

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO TECNOLÓGICO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

**LUIS FELIPE DOS SANTOS ESTEVES**

**MODELAGEM MATEMÁTICA DA RESISTÊNCIA À FILTRAÇÃO OFERECIDA PELO BLOQUEIO  
DOS POROS, PELA CAMADA DE TORTA E PELO FOULING IRREVERSÍVEL EM UM REATOR  
ANAERÓBIO COM MEMBRANA SUBMERSA APLICADO AO TRATAMENTO DE ÁGUAS  
RESIDUÁRIAS**

VITÓRIA  
2014

**LUIS FELIPE DOS SANTOS ESTEVES**

**MODELAGEM MATEMÁTICA DA RESISTÊNCIA À FILTRAÇÃO OFERECIDA PELO BLOQUEIO DOS POROS, PELA CAMADA DE TORTA E PELO FOULING IRREVERSÍVEL EM UM REATOR ANAERÓBIO COM MEMBRANA SUBMERSA APLICADO AO TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável, na área de concentração Saneamento Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Rigo

Coorientador: Prof. Dr. Ricardo Franci Gonçalves

VITÓRIA  
2014

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)  
(Biblioteca Setorial Tecnológica,  
Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

---

E79m Esteves, Luis Felipe dos Santos, 1988-  
Modelagem matemática da resistência à filtração oferecida pelo bloqueio dos poros, pela camada de torta e pelo *fouling* irreversível em um reator anaeróbio com membrana submersa aplicado ao tratamento de águas residuárias / Luis Felipe dos Santos Esteves. – 2014.  
95 f. : il.

Orientador: Daniel Rigo.

Coorientador: Ricardo Franci Gonçalves.

Dissertação (Mestrado em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Filtração por membranas. 2. Águas residuais – Purificação. 3. Modelagem matemática. I. Rigo, Daniel. II. Gonçalves, Ricardo Franci. III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. IV. Título.

CDU: 628

---

Luis Felipe dos Santos Esteves

**MODELAGEM MATEMÁTICA DA RESISTÊNCIA À FILTRAÇÃO OFERECIDA PELO BLOQUEIO DOS POROS, PELA CAMADA DE TORTA E PELO FOULING IRREVERSÍVEL EM UM REATOR ANAERÓBIO COM MEMBRANA SUBMERSA APLICADO AO TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisição parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável na área de concentração Saneamento Ambiental.

Aprovada em \_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 2014.

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

---

Prof. Dr. Daniel Rigo

Orientador – UFES

---

Prof. Dr. Ricardo Franci Gonçalves

Coorientador – UFES

---

Prof. Dr. Renato Ribeiro Siman

Examinador Interno – UFES

---

Prof. Dr. Eduardo Lucas Subtil

Examinador Externo – UFABC

## DEDICATÓRIA

Dedico esta dissertação à minha mãe e irmã,  
pela ausência que a mesma me fez prescindir  
da companhia de ambas.

“A mente que se abre a uma nova idéia  
jamais volta ao seu tamanho original”  
(Albert Einstein)

## AGRADECIMENTOS

À Deus, pela vida e a possibilidade de empreender esse caminho evolutivo, por propiciar tantas oportunidades de estudos e por colocar em meu caminho pessoas amigas e preciosas.

À minha família, especialmente minha mãe Lina e irmã Nadielle, pelo apoio incondicional, principalmente nos momentos mais difíceis.

Aos demais parentes que mesmo estando há alguns quilômetros de distância, se mantiveram incansáveis em suas manifestações de apoio e carinho.

Ao meu Pai Luis Carlos (*In memoriam*) que mesmo não estando aqui presente para celebrar este momento, sempre acreditou na minha capacidade de superar obstáculos e alcançar meus objetivos.

Aos meus amigos do Núcleo Água, Letícia, Ludimila, Laia e Thiago que me ajudaram em diversos momentos deste trabalho.

À minha amiga Priscila que mesmo seguindo caminhos diferentes me motivou de forma incansável nessa jornada.

Aos meus amigos que me auxiliaram no início desta etapa, Andrielly, Jeaninna, Léa e Thamires, que mesmo seguindo também caminhos diversos, sempre se fizeram presentes com lembranças e palavras de encorajamento.

Aos meus orientadores, Daniel Rigo e Ricardo Franci, um agradecimento carinhoso por todos os momentos de paciência, compreensão e competência.

Ao Programa de Pós Graduação o qual estou inserido, representado pelo Prof. Dr. Renato Ribeiro Siman, pelos momentos partilhados, sem esmorecimento e a todos os professores que fizeram parte deste caminhar.

À capes pela bolsa de Mestrado.

À Finep, pelo financiamento do projeto.

Enfim, a todos aqueles que de uma maneira ou de outra contribuíram para que este percurso pudesse ser concluído.

## RESUMO

Sistemas de tratamento de água residuária com membrana possuem várias vantagens em comparação com os sistemas convencionais clássicos projetados com técnicas de purificação. O processo de filtração é a chave para o sucesso, no que diz respeito ao consumo de energia e eficácia, habilitado pela otimização da filtração, utilizando um modelo de simulação dinâmica. O presente estudo teve como objetivo desenvolver uma modelagem matemática do comportamento de um biorreator anaeróbio com membrana de microfiltração aplicado ao tratamento de água cinza, visando otimizar seu desempenho operacional. Para tanto, fenômenos tais como bloqueio dos poros, crescimento da camada de torta e fouling foram analisados matematicamente. O sistema utilizado para esta pesquisa foi desenvolvido pelo grupo de pesquisa Núcleo Água (Núcleo de Bioengenharia aplicado ao Saneamento) do Departamento de Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo. A membrana utilizada para estudo apresentou resultado para a resistência intrínseca um valor próximo de  $1,4 \times 10^{12} \text{m}^{-1}$ . No que diz respeito ao Bloqueio dos Poros ( $R_p$ ), foi utilizado os dados granulométricos fornecidos pelo fabricante. Estes dados foram combinados com os demais parâmetros considerados no modelo, apresentando resistência de valor de  $1,52 \times 10^{12} \text{m}^{-1}$ . Para a resistência da Camada de Torta ( $R_c$ ) foram utilizados os resultados obtidos em  $R_p$  juntamente com dados da literatura, bem como alguns parâmetros em que houve a possibilidade de serem calculados. Para  $R_c$  a resistência encontrada foi  $8,73 \times 10^{12} \text{m}^{-1}$ . Para finalizar a análise do comportamento da filtração, a resistência ao fouling foi simulada, apresentando valor de  $-1,2 \times 10^{12} \text{m}^{-1}$ . Todos os fenômenos foram simulados através do pacote de programação Matlab/Simulink®, no qual foi desenvolvido uma interface para gerar o equacionamento dos modelos. A modelagem apresentou resultados satisfatórios dentro dos limites esperados, quando comparados com resultados de outras pesquisas.

Palavras-chave: Filtração, modelagem, resistência.

## ABSTRACT

Water treatment membrane systems have several advantages in comparison with classical systems designed with conventional purification techniques. The filtering process is the key to success with regard to energy consumption and efficiency, enabled by optimizing the filtration using a dynamic simulation model. This study aimed to develop a mathematical model of the behavior of an anaerobic bioreactor with microfiltration membrane applied to the treatment of gray water to optimize their operational performance. For both phenomena such as pore blocking, growing cake layer and fouling were analyzed mathematically. The system used for this research was developed by the research group Center Water (Center for Bioengineering applied to Sanitation) of Environmental Engineering Department, Federal University of Espírito Santo. The membrane used for the study showed intrinsic resistance to a value of  $1.4 \times 10^{12} \text{m}^{-1}$ . With respect to pore blocking resistance ( $R_p$ ), the granulometric data provided by the manufacturer was used. These data were combined with the other parameters considered in the model, presenting resistance value of  $1.52 \times 10^{12} \text{m}^{-1}$ . For cake layer resistance ( $R_c$ ) the results obtained in  $R_p$  with literature data, as well as some parameters on which there was the possibility of being calculated were used. To  $R_c$ , resistance encountered was  $8.73 \times 10^{12} \text{m}^{-1}$ . Finally the analysis of the behavior of the filtration, fouling resistance was simulated, with value of  $-1.2 \times 10^{12} \text{m}^{-1}$ . All phenomena were simulated by programming package Matlab / Simulink, in which an interface to generate the model equation was developed. The modeling showed satisfactory results within the expected limits, when compared with results from other surveys.

