 mg/L), considerado pela PORTARIA como subproduto da desinfecção, mas que, na EPE, poderá ser formado pela oxidação do brometo. Tal qual com o NaCl e com os demais sais, caberá às resinas de troca iônica colocarem o bromato com concentração abaixo do limite permitido.

Quanto ao nitrito e ao nitrato, além de atenderem a seus respectivos VMP (nitrito: VMP = 1 mg/L e nitrato: VMP = 10 mg/L), quando tomadas em conjunto, essas substâncias devem atender ao limite indicado em (4).

O nitrito é muito instável e tenderá a se transformar em nitrato nas câmaras aeróbias. O nitrato tenderá a se transformar em nitrogênio gasoso nas câmaras anóxicas. Dentro do princípio das barreiras múltiplas, caberá às resinas de troca iônica a remoção de eventual excesso de nitrato.

Cuidado deverá ser tomado com relação ao fluoreto, pois, se a água potável contiver concentração acima de seu VMP (1,5 mg/L), poderá ocorrer fluorose dental. Contudo, a adição de fluoreto à água, ao final do tratamento, está prevista no Anexo XXI da Portaria de Consolidação GM/MS nº 5/2017 do Ministério da Saúde.

A fluoretação deverá ser feita em unidade própria (unidade de fluoretação), cabendo aos operadores determinar a dosagem necessária, levando em conta que tanto o esgoto de Ibirité como o efluente da REGAP contêm fluoreto, este devido ao esgoto sanitário adicionado à BAS. As resinas de troca iônica removerão parte do

fluoreto, mas deverá ser mantida uma pequena concentração de fluoreto, que deverá ser considerada no cálculo da sua dosagem.

O petróleo bruto contém mercúrio e, por isso, é de se esperar que haja Hg (VMP = 0,001 mg/L) antes de o efluente da REGAP passar pelo carvão ativado. Como se trata de elemento de fácil floculação, a maior parte do mercúrio que ultrapassar a barreira de carvão ativado deverá ficar retida nos flocos e sua remoção tenderá a ser feita pelos decantadores terciários. A maioria dos flocos que não se decantarem não deverá passar pelo filtro de disco, retornando à unidade de carvão ativado. A parcela de mercúrio que ultrapassar o filtro de disco deverá ser removida pelas resinas catiônicas. Com a regeneração das resinas, poderá haver Hg no tanque de neutralização. Embora esse metal possa estar presente na vazão de retorno, (Figura 4) sua concentração não deverá ser suficiente para que haja mais de 0,001 mg/L no tanque de distribuição. Dentro do princípio de barreiras múltiplas, os filtros rápidos serão garantia de que não haverá excesso de Hg em seu efluente.

As demais substâncias terão suas concentrações reduzidas a valores inferiores aos respectivos VMP pelo conjunto coagulação, floculação, decantação terciária, filtro de disco, resinas de troca iônica e filtração em dupla camada.

SUBSTÂNCIAS QUÍMICAS ORGÂNICAS QUE PODEM CAUSAR RISCO À SAÚDE HUMANA, INCLUINDO AGROTÓXICOS E SEUS METABÓLITOS

Para que a ação bacteriana sobre as substâncias orgânicas seja eficaz, deverá haver oxigênio dissolvido suficiente nas câmaras de aeração MBBR. De acordo com o item 6.6.18, “b” da NBR 12.209, a massa de oxigênio a ser disponibilizada deverá ser, no mínimo, duas vezes e meia a carga média de DBO₅ aplicada ao tanque de aeração.

Para que o produto final da EPE seja água legalmente potável, as substâncias orgânicas, incluindo os agrotóxicos e seus metabólitos listados no Anexo 9 da PORTARIA deverão ter concentrações até os respectivos VMP.

Além das substâncias orgânicas listadas no Anexo 9 da PORTARIA, há que se considerar os poluentes orgânicos persistentes (POPs). Os POPs são substâncias orgânicas sintéticas tóxicas que combinam as características de semivolatilidade, persistência e bioacumulação. Não são comuns em efluentes de refinaria de petróleo, mas podem estar presentes no esgoto sanitário.

