

DIMENSIONAMENTO DE TANQUE DE EQUALIZAÇÃO ANTECEDENDO SISTEMA MBR COM AUXÍLIO DE TÉCNICAS DE MODELAGEM COMPUTACIONAL

Rodrigo de Oliveira Marques⁽¹⁾

Engenheiro Ambiental, formado na Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP) - Campus de Sorocaba. Atualmente cursando mestrado em Engenharia Civil, subárea Hidráulica e Sanitária, na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP). Coordenador de Projetos na empresa H₂O Engenharia Ltda.

Juliana Soares Lisboa

Engenheira Ambiental, formada na Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP) - Campus de Sorocaba. Especialista em Gestão e Tecnologias Ambientais, formada na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP). Coordenadora de Projetos na empresa H₂O Engenharia Ltda.

Ademar César Matos Ferreira

Engenheiro Industrial Químico, formado na Fundação Universidade do Rio Grande. Especialista em Engenharia de Segurança do Trabalho, formado na Fundação Universidade do Rio Grande. Sócio-diretor da empresa H₂O Engenharia Ltda.

Endereço⁽¹⁾: Rua dos Três Irmãos, nº 62, Cj. 502 – Vila Progredior – São Paulo – SP – CEP: 05615-190 - Brasil - Tel: +55 (11) 3723-4422 - Fax: +55 (11) 3723-4421 - e-mail: rodrigo@h2oengenharia.com.br.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo apresentar os benefícios do uso de técnicas de modelagem computacional no dimensionamento de tanques de equalização. Para isto, utilizam-se os resultados obtidos em um projeto de recapitação da estação de tratamento de efluentes (ETE) de uma grande indústria de cosméticos, durante o qual se constatou a necessidade de dimensionar um tanque de equalização à montante de um sistema de biorreatores de membrana (MBR). Na etapa de modelagem computacional, foram avaliados três (03) volumes distintos para o tanque de equalização (380, 800 e 1.200 m³), referentes a tanques reais disponíveis na indústria para serem reaproveitados como tanque de equalização. Determinou-se a vazão equalizada, assim como os perfis de concentração equalizados dos parâmetros DBO_{5,20} total, DQO total, N total e P total. Verificou-se através do uso de modelagem computacional, que o menor volume modelado (380 m³) gerou perfis de concentração equalizados satisfatórios para todos os parâmetros avaliados. Portanto, constatou-se não ser necessária a utilização dos maiores volumes disponíveis (800 m³ e 1.200 m³), e o volume adotado para o tanque de equalização (380 m³) caracteriza-se como a solução de menor custo, levando-se em consideração estritamente a potência necessária para mistura.

PALAVRAS-CHAVE: tanque de equalização, biorreatores de membrana, MBR, modelagem computacional, efluentes industriais.

INTRODUÇÃO

A etapa de equalização é recorrente no tratamento de efluentes industriais, sendo ainda mais atrativa quando aplicadas em projetos de recapitação de estações de tratamento de efluentes (ETEs) sobrecarregadas. O dimensionamento deste tipo de unidade pode ser realizado segundo duas abordagens distintas: regularização de vazões ou regularização de concentrações (Tchobanoglous *et al.*, 2014).

A primeira abordagem tem como benefício principal evitar sobrecargas hidráulicas em unidades localizadas à jusante do tanque de equalização, como decantadores secundários e/ou membranas de um sistema MBR (Membrane Bio Reactor) de tratamento. A segunda abordagem beneficia ETEs que possuem sistemas biológicos de tratamento, pois evita o envio de concentrações elevadas de substâncias inibidoras ao processo biológico. Além dos benefícios já mencionados, uma etapa de equalização à montante de sistemas MBR reduz, por exemplo, o risco de formação de espuma no tanque de aeração (Cavalcanti, 2012; Judd, 2011; Ongerth, 1979).