Keywords: Filtration, modeling, resistance.

## LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

$\mu$  - Coeficiente de atrito

$\mu_{\max}$  – Coeficiente máximo de atrito

AeMBR – Biorreator aeróbio com membrana

$A_{\text{mem}}$  – Superfície externa da membrana

AnMBR – Biorreator anaeróbio com membrana

BRMs – Biorreatores com membrana

$C^{\text{bulk}}$  – Concentração de Massa das partículas na Fase Inicial

$C_{\text{cake}}$  – Concentração de massa das partículas na camada de torta

$d_{\text{bulk}}$  – Diâmetro médio das partículas

$d_{\text{poro}}$  – Diâmetro médio do poro

$\epsilon_{\text{mem}}$  – Porosidade da membrana

$F^A$  – Força adesiva

$F^N$  – Força normal

$F^r$  – Força resultante que atrai a partícula para a superfície da membrana

$F^t$  – Força tangencial

$g_{\text{bulk}}$  – Densidade da distribuição

$g_{\text{cake}}$  – Distribuição da densidade das partículas que são retidas na superfície da membrana

$g_{\text{mem}}$  – Distribuição da densidade das partículas que entram nos poros da membrana

$G_{\text{mem}}$  – Fração de massa das partículas que entram nos poros da membrana

J – Fluxo

$K_{\text{porosidade}}$  – Constante específica da membrana

$\eta$  - Viscosidade do permeado

$n_{\text{bulk}}$  – Largura da distribuição das partículas

$n_{\text{poro}}$  – Largura da distribuição dos poros

$R_{\text{bulk}}$  – Função de peso retido para as partículas

$R_c$  – Resistência à camada de torta

$R_{\text{com}}$  – Resistência ao completo bloqueio dos poros

$R_{\text{int}}$  – Resistência ao bloqueio intermediários dos poros

$R_{\text{irr}}$  – Resistência ao fouling irreversível

$R_m$  – Resistência intrínseca à membrana

$R_p$  – Resistência do bloqueio dos poros

$R_{\text{poro}}$  – Função de peso retido para as partículas que entram nos poros

$R_{sc}$  - Resistência à torta estável

$R_{cd}$  – Resistência ao biofilme de torta dinâmico

$R_{sta}$  – Resistência ao bloqueio de poros padrão

$R_{\text{total}}$  – Resistência global

$V_{\text{mem}}$  – Volume total da membrana

$X_1$  – Tamanho do poro

$X_2$  – Tamanho da partícula

$\Delta p$  – Pressão transmembrana

$P_{p,\text{mem}}$  – Densidade das partículas nos poros da membrana

$\tau^w$  – Tensão de cisalhamento

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	13
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	16
2.1. Objetivo Geral.....	17
2.2. Objetivos Específicos.....	17
<b>3. REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	18
3.1. Tecnologia de AnMBRs comparada com outros sistemas de tratamento.....	19
3.2. Biorreatores Anaeróbios com Membrana.....	20
3.3. Modelagem de Processos de Filtração.....	23
3.4. Resistência da Membrana – Lei de Darcy ( $R_m$ ).....	27
<b>4. CONTEXTUALIZAÇÃO DA PESQUISA</b> .....	29
<b>5. ARTIGOS</b> .....	32
<b>5.1. Resistência do Bloqueio dos Poros da Membrana de Microfiltração para Tratamento de Água Cinza</b> .....	33
5.1.1. Introdução.....	34
5.1.2. Bloqueio dos Poros.....	36
5.1.3. Materiais e Métodos.....	39
5.1.4. Resultados e Discussão.....	41
5.1.5. Conclusão.....	46
5.1.6. Referências.....	46
<b>5.2. Modelagem da Formação da Camada de Torta em uma Membrana de Microfiltração aplicada ao Tratamento de Água Cinza</b> .....	51
5.2.1. Introdução.....	52
5.2.2. Bloqueio dos Poros.....	53
5.2.3. Materiais e Métodos.....	59
5.2.4. Resultados e Discussão.....	62
5.2.5. Conclusão.....	67
5.2.6. Referências.....	68
<b>5.3. Modelagem do Processo de Filtração de um Biorreator com Membrana Submersa Tratando Água Cinza: Fouling Irreversível</b> .....	70
5.3.1. Introdução.....	71
5.3.2. Bloqueio dos Poros.....	73
5.3.3. Materiais e Métodos.....	76
5.3.4. Resultados e Discussão.....	78
5.3.5. Conclusão.....	80
5.3.6. Referências.....	81
<b>6. CONCLUSÃO GERAL</b> .....	83
<b>7. RECOMENDAÇÕES</b> .....	85
<b>8. REFERÊNCIAS</b> .....	87

## **1. INTRODUÇÃO**

---

## INTRODUÇÃO

O combate à escassez da água, que se dissemina em várias regiões do planeta, amplia significativamente o interesse pelo desenvolvimento de tecnologias que viabilizem o reuso de água. Entre as diversas opções tecnológicas disponíveis para o tratamento de águas residuárias para efeito de reuso, os processos anaeróbios tem a vantagem da combinação da redução de matéria orgânica com produção de energia (Skouteris et al., 2012). Mesmo não sendo uma solução definitiva, devido às limitações de eficiência na remoção dos poluentes de interesse para o reuso, tais processos são peças importantes de sistemas de tratamento biológico que combinam processos anaeróbios e aeróbios em série (CAMPOS et al., 2009).

A razão da associação anaeróbio - aeróbio para tratamento de esgoto sanitário e águas residuárias baseia-se nos custos relacionados ao tratamento anaeróbio, que são drasticamente menores do que o tratamento aeróbio. Todavia, estas vantagens têm se mostrado limitadas nos processos de tratamento mais utilizados hoje em dia, tais como os UASB e os filtros anaeróbios. Isto porque a idade de lodo (o tempo de retenção de sólidos no volume reacional), um dos mais importantes aspectos do tratamento biológico de águas residuárias, é baixa e limita a sua eficiência. De um lado, a taxa de produção da biomassa é baixa, cerca de dez vezes menor do que nos processos com aeróbios (Naessens, Maere e Nopens, 2012), e, de outro lado, as propriedades relativamente pobres da biomassa nos sistemas de tratamento anaeróbio convencionais, levam a um longo período de inicialização (Naessens et al., 2012).

Os biorreatores anaeróbios com membrana surgiram como uma solução para o problema da idade de lodo em processos anaeróbios, muito embora ainda existam gargalos tecnológicos relevantes que obstruem a massificação de seu emprego. Entender e otimizar um sistema complexo como um biorreator com membrana é um procedimento difícil, devido aos diversos processos simultâneos envolvidos, os quais geralmente são dependentes um do outro (Robles, et al., 2013). Em vários estudos sobre modelagem de reatores com membrana, tendo como foco os processos físicos e biológicos, a modelagem dos processos

de filtração é dificilmente simplificada em relação a um decantador ou processo de separação ideal (retenção completa dos sólidos). Por isso, não se pode negligenciar o processo de “fouling”, especialmente quando é considerada a modelagem para a otimização operacional. A modelagem de processos de filtração é, principalmente, realizada de forma mecânica, usando a Lei de Darcy e conceitos de resistências em séries para descrever a influência de diferentes mecanismos de “fouling” na permeabilidade da membrana, os quais serão apresentados ao longo dessa pesquisa.

Assim, no intuito de otimizar o desempenho operacional de um sistema complexo como um biorreator, observa-se a necessidade do desenvolvimento de uma modelagem matemática que seja capaz de representar o seu comportamento. As maiores contribuições disponíveis atualmente dizem respeito aos processos aeróbios, motivo pelo qual esta pesquisa se diferencia, uma vez que se pretendeu trabalhar sob condições de um sistema anaeróbio, visando uma contribuição científica relevante. Além disso, visamos trabalhar, no que diz respeito aos resultados, numa visão mais probabilística e menos determinística, tendo em vista que dados desta natureza ainda são escassos na literatura.

