

II-039 - A MODELAGEM MATEMÁTICA COMO FERRAMENTA NO GERENCIAMENTO DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTOS POR LODOS ATIVADOS – ESTUDO DE CASO DA ETE PARQUE NOVO MUNDO

Fabricio Bonadias da Silva ⁽¹⁾

Tecnólogo em Mecânica pela Faculdade de Tecnologia de São Paulo (FATEC-SP). Engenheiro Civil pela Universidade Nove de Julho (UNINOVE). Mestrando em Engenharia Civil pela Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Engenheiro da Divisão de Desenvolvimento Operacional e Tratamento de Esgotos da Sabesp.

Luiz Carlos Helou

Engenheiro Civil pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (POLI/USP). Mestre em Hidráulica e Saneamento pela Escola Politécnica da Universidade (POLI/USP). Doutor em Hidráulica e Saneamento pela Escola Politécnica da Universidade (POLI/USP). Engenheiro da Divisão de Desenvolvimento Operacional e Tratamento de Esgotos da Sabesp.

Rosmeiry Vanzella Vicente

Engenheiro Civil pela Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Mestre em Hidráulica e Saneamento pela Escola Politécnica da Universidade (POLI/USP). Engenheiro da Divisão de Desenvolvimento Operacional e Tratamento de Esgotos da Sabesp.

Endereço⁽¹⁾: Avenida do Estado, 561 - Luz – São Paulo - SP - CEP: 01107-000 - Brasil - Tel.: (11) 3388-7407 - e-mail: fbonadias@sabesp.com.br

RESUMO

Modelos matemáticos são utilizados para prever respostas de sistemas biológicos sujeitos a perturbações diversas, assim como alterações significativas das condições de afluência ou deterioração da qualidade do efluente. Por outro lado, a modelagem e a simulação, permitem a adoção de estratégias de controle, com o objetivo de otimizar e adequar o funcionamento de uma ETE em uma dada condição, procurando-se garantir um melhor desempenho dos processos biológicos.

Depois de apresentar as equações que regem o fenômeno, a metodologia baseada estritamente na DQO (Demanda Química de Oxigênio) será aplicada a uma ETE (Estação de Tratamento de Esgoto) por lodos ativados, simulando-se alguns cenários e discutindo-se os resultados. Recorreu-se a ETE Parque Novo Mundo.

PALAVRAS-CHAVE: Modelos Matemáticos, Demanda Química de Oxigênio, Taxa de Consumo de Oxigênio.

INTRODUÇÃO

UM POUCO DE HISTÓRIA

Giordano (2.010) afirma que ao longo dos últimos 30 anos, diversos modelos cinéticos foram criados para tentar descrever o comportamento do processo de degradação pelos microrganismos do lodo ativado. Em 1920, pela primeira vez foi aventada a remoção da matéria orgânica pelos microrganismos. A teoria da adsorção foi dominante nas décadas seguintes, sendo superada apenas em 1942 pela teoria da adsorção metabólica, onde, além da adsorção, ocorreria também o metabolismo microbiano. Entretanto, essa teoria não teve consenso científico, até que em 1955, pesquisadores começaram a considerar a composição do esgoto e suas relações nas reações físico-químicas e biológicas.

Em 1982, a *International Association on Water Pollution Research and Control* (IAWPRC), formou um grupo para analisar a modelagem Matemática para projeto e operação em Processos de Lodo Ativado. Esse grupo baseou-se no que existia de mais avançado na época liderado pelo professor Dr. Gerrit Marais da Universidade do Cabo, na África do Sul.

Em 1983, a Associação Internacional de Qualidade da Água (IAWQ) formou um grupo de trabalho com o objetivo de promover a aplicação de modelos práticos para projeto e operação dos sistemas biológicos no

tratamento de efluentes, O resultado final foi apresentado em 1987, e o modelo apresentado ficou sendo conhecido como *Activated Sludge Model* nº1, ou simplesmente ASM1.

Alem Sobrinho (2.012), faz um breve histórico de como a tecnologia se difundiu pelo mundo a partir da década de 1960, com as primeiras ETEs construídas para a remoção de nitrogênio, até o presente, passando pelas mais diversas opções, tais como sistemas mistos (com UASB), Bardenpho Modificado, etc.

Segundo Bye et al. (2.012) “A modelagem matemática dos processos de Lodos Ativados de uma Estação de Tratamento de Esgotos é uma ferramenta poderosa que pode ajudar os tomadores de decisão a maximizar a capacidade operacional existente dessa planta, de modo a se obter o máximo benefício em novas ou futuras ampliações. Isso, sem dúvida, ajuda no desenvolvimento de programas de investimentos de capital de forma a acomodar o crescimento futuro”.

O BALANÇO DE MASSA

Independentemente do tipo de processos e equipamentos, qualquer experimento estará sujeito, por mais complexo que seja tal experimento, às mesmas leis da física e da química, principalmente às que concernem à conservação de massa, energia e *momentum*, **equação 0**.

De maneira simplificada, a lei da conservação de massa afirma que massa não pode ser criada nem destruída. Segundo Fernandes et al. (2.006), podem ocorrer reações químicas, que transformam reagentes em produtos, mas a massa total (reagentes e produtos) não será alterada. Matematicamente pode-se escrever que:

$$\frac{dm}{dt} = 0 \quad \text{ou} \quad \left(\begin{array}{c} \text{acumulo} \\ \text{de} \\ \text{massa} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{massa} \\ \text{que} \\ \text{entra} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{massa} \\ \text{que} \\ \text{sai} \end{array} \right) \quad \text{equação [0]}$$

Helou (2.000) define modelo matemático como sendo uma simplificação de um sistema ou fragmento da natureza, realizado através de equações, sendo que a proximidade entre a representação e o sistema está diretamente ligada à precisão dos resultados. Assim, o usuário de um modelo pode pôr à prova diversas hipóteses, simulando situações existentes ou novas condições de operação. Um modelo pode ser usado para projetar um novo sistema ou até mesmo para prever um futuro comportamento.

Segundo Vicente (2.006), a simulação avalia as respostas de um sistema submetido a eventos em condições e restrições em uma operação em tempo real, já a simulação difere da otimização por não apresentar uma natureza otimizante, mas sim descritiva. A procura de uma solução ótima não é objetivo direto da simulação, uma vez que ela é extraída a partir de um grupo de possíveis resultados e variáveis de decisão.

O objetivo de uma simulação visa basicamente conhecer mais profundamente as condições operacionais de uma planta existente, e dessa forma oferecer opções de melhorias ao processo. As simulações podem ser caracterizadas por duas formas distintas, a saber: a simulação física e a matemática.

A simulação física envolve o uso do próprio processo ou uma versão reduzida dele (planta piloto) sendo muitas vezes bastante dispendiosa e impossível de se aplicar.

Já a simulação matemática se faz através das equações matemáticas dos principais fenômenos que envolvem o processo, mas que pressupõe o conhecimento prévio de alguns coeficientes das equações envolvidas no processo. Seu desenvolvimento abrange os princípios básicos da conservação da massa e de energia. Sempre é importante a adoção de hipóteses simplificadoras devendo-se sempre levar em consideração as condições iniciais e de contorno do problema em si.

Simulações de cenários em Sistemas de Lodos Ativados são de fundamental importância nas diversas etapas no planejamento de uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE), de duas formas distintas. Na fase de projeto, quando ainda é possível fazerem-se mudanças no desenho da planta, e na fase de operação, quando já não se podem alterar dimensões de tanques, mas ainda é possível estabelecerem-se regras operacionais que se minimizem os custos de operação da planta.