As desvantagens dos tanques de equalização residem no fato de serem unidades de grande porte e necessitarem de mistura e bombeamento (normalmente), implicando em elevados custos de operação (Cavalcanti, 2012; Tchobanoglous, *et al.*, 2014). Desta forma, a utilização de métodos que permitam um dimensionamento mais racional e customizado deste tipo de unidade é vantajosa, pois pode diminuir consideravelmente os custos envolvidos na implantação e operação dessas unidades.

OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é apresentar os resultados do dimensionamento de um tanque de equalização, realizado com o auxílio de técnicas de modelagem computacional, para um projeto de recapitação da ETE de uma grande indústria de cosméticos. A modelagem teve como propósito identificar qual dos volumes fisicamente disponíveis para uso como tanque de equalização era o mais vantajoso (380, 800 ou 1.200 m³). Foram considerados aspectos de regularização de vazão, perfis de concentração equalizados dos parâmetros qualitativos DBO_{5,20} total, DQO total, N total e P total, e potência necessária para mistura.

METODOLOGIA

A etapa experimental do presente trabalho foi composta essencialmente por ensaios de modelagem computacional dos volumes disponíveis para o tanque de equalização proposto. O primeiro passo foi selecionar as equações matemáticas necessárias para a modelagem matemática de tanques de equalização. Em seguida, determinou-se a configuração do cenário a ser modelado e as premissas adotadas para o mesmo. Por fim, fixou-se a metodologia para cálculo da demanda de energia necessária para a mistura dos tanques de equalização modelados.

Modelagem matemática de tanques de equalização

O comportamento de um tanque de equalização em linha pode ser modelado admitindo-se que o mesmo se comporte como um reator de mistura completa (Khandan, 2002), sendo possível escrever o balanço de massas genérico conforme a equação 1 (Clark, 2009; Levenspiel, 1999).

$$\left(\frac{dm}{dt}\right)_{\text{reator}} = \left(\frac{dm}{dt}\right)_{\text{afluente}} - \left(\frac{dm}{dt}\right)_{\text{efluente}} \pm \left(\frac{dm}{dt}\right)_{\text{reações}} \quad (\text{Equação 1})$$

A partir do balanço de massas descrito pela equação 1, Ongerth (1979) apresenta uma metodologia de modelagem que utiliza as equações 2, 3, 4 e 5.

$$\Delta V = \Delta t \cdot (Q(t)_{\text{afluente}} - Q(t)_{\text{efluente}}) \quad (\text{Equação 2})$$

$$V(t) = V(t-1) + \Delta V \quad (\text{Equação 3})$$

$$\Delta C = \frac{Q(t)_{\text{afluente}} \cdot C(t)_{\text{afluente}} \cdot \Delta t - C(t)_{\text{efluente}} \cdot (Q(t)_{\text{efluente}} \cdot \Delta t + \Delta V)}{V(t)} \quad (\text{Equação 4})$$

$$C(t)_{\text{efluente}} = C(t-1)_{\text{efluente}} + \Delta C \quad (\text{Equação 5})$$

Sendo que,

ΔV = variação do volume no interior do tanque de equalização em um determinado Δt (L³);
 Δt = intervalo de tempo selecionado para a modelagem (T);
 ΔC = variação da concentração do composto C no interior do tanque de equalização (M.L⁻³);
 $Q(t)_{\text{afluente}}$ = vazão afluente ao tanque de equalização no tempo t (L³. T⁻¹);
 $Q(t)_{\text{efluente}}$ = vazão efluente ao tanque de equalização no tempo t (L³. T⁻¹);
 $C(t)_{\text{afluente}}$ = concentração do composto C no afluente do tanque de equalização no tempo t (M.L⁻³);

$C(t)_{\text{efluente}}$ = concentração do composto C no efluente do tanque de equalização no tempo t (M.L⁻³);
 $V(t)$ = volume de líquido no interior do tanque de equalização no tempo t (L³);
 $V(t-1)$ = volume de líquido no interior do tanque de equalização no tempo t-1 (L³);
 $C(t-1)$ = concentração do composto C no interior do tanque de equalização no tempo t-1 (M.L⁻³).