## **2. OBJETIVOS**

---

## OBJETIVOS

### OBJETIVO GERAL

Baseado na necessidade de desenvolver uma modelagem matemática do comportamento de um biorreator anaeróbio com membrana de microfiltração aplicado ao tratamento de água cinza, visando otimizar seu desempenho operacional.

### OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definir uma modelação matemática capaz de calcular a resistência do bloqueio dos poros da membrana e avaliar a largura da distribuição, tamanho médio e diâmetro tanto dos poros quanto da partícula;
- Analisar a influência das forças de adesão entre as partículas e a superfície da membrana e simular o comportamento da camada de torta, bem como a resistência causada por este fenômeno;
- Analisar o desempenho da filtração, descrevendo matematicamente o seu comportamento através da resistência do fouling ao longo do tempo.

### **3. REVISÃO DA LITERATURA**

---

## TECNOLOGIA DE AnMBRs COMPARADA COM OUTROS SISTEMAS DE TRATAMENTO

Microorganismos anaeróbios são conhecidos a crescer e reproduzir-se mais lentamente que os aeróbios (Chan et. al, 2009). Devido à sua baixa taxa de crescimento, a retenção de biomassa é fundamental para o tratamento anaeróbio de alta taxa de águas residuais. De maneira geral, tecnologias baseadas em biofilmes representam a forma tradicional de alcançar a retenção de biomassa necessária para permitir a operação de biorreatores em altas concentrações de biomassa, portanto, em altas cargas orgânicas (Jeilson, Diaz e Lier, 2008). No entanto sob condições específicas, tais como a salinidade elevada ou temperaturas termófilas, biofilme e formações granulares, as condições ideais não ocorrem, afetando negativamente. AnMBRs, podem ser utilizados para alcançar a retenção de lodo desejado em condições não convencionais. Eles podem operar com sucesso quando há mais tempo de retenção de sólidos (Fucks et. al,, 2003), o que implica não só o potencial de reter todos os microorganismos, mas também a capacidade de proporcionar-lhes a oportunidade de tornar-se completamente crescido, melhorando significativamente o tratamento anaeróbio (Meng et. al, 2007).

Cornelissen et al., 2001 previu em 2001 que os AnMBRs seriam uma tecnologia muito promissora, com um futuro importante. Atualmente, no entanto, eles ainda parecem estar em desenvolvimento, em comparação com os biorreatores com membrana aeróbios (MBRs), que são agora amplamente utilizados em sistemas de tratamento de águas residuárias em larga escala (Gao, 2010). O seu desenvolvimento e uso limitado (Spagni, 2010) é atribuído ao fato de que a digestão anaeróbia é um processo complexo (Gao, 2010). No passado, a digestão anaeróbia foi, em geral, evitada devido à sua grande desvantagem, as suas bactérias de crescimento lento para as quais o tempo de duplicação pode variar amplamente, desde 12 horas até uma semana (Zayen, 2010).

AnMBRs conseguiram resolver este problema, devido à retenção completa dos microorganismos dentro de seus tanques, no entanto, a incrustação da membrana, o grande problema de todos os MBRs, parecia ser mais intensa em AnMBRs do que nos reatores

aeróbios (Spagni, 2010). Finalmente, a toxicidade das águas residuárias, também tem sido considerada como uma das principais razões para a utilização de um uso não generalizado da digestão anaeróbia, uma vez que estes processos não são capazes de tolerar a ela, devido ao fato de que os microorganismos metanogênicos podem ser facilmente inibidos por toxinas (Chernicharo, 2007). Sistemas aeróbios foram desenvolvidos mais facilmente e mais rapidamente do que os anaeróbios porque eles são mais flexíveis e capazes de acomodar a taxa de crescimento bacteriano no líquido com um tempo de retenção de sólidos mais curto, e pode ser operado de forma eficiente em baixa temperatura (Santose Judd, 2011; Chang, 2011).

### **BIORREATORES ANAERÓBIOS COM MEMBRANA (AnMBR)**

Os biorreatores anaeróbios com membrana, cuja sigla em inglês é AnMBR (Anaerobic Membrane Bioreactor), podem ser definidos como um processo de tratamento biológico de águas residuárias operados sem oxigênio e que possuem uma membrana filtrante para realizar a separação sólido-líquido de efluente tratado. A Tabela 1 (Naessens et al., 2012) apresenta claramente as vantagens oferecidas por esse processo quando comparados com sistemas de reatores aeróbios com membrana (H. Lin et al, 2009). Através dela é possível claramente perceber a combinação das vantagens do processo de tratamento convencional anaeróbio com a tecnologia MBR. Ao final, um dos mais citados resultados com notória diferença são a retenção total da biomassa, a qualidade do efluente, a baixa produção de lodo e uma pequena produção de rede de energia.

Em geral, os sistemas de AnMBR são baseados em duas configurações: a externa de fluxo lateral e a submersa. Geralmente a configuração externa fornece maior controle direto do fouling e oferece a vantagem de ser mais fácil a substituição da membrana e fluxos elevados, contudo há necessidade de limpeza constante e um alto consumo de energia (P. Le-Clech et al, 2006). Além disso, a alta velocidade do fluxo tem sido apresentada como um fator negativo nas atividades da biomassa (Brockmann e Seyfried, 1996). Quando comparada a configuração submersa com a externa, a primeira apresenta certas vantagens. Pelo fato de

estar dentro do líquido, uma bomba ou a gravidade é utilizada, tornando baixo o consumo de energia e menores os procedimentos com a limpeza, além das condições operacionais serem mais suaves devido a velocidade menor no sentido tangencial (H. Lin et al, 2009).

Ambas as configurações possuem resultados positivos ao longo das pesquisas que foram realizadas, todavia desde a última década, pesquisadores têm dado certa atenção à configuração submersa, tendo em vista o sucesso com os reatores aeróbios com membrana. Assim, principalmente nos últimos dez anos, o tratamento de reatores anaeróbios com membrana submersa tem respondido de forma favorável às expectativas, tendo em vista a melhora da eficiência energética bem como, a solução de problemas técnicos como o fouling.

<b>Características</b>	<b>Tratamento Aeróbio</b>	<b>Tratamento Anaeróbio</b>	<b>AeMBR</b>	<b>AnMBR</b>
	<b>Convencional</b>	<b>Convencional</b>		
<b>Eficiência de Remoção Orgânica</b>	Elevada	Elevada	Elevada	Elevada
<b>Qualidade do Efluente</b>	Elevada	Moderada a baixa	Excelente	Elevada
<b>Carga orgânica</b>	Moderada	Elevada	Elevada a Moderada	Elevada
<b>Produção de Lodo</b>	Elevada	Baixa	Elevada a Moderada	Baixa
<b>Retenção de Biomassa</b>	Baixa a Moderada	Baixa	Total	Total
<b>Sensibilidade à Temperatura</b>	Baixa	Baixa a Moderada	Baixa	Baixa a Moderada
<b>Tempo de Inicialização</b>	Baixo	Baixo a Moderado	Baixo	Baixo a Moderado
<b>Modo de Tratamento</b>	Total	Essencial Pré-Tratamento	Total	Total