A PORTARIA (Anexo 9) lista apenas alguns POPs (Tabela 4). Como são muitos os que não constam na PORTARIA, é preciso escolher um deles como indicador, de modo que, se estiver ausente, pode-se concluir pela ausência dos demais. A substância a ser usada como indicador é o etinilestradiol, hormônio presente nos anticoncepcionais e frequente no esgoto sanitário. Apesar de não ser tóxico, o etinilestradiol possui as propriedades de semivolatilidade, persistência e bioacumulação e sua longa cadeia molecular (C₂₀H₂₄O₂) exige 25 moléculas de O₂ para ser oxidada completamente, o que o torna apto a ser considerado indicador da ausência de POPs.

Para que o efluente final não seja apenas água legalmente potável, mas, como diz HESPANHOL (2015), seja água segura para o consumo humano, a concentração de oxigênio dissolvido deverá ser ajustada na câmara aeróbia de cada linha de tratamento até o C₂₀H₂₄O₂ não ser mais detectado em todas as amostras recolhidas.

PRODUTOS SECUNDÁRIOS DA DESINFECÇÃO

A EPE possuirá duas unidades de desinfecção: radiação ultravioleta e aplicação de ácido tricloroisocianúrico. A radiação UV não provoca o aparecimento de subprodutos deletérios, mas a ação do cloro é, dentre todos os métodos de desinfecção, o que pode dar origem à maior diversidade de produtos nocivos à saúde humana.

Nas estações de tratamento de água, consideram-se os seguintes subprodutos patogênicos em função do tipo de desinfetante utilizado:

- Cloração: 2-4 diclorofenol (VMP = 0,2 mg/L), 2-4-6 triclorofenol (VMP = 0,2 mg/L) trihalometanos (VMP = 0,1 mg/L); ácidos haloacéticos (VMP = 0,08 mg/L) e cloro residual livre (VMP = 5 mg/L);
- Ozonização: bromato (VMP = 0,01 mg/L), que também poderá ser formado pela oxidação do brometo nas câmaras aeróbias;
- Cloramina: N-nitrosodimetilamina (VMP = 0,0001 mg/L); e a própria cloramina (VMP = 4 mg/L);

- Dióxido de cloro: clorito (VMP = 0,7 mg/L) e clorato (VMP = 0,7 mg/L).

Quanto aos subprodutos típicos da cloração, o 2-4 diclorofenol e o 2-4-6 triclorofenol ocorrem apenas na presença de fenóis. A estes se junta o pentaclorofenol (VMP = 0,009 mg/L), que, embora, possa ter origem em outras fontes que não a cloração, pode também ser o resultado da ação do cloro sobre o fenol.

O efluente da REGAP passa por aeração e deverá passar por carvão ativado, o que impedirá que chegue ao tanque de equalização com concentração de fenóis suficiente para formação desses subprodutos.

No esgoto, os compostos fenólicos são lançados pela urina e pelas fezes ou, diretamente, por resíduos de medicamentos. Sua oxidação será feita pelo sistema Bardenpho e, dentro do princípio das barreiras múltiplas, os fenóis remanescentes passarão por coagulação, floculação, decantação terciária, filtro de disco, resinas de troca iônica e filtração em dupla camada, sendo pouco provável que se encontrem fenóis na aplicação de ácido tricloroisocianúrico.

Trihalometanos e ácidos haloacéticos necessitam de ácidos húmicos ou fúlvicos como precursores e, por isso, se formam geralmente quando há pré-cloração. Na EPE Ibirité, em que a aplicação de ácido tricloroisocianúrico será feita apenas ao final do tratamento, esses precursores deverão ser oxidados a compostos mais simples nas câmaras aeróbias.

Com relação ao cloro residual livre, o limite de 5 mg/L pode causar preocupação quando a cloração ocorre em água com turbidez elevada, em que os microrganismos patogênicos se ocultam nos materiais que provocam turbidez, exigindo maior intensidade de cloração. Não será o caso da EPE Ibirité, em que as diversas unidades tenderão a reduzir progressivamente a turbidez.

Com relação à aplicação de ácido tricloroisocianúrico, não se espera que qualquer dos subprodutos citados esteja com concentração acima dos limites determinados no efluente final.