Uma vez determinadas as equações necessárias para a modelagem matemática de um tanque de equalização, estas foram estruturadas em planilhas eletrônicas do programa Microsoft Excel 2010® para execução dos cálculos iterativos. O cenário modelado é descrito a seguir.

Configuração do cenário modelado

A figura 1 apresenta o fluxograma de funcionamento da ETE, já considerando a presença do tanque de equalização à montante do sistema MBR, cuja primeira unidade é o tanque de aeração.

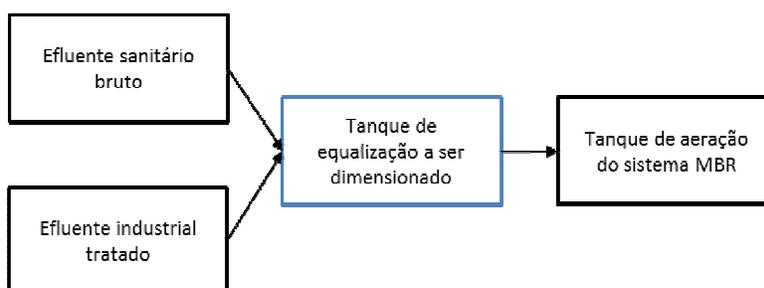


Figura 1. Fluxograma de funcionamento da ETE com o tanque de equalização a ser modelado.

No cenário modelado, que corresponde à situação real do projeto mencionado, o sistema físico-químico é composto por dois tanques de reação que operam em regime de batelada, e cada tanque realiza 6,0 ciclos completos de tratamento por dia, com duração total de 4,0 horas por ciclo. A vazão horária de descarte de cada tanque de reação foi estimada em 56,5 m³/h (duração de 1,0 horas), e os descartes dos tanques de reação não coincidem. A vazão de efluente sanitário bruto, por sua vez, é uniformemente distribuída ao longo de 24 horas (totalizando 6,3 m³/h), uma vez que a mesma é equalizada previamente em uma elevatória. Um resumo dos dados quali-quantitativos utilizados na etapa de modelagem são apresentados na tabela 1 (Os dados quali-quantitativos apresentados na tabela 1 foram determinados em outra etapa do projeto de recapacitação, não descrita no presente trabalho).

Tabela 1. Dados quali-quantitativos utilizados na etapa de modelagem.

Descrição	Unidade	Efluente sanitário bruto	Efluente industrial tratado	Afluente à equalização (a/b)	Δ
Vazão diária	m ³ /dia	152,0	678,0	824,0	-
Vazão horária	m ³ /h	6,3	56,5	6,3/62,8	56,5
DBO _{5,20} total	mg O ₂ /L	1.500,0	2.100,0	1.500,0/2.039,5	539,5
DQO total	mg O ₂ /L	3.500,0	4.500,0	3.500,0/4.339,2	839,2
Nitrogênio total	mg N/L	210,0	7,0	210,0/27,5	182,5
Fósforo total	mg P/L	80,0	1,0	80,0/9,0	71,0

Admitiu-se que existem duas situações possíveis. Quando não ocorre descarte de efluente industrial tratado, apenas o efluente sanitário bruto é enviado para o tanque de equalização, resultando nos valores apresentados na coluna “Afluente à equalização a” da tabela 1. Quando ocorre descarte de efluente industrial tratado, admitiu-se que ambos os efluentes se misturam completamente antes de entrarem no tanque de equalização, resultando nos valores apresentados na coluna “Afluente à equalização b” da tabela 1. São apresentadas também as variações entre os valores máximos e mínimos em termos de valores absolutos, pois para os parâmetros N total e P total, as concentrações destes na mistura de efluentes é inferior à do efluente sanitário bruto.