**Tabela 1:** Comparação do tratamento aeróbio convencional, anaeróbio convencional, AeMBR e AnMBR

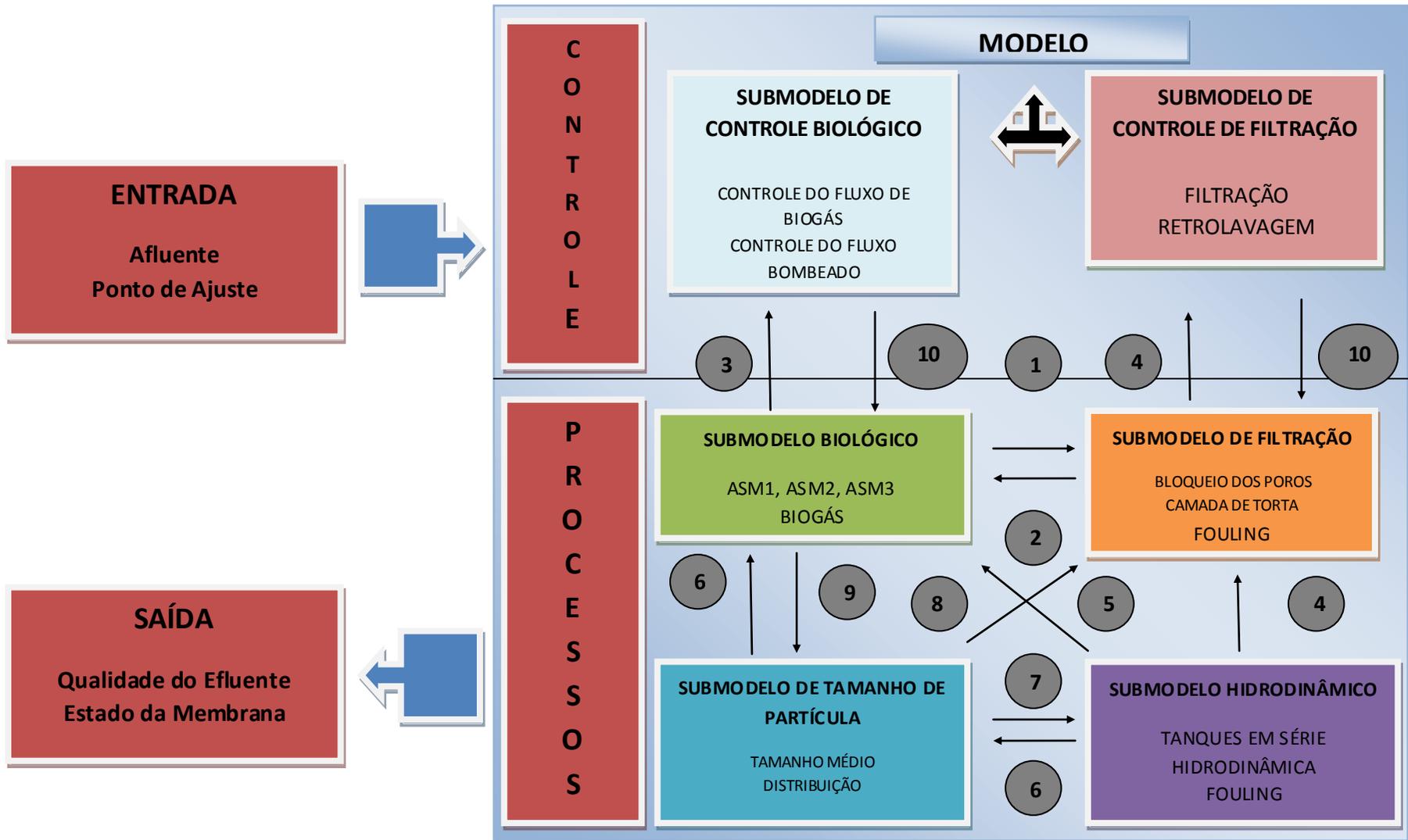
## MODELAGEM DE PROCESSOS DE FILTRAÇÃO

Devido à dificuldade em entender os diversos fenômenos envolvidos num sistema complexo como um biorreator com membrana, diversos modelos tem sido encontrados para diferentes objetivos como pesquisa e desenvolvimento dos processos de um AnMBR, visando aprimoramento do seu design e desenvolvimento de estratégias para otimização e controle do desempenho. Assim, modelos matemáticos que representam tais fenômenos vêm sendo desenvolvidos e analisados (Figura 1).

De um modo geral, todo mecanismo de modelos de filtração usa a Lei de Darcy de filtração em meios porosos como ponto inicial teórico para as equações dos modelos, que diretamente refere-se ao fluxo da membrana para medir a pressão transmembrana, utilizando uma constante para a viscosidade do lodo ou na melhor das hipóteses, um parâmetro dependente de temperatura e/ou sólidos total.

A Lei de Darcy permite que a resistência da membrana ( $R_m$ ) seja calculada, que é geralmente o efeito combinado da resistência da membrana limpa ( $R_m$ ) e certo número de mecanismos fouling deteriorando o processo de filtração. A resistência da membrana limpa é uma característica de tempo da própria membrana e é fornecida pelo fabricante ou pode ser determinado utilizando a Lei de Darcy na filtração de água pura.

A tradicional forma de modelagem de processos de filtração em reatores biológicos com membrana aplica o conceito de resistências em séries. Através da tabela 2 (Broeckmann et al., 2006) é possível perceber as diversas combinações de fenômenos envolvidos nesse tipo de sistema. Não serão dados detalhes matemáticos que existem por trás de todos os modelos, devido a variedade de abordagens para se calcular as resistências, todavia a maioria delas usa três condições básicas para calcular a resistência de filtração total, sendo: a resistência da membrana limpa  $R_m$  (calculada usando a Lei de Darcy na filtração de água ultra pura), resistência da camada de torta  $R_c$ , a resistência do bloqueio dos poros  $R_p$  e a resistência pelo fouling irreversível.



**FIGURA 1:** Ilustração das interações complexas entre diferentes processos em MBRs

Decomposição das resistências em séries	Resistências Parciais	Referência
$R = R_m + R_c + R_p + R_b$	$R_m$ : Lei de Darcy $R_c$ : Broeckmann e outros (2006) $R_p$ : Broeckmann e outros (2006) $R_b$ : Busch e outros (2007a)	Busch e outros (2007a)
$R = R_m + R_c + R_{sta} + R_{com} + R_{int}$	$R_m$ : Lei de Darcy $R_c$ : Chudacek e Fane (1994); Elmaleh e Ghaffor (1996) $R_{sta}$ , $R_{com}$ , $R_{int}$ : Hermia (1982)	Drews e outros (2009)
$R = R_m + R_c + R_f$	$R_m$ : Lei de Darcy (Água limpa) $R_c$ : Lei de Darcy (Ao final final da filtração) $R_f$ : Lei de Darcy (Após remoção da camada de lodo)	Khan e outros (2009)
$R = R_m + R_p + R_{cd} + R_{sc}$	$R_m$ : Não foi mencionado $R_p$ : Bowen e outros (1995) $R_{cd}$ : Li e Wang (2006) $R_{sc}$ : Li e Wang (2006)	Li e Wang (2006)
$R = R_m + R_c + R_f$	$R_m$ : Não Foi mencionado $R_c$ : Ludwig e outros (2011) $R_f$ : Geissler e outros (2005)	Ludwig e outros (2011)

**Tabela 2:** Modelos de processos de filtração da membrana através da decomposição da resistência em séries (Naessens, Maere e Nopens, 2012)

Broeckmann et al. (2006) ampliaram os modelos disponíveis para a formação da camada de torta pela representação do efeito das forças adesivas entre as partículas e as superfícies da membrana, enquanto que para o bloqueio dos poros foi tentada incluir a influência da relação entre o tamanho dos poros e a distribuição do tamanho das partículas. Os resultados mostraram que os declives da curva de filtração foram previstas muito bem, mas o constante desequilíbrio entre os resultados experimentais e simulados foram presentes, especialmente para os fluxos mais elevados.

De acordo com os autores, esta última foi causada pela perda da pressão na tubulação, formação do biofilme e polarização de concentração, ou seja, mecanismos que não foram incluídos no modelo. Contudo, a influência do uso de modelos de retrolavagem mais simples não deverá ser negligenciada. Como também estabelecido pelos autores, estes modelos terão necessidades de serem pesquisados de forma mais intensificada no futuro. Além disso, a influência da filtração na porosidade da camada de torta, importante para o bloqueio dos poros, precisam de uma intensificação completa, ou seja, o efeito da interação entre ambos os mecanismos. A desvantagem na sequência da extensão dos modelos é um excesso de parâmetros e a necessidade de calibração que proporcionam um excesso de graus de liberdade, refletindo um ponto de atenção na modelagem. Neste modelo, a distribuição do tamanho das partículas foi vista como um parâmetro que não pode ser justificada no longo prazo, visto que características da torta podem mudar substancialmente ao longo do tempo.