CIANOTOXINAS

As cianotoxinas são liberadas por cianobactérias quando ocorre a lise de sua parede celular. Como as cianobactérias necessitam de luz para se desenvolverem, não se espera encontrar cianotoxinas no esgoto, mas há possibilidade de essas toxinas serem encontradas no efluente da REGAP. Contudo, a maioria das cianotoxinas será oxidada nas câmaras aeróbias e, as que ultrapassarem essa unidade, ficarão retidas no carvão ativado. As cianotoxinas que poderão ser produzidas pelas cianobactérias na EPE deverão ter a mesma sorte.

PADRÃO ORGANOLÉPTICO

As condições organolépticas serão de grande importância porque o efluente de uma EPE pode ser rejeitado por impressão visual e/ou olfativa do usuário (ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DE SAÚDE, 2017).

O padrão organoléptico da PORTARIA lista os seguintes parâmetros:

Substâncias inorgânicas: alumínio (VMP = 0,2 mg/L), amônia (VMP = 1,2 mg/L), cloreto (VMP = 250 mg/L), ferro (VMP = 0,3 mg/L), manganês (VMP = 0,1 mg/L), sódio (VMP = 200 mg/L), sulfato (VMP = 250 mg/L), sulfeto de hidrogênio (VMP = 0,05 mg/L) e zinco (VMP = 0,18 mg/L).

Substâncias orgânicas: 1,2 diclorobenzeno (VMP = 0,01 mg/L), 1,4 diclorobenzeno (VMP = 0,0003 mg/L), monoclorobenzeno (VMP = 0,02 mg/L).

Parâmetros físico-químicos: cor aparente (VMP = 15 uH), dureza total (VMP = 300 mg/L), gosto e odor (VMP = 6), sólidos dissolvidos totais (VMP = 500 mg/L) e turbidez (VMP = 5 uT).

Com relação às substâncias inorgânicas, os destaques são para a amônia, o ferro, o manganês, o cloreto e o sódio.

De acordo com a NBR 12.209 (item 6.6.18, "b"), para haver remoção de amônia, a relação entre a massa de oxigênio disponibilizada e a carga média de DBO₅ aplicada à câmara de aeração deve ser, no mínimo, de 2,5

vezes e, dentro do princípio das barreiras múltiplas, parte da amônia remanescente será removida pelas resinas de troca iônica.

A amônia reage com o cloro formando cloraminas, mas, se o líquido deixar a unidade de radiação UV com concentração igual ao VMP da amônia (1,2 mg/L) haverá a formação de 2,87 mg/L de monocloramina, abaixo do limite de 4 mg/L indicado na PORTARIA.

A presença de ferro na água pode dar origem ao desenvolvimento de ferrobactérias, que provocam cor e gosto na água. Por isso, é imprescindível que seu VMP seja respeitado.

O manganês só é nocivo à saúde humana em altas concentrações. Seu VMP, no entanto, é mais baixo que o do ferro porque produz cor amarelada na água, que o usuário pode associar à ocorrência de urina, além de poder produzir manchas escuras em roupas e em utensílios domésticos.

O cloreto de sódio, cuja concentração no efluente da REGAP é elevada, terá uma unidade de tratamento específica para sua remoção: as resinas de troca iônica. Será a única substância em que não prevalecerá na EPE o princípio das barreiras múltiplas. Como as resinas de troca iônica são muito eficientes, o controle de sais em seu efluente deverá ser no sentido de se manter a concentração mínima de 30 mg/L, que será garantida limitando-se a condutividade mínima em 5 µS/cm, conforme recomendam os fornecedores de aparelhos de osmose reversa.

As demais substâncias orgânicas ou inorgânicas indicadas no padrão organoléptico serão removidas pelo conjunto coagulação, floculação, decantação terciária, filtro de disco, resinas de troca iônica e filtração rápida.

Os parâmetros físico-químicos atenderão aos limites da seguinte forma:

Cor: A cor aparente diminuirá à medida em que as substâncias que promovem cor (ferro, manganês, tanino e alumínio, dentre outras) tenham suas concentrações reduzidas.