Após a determinação da configuração do cenário modelado, foi possível estruturar as planilhas eletrônicas de modelagem matemática usando os valores da tabela 1 e as equações 2, 3, 4 e 5. O intervalo de tempo selecionado para cada iteração foi de 0,5 horas. A modelagem foi realizada até completar 20 dias, ou seja, 480 horas. As demais premissas adotadas para a modelagem foram:

- Manter o maior volume possível de líquido no interior do tanque de equalização;
- Todos os compostos modelados são conservativos ($K_d = 0$);
- A vazão de saída do tanque de equalização deverá ser constante, visando manter fixa a taxa de filtração nas membranas do sistema MBR;
- No início da modelagem, a concentração de todos os compostos modelados é 0 no interior do tanque de equalização;
- O volume inicial do tanque de equalização será o máximo possível, de modo que a variação volumétrica em um dia (24 horas) seja igual a 0.

Fez-se necessário estimar valores iniciais para o volume de líquido no interior do tanque de equalização no primeiro instante da modelagem, assim como para a vazão equalizada (que segue para o tanque de aeração do sistema MBR).

Ambos os valores inicialmente estimados foram então ajustados com o auxílio da função “Solver” do programa Microsoft Excel 2010®, utilizando-se o método de solução GRG Não-Linear. O volume de líquido no interior do tanque de equalização foi ajustado de modo que o volume máximo obtido ao longo das iterações fosse exatamente o volume útil máximo disponível para cada tanque modelado, (380, 800 e 1.200 m³). Já a vazão equalizada foi ajustada considerando-se a premissa de vazão efluente constante e que a variação volumétrica no interior do tanque de equalização ao longo de um (01) dia é 0. Após estes ajustes, foram obtidos os perfis de concentração dos compostos selecionados para a modelagem (DBO_{5,20} total, DQO total, N total e P total), assim como a vazão equalizada final.

Potência necessária para mistura

A determinação da potência necessária para mistura nos tanques de equalização modelados seguiu a metodologia apresentada por Tchobanoglous *et al.*, 2014. Apesar de não considerar as especificidades acerca dos equipamentos utilizados para mistura, os autores apresentam a equação 6 como uma ferramenta para estimativas iniciais de potência total necessária para esse processo.

$$P = \mu \cdot G^2 \cdot V \quad (\text{Equação 6})$$

Sendo que,

P = potência total necessária (M.L².T⁻³);
μ = viscosidade dinâmica do fluido (M.L⁻¹.T⁻¹);
G = gradiente de velocidade (T⁻¹);
V = volume (L³).

As estimativas apresentadas neste trabalho foram realizadas atribuindo-se para G o valor de 300 s⁻¹ (os autores recomendam valores entre 100 e 500 s⁻¹) e para o μ o valor de 1,002 x 10⁻³ N/s.m² (água a 20°C). Foram desconsideradas as influências da temperatura e concentração de sólidos na viscosidade dinâmica da mistura de efluentes.

RESULTADOS

Inicialmente, é importante apresentar alguns comentários acerca do cenário selecionado para a modelagem. É possível notar na tabela 1, que os parâmetros qualitativos analisados no efluente sanitário bruto apresentam valores elevados para esse tipo de efluente. Isto é consequência do sistema de esgotamento sanitário existente na indústria em questão, que utiliza um moderno sistema a vácuo. Nesse tipo de sistema de esgotamento

sanitário, a utilização de água é reduzida significativamente, o que resulta em valores mais elevados de concentração.

O primeiro resultado obtido na etapa de modelagem foi o valor da vazão equalizada a ser enviada para o sistema MBR, aproximadamente 34,6 m³/h, independentemente do volume destinado para o tanque de equalização. Portanto, qualquer um dos volumes modelados atende o objetivo de manter constante a vazão afluyente ao sistema MBR. Na figura 2 é possível observar a influencia da etapa de equalização proposta em termos de equalização de vazão (apresentou-se apenas o vigésimo dia modelado por considerar que o mesmo representa a situação de equilíbrio).