Para que uma Estação de Tratamento de Esgoto funcione de maneira adequada é necessário que as hipóteses adotadas na fase de planejamento sejam confirmadas na fase operacional. Para tanto é necessário que se estabeleçam cenários que minimizem custos operacionais, no caso de uma ETE já existente, ou que se diminuam custos de investimentos em ETEs a serem projetadas.

No caso de uma planta cujo tratamento seja feito por lodos ativados, os custos que têm o maior peso na composição do custo global são o de energia elétrica, e o de transporte de lodo. Se, por um lado, o custo da energia elétrica varia de acordo com a região e mercado energético, o de transporte dos lodos depende de a distância entre a ETE e o aterro sendo um fator muito importante no caso de grandes metrópoles. Para tanto, é importante que se conheçam bem os principais parâmetros envolvidos no processo.

Para que se obtenham resultados compatíveis com a realidade operacional é necessário que, primeiramente, os dados sejam exaustivamente testados através de simulações matemáticas.

OBJETIVO

O objetivo deste trabalho foi o de estabelecer, através de um Balanço de Massa, baseado exclusivamente Demanda Química de Oxigênio (DQO), que é um parâmetro fácil de ser obtido, a quantidade mínima de estruturas a serem colocadas em operação (tanques de aeração e decantadores secundários), bem como estimar a energia elétrica a ser dispendida no tratamento, através do monitoramento da Taxa de Consumo de Oxigênio (TCO), mantendo-se restringidas a Taxa de Aplicação de Sólidos (TAS) nos decantadores secundários e a concentração de sólidos voláteis nos reatores (X_V).

As análises de DBO, ou Demanda Bioquímica de Oxigênio, comumente utilizadas em trabalhos de engenharia, demoram cinco dias para que se obtenham resultados, enquanto as de DQO não demoram mais do que duas horas, além de existirem equipamentos que podem realizar a aquisição de dados em campo. Outro fator relevante é o seu custo, que é pelo menos, quatro vezes maior. Pese isso, a DBO tem a enorme desvantagem de não “fechar” um balanço de massa devido ao resíduo endógeno.¹

MATERIAIS E MÉTODOS

É importante salientar que a hipótese fundamental para efeito dos cálculos pressupõe o regime permanente (*steady state*), onde as grandezas envolvidas no processo não sofrem alteração no tempo. Dessa forma, pode-se dizer que para efeito de projeto ou planejamento da operação, para períodos considerados longos, geralmente maiores que duas a três vezes a idade do lodo, a hipótese do regime permanente pode ser aplicada com segurança.

A taxa de aplicação de sólidos (TAS) é baseada na vazão afluyente ao sistema biológico (Q) bem como a vazão oriunda da recirculação (Q_R), pois o importante é que a carga aplicada por unidade de área não ultrapasse o fluxo limite de sólidos. Sendo assim, a carga afluyente é a carga efetivamente aplicada ao decantador secundário, ou seja, $(Q+Q_R).X$.

A **Tabela 1** apresenta, resumidamente, alguns parâmetros básicos largamente utilizados em projetos de sistemas de lodo ativados, baseados na experiência dos autores e de dados disponíveis em várias ETEs.

¹ Segundo van Haandel e Marais (1.999) parte do material orgânico afluyente biodegradável (que tem DBO) no sistema de lodo ativado se transforma em resíduo endógeno não biodegradável, e que, portanto não tem DBO. Desse modo, a DBO “desaparece” no sistema de lodo ativado, sem que haja oxidação correspondente. Ou seja, os fluxos da DBO no efluente e no lodo de excesso, somados ao fluxo do oxigênio consumido pela oxidação do material orgânico sempre serão menores que o fluxo da DBO efluente¹.

Tabela 1 – Principais características dos sistemas de lodos ativados

Parâmetro/ Valores Típicos	Sistema de Lodos Ativados	
	Convencional	Aeração Prolongada
Tempo de Detenção (h)	6 – 8	16 – 24
Idade do Lodo (dias)	4 – 10	18 – 30
SSVTA (mg/L)	1.500-3.000	3.000-6.000
A/M (kgDBO/kgSSV.d)	0,3 - 0,8	0,08 - 0,15
Taxa de reciclo de lodo (%)	25 a 75	75 a 150
Remoção DQO (%)	85 – 90	90 – 95
SST no lodo de retorno (mg/L) fundo do DS	8.000-12.000	8.000-12.000
Taxa de Aplicação hidráulica (m ³ /m ² .h) para Q méd.	0,67 - 1,33	0,33 - 0,67
Taxa de Aplicação hidráulica (m ³ /m ² .h) para Q máx.	1,7 -2,00	1,00 - 1,33
Taxa de Aplicação de sólidos (kg/m ² .h) para Q méd.	4,0 - 6,0	1,0 - 5,0
Taxa de Aplicação hidráulica (kg/m ² .h) para Q máx.	10	7

Adaptado de Alem Sobrinho e Kato (1.999) e von Sperling *et al.* (2.002).

Já a Taxa de Consumo de Oxigênio (TCO) é o parâmetro fundamental na determinação da potência do sistema de sopradores e, conseqüentemente, tem sua importância aumentada já que está intimamente ligada ao consumo de energia elétrica da planta.

Segundo van Haandel (1.999) 1 kg de DQO é oxidado por 1 kg de oxigênio (O₂), portanto o fluxo material orgânico oxidado será sempre numericamente igual ao fluxo do oxigênio consumido no processo de oxidação. O fluxo de oxigênio consumido é dado pelo produto do volume do reator pela Taxa de Consumo de Oxigênio. A TCO é igual ao consumo do oxigênio por unidade de volume e de tempo, e pode ser mensurada experimentalmente.

Assim, ao se fixar a idade do lodo desejada à operação e adotar a DQO na entrada do sistema biológico, bastaria, uma vez obedecido o equacionamento exposto a seguir, operar a planta dentro de limites pré-estabelecidos para a Taxa de Aplicação de Sólidos e da concentração dos sólidos voláteis no reator.

EQUACIONAMENTO

Para o trabalho em questão, recorreu-se à cinética de lodos ativados proposta por Ekama, van Haandel e Marais, e consolidada pelo ASM1 da IWA (2.008).

Os modelos matemáticos mais empregados na predição de comportamentos biológicos em unidades de tratamento de esgotos derivam dos estudos realizados pelo grupo de pesquisadores da IWA – *International Water Association*, denominados de ASM – *Activated Sludge Models* (Modelos para Lodo Ativado). Para esses modelos contribuíram os estudos realizados pela equipe de pesquisadores da Universidade de Cape Town na África do Sul, coordenada pelo professor G. Marais, em meados dos anos 80. Apesar desses modelos se basearem em processos que ocorrem na biomassa suspensa, muitos pesquisadores que trabalham com biomassa fixa, os utilizam, conforme preconizado por SEZERINO (2.006).

A partição da DQO, proposta primeiramente por van Haandel e Marais (1.999), facilitou em muito o entendimento da dinâmica dos lodos ativados. Os autores utilizam a DQO (Demanda Química de Oxigênio) como parâmetro representativo da matéria orgânica haja vista que é possível relacionar estequiometricamente e de forma direta, a DQO com o material orgânico. De acordo com esses autores, o material orgânico em termos

de DQO pode ser biodegradável e não biodegradável. A **Figura 1** apresenta um esquema das frações do material orgânico em um sistema de lodo ativado.