Uma observação importante feita por diversos autores é que a força de adesão envolvida muda consideravelmente a resistência específica da membrana e a espessura da torta, mas ambos os efeitos neutralizando entre si, o quase que completamente elimina a influência no  $R_c$ . Todavia é um dado importante para a construção do conhecimento sobre os mecanismos do fouling.

Os modelos apresentados para  $R_c$  e  $R_p$  por Broeckmann et al. (2006) foram usados por Busch et al. (2007a), que adicionou um modelo extensivo para resistência do biofouling. Além disso, toda a estrutura de modelos de filtração foi combinada com um simples modelo

hidrodinâmico e a hipótese de geometria do módulo. A maioria dos resultados é uma confirmação dos conhecimentos práticos da filtração em MBR. A filtração é prejudicada em baixa temperatura, as substâncias poliméricas extracelulares (EPS) contribuem fortemente para a resistência do biofouling  $R_b$  e elevadas concentrações de sólidos contribuem para  $R_p$  e  $R_c$ . A análise de sensibilidade confirmou que a distribuição do tamanho das partículas e a porosidade da membrana são importantes para a filtração da torta e o bloqueio dos poros. Indicou também que a retrolavagem é uma medida preventiva para a formação do biofilme, enquanto que as concentrações de EPS e seu transporte através da camada de torta são importantes como uma substância de ligação cruzada. Uma vez que um biofilme atua como um filtro adicional, interações do bloqueio dos poros com a filtração da torta também devem ser considerados no futuro.

Outro mecanismo de modelos de filtração, proposto por Li e Wang (2006), utiliza uma abordagem de corte, com vista a subdividir a superfície da membrana a dar conta para a distribuição desigual da intensidade de cisalhamento por arejamento e deposição dos materiais que causam o fouling. O fouling, aliás, é visto como um processo de duas etapas, em que uma camada de torta (modelada por  $R_{sc}$ ) é formada por um acréscimo cíclico de parte não removido da torta (modelado por  $R_{sf}$ ). Contudo, esta resistência do filme não foi relatada como uma contribuição significativa para a resistência total da filtração.

### **RESISTÊNCIA DA MEMBRANA – LEI DE DARCY ( $R_m$ )**

A Membrana de fibra oca é modelada em uma dimensão ao longo do seu eixo de comprimento. As questões mais detalhadas das variáveis não são expressas na dissertação com o objetivo de simplificar a notação. Assim, o fluxo de água pura através da membrana  $J$  é descrito pela equação de Darcy:

$$J = \frac{\Delta p}{R_{total} \cdot \eta} \quad \text{Equação (1)}$$

em que a diferença da pressão transmembrana ( $\Delta p$ ), a viscosidade do permeado ( $\eta$ ) e a resistência global ( $R_{total}$ ) é possível modelar, usando a resistência em séries, resultando em:

$$R_{total} = R_m + R_c + R_p + R_{irr} \quad \text{Equação (2)}$$

$R_m$ ,  $R_c$  e  $R_p$  são a resistência inicial da membrana, a camada de lodo e a resistência do bloqueio dos poros, respectivamente. Efeitos irreversíveis serão esperados por  $R_{irr}$ . Como os efeitos hidrodinâmicos deverão dominar sobre os efeitos difusos, controle de polarização de concentração é negligenciado. Isso é razoável, considerando o tamanho de partículas na ordem de 1-100  $\mu m$  (Chang et al., 2002). As condições hidrodinâmicas no lado exterior da membrana são modeladas como fluxo uniforme através de canais de água (Liu e Huang, 2000). O fluxo aumenta a tensão de cisalhamento sobre as partículas que é um fator essencial no controle da formação da camada de lodo. A resistência da membrana ( $R_m$ ) é uma constante específica e pode ser descoberta através de experimentos ou encontrada na literatura.

## **4. CONTEXTUALIZAÇÃO DA PESQUISA**

---

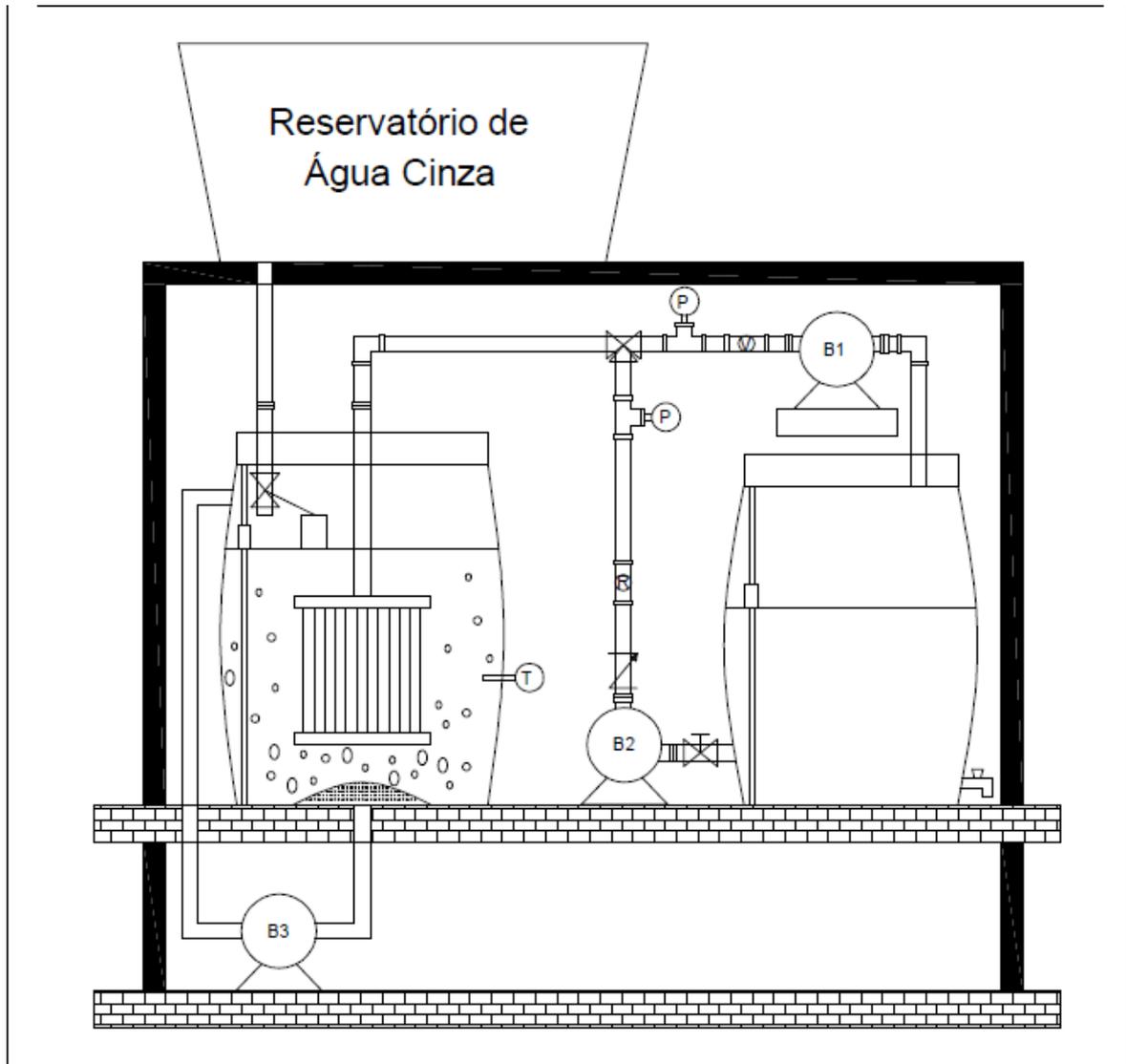
## CONTEXTUALIZAÇÃO DA PESQUISA

O presente estudo fez parte de um projeto de pesquisa executado pela Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) intitulado “Rede Nacional de Tratamento de Esgotos Descentralizado (REnTED)”. Os recursos financeiros foram disponibilizados pela Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) do Ministério da Ciência e Tecnologia, segundo o edital MCT/MCIDADES/FINEP/Ação Transversal SANEAMENTO AMBIENTAL E HABITAÇÃO – 6/2010.