Dureza total: O efluente da REGAP não deve apresentar dureza significativa, pois o petróleo apresenta apenas traços de cálcio e de magnésio. Há que se considerar, no entanto, que a dureza total máxima no efluente da filtração rápida deva ser o limite indicado pelos fabricantes de aparelhos de desinfecção por radiação UV (120 mg/L), por ser menor que o VMP indicado pela PORTARIA (300 mg/L). As unidades responsáveis pela redução da dureza na EPE serão o conjunto coagulação, floculação decantação terciária e filtro de disco, completando-se com as resinas de troca iônica e com a própria filtração rápida.

Gosto e odor: As principais substâncias que causam gosto e odor em concentrações elevadas e as respectivas unidades responsáveis pela redução de suas concentrações são:

Substâncias inorgânicas: Ferro, cloreto, sulfato e gás sulfídrico. Terão suas concentrações reduzidas no tratamento biológico e no tratamento físico-químico.

Substâncias orgânicas: Fenóis, nitrofenóis e compostos aromáticos. Serão decompostas nas câmaras aeróbias e eventuais remanescentes serão removidos por coagulação, floculação, decantação terciária, filtro de disco, resinas de troca iônica e filtração em dupla camada.

Algas: Não estão presentes no esgoto e serão removidas do efluente da REGAP pelo carvão ativado. Parte das algas remanescentes serão consumidas pelos microrganismos no Sistema Bardenpho e as que persistirem, serão removidas pelo conjunto coagulação, floculação, decantação terciária, filtro de disco, resinas de troca iônica e filtração em dupla camada. Se ainda houver algas viáveis, estas serão inativadas pela radiação UV, servindo a aplicação de ácido tricloroisocianúrico como polimento final.

Sólidos dissolvidos totais: A concentração típica de SDT no esgoto é de 650 mg/L e, no efluente da REGAP, a concentração deve ser muito menor, pois os sólidos são removidos ao longo do tratamento na ETDI. A concentração de SDT irá decrescendo nas diversas unidades da EPE, ficando o VMP de 500 mg/L muito acima do valor esperado para o efluente final da EPE.

Turbidez: O limite de turbidez estabelecido pelo Anexo 11 da PORTARIA por questões organolépticas (VMP de 5 uT) é muito superior ao limite de turbidez previsto no Anexo 2 da PORTARIA como garantia de inativação

e/ou remoção de protozoários (0,5 uT em 95% das amostras e 1,0 uT nas demais). As sucessivas unidades de tratamento farão com que a EPE atenda a esses limites.

ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Um dos objetivos deste trabalho é indicar um método seguro para potabilização tanto do efluente industrial como do efluente doméstico.

Legalmente, a potabilização de um líquido se dá com o atendimento às exigências da PORTARIA. Para a confirmação do atendimento aos diversos parâmetros, a PORTARIA (Anexo 13) fixa a seguinte frequência de análises no efluente final:

- Verificação no sistema de distribuição: produtos secundários da desinfecção;
- Intervalo de duas horas: turbidez, residual de desinfetante, cor aparente, pH e fluoreto;
- Intervalo de uma semana: cianotoxinas, quando a contagem de cianobactérias na água bruta exceder a 20 mil células/mL;
- Mensal: Acrilamida, além de epicloridrina, quando esta estiver presente no polímero utilizado;
- Trimestral: gosto e odor;
- Semestral: demais parâmetros.

Em uma ETA, qualquer falha no sistema de tratamento de água pode acarretar valores de VMP acima dos especificados durante período que pode durar até seis meses. Para que a água seja potável e segura, uma EPE adota o princípio das barreiras múltiplas, em que qualquer parâmetro deve passar pelo controle de, pelo menos, duas unidades de tratamento.

Na EPE Ibirité, o princípio das barreiras múltiplas será aplicado em todos os parâmetros previstos tanto na PORTARIA como no PROJETO, à exceção de cloreto e de sódio. Essas exceções se justificam porque as resinas de troca iônica são tão eficientes que não haverá risco de serem ultrapassados os VMP de cloreto ou de sódio. Para evitar o risco de redução da salinidade da água a valor abaixo do recomendado pela ANVISA, será acrescentado um parâmetro não previsto na PORTARIA: a salinidade mínima.

Na desinfecção, o princípio das barreiras múltiplas será aplicado com o uso de dois tipos: a radiação ultravioleta e o uso de ácido tricloroisocianúrico.