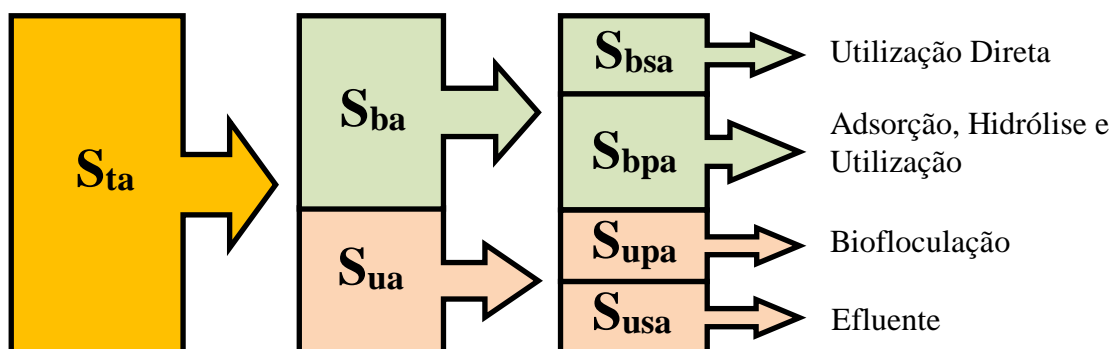


Figura 1 – Representação das frações do material orgânico, adaptado de van Haandel e Marais (1.999)

De acordo com o esquema da **Figura 1**, tem-se:

S_{ta} – DQO afluente total

S_{ba} – DQO biodegradável afluente

S_{ua} – DQO não biodegradável afluente

S_{bsa} – DQO biodegradável solúvel afluente

S_{bpa} – DQO biodegradável particulada afluente

S_{upa} – DQO não biodegradável particulada afluente

S_{usa} – DQO não biodegradável solúvel afluente

E através dessa partição da DQO podem-se formular as frações:

f_{us} – fração da DQO não biodegradável solúvel que é o quociente entre a DQO não biodegradável solúvel afluente e a DQO total, ou seja, é a parte da DQO que se perde pelo efluente final.

f_{up} – fração da DQO não biodegradável particulada que é o quociente entre a DQO não biodegradável particulada afluente e a DQO total, ou seja, é a parte da DQO que dá a parcela que se transforma em lodo.

A partir da partição da DQO proposta, e em consonância com as frações definidas, fica fácil estabelecerem-se as seguintes relações:

$$S_{ta} = S_{ba} + S_{ua} \quad \text{equação [1]}$$

$$S_{ba} = (1 - f_{us} - f_{up}) \cdot S_{ta} \quad \text{equação [2]}$$

$$S_{bsa} = f_{sb} \cdot S_{ba} \quad \text{equação [3]}$$

$$S_{bpa} = S_{ba} - S_{bsa} \quad \text{equação [4]}$$

$$S_{ua} = S_{ta} - S_{ba} \quad \text{equação [5]}$$



$$S_{upa} = f_{up} \cdot S_{ta} \quad \text{equação [6]}$$

$$S_{usa} = f_{us} \cdot S_{ta} \quad \text{equação [7]}$$

$$S_{ua} = (f_{us} + f_{up}) \cdot S_{ta} \quad \text{equação [8]}$$

$$S_{ba} = (1 - f_{us} - f_{up}) \cdot S_{ta} \quad \text{equação [9]}$$

Da mesma forma que para a DQO, foi proposta uma partição dos sólidos voláteis como se segue, na **Figura 2**.

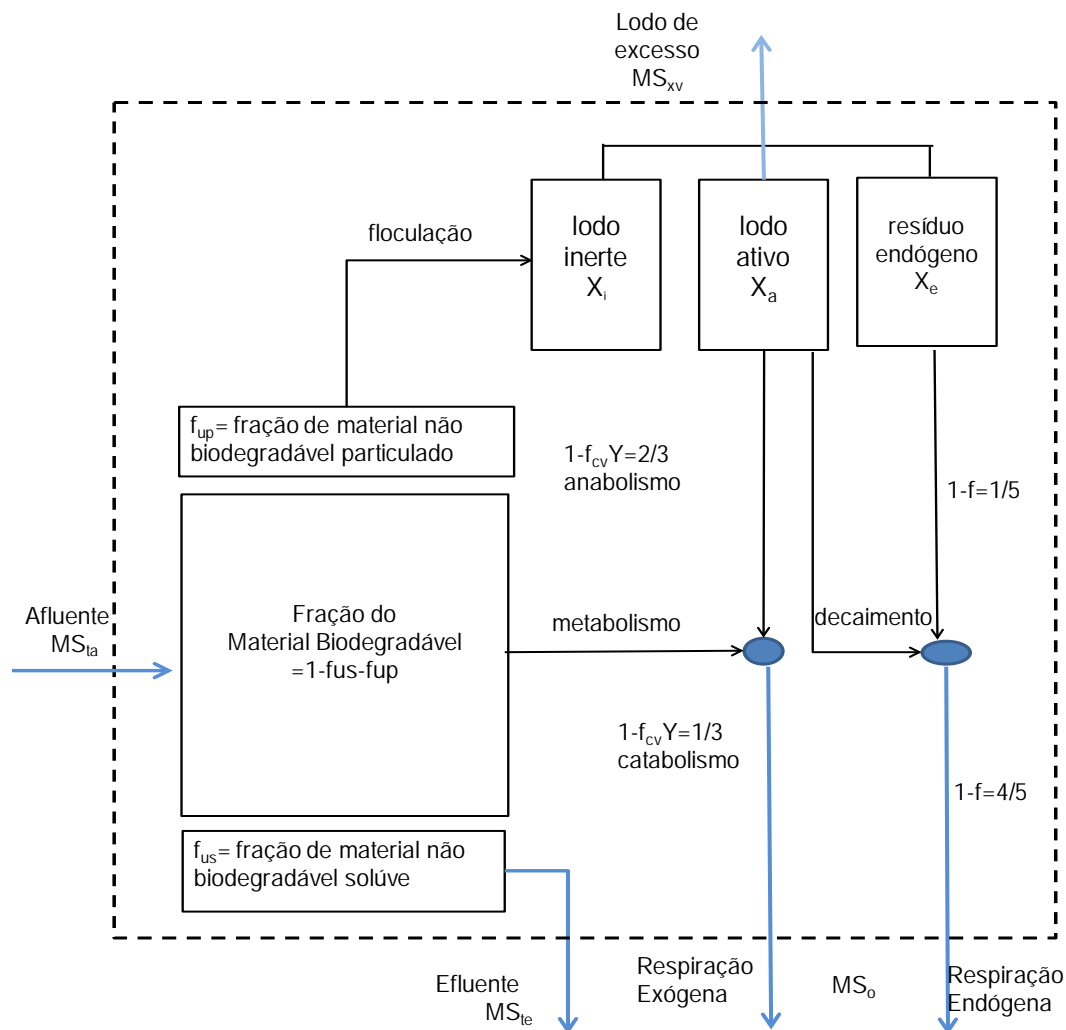


Figura 2 – Esquema dos principais processos no sistema de lodos ativados, adaptado de van Haandel e Marais (1.999).