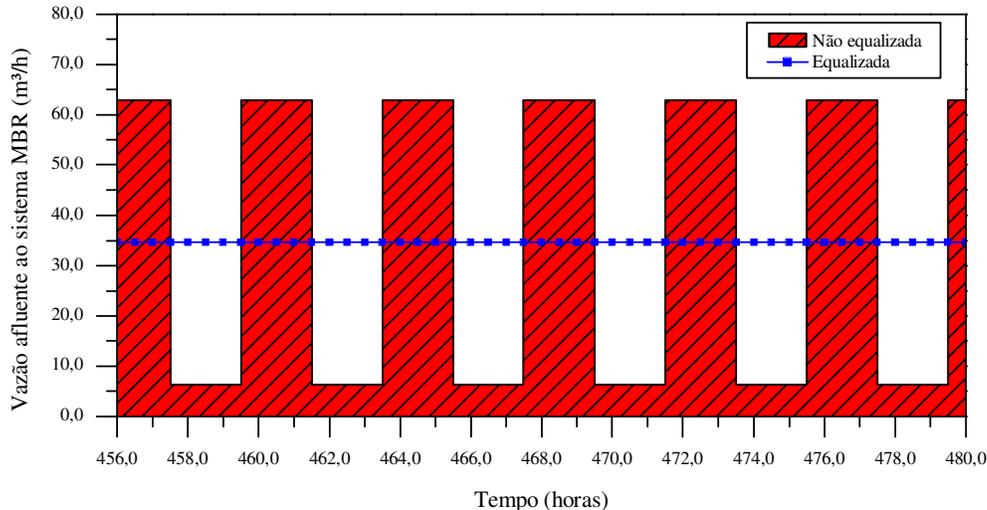


Figura 2. Perfil de vazão afluyente ao tanque de aeração do sistema MBR, com e sem equalização (vigésimo dia modelado).

Fica evidente na figura 2 o benefício de uma etapa de equalização localizada à montante do sistema MBR. Sem essa etapa, os descartes das bateladas do sistema físico-químico geram picos momentâneos de vazão afluyente ao sistema MBR, elevando-a de 6,3 m³/h (apenas efluente sanitário bruto) para 62,8 m³/h (mistura de efluente sanitário bruto com efluente industrial tratado). Uma etapa de equalização à montante do sistema MBR permite que a vazão afluyente ao mesmo possa ser mantida constante em aproximadamente 34,6 m³/h. A manutenção de vazão afluyente constante é benéfica para o processo de lodo ativado de um sistema MBR, assim como para a etapa de micro ou ultrafiltração do mesmo (Judd, 2011; Ongerth, 1979; Tchobanoglous *et al.*, 2014).

O segundo benefício da etapa de equalização prevista é reduzir a variação nas concentrações dos compostos presentes na mistura de efluentes. Concluídas as modelagens, foram determinadas as concentrações máximas e mínimas dos compostos avaliados, assim como a variação (Δ) entre estes. Na tabela 2, são apresentados os valores obtidos no vigésimo dia modelado, por considerar que o mesmo representa a situação de equilíbrio.

Tabela 2. Variações das concentrações dos compostos avaliados no vigésimo dia modelado.

Descrição	Unidade	V _{eq} = 380 m ³			V _{eq} = 800 m ³			V _{eq} = 1.200 m ³		
		Mín.	Máx.	Δ	Mín.	Máx.	Δ	Mín.	Máx.	Δ
DBO _{5,20} total	mg O ₂ /L	1.980,6	1.998,7	18,1	1.986,0	1.994,1	8,1	1.987,4	1.992,7	5,3
DQO total	mg O ₂ /L	4.301,0	4.331,2	30,2	4.309,9	4.323,5	13,6	4.312,3	4.321,2	8,9
N total	mg N/L	41,3	47,4	6,1	42,8	45,6	2,8	43,3	45,1	1,8
P total	mg P/L	14,3	16,7	2,4	14,9	16,0	1,1	15,1	15,8	0,7

Comparando os valores da tabela 2 com a situação inicial (tabela 1), o segundo benefício de uma etapa de equalização à montante do sistema MBR fica evidente. Nota-se que a variação $|\Delta|$ dos compostos avaliados é muito inferior com uma etapa de equalização. Por exemplo, a variação $|\Delta|$ da concentração de $\text{DBO}_{5,20}$ total deixa de ser 539,5 mg O_2/L (tabela 1) passando a ser 18,1 mg O_2/L quando $V_{\text{eq}} = 380 \text{ m}^3$. A figura 3 apresenta esse comportamento (valores de $V_{\text{eq}} = 0 \text{ m}^3$ localizados no eixo y secundário).