Para que a desinfecção seja eficaz, o líquido deve chegar ao tratamento por radiação UV com atendimento a alguns parâmetros, sendo que alguns deles são mais restritivos que os exigidos pela PORTARIA no efluente final do tratamento. Assim, o efluente da filtração rápida deverá apresentar:

- dureza máxima de 120 mg/L (a PORTARIA tolera até 300 mg/L);
- concentração máxima de manganês de 0,05 mg/L (a PORTARIA tolera até 0,1 mg/L);
- até 10 mg/L de sólidos suspensos totais (a PORTARIA não estipula limite para SST);
- concentração máxima de 0,1 mg/L de tanino (a PORTARIA não faz exigência a respeito de tanino).

A PORTARIA cita apenas alguns poluentes orgânicos persistentes. Para garantir a ausência de POPs em geral, foi escolhido o etinilestradiol como indicador, devido a sua presença comum no esgoto e às suas características de semivolatilidade, persistência e bioacumulação, além de sua cadeia molecular exigir 25 moléculas de O₂ para ser oxidada completamente. A ausência de etinilestradiol será garantia da ausência de outros POPs.

Portanto, o efluente final da EPE, além de ser água potável, poderá ser considerado água mais segura que os efluentes de estações de tratamento de água convencionais.

CONCLUSÕES/RECOMENDAÇÕES

O aquecimento global está provocando escassez de água em regiões que jamais se imaginaria viessem a passar por tal situação. A potabilização de efluentes está entre as medidas que garantem o abastecimento de água por todo o ano em localidades com alto estresse hídrico.

No Brasil, tem sido comum a adaptação de estações de tratamento de efluentes sanitários ou industriais para funcionar como estações de reúso não potável. O receio infundado de que não haja legislação que permita a produção de água potável a partir de efluentes sanitários ou industriais tem feito com que estações que poderiam se tornar ótimas EPEs se limitem a produzir água para usos considerados menos nobres.

A ETE Ibirité possui projeto robusto para produzir água de reúso não potável. Com algumas modificações, sua segunda etapa poderá ficar apta a produzir água potável, utilizando, como água bruta, o efluente da REGAP, complementado com parte do esgoto de Ibirité. Não obstante o grande número de unidades de sua ETDI, o efluente da REGAP tem contaminado o córrego Pintado e acumulado óleo na lagoa de Ibirité. Não são poucos os protestos contra a contaminação da lagoa de Ibirité, que é carinhosamente chamada de lagoa da Petrobras pelos moradores de sua orla.

A EPE Ibirité vai solucionar esse problema crucial para a PETROBRAS, pois o efluente da REGAP será transformado em água potável e o descarte pela EPE vai se limitar à vazão de regeneração das resinas, já devidamente isenta de óleos e de graxas minerais.

Desse modo, a transformação da segunda etapa da ETE em uma estação de potabilização de efluentes trará as vantagens de produzir água potável com características de reúso industrial e de evitar que a PETROBRAS siga poluindo a lagoa por ela própria construída.

As modificações sugeridas não visam apenas a aperfeiçoar as unidades de tratamento previstas no PROJETO ou a introduzir novas unidades. Visam, também, excluir ou reduzir as dimensões de outras unidades. É o caso do tratamento primário, presente no PROJETO, que dificulta o processo de desnitrificação e que não deverá ser executado na EPE. Com sua exclusão, deverá também ser dispensada a unidade de sedimentação por gravidade no tratamento sólido.

Redução importante será feita no volume do tanque de mistura rápida para que seu tempo de detenção fique de acordo com o prescrito pela NBR 12.216.

Mudanças deverão ser feitas no tratamento sólido, adicionando-se wetland de lodo em substituição aos digestores primários e ao digestor secundário, o que aumentará a eficiência do processo, com redução de custos tanto de implantação como de operação.

Ressalte-se que a Lei Federal 9.433, de 8 de janeiro de 1997, em seu art. 38, VI, delegou aos comitês de bacias hidrográficas a prerrogativa de estabelecer mecanismos de cobrança pela captação de recursos hídricos e pelo descarte de efluentes. Na EPE Ibirité, esse pagamento ficará bastante reduzido, pois não haverá captação externa de água e o descarte se limitará aos líquidos usados na regeneração das resinas, que representam uma pequena fração do efluente final.