Acrescentando-se o conceito da idade do lodo, que é o tempo de permanência dos sólidos no sistema, definido como sendo a relação entre a massa do lodo presente no sistema e a massa descarregada por dia, ou seja:

$$R_s = \frac{V_r}{q_w} \quad \text{equação [10]}$$

Onde V_r é o volume do reator e q_w é a vazão de descarte do lodo.

Já o tempo de permanência do líquido no sistema, comumente chamado de tempo de detenção hidráulica, é dado pela razão entre o volume e a vazão afluyente ao reator, ou seja:

$$R_h = \frac{V_r}{Q} \quad \text{equação [11]}$$

Acrescentando-se, agora a definição da constante de decaimento do lodo ativo, b_{HT} , bem como a massa do lodo ativo presente no sistema por unidade de DQO biodegradável aplicada por dia, C_r , obtém-se:

$$b_{HT} = 0,24 \cdot 1,04^{(T-20)} \quad \text{equação [12]}$$

Onde T é a temperatura em Celsius do licor misto e:

$$C_r = \frac{Y \cdot R_s}{1 + b_{HT} \cdot R_s} \quad \text{equação [13]}$$

Onde Y é o coeficiente de síntese celular, ou coeficiente de rendimento geralmente adotado como sendo 0,45 mg SSV/mg DQO.

EQUACIONAMENTO – LODO INERTE (X_i)

O lodo inerte que é gerado pela floculação do material orgânico não biodegradável particulado afluyente, pode ser obtido através do balanço:

$$Q \cdot X_{ia} = q \cdot X_i \quad \text{equação [14]}$$

Onde X_{ia} é a concentração dos sólidos inertes afluyente.

Relaciona-se assim, a concentração dos sólidos orgânicos não biodegradáveis particulados ao material orgânico afluyente através do fator de conversão f_{cv} , constante dada pela relação entre a DQO e os SSV (sólidos suspensos voláteis) no reator (algo entre 1,48 e 1,50) como se segue:

$$X_{ia} = \frac{S_{upa}}{f_{cv}} = \frac{f_{up}}{f_{cv}} \cdot S_{ta} \quad \text{equação [15]}$$

e,

$$X_i = \frac{f_{up}}{f_{cv}} \frac{R_s}{R_h} S_{ta} \quad \text{equação [16]}$$

EQUACIONAMENTO - LODO ATIVO (X_a)

O lodo ativo é afetado por três fatores: pelo seu crescimento devido á síntese celular, pelo seu decaimento e pela descarga do lodo em excesso. No regime permanente, onde não há variação da concentração do lodo ativo com o tempo tem-se:

$$\frac{dX_a}{dt} = \left(\frac{dX_a}{dt} \right)_c + \left(\frac{dX_a}{dt} \right)_d + \left(\frac{dX_a}{dt} \right)_e = r_c + r_d + r_e = 0 \quad \text{equação [17]}$$

Assumindo-se que a taxa de crescimento do lodo ativo é proporcional à taxa de utilização do material biodegradável e que todo material biodegradável é utilizado, tem-se que a taxa de utilização do material biodegradável r_u é igual à sua taxa a de alimentação. Daí vem que:

$$V_r \frac{dS_{ba}}{dt} = V_r \cdot r_u = Q \cdot S_{ba} \quad \text{equação [18]}$$

ou,

$$r_u = \frac{Q \cdot S_{ba}}{V_r} = \frac{S_{ba}}{R_h} \quad \text{equação [19]}$$

E como a taxa de crescimento do lodo ativo é dada como sendo:

$$\left(\frac{dX_a}{dt} \right)_c = Y \cdot r_u = Y \frac{S_{ba}}{R_h} \quad \text{equação [20]}$$

Para a taxa de decaimento do lodo ativo, assume-se uma reação de primeira ordem, vem que:

$$\left(\frac{dX_a}{dt} \right)_d = r_d = -b_{HT} \cdot X_a \quad \text{equação [21]}$$

Onde b_{HT} é a constante de decaimento do lodo ativo

E, finalmente, para a taxa de diminuição do lodo ativo devido descarte do lodo, basta aplicar a definição da idade do lodo, que é a razão entre massa de lodo ativo pela taxa de descarga do lodo ativo:

$$R_s = \frac{V_r X_a}{V_r \cdot \left(-\frac{dX_a}{dt} \right)_e} \quad \text{equação [22]}$$

Portanto:

$$\left(\frac{dX_a}{dt} \right)_e = r_e = -\frac{X_a}{R_s} \quad \text{equação [23]}$$

Lembrando que:

$$r_c + r_d + r_e = 0 \quad \text{equação [24]}$$

Fica fácil, agora, chegar-se à expressão para o lodo ativo:

$$X_a = \left[\frac{(1 - f_{us} - f_{up}) \cdot Y \cdot R_s}{1 + b_{HT} \cdot R_s} \right] \cdot \frac{S_{ta}}{R_h} = \frac{(1 - f_{us} - f_{up}) \cdot C_r \cdot S_{ta}}{R_h} \quad \text{equação [25]}$$



EQUACIONAMENTO – RESÍDUO ENDÓGENO

Assumindo-se que a taxa de produção de resíduo endógeno é igual à taxa de descarte do lodo de excesso e, que a taxa de diminuição da concentração de resíduo endógeno devido à descarga do lodo pode ser calculada de modo semelhante à utilizada no lodo ativo, vem que:

$$X_e = f \cdot b_{HT} \cdot R_s \cdot X_a \quad \text{equação [26]}$$

Onde f é a fração de lodo ativo decaído transformado em resíduo endógeno, que em geral assume valor de 0,20.

EQUACIONAMENTO – LODO ORGÂNICO (X_v)

Levando-se em conta que: $X_v = X_a + X_e + X_i$ vem:

$$X_v = \left[(1 - f_{us} - f_{up}) \cdot C_r \cdot (1 + f \cdot b_{HT} \cdot R_s) + f_{up} \frac{R_s}{f_{cv}} \right] \cdot \frac{S_{ta}}{R_h} \quad \text{equação [27]}$$

A concentração dos sólidos totais no reator será do por:

$$X_{TA} = \frac{X_v}{f_v} \quad \text{equação [28]}$$

Onde f_v representa a relação entre SSV e SST no reator.

EQUACIONAMENTO – AS FRAÇÕES DA DQO

Chamando-se de ME_v da massa diária de lodo de excesso produzida por dia (mg SSV/d) e de MX_v a massa de lodo:

$$ME_v = \frac{V_r \cdot X_v}{R_s} = \left[(1 - f_{us} - f_{up}) \cdot (1 + f \cdot b_{HT} \cdot R_s) \cdot \frac{C_r}{R_s} + \frac{f_{up}}{f_{cv}} \right] \cdot MS_{ta} \quad \text{equação [29]}$$

$$MX_v = V_r \cdot X_v = \left[(1 - f_{us} - f_{up}) \cdot (1 + f \cdot b_{HT} \cdot R_s) \cdot C_r + \frac{f_{up} \cdot R_s}{f_{cv}} \right] \cdot MS_{ta} \quad \text{equação [30]}$$

Lembrando que a relação entre a DQO e os sólidos suspensos voláteis é representada pela constante f_{cv} vem que:

$$mS_{XV} = f_{cv} \cdot \frac{ME_v}{MX_v} = f_{cv} \cdot (1 - f_{us} - f_{up}) \cdot (1 + f \cdot b_{HT} \cdot R_s) \cdot \frac{C_r}{R_s} + f_{up} \quad \text{equação [31]}$$