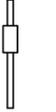
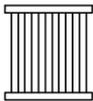
A pesquisa foi desenvolvida no Parque Experimental de Saneamento Básico da UFES no período de Fevereiro de 2013 a Maio de 2014.

Como se trata de uma pesquisa de modelagem computacional, um sistema (Fig. 1) foi projetado pelo Grupo de Pesquisa Núcleo Água (Núcleo de Bioengenharia aplicado ao Saneamento) da Universidade Federal do Espírito Santo para que informações necessárias para determinados parâmetros de entrada pudessem ser considerados.

O sistema consiste num biorreator anaeróbio com um volume total de  $0.1 \text{ m}^3$ , o qual possui uma membrana submersa com área de superfície total de  $2.0 \text{ m}^2$ . Baseado em revisão de literatura, foi considerado inicialmente um ciclo de operação de 180 segundos, sendo 160 segundos de filtração e 20 segundos de retrolavagem.



**Figura 2:** Biorreator Anaeróbio com Membrana desenvolvido pelo Núcleo Água (UFES)

	Conexão tipo T		Válvula tipo bóia		Rotâmetro		Bomba
	Conexão 90°		Válvula solenóide 2/3 vias		Sensor de nível tipo mergulhador		Torneira
	União		Sensor de temperatura				
	Válvula de retenção		Sensor de pressão		Membrana		
	Válvula manual 2 vias		Sensor de vazão				

## **5. ARTIGOS**

---

## ARTIGO 1

---

### RESISTÊNCIA DO BLOQUEIO DOS POROS DA MEMBRANA DE MICROFILTRAÇÃO PARA TRATAMENTO DE ÁGUAS CINZA

**Resumo:** Filtração através de membranas é uma tecnologia que tem tido crescimento no seu emprego para aumentar a qualidade de água e para tratamento de efluentes em geral. Estudos de simulação com modelos que representam o processo são excelentes ferramentas para aumentar o entendimento dos sistemas empregados e para orientar decisões e, portanto, planejar os processos ideais e estratégias operacionais eficientes. Assim, o presente estudo realizou a modelagem do bloqueio dos poros da membrana de microfiltração quando submetida ao tratamento de água cinza. O modelo utilizado para avaliar a resistência da membrana foi descrito por Broeckmann et al. (2006) e foi implementado no software MatLab Simulink® (versão R2012b). Os dados de entrada intrínsecos à membrana foram adquiridos através de relatórios fornecidos pelo fabricante. A resistência do bloqueio dos poros apresentou resultado próximo a  $1,52 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$ .

**Palavras chave:** Bloqueio dos poros, Membrana, Modelagem, Resistência.

#### Abstract

Filtration through membranes is a technology that has had growth in their employment to increase water quality and wastewater treatment in general. Simulation studies with models representing the process are excellent tools to increase understanding of the systems used to guide decisions and therefore to plan ideal process and efficient operational strategies. Thus, this study was performed to model the pore blocking microfiltration membrane from Pam Membranas Seletivas, when subjected to the greywater treatment. The model used to assess membrane resistance was described by Broeckmann et al. (2006) and was implemented in Matlab Simulink® software (version R2012b). Input data of intrinsic membrane were acquired through reports provided by the manufacturer. The pore blocking resistance results showed nearly  $6 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$ .

**Keywords:** Pore Blocking, Membrane, Modeling, Resistance.

## INTRODUÇÃO

Nos últimos anos os biorreatores com membrana têm experimentado aceitação crescente em substituição aos sistemas convencionais de tratamento de águas residuárias. Subtil, Mierzwa e Hespanhol (2014), compararam dois biorreatores com membrana, convencional (C-MBR) e Biofilm (BF-MBR), ambos aplicados ao tratamento de esgoto doméstico. Foi observado que a taxa de fouling foi cerca de 35% superior no C-MBR do que no BF-MBR, o qual também apresentou uma redução na resistência total da membrana, cerca de 29% e aumentou a duração do ciclo operacional cerca de 7 dias em comparação com o C-MBR. Wang (2014), avaliou o fouling em um biorreator com membrana submersa sob a ótica do tempo de retenção de sólidos (10 a 15 dias). Os resultados mostraram que o menor tempo foi útil para avaliar o acúmulo de sólidos e diminuição do fluxo.

Apesar de vários estudos bem sucedidos desta tecnologia, visto que esta aumenta a qualidade do produto do tratamento e possui elevada concentração de biomassa, problemas operacionais e um custo relativamente alto devem ser considerados (Witgens et al, 2003). Dentre os principais problemas operacionais podem ser descritos o bloqueio dos poros, o crescimento da camada de torta e o fouling, porque impede a operação dos sistemas de forma constante (Skouteris et al., 2012). No que se refere aos custos, Skouteris et al. (2012) citam que MBRs podem custar até 30% a mais que sistemas convencionais de tratamento.

O ciclo de filtração em um biorreator com membranas, em especial membranas de fibra oca, é caracterizado por um período de filtração do efluente seguido de um período da retrolavagem. Apesar de necessária, a retrolavagem diminui o desempenho geral do sistema devido à perda do permeado, visto que parte dele retorna para desobstruir os poros, além disso, o fluxo inverso danifica o material da membrana ao longo do tempo (Broeckmann et al., 2006). Assim, para aumentar o campo do entendimento acerca do processo e determinar estratégias de gestão do processo, modelos de filtração com membranas vêm sendo desenvolvidos.

Quanto à modelagem dos processos físicos, vários modelos foram propostos para expressar a relação entre as características das variáveis que influenciam no comportamento de um MBR e suas condições de funcionamento (Naessens, Maere e Nopens, 2012; Zuthi, Ngo e Guo, 2012). Para o fenômeno representado pela resistência do bloqueio dos poros é observado que a largura da distribuição e o tamanho médio dos poros e da partícula são os parâmetros que mais impactam no processo de filtração (Robles et al., 2013).

Neste estudo, os parâmetros de distribuição de partícula e diâmetro dos poros da membrana são analisados sob a ótica da influência que ambos exercem na resistência do bloqueio dos poros. Embora estes fenômenos já tenham sido avaliados por diversos autores, visou-se avaliá-los levando em consideração as características da membrana proposta neste estudo, de modo que decisões posteriores possam ser tomadas. Vale ressaltar que, ao contrário de vários modelos empíricos, disponíveis na literatura, o modelo usado neste estudo visa descrever, o principal fenômeno físico da filtração da membrana. Uma das principais vantagens desse modelo é a capacidade de prever a influência relativa ao bloqueio dos poros baseado nos parâmetros de modelos mensuráveis (Ludwig et al., 2012). Isso fornece valiosas informações para o desenho do processo de filtração, bem como para o desenvolvimento de estratégias de controle e limpeza de sucesso.

Assim, o objetivo deste trabalho foi definir uma modelação matemática capaz de calcular a resistência do bloqueio dos poros da membrana de microfiltração de fibra oca, visando o tratamento de água cinza. Para tanto, pretendeu-se avaliar a largura da distribuição, tamanho médio e diâmetro tanto dos poros quanto da partícula.

## BLOQUEIO DOS POROS

Os modelos matemáticos que representam um biorreator com membrana consistem de dois compartimentos que descrevem os processos de lodo ativado: um para explicar a eficácia do tratamento biológico e um para descrever a permeabilidade da unidade de filtração. De maneira geral, ambos os compartimentos são interligados dentro de um ambiente de simulação para explicar interdependências, principalmente a colmatação da membrana. Este último processo é altamente influenciado pela concentração e pelas características da biomassa no sistema, o que traz conseqüências tanto para o estado metabólico dos microorganismos quanto para a resistência da filtração (Witgens et al., 2003).