O mesmo ocorre para os compostos N total e P total, que apresentam concentrações mais elevadas no efluente sanitário bruto, e não no efluente industrial tratado. A presença de uma etapa de equalização permite que a mistura de efluentes (sanitário bruto e industrial tratado) apresente variações (Δ) menores entre os valores máximos e mínimos desses compostos. Isso traz benefícios para o processo biológico de lodo ativado, que necessita de disponibilidade constante dos macronutrientes N e P para o desenvolvimento bacteriano (Henze et al. 2008). Além disso, menores variações permitem que a dosagem artificial de nutrientes (muitas vezes necessária no tratamento biológico de efluentes industriais) seja mais eficiente, evitando dosagens excessivas e desperdício de produtos químicos.

Observa-se na tabela 2, que ocorre um decréscimo dos valores de $|\Delta|$ conforme o aumento do volume modelado para o tanque de equalização, o que é esperado. Esse comportamento é mais bem visualizado na figura 3, que apresenta os perfis de concentração de $\text{DBO}_{5,20}$ total, DQO total, N total e P total (gráficos a, b, c, e d, respectivamente) no afluente ao tanque de aeração do sistema MBR, em função dos diferentes volumes de equalização modelados. Novamente, foi apresentado apenas o vigésimo dia modelado por considerar que o mesmo apresenta a situação de equilíbrio.