EQUACIONAMENTO – A FRAÇÃO DO LODO OXIDADO (mS_o)

A taxa de consumo de oxigênio, devido a **respiração exógena** diz que para cada grama de DQO se formam Y gramas de lodo ativo, cuja DQO é de $f_{cv} \cdot Y$, restando portanto, $(1 - f_{cv}Y)$ g de DQO para a oxidação. Para essa oxidação será necessária, por definição, $(1 - f_{cv}Y)$ g de oxigênio; daí, o consumo de oxigênio para a respiração exógena será uma fração $(1 - f_{cv}Y)$ da DQO metabolizada. Onde:

$$TCO_{ex} = (1 - f_{cv}) \cdot r_u = (1 - f_{cv}) \cdot \frac{S_{ba}}{R_h} \quad \text{equação [32]}$$

Sabendo-se que a taxa de oxidação do lodo ativo é a diferença entre as taxas de decaimento do lodo ativo e da taxa do surgimento do resíduo endógeno vem que:

$$r_o = \left(\frac{dX_a}{dt} \right)_d - \left(\frac{dX_e}{dt} \right)_d = b_{HT} X_a - f \cdot b_{HT} \cdot X_a = (1-f) \cdot b_{HT} \cdot X_a \quad \text{equação [33]}$$

Usando-se, novamente a constante f_{cv} , pode-se escrever que:

$$TCO_{en} = f_{cv} \cdot r_o = f_{cv} \cdot (1-f) \cdot b_{HT} \cdot X_a \quad \text{equação [34]}$$

Lembrando que a Taxa de Consumo de Oxigênio para o material orgânico será a soma das taxas para as respirações exógena e endógena:

$$TCO = TCO_{ex} + TCO_{en} = (1-f_{cv}) \cdot \frac{S_{ba}}{R_h} + f_{cv} \cdot (1-f) \cdot b_{HT} \cdot X_a \quad \text{equação [35]}$$

Podendo-se chegar à expressão:

$$TCO = (1-f_{us} - f_{up}) \cdot (1-f_{cv} \cdot Y + f_{cv} \cdot (1-f) \cdot b_{HT} \cdot C_r) \frac{S_{ta}}{R_h} \quad \text{equação [36]}$$

A fração da DQO que será oxidada no sistema de lodos ativados será expressa por:

$$mS_o = \frac{MO_c}{MS_{ta}} = \frac{V_r \cdot TCO}{Q \cdot S_{ta}} = (1-f_{us} - f_{up}) \cdot [(1-f_{cv} \cdot Y) + f_{cv} \cdot (1-f) \cdot b_{HT} \cdot C_r] \quad [37]$$

E, finalmente a fração do material orgânico que permanece na fase líquida será dada por:

$$mS_{te} = f_{us} \quad \text{equação [38]}$$

Lembrando sempre que:

$$mS_{xv} + mS_o + mS_{te} = 1 \quad \text{equação [39]}$$

Sabendo-se que:

$$q_w = \frac{mS_{xv} \cdot Q \cdot S_{ta}}{f_{cv} \cdot X_w} \quad \text{equação [40]}$$

Caso o descarte se faça diretamente pelo reator, a concentração de sólidos do descarte será a mesma do reator:

$$X_w = X_{TA} \quad \text{equação [41]}$$

Já a vazão de descarte será:

$$q_w = \frac{V_r}{R_s} \quad \text{equação [42]}$$

A carga de sólidos, em termos da DQO, do descarte será dada por:

$$L_w = q_w \cdot X_w \quad \text{equação [43]}$$

EQUACIONAMENTO DA FASE SÓLIDA

Na fase sólida haverá apenas a partição de vazão e carga, pois nesse caso não há reatores (digestores) envolvidos no processo.

Já para o espessador de lodo (adensador por gravidade ou centrífuga de adensamento), com uma taxa de captura de sólidos λ tem-se:

$$L_{ad} = \lambda \cdot L_w \quad \text{equação [44]}$$

$$L_{sob} = L_W - L_{ad} \quad \text{equação [45]}$$

Assumindo-se que seja conhecida a DQO do sobrenadante do adensador por gravidade, DQO_{sob} , fica fácil a determinação das vazões do sobrenadante e do lodo adensado:

$$Q_{ad}^{sob} = \frac{L_{sob}}{DQO_{sob}} \quad \text{equação [46]}$$

$$Q_{LA} = q_w - Q_{ad}^{sob} \quad \text{equação [47]}$$

No desaguamento, pode-se, por exemplo, através da DQO da torta ou do lodo centrifugado, determinarem-se os demais parâmetros, que seriam as cargas da torta e do filtrado, bem como as respectivas vazões. Desta forma, vem que:

$$L_{torta} = CapSol \cdot L_{ad} \quad \text{equação [48]}$$

$$L_{filtrado} = L_{ad} \cdot (1 - CapSol) \quad \text{equação [49]}$$

$$Q_{torta} = \frac{L_{torta}}{DQO_{torta}} \quad \text{equação [50]}$$

$$Q_{filtrado} = Q_{LA} - Q_{torta} \quad \text{equação [51]}$$

No reciclo as cargas e vazões que retornam ao início do processo devem ser adicionadas às afluentes, tal que:

$$L_{rec} = L_{filtrado} + L_{sob} \quad \text{equação [52]}$$

$$Q_{rec} = Q_{sobr} + Q_{filtr} \quad \text{equação [53]}$$

$$Q_{ef} = Q_{af}^{TA} - q_w \quad \text{equação [54]}$$

Uma vez conhecido a carga da DQO que aflui ao Sistema Biológico, MSt_a , vem que:

$$MSt_a = Q \cdot St_a \quad \text{equação [55]}$$

$$MS_0 = mS_0 \cdot MSt_a \quad \text{equação [56]}$$

$$MS_{xv} = mS_{xv} \cdot MSt_a \quad \text{equação [57]}$$

$$MSt_e = mSt_e \cdot MSt_a = fus \cdot MSt_a \quad \text{equação [58]}$$

Em termos de DQO, a carga que será somada à carga que aflui ao sistema biológico será:

Finalmente, para a taxa de aplicação de sólidos, recorre-se à expressão:

$$TAS = \frac{(Q + RQ) \cdot X_{TA}}{Area_{DS}} \quad \text{equação [55]}$$

Já a massa de torta produzida será dada pela relação entre a vazão da torta e sua massa específica ρ de tal forma que:

$$\text{Massa da torta} = \rho \cdot Q_{\text{torta}}$$

equação [60]

Dessa forma, através das equações obtidas pode-se construir um modelo baseado em cargas (ou massa) de DQO de um sistema qualquer de lodos ativados, conforme o roteiro de cálculo que segue:

ROTEIRO DE CÁLCULO

O roteiro de cálculo é apresentado através das **tabelas 2, 3 e 4**, essas tabelas apresentam os símbolos, unidades, valores típicos e equações utilizadas, a **tabela 2** apresenta os parâmetros utilizado como entrada do modelo, e as **tabelas 3 e 4** as equações utilizadas para cada parâmetro calculado.

Tabela 2 – Dados de Entrada contendo parâmetros físicos e cinéticos.