O bloqueio dos poros é o fenômeno resultante da redução da porosidade da membrana e conseqüente aumento da resistência. Ele é causado pelas partículas que são pequenas o suficiente para entrarem nos poros da membrana, segundo o modelo desenvolvido por Broeckmann et al. (2006).

O modelo seguinte é baseado na idéia de que as partículas podem ser separadas em duas fases: na primeira as partículas são retidas, podendo então ser fixadas à superfície, e na segunda as partículas entram pelos poros e contribuem para o bloqueio.

De maneira geral, a divisão destas duas fases é determinada matematicamente, levando em consideração o tamanho das partículas e a distribuição do tamanho dos poros da membrana. Para o tamanho dos poros, a distribuição é determinada através de:

$$R_{poro}(x_1) = \exp \left[ - \left( \frac{x_1}{d_{poro}} \right)^{n_{poro}} \right] \quad \text{Equação (1)}$$

em que:

$R_{poro}$ : Função para a distribuição do tamanho dos poros da membrana (%)

$x_1$ : tamanho do poro (m)

$d_{poro}$ : diâmetro médio do poro (m)

$n_{pore}$ : largura da distribuição (m)

A distribuição do tamanho da partícula (em inglês, Particle size distribution – PSD) é descrita pela distribuição da densidade  $g_{bulk}(x_2)$ , a qual é determinada por:

$$g_{bulk}(x_2) = -\frac{dR_{bulk}}{dx} = \frac{n_{bulk}}{d_{bulk}} \cdot \left(\frac{x_2}{d_{bulk}}\right)^{n_{bulk}-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{x_2}{d_{bulk}}\right)^{n_{bulk}}\right] \quad \text{Equação (2)}$$

em que:

$g_{bulk}$ : Distribuição da densidade das partículas (1/m)

$R_{bulk}$ : Função para a distribuição do tamanho das partículas (%)

$x_2$ : tamanho da partícula (m)

$d_{bulk}$ : diâmetro médio da partícula (m)

$n_{bulk}$ : largura da distribuição (m)

A idéia principal é combinar a informação que será adquirida através de  $R_{pore}(x_1)$  para os poros da membrana e de  $g_{bulk}(x_2)$  para as partículas. Considerando que uma partícula de um diâmetro  $x$  se aproxima do poro da membrana, então  $R_{pore}(x_1)$  expressa a possibilidade de um determinado poro ser mais largo que a partícula que, portanto, irá passar por ele. Desse modo,  $R_{pore}(x_1)$  divide a densidade da PSD em duas frações: uma descreve as partículas que entram nos poros e a outra descreve as que são retidas na superfície. Matematicamente:

$$g_{mem} = R_{pore}(x_1) \cdot g_{bulk}(x_2) \quad \text{Equação (3)}$$

onde:

$g_{mem}$ : distribuição de densidade da PSD para as partículas que entram na membrana (1/m)

E

$$g_{cake} = (1 - R_{pore}(x_1)) \cdot g_{bulk}(x_2) \quad \text{Equação (4)}$$

onde:

$g_{cake}$ : distribuição da densidade para as partículas que são retidas na superfície (1/m)

É importante observar que, por definição matemática,

$$\int_{-\infty}^{\infty} g_{mem}(x) dx = 1, \quad \text{Equação (5)}$$

assim, combinando as equações (3) e (5), tem-se:

$$0 \leq \int_{-\infty}^{\infty} g_{mem}(x) dx = G_{mem} \leq 1 \quad \text{Equação (6)}$$

$G_{mem}$  expressa a fração das partículas que entram nos poros da membrana.

A resistência da membrana é calculada através da equação de Karman-Kozeny

$$R_p + R_{mem} = \frac{(1 - \varepsilon_{mem})^2 \cdot K_{porosity}}{(\varepsilon_{mem})^3} \quad \text{Equação (7)}$$

onde  $R_p$  é a resistência do bloqueio dos poros,  $R_{mem}$  é a resistência da membrana à água pura,  $\varepsilon_{mem}$  é a porosidade da membrana e  $K_{porosity}$  é a constante específica da membrana. Como a disposição das partículas nos poros da membrana não afeta, fundamentalmente, suas características, então se assume que  $K_{porosity}$  não muda com  $\varepsilon_{mem}$ . Caso  $R_{mem}$  seja conhecido por meio de experimentos ou através da literatura, a equação 7 poderá ser calculada, caso  $\varepsilon_{mem}$  seja conhecido.  $\varepsilon_{mem}$  diminui quando as partículas entram nos poros, o que pode ser derivado do balanço de massa em torno da membrana,

$$\rho_{p,mem} \cdot V_{mem} \cdot \frac{d\varepsilon_{mem}}{dt} = -J \cdot c_{mem}^{bulk} \cdot A_{mem} \quad \text{Equação (8)}$$

onde:

$V_{mem}$ : volume total da membrana ( $m^3$ )

$A_{mem}$ : superfície externa da membrana ( $m^2$ )

$\rho_{p,mem}$ : densidade das partículas nos poros da membrana e

$c_{mem}^{bulk}$  : concentração de massa das partículas na fase inicial que irão penetrar a membrana (g/L).

$c_{mem}^{bulk}$  é obtido através de:

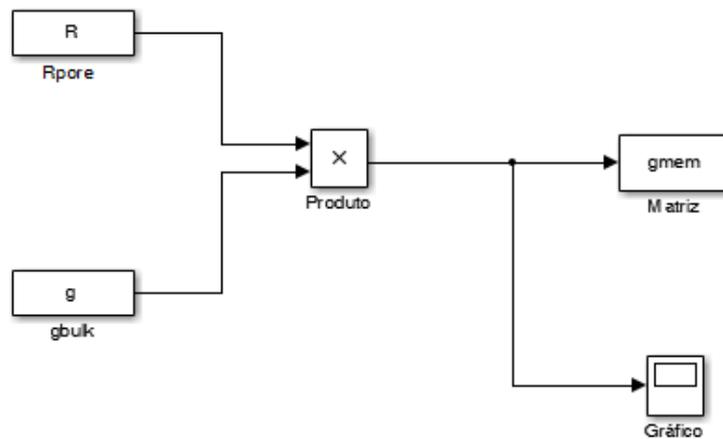
$$c_{mem}^{bulk} = G_{mem} \cdot c^{bulk}, \quad \text{Equação (9)}$$

onde:

$c^{bulk}$  : concentração de massa na fase inicial (g/L)

## MATERIAIS E MÉTODOS

O modelo de filtração  $R_{pore}/g_{bulk}$  foi implementado usando um pacote de programação Matlab/Simulink®, tal como descreve o diagrama de blocos da figura 1.



**Figura 1:** Diagrama de blocos para o cálculo de  $g_{mem}$

Os estudos de simulação foram realizados para reproduzir a resistência do bloqueio dos poros referente à uma membrana de microfiltração de fibra oca. A tabela 1 apresenta as

características da membrana utilizada como referência para o estudo. Os dados foram fornecidos pelo fabricante.