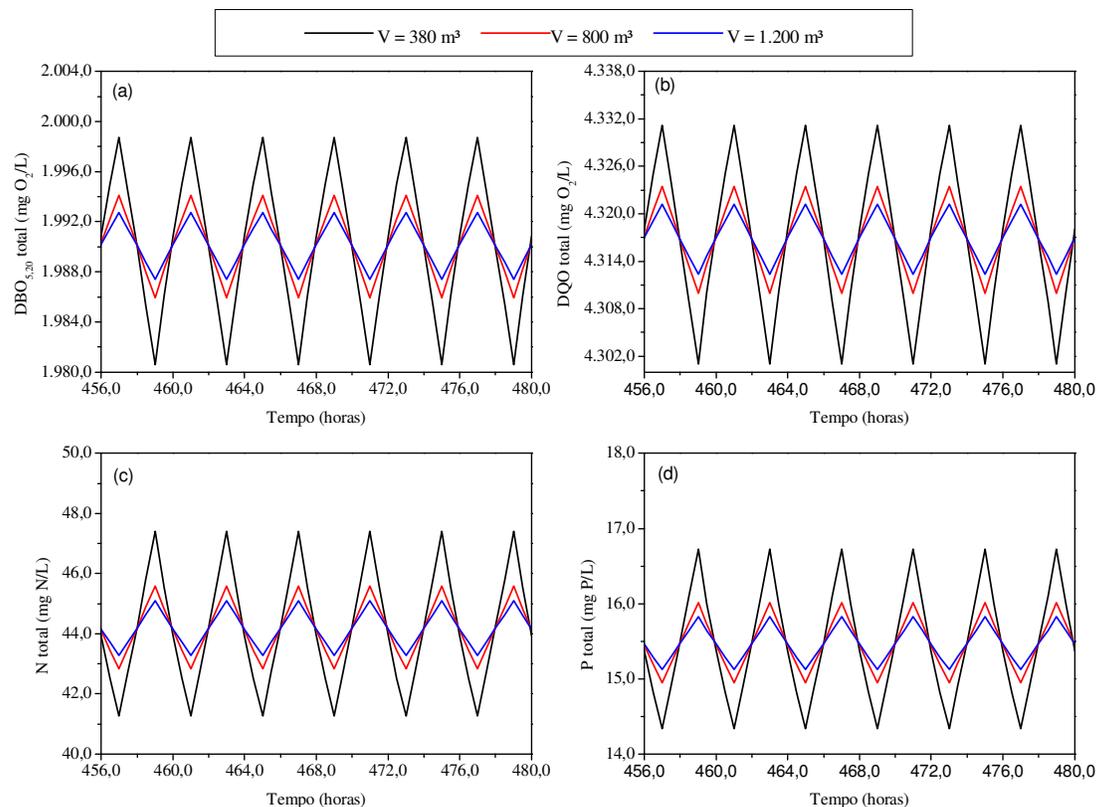


Figura 3. Perfis de concentração de $\text{DBO}_{5,20}$ total, DQO total, N total e P total no afluente ao sistema MBR com uma etapa de equalização (vigésimo dia modelado).

Os picos elevados nos gráficos (a) e (b) representam o momento em que ocorrem os descartes das bateladas de efluente industrial tratado. Já os picos elevados nos gráficos (c) e (d) mostram exatamente a situação oposta, ou seja, os momentos em que não ocorrem descartes de efluente industrial tratado. Isto porque os gráficos (a) e (b) apresentam os perfis de concentração dos parâmetros $\text{DBO}_{5,20}$ total e DQO total, cujos valores mais

elevados se encontram na mistura de efluentes (sanitário bruto e industrial tratado). Já os gráficos (c) e (d) apresentam os perfis de concentração dos parâmetros N total e P total, cujos valores de concentração mais elevados se encontram no efluente sanitário bruto, e não na mistura com o efluente industrial tratado, conforme evidenciado anteriormente na tabela 1.

A análise dos resultados da tabela 2 e do comportamento da figura 3 indica que, em termos práticos, as variações obtidas com os três volumes modelados não diferem significativamente. Sendo assim, sob a perspectiva de regularização de vazão e concentrações, concluiu-se não haver a necessidade de adoção de um volume superior a 380 m³, contrariando o instinto comum de se utilizar o maior volume disponível para esta operação unitária.

Outra importante informação obtida neste trabalho é a variação do volume no interior dos tanques de equalização modelados. A figura 4 apresenta a variação do volume no interior do tanque de equalização, quando $V_{eq} = 380 \text{ m}^3$.

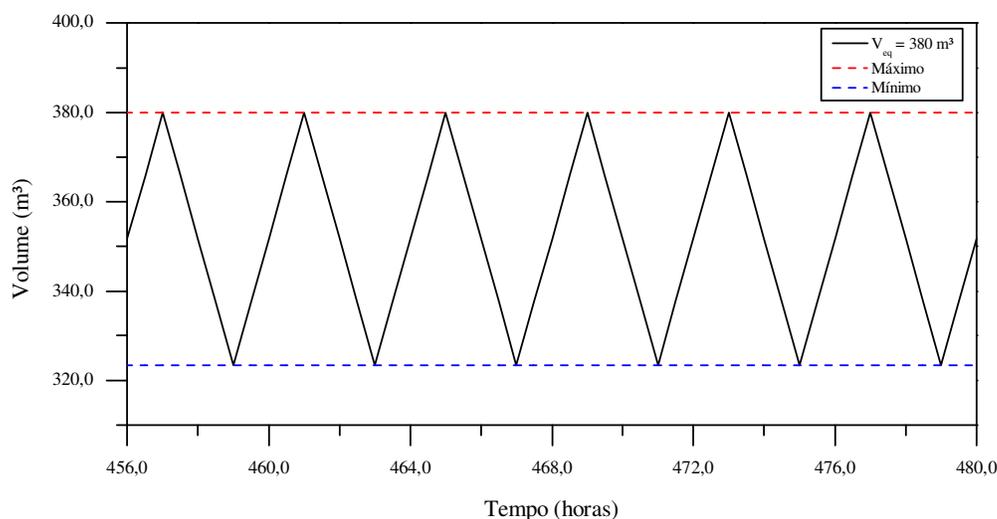


Figura 4. Variação do volume no interior do tanque de equalização ($V_{eq} = 380 \text{ m}^3$), no vigésimo dia modelado.