PARÂMETROS FÍSICOS	SÍMBOLOS	UNIDADE	VALOR TÍPICO
Número de Decantadores s Secundários	nDS	unidade	-----
Número ode Tanques de Aeração	nTA	unidade	-----
Diâmetro dos Decotadores Secundários	D	m	-----
Volume Unitário do Reator	Vr	m ³	-----
Parâmetros Operacionais			
Vazão afluyente à ETE	Q	m ³ /dia	-----
DQO afluyente à ETE	DQOa	mg/l	-----
Fase Líquida			
Idade do Lodo	Rs	d	-----
Taxa de recirculação	R	%	-----
Relação SSV/SST nos reatores	fv	-----	-----
Caso o descarte seja feito pelos Dec. Sec.			
Concentração lodo de excesso	Xw	mg/l	-----
Fase Sólida			
Captura de sólidos no desaguamento	λ	%	-----
DQO da torta	DQOtorta	mg/l	-----
Porcentagem de Sólidos Totais na torta	ST	%	-----
PARÂMETROS CINÉTICOS	SÍMBOLOS	UNIDADE	VALOR TÍPICO
Fração do lodo ativo que se torna resíduo endógeno	f	-----	0,2
Fração da DQO afluyente ao reator não biodegr. sol.	fus	-----	0,08
Fração da DQO afluyente ao reator não biodegr. part.	fup	-----	0,12
Fração biodegradável solúvel afluyente	fsb	-----	0,2
Razão DQO/SSV no lodo orgânico	fcv	mg DQO/mgSSV	1,48
Coefficiente de rendimento	Y	mg SSV /mgDQO	0,45
Temperatura	T	°C	-----



Tabela 3 – Roteiro de Cálculos da Fase Líquida.

CÁLCULOS - FASE LÍQUIDA	SÍMBOLOS	UNIDADE	EQUAÇÃO
Constante de decaimento do lodo	b_{HT}	-----	[12]
Lodo Ativo por unidade de massa de DQO aplicada por dia	Cr	-----	[13]
Tempo de Detenção Hidráulica do Sistema	Rh	d	[11]
DQO			
DQO total afluente ao Reator	Sta	mg/l	[dado]
DQO biodegradável afluente	Sba	mg /l	[2]
DQO biodegradável solúvel afluente (mg/L)	Sbsa	mg/l	[3]
DQO não biodegradável afluente	Sua	mg/l	[5]
DQO biodegradável particulada afluente (mg/L)	Sbpa	mg/l	[4]
DQO biodegradável solúvel da afluente (mg/L)	Susa	mg/l	[7]
DQO biodegradável particulada afluente (mg/L)	Supa	mg/l	[6]
Tempo de detenção hidráulico	Rh	dia	[11]
Fração da DQO afluente oxidada	mSo	-----	[37]
Fração da DQO afluente no lodo de excesso	mSxv	-----	[31]
Fração da DQO que permanece no sistema	mSte	-----	[38]
Taxa de consumo de Oxigênio	TCO	mg/(l.h)	[36]
Lodos			
Lodo inerte (mg/L)	Xi	mg/l	[16]
Lodo Ativo (mg/L)	Xa	mg/l	[25]
Resíduo Endógeno (mg/L)	Xe	mg/l	[26]
Lodo volátil (mg/L)	Xv	mg/l	[27]
Concentração de sólidos totais no reator	Xta	mg/l	[28]
Taxa de consumo de oxigênio	TCO	mg/l.h	[36]

Tabela 4 – Roteiro de Cálculos da Fase Sólida.

CÁLCULOS - FASE SÓLIDA	SÍMBOLOS	UNIDADE	EQUAÇÃO
Caso o descarte seja efetuado através dos Decantadores Secundários			
Vazão de descarte de lodo	q_w	m^3/dia	[40]
Caso o descarte se faça diretamente através do Reator			
Concentração de descarte	$X_w=X_{ta}$	mg/l	[28]
Vazão de descarte	q_w	m^3/dia	[42]
Carga de DQO oxidada no reator	MS_o	kg/dia	[56]
Carga de DQO que vai para o lodo	MS_{xv}	kg/dia	[57]
Carga de DQO que se perde pelo efluente	MSt_e	kg/dia	[58]
Carga de DQO no descarte do lodo	L_w	kg/dia	[43]
Na fase sólida			
Adensador ou flotor ou centrífuga de espessamento			
Carga de DQO do lodo adensado	L_{ad}	kg/dia	[44]
Carga de DQO do sobrenadante	L_{sobr}	kg/dia	[45]
Vazão do lodo adensado	Q_{lad}	m^3/dia	[46]
Desaguamento Mecânico do Lodo			
Vazão da torta	Q_{torta}	m^3/dia	[50]
Carga de DQO da torta produzida	L_{torta}	kg/dia	[48]
Vazão do filtrado	Q_{filtr}	m^3/dia	[51]
Carga de DQO do filtrado	L_{filtr}	kg/dia	[49]
Torta produzida	Torta	kg/dia	[60]
No Reciclo			
Carga de DQO no reciclo	L_{rec}	kg/dia	[52]
Vazão do reciclo	Q_{rec}	m^3/dia	[53]
Vazão do efluente final	Q_{ef}	m^3/dia	[54]
Carga no efluente final	MSt_e	kg/dia	[54]
Parâmetros de controle			
Números de reatores em operação	n_{TA}	unidade	-----
Número de decantadores secundários em operação	n_{DS}	unidade	-----
Taxa de Aplicação de sólidos	TAS	$kg/m^2.h$	[55]
Taxa de consumo de oxigênio	TCO	$mg/l.h$	[36]
Taxa de Recirculação do lodo	R	(%)	-----

A vazão afluyente ao sistema biológico é somada à vazão do reciclo, bem como as cargas de DQO até que haja a convergência, que ocorre rapidamente, geralmente entre a terceira e a quarta iteração.

ESTUDO DE CASO – A ETE PARQUE NOVO MUNDO

A Estação de Tratamento de Esgotos Parque Novo Mundo é uma estação de tratamento de esgotos por processos de lodos ativados, com capacidade instalada de 2,5 m^3/s . A vazão média atual afluyente à ETE é de 2,53 m^3/s (2014), apresentando picos elevados, principalmente em épocas de chuva.

A ETE PNM está localizada no Município de São Paulo, na margem direita do Rio Tietê. Situa-se cerca de 300 m a jusante da foz do Rio Cabuçu de Cima, nas proximidades da Ponte Aricanduva da Marginal do Rio Tietê e dos acessos às rodovias Dutra e Fernão Dias.

As instalações da fase líquida ocupam uma área de 18,14 ha junto à marginal do rio Tietê. Outra área de 2,50 ha, localizada do lado esquerdo da via de acesso à Rodovia Fernão Dias, é destinada às instalações das unidades de fase sólida.

A ETE PNM foi projetada no início dos anos 90 para tratar 7,5 m³/s, de capacidade final, dividida em três módulos de 2,5 m³/s, sendo que o primeiro módulo entrou em operação em 1998.

Em função da exiguidade de área disponível para implantação da ETE, algumas alterações foram introduzidas no processo de tratamento de lodos ativados convencional:

- Os decantadores primários foram substituídos por peneiras rotativas, projetadas com abertura de 0,75 mm. Foram consideradas para estas peneiras eficiências da ordem de 15% de remoção de sólidos e 10% de remoção de DBO₅, inferiores às observadas no tratamento primário convencional em decantadores primários.
- Foi proposta a estabilização química para o lodo gerado (ao invés de digestores anaeróbios) que, após desaguamento, seria encaminhado para secagem térmica na ETE São Miguel.
- Para o tratamento excesso de lodo, foram implantados flotores por ar dissolvido, seguidos por condicionamento com cal e posterior desaguamento com filtros prensa de placas.