A própria transformação da segunda etapa da ETE Ibirité em uma EPE representará corte de despesas operacionais, pois concentrará em uma única estação o tratamento de efluentes e a produção de água potável.

Portanto, ao invés de se fazer a segunda etapa da ETE Ibirité para a produção de água apenas para reúso industrial, em quantidade muito acima da necessária, será preferível construir-se a EPE Ibirité, com capacidade para produzir água potável e água industrial, usando como matéria prima o efluente da REGAP, que deixará de ser poluidor da lagoa, e parte do esgoto de Ibirité.

Após serem realizadas as modificações propostas para o projeto da segunda etapa, esta se tornará a primeira estação da América Latina a produzir, simultaneamente, água potável e água para uso industrial, podendo servir de modelo para que surjam outras EPEs. Assim, estará sendo atacado de forma pujante o problema crucial de falta de água potável que se anuncia para breves anos.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Engenheiro Ambiental Gabriel Rodrigues Vasconcellos, mestre e doutor em Engenharia Sanitária e Ambiental, pelas informações sobre o tratamento por wetlands de lodo, que foram de grande importância nas modificações propostas para a unidade de tratamento sólido.

Agradecemos ao Engenheiro Civil José Magno Senra Fernandes, mestre em Engenharia Sanitária e Ambiental e doutor em Epidemiologia Veterinária pelas informações sobre fluoretação das águas de abastecimento público.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BRASIL – Constituição da República Federativa do Brasil. 5 de outubro de 1988.
2. BRASIL – Decreto Legislativo 204, de 7 de maio de 2004. Aprova o texto da Convenção de Estocolmo sobre Poluentes Orgânicos Persistentes, de 22 de maio de 2001.
3. BRASIL – Lei 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos e dá outras providências.
4. BRASIL – Lei 12.527 de 18 de novembro de 2011 (Lei de acesso à informação). Regula o acesso a informações, conforme previsto no inciso XXXIII do art. 5º, no inciso II do § 3º do art. 37 e no § 2º do art. 216 da Constituição Federal.
5. BRASIL – NBR 12.209. Projeto de Estação de Tratamento de Esgotos.
6. BRASIL – NBR 12.216. Projeto de Estação de Tratamento de Água para Abastecimento Público.
7. BRASIL – Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021. Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS nº 5, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade.
8. BRASIL – Resolução ANVISA nº 274, de 22 de setembro de 2005. Fixa a identidade e as características mínimas de qualidade a que devem obedecer a Água Mineral Natural, a Água Natural, a Água Adicionada de Sais Envasadas e o Gelo para Consumo Humano.
9. BRASIL – Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes e dá outras providências.
10. BRASIL – SEMAD – Secretaria do Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável do Estado de São Paulo. Parecer nº 88/SEMAD/SUPRAM CENTRAL-DRRA/2023.
11. CONCREMAT. Projeto Básico do Sistema de Esgoto Sanitário de Ibirité, 2011.
12. HESPANHOL, I. A Inexorabilidade do Reúso Potável Direto. Revista DAE, SABESP, janeiro-abril, 2015.
13. HESPANHOL, I. e MACHADO, P. A. M. Reúso Potável na Região Metropolitana de São Paulo e em Outros Países. EcoDebate, 5.12.2018.
14. JORNAL DA USP NO AR. Edição de 22 de março de 2021.
15. LIMA, G. O. Tratamento Terciário de Efluentes de Refinaria de Petróleo com Carvão Ativado em Pó, visando seu Reúso. Projeto de Graduação. Escola Politécnica da UFRJ. Rio de Janeiro, 2015.
16. ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DE SAÚDE. Manual de Produção de Água Potável Segura por Reúso do Esgoto, EcoDebate, 22/01/2018. Título original: Potable Reuse: Guidance for Producing Safe Drinking-Water, 2017.
17. PEQUENAS EMPRESAS. GRANDES NEGÓCIOS. Rede Globo. Cerveja feita com Água de Esgoto Tratada faz Sucesso em Singapura, 12.07.2022.
18. VON SPERLING, M. Lodos Ativados. 4ª edição. Belo Horizonte – Editora UFMG, 2016. 461 p.