Conforme apresentado anteriormente, uma das premissas da modelagem proposta era a manutenção do maior volume de líquido no interior do tanque de equalização. Isto porque, manter o maior volume possível de líquido no interior do tanque de equalização, promove maior capacidade de assimilação de picos de concentração, conforme é possível notar na equação 4. Nota-se na figura 4 que esse objetivo foi alcançado, e o volume máximo disponível nunca foi ultrapassado. Além disso, nota-se que o volume mínimo encontrado foi de aproximadamente 323,5 m³. O conhecimento acerca dos níveis máximos e mínimos de um tanque é extremamente útil em uma etapa de projeto, pois permite a correta instalação de equipamentos hidráulicos e programação/automação de instrumentos de medição de nível.

Já em termos de potência necessária para mistura, estimou-se a potência total necessária para cada volume modelado utilizando-se a equação 6 e as premissas apresentadas previamente. Determinou-se que seriam necessários em torno de 34,3, 72,1 e 108,2 kW para os volumes de 380 m³, 800 m³ e 1.200 m³, respectivamente. Como os parâmetros μ e G foram mantidos constantes nos cálculos, as potências calculadas representam uma densidade de potência aproximada de 0,09 kW/m³, condizente com valores normalmente aplicados em tanques de equalização (Tchobanoglous *et al.*, 2014). Ou seja, constatou-se que utilizar o volume de 380 m³ para o tanque de equalização, representa a solução que demanda a menor potência total para mistura.

CONCLUSÃO

O uso de técnicas de modelagem computacional permitiu dimensionar o tanque de equalização previsto no projeto de recapacitação mencionado de forma racional. Levando-se em consideração aspectos de equalização de vazão, redução na variação das concentrações dos compostos avaliados ($DBO_{5,20}$ total, DQO total, N total e P total) e potência total necessária para mistura, concluiu-se que o menor volume disponível para o tanque de equalização (380 m^3) é a melhor alternativa para o tanque de equalização a ser dimensionado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CAVALCANTI, J. E. W. de A. (2012) *Manual de tratamento de efluentes industriais*, 2^a ed., Engenho Editora Técnica Ltda., São Paulo, São Paulo, 500 p.
- CLARK, M. M. (2009) *Transport modeling for environmental engineers and scientists*, 2^a ed., John Wiley & Sons Inc., Hoboken, New Jersey, 630 p.
- HENZE, M., VAN LOOSDRECHT, M. C. M., EKAMA, G. A., BRDJANOVIC, D.. *Biological wastewater treatment: principle, modeling and design*, 1^a ed., IWA Publishing, London, 511 p.
- JUDD, S. (2011) *The MBR book: principles and applications of membrane bioreactors for water and wastewater treatment*, 2^a ed., Butterworth-Heinemann, Oxford, 519 p.
- KHANDAN, N. N. (2002) *Modeling tools for environmental engineers and scientists*, 1^a ed., CRC Press, Boca Raton, Florida, 313 p.
- LEVENSPIEL, O. (1999) *Chemical reaction engineering*, 3^a ed., John Wiley & Sons Inc., New York, 668 p.
- ONGERTH, J. E. (1979) *Evaluation of flow equalization in municipal wastewater treatment*, EPA-600/2-79-096, Municipal Environmental Research Laboratory, Cincinnati, Ohio, 234 p.
- TCHOBANOGLOUS, G., STENSEL, H. D., TSUCHIHASHI, R., BURTON, F., ABU-ORF, M., BOWDEN, G., PFRANG, W.. (2014) *Wastewater engineering: treatment and resource recovery*, 5^a ed., Metcalf & Eddy/AECOM, McGraw-Hill, New York, 2048 p.