A **Figura 3** apresenta o fluxograma de processo da ETE PNM existente.

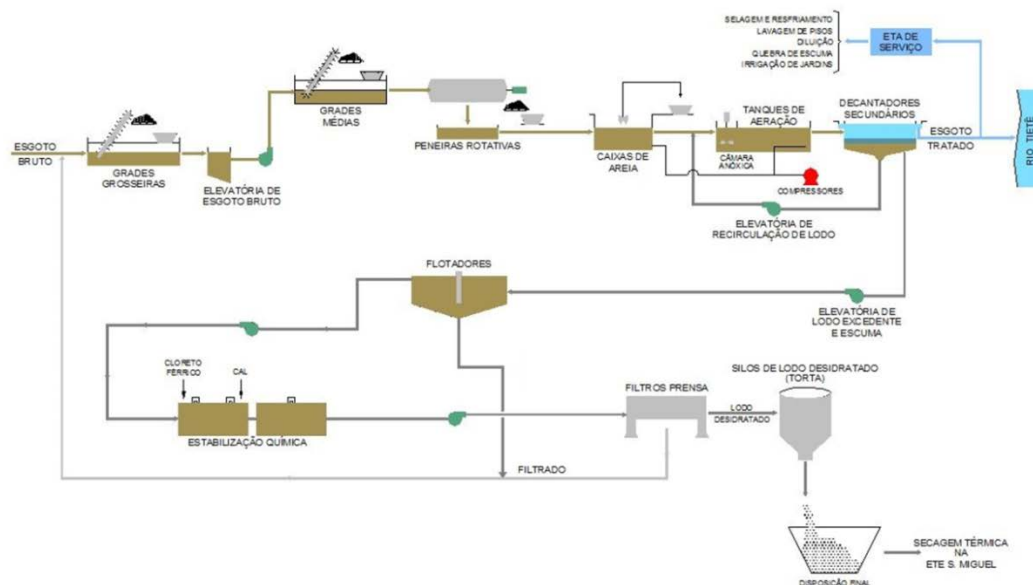


Figura 3 – A ETE PNM - Adaptado de Relatório do PLANTE - Sabesp [2017].

Assim, para a situação atual da ETE Parque Novo Mundo (2.011) considerando-se uma vazão média de 2.500 L/s, e uma concentração de DQO de 500 mg/L, com descarte de lodo pelo decantador secundário a uma concentração de 8.000 mg SSV/L, (haja vista que a planta não possui decantadores primários), a melhor configuração operacional procurada seria aquela em que o número de unidades de operação fosse o mínimo possível. Espera-se, também, que a planta opere com a menor taxa de consumo de oxigênio, para uma mesma idade do lodo, respeitando-se os limites para as taxas de aplicação de sólidos.

Adotaram-se os valores que se seguem para a elaboração do Balanço de Massa:

Com esses dados apresentados na **Tabela 5** obtiveram-se como saída do modelo os seguintes resultados, conforme mostram a **Tabela 6**:

Tabela 5 – Dados operacionais de entrada dos cálculos.

DADOS OPERACIONAIS	VALOR
Vazão Afluente (L/s)	Q = 2.500
Demanda Química de Oxigênio afluente aos reatores (mg/L)	S _{ta} = 500
Volume de cada reator (m ³)	18.000
Diâmetro de cada decantador secundário (m)	D = 46
Número de tanques de aeração	3
Número de decantadores secundários	6
Parâmetros Operacionais Admitidos	
Taxa de recirculação de lodo	0,25 < Q _R /Q = 0,72 < 1,30
Concentração de SSV no descarte de lodo (mgSSV/L) (pelo DS)	X _w = 8.000
Temperatura média do licor misto (°C)	T = 22
Parâmetros Cinéticos	
Fração de DQO não biodegradável solúvel afluente	f _{us} = 0,08
Fração de DQO não biodegradável particulada afluente	f _{up} = 0,12
Fração do lodo que se torna resíduo endógeno	f = 0,20
Fração biodegradável solúvel afluente	f _{sb} = 0,25
Razão da DQO/SSV no lodo orgânico	f _{cv} = 1,48
Razão SSV/SST no licor misto	f _v = 0,75
Coefficiente de síntese celular (mgSSV/mgDQO)	Y = 0,45
Parâmetros a serem atingidos	
Idade do Lodo (dias)	6
Taxa de Consumo de Oxigênio (mg/(L.h))	TCO
Taxa de Aplicação de Sólidos (kg/(m ² .h))	TAS (2 a 7)
Fase Sólida	
Captura de sólidos no desaguamento	Cap _{Sol} = 95 %
DQO da torta (mg DQO/L)	300.000
Concentração de ST na torta	250.000 ou 25%
Taxa de Captura de Sólido do Adensador (λ)	0,9
DQO do Sobrenadante do Adensador mg/l	1735

Tabela 6 – Resultados das Iterações.

RESULTADO DAS ITERAÇÕES								
Equação	Parâmetro	Unidade	Iter.0	Iter.1	Iter.2	Iter.3	Iter.4	Iter.5
Afluente ao Sistema Biológico								
	Q	m ³ /dia	216.000	219.466	219.521	219.522	219.522	219.522
1	Sta	mg/l	500	500	500	500	500	500
	Msta	kg DQO/dia	108.000	115.891	115.919	115.919	115.919	115.919
7	Susa	mg/l	40	40	40	40	40	40
2	Sba	mg/l	400	400	400	400	400	400
6	Supa	mg/l	60	60	60	60	60	60
5	Sua	mg/l	100	100	100	100	100	100
3	Sbsa	mg/l	80	80	80	80	80	80
4	Sbpa	mg/l	320	320	320	320	320	320
11	Rh	dia	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25



16	Xi	mg/l	973	989	989	989	989	989
25	Xa	mg/l	1.689	1.716	1.717	1.717	1.717	1.717
26	Xe	mg/l	526	535	535	535	535	535
27	Xv	mg/l	3.188	3.239	3.240	3.240	3.240	3.240
Reator								
28	Xta	mg/l	4251,05	4319,26	4320,36	4320,38	4320,38	4320,38
36	TCO	mg/l.h	43,9	44,6	44,61	44,61	44,61	44,61
Descarte pelo Decantador Secundário								
	Xw	mg SSV/l	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000
	Xw	mg DQO/l	11.840	11.840	11.840	11.840	11.840	11.840
40	qw	m ³ /dia	3.587	3.644	3.645	3.645	3.645	3.645
37 e 56	Ms0	kg/dia	56.892	61.049	61.063	61.064	61.064	61.064
57	Msxv	kg/dia	42.468	45.571	45.582	45.582	45.582	45.582
58	Mste	kg/dia	8.640	9.271	9.273	9.274	9.274	9.274
43	Lw	kg/dia	42.468	43.149	43.160	43.161	43.161	43.161
Fase Sólida - Adensamento								
44	Lad	kg DQO/dia	38.221	38.834	38.844	38.844	38.844	38.844
45	Lsob	kg DQO/dia	4.247	4.315	4.316	4.316	4.316	4.316
46	Qsob	m ³ /dia	2.448	2.487	2.488	2.488	2.488	2.488
47	Qad	m ³ /dia	1.139	1.157	1.158	1.158	1.158	1.158
Filtro Prensa ou Centrífuga								
	Qaf	m ³ /dia	1.139	1.157	1.158	1.158	1.158	1.158
	Laf	kg DQO/dia	38.221	38.834	38.844	38.844	38.844	38.844
50	Qtor	m ³ /dia	121	123	123	123	123	123
48	Ltor	kg DQO/dia	36.310	36.893	36.902	36.902	36.902	36.902
51	Qfilt	m ³ /dia	1.018	1.034	1.035	1.035	1.035	1.035
49	Lfilt	kg DQO/dia	1.911	1.942	1.942	1.942	1.942	1.942
Reciclo								
52	Lrec	kg DQO/dia	6.158	6.257	6.258	6.258	6.258	6.258
53	Qrec	m ³ /dia	3.466	3.521	3.522	3.522	3.522	3.522

Tabela 7 – Resultado das Simulações com tempo de detenção Rs=6 dias.

Rs=6, Sta=500mg/l, ST=25% e $\rho=1,2t/m^3$									
Q	Xta	TAS	Dec Sec	Reatores	TCO	mSo	mSxv	Qtorta	Mtorta
l/s	mg/l	kg/m ² .h	em operação		mg/l.h	%	%	m ³ /dia	ton/dia
2.500	4.320	3,9	6	3	45	53	39	123	148
2.500	4.320	4,7	5	3	45	53	39	123	148

Tabela 8 – Resultado das Simulações com tempo de detenção $R_s=4$ dias.

Rs=4, Sta=500mg/l, ST=25% e $\rho=1,2t/m^3$									
Q	Xta	TAS	Dec Sec	Reatores	TCO	mSo	mSxv	Qtorta	Mtorta
l/s	mg/l	kg/m ² .h	em operação		mg/l.h	%	%	m ³ /dia	ton/dia
2.500	3.197	3	6	3	41	48	44	137	164
2.500	3.197	3	5	3	41	53	39	137	164

CONCLUSÕES

Pelos resultados obtidos, verifica-se que para a vazão média de 2,5 m³/s, fica claro que a ETE deve operar como os três tanques de aeração e todos os seis decantadores secundários, pois só dessa forma consegue manter a taxa de aplicação de sólidos dentro de valores aceitáveis, porém sem nenhuma folga operacional.

Recomenda-se, também, que a ETE opere com idade do lodo reduzida (4 dias), caso contrário, as taxas de aplicação de sólidos alcançariam patamares incompatíveis com a prática operacional, acarretando perdas no efluente final.

Se, por exemplo, houver a necessidade de manutenção de apenas um dos decantadores, nota-se que as cargas que afluem a eles aumentariam o que se evidencia através da taxa de aplicação de sólidos que subiria de 5,3 para 6,4. Ainda assim é possível a operação do sistema de lodos ativados, entretanto, é preciso deixar claro que a idade do lodo deve ser mantida em valores muito baixos (4dias). Qualquer outro evento que possa acontecer, seria prejudicial à ETE, podendo, dessa forma, prejudicar a operação e afetar qualidade do efluente final, com a perda de sólidos pelo efluente final.

Apenas a alteração da idade do lodo, diminuindo-se de 6 para 4 dias, seria suficiente para abrandar o problema, diminuindo algo em termos de 10%, com a conseqüente queda no consumo de energia da planta, conforme se pode verificar através da Taxa de consumo de Oxigênio, que cairia dos atuais 45 para algo em torno de 41 mg/l.h, havendo, entretanto, um aumento na produção da torta gerada, da ordem de 16 t/d.

Se um dos reatores sair de operação, a resposta seria a perda imediata da qualidade do efluente final, haja vista que a concentração neles subiria dos atuais, já elevados, 4.320 mg /L para concentrações muito mais altas, da ordem de 6.800 mg/l, sendo que a taxa de aplicação de sólidos iria para valores incompatíveis com a operação da ETE (algo em torno de 11 kg/m².h), o que acarretaria perda de sólidos no efluente final.

Em resumo, pode-se concluir que a ETE Parque Novo Mundo, necessita com urgência de pelo menos mais um módulo biológico (um reator aeróbio e ao menos mais um decantador secundário) para que possa continuar operando dentro de limites razoáveis e obedecendo a legislação vigente.

Outro ponto importante a se frisar é que os cálculos foram feitos com uma DQO de entrada da ETE baixa, se comparada à valores de literatura (500 mg/l ao invés de 600 mg/l, valor típico de esgoto doméstico). Isso se deve ao fato de existirem ligações de águas pluviais na rede de esgotos que é encaminhada para a ETE. E mesmo assim foi necessária a redução da taxa de recirculação do lodo de 100 para 72 %, de forma a garantir que a taxa de aplicação de sólidos ficasse e dentro de intervalos aceitáveis e, com isso, minimizar os efeitos nocivos da perda de sólidos no efluente final.

As **Tabelas 7 e 8** ilustram as conclusões do estudo feito para a ETE Parque Novo Mundo mostrando que ela praticamente esgotou seu potencial de tratamento evidenciando desde já um aumento na sua fase líquida, através da construção imediata de decantadores secundários.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. van HAANDEL A., MARAIS G. (1999) – O comportamento do Sistema de Lodo Ativado – Teoria e Aplicações para Projetos e Operação.
2. von SPERLING M. (2002) – Lodos Ativados – Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias, vol. 4, DESA (Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental).
3. METCALF & EDDY. (2003). Inc. *Wastewater engineering: treatment and reuse*. 4ª ed. New York: McGraw-Hill.
4. PLAMTE – Relatório em Andamento - Elaboração do plano de Modernização do Tratamento de Esgoto da Região Metropolitana de São Paulo (Sabesp 2018).
5. ALEM Sobrinho, p.; KATO, M.T (1999) Análise crítica do uso do processo anaeróbio pra tratamento de esgotos sanitários. Rio de Janeiro, ABES-RJ.
6. SEZERINO, P. H. (2006). Potencialidade dos filtros plantados com macrófitas (constructed wetlands) no pós-tratamento de lagoas de estabilização sob condições de clima subtropical. Florianópolis - SC: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, UFSC.
7. HENZE M., van Loosdrecht M., Ekama G., Brdjanovic D.– *Biological Wastewater Treatment – Principles, Modelling and Design* – IWA Publishing 2008, UK.
8. *Region-wide Wastewater Treatment Plant Modeling Enhances Facility Management and Treatment – Principles. Modeling and Design* – IWA Publishing, 2008, UK.
9. GIORDANO, G. (2010) - Avaliação de efeito tóxico utilizando o respirômetro em processos de lodos ativados. Dissertação de mestrado, pontifícia da Universidade Católica do Rio de Janeiro.
10. VICENTE V. R. (2006) – Modelos de operação para centros de controle de Sistemas de Abastecimento de Água – Estudo de Caso Sistema Adutor Metropolitano de São Paulo. Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo (USP).
11. ALEM Sobrinho, P (2012) - Aspectos Técnicos Relevantes para o Dimensionamento de Sistemas de Tratamento Biológico Aeróbio e Anaeróbio (Escola Politécnica da USP).
12. FERNANDES A.N et al (2006) – *Termodinâmica Química* (Ed. Fernandes, Pizzo & Moraes Jr).
13. HELOU, L. C. (2000) Tratamento de esgotos convencionais por lodos ativados com aproveitamento dos efluentes para reuso - Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Sanitária) - Universidade de São Paulo (USP).