**Tabela 1:** Membrana de Microfiltração

Área da Membrana	2,0 m <sup>2</sup>
Pressão Máxima de operação	5 bar
Comprimento do módulo	0,9 mm
Diâmetro médio dos poros	0,4 µm
Temperatura Máxima	55°C
Resistência da Membrana	1,4 x 10 <sup>-12</sup> m <sup>-1</sup>

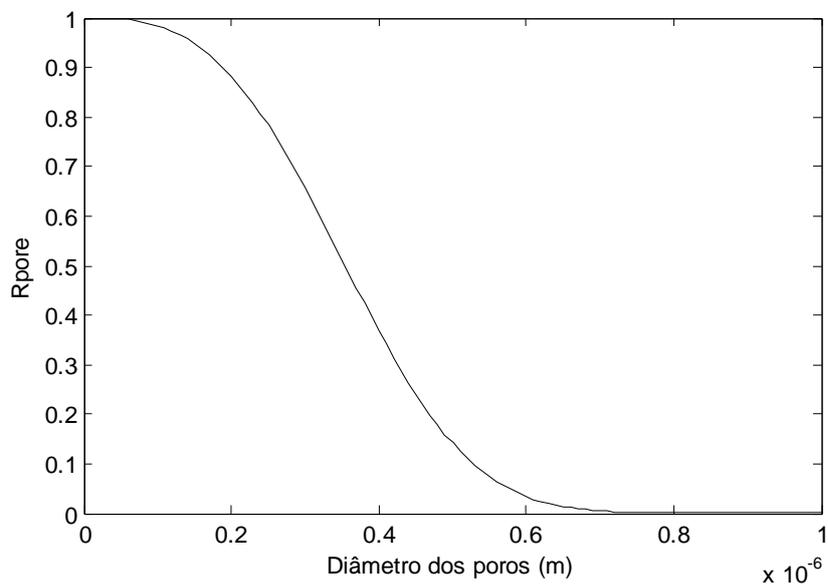
Uma parte do conjunto de dados de entrada do modelo foi adquirida através dos relatórios fornecidos pelos fabricantes de diversas membranas disponíveis no mercado e outra parte através da literatura (dados que só podem ser mensurados experimentalmente). Foi realizada uma combinação, utilizando um tamanho médio dos poros (0.4 µm) e dois tamanhos médios de partícula (38µm/76µm). Os dados foram simulados usando a distribuição que é formulada através da curva de peso retido (equação 1), os quais foram apresentados na tabela 2 deste trabalho.

**Tabela 2:** Parâmetros de entrada para simulação e análise

x <sub>1</sub>	0 - 1 µm	Nakao, 1994; Mulder, 2000
x <sub>2</sub>	50 - 76 µm	Bani-Melhem and Smith, 2012
d <sub>pore</sub>	0,4 µm	Microfiltração
d <sub>bulk</sub>	38 µm/76 µm	Bani-Melhem and Smith, 2012
n <sub>pore</sub>	3	Busch, 2013
n <sub>bulk</sub>	3	Busch, 2013

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Através da figura 2, observou-se que a membrana de microfiltração possui cerca de 40% dos poros com diâmetro de  $0.4\mu\text{m}$ . Este cálculo é feito para mostrar que apesar do diâmetro médio do poro apresentar um valor próximo à  $0.4\mu\text{m}$ , a sua maioria pode possuir um tamanho um pouco menor ou maior, o que, conseqüentemente, resulta também numa menor ou maior quantidade de partícula nos poros da membrana.



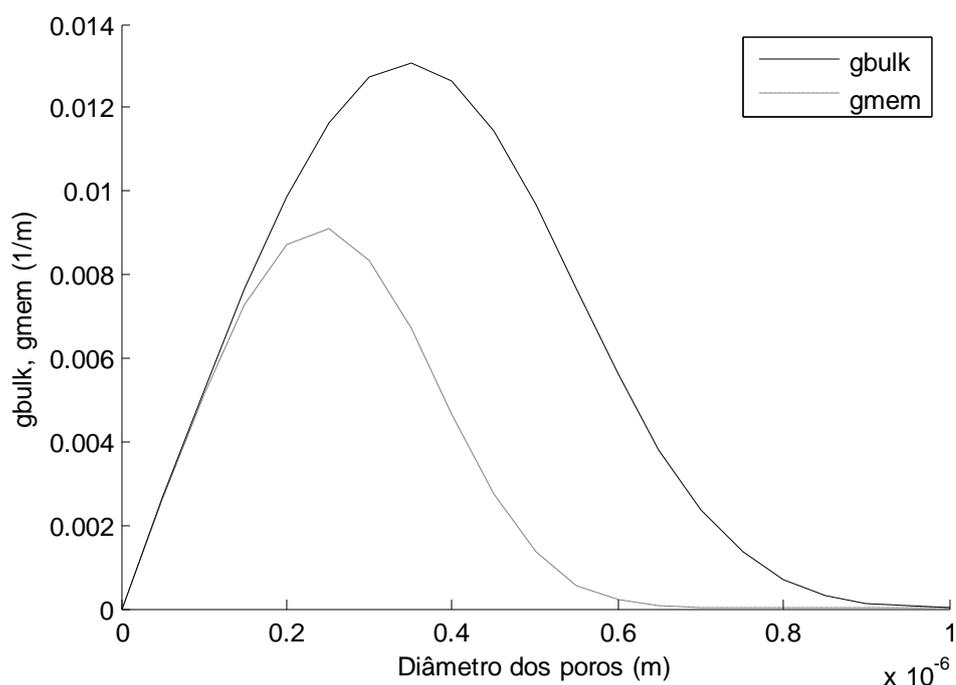
**Figura 2:** Distribuição dos poros da membrana quando  $d_{\text{poro}}$  igual a  $0,4\mu\text{m}$

Tendo em vista que o objetivo da membrana é realizar a separação sólido – líquido em um processo biológico de tratamento, levou-se em consideração os tamanhos de partícula que são representadas pelos dos flocos formados nos MBRs. Uma variação de tamanho de floco de 28 a  $125\mu\text{m}$  foi constatada na revisão bibliográfica realizada (tabela 3).

**Tabela 3:** Tamanho de flocos de partícula em MBRs

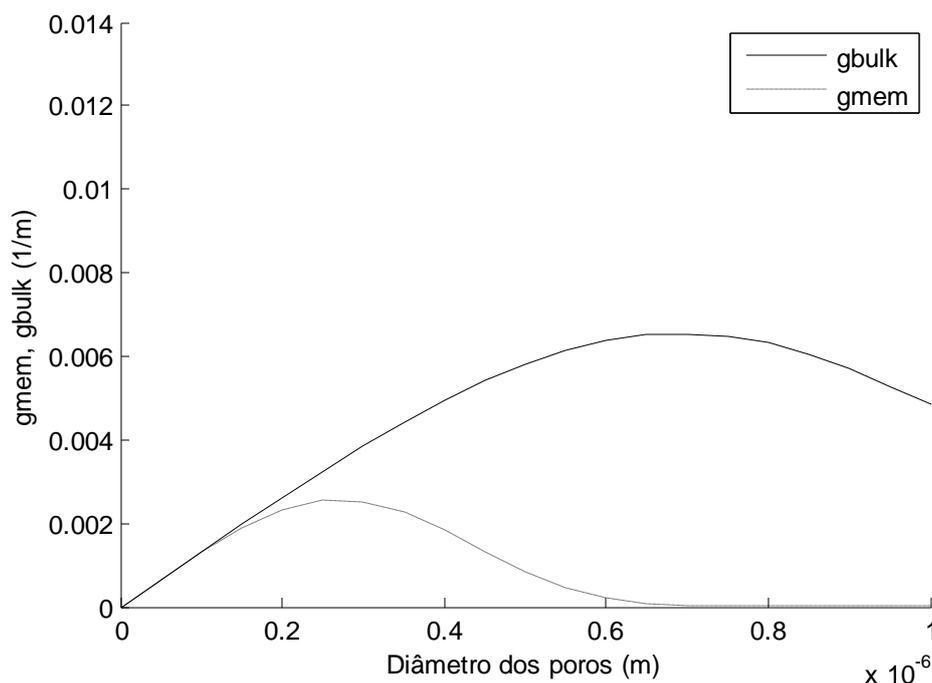
Flocos ( $\mu\text{m}$ )	Efluente	Referência
28 – 125	Esgoto Urbano	Wisninwski e Grasmick, 1998
35	Esgoto Doméstico	Manser, Gujer e Siegrist, 2005
30 – 50	Esgoto	Jiang, 2007
140	Esgoto Urbano	Jimenez, Grelier, Meinhold e Tazi-Pain, 2010
50 - 76	Água Cinza	Bani-Melhem e Smith, 2012

Comparando as figuras 3 e 4, a análise que se obtém acerca dos resultados é que  $g_{\text{mem}}$  é significativamente maior na figura 3, visto que o diâmetro médio da partícula é menor e, conseqüentemente, uma maior quantidade de partículas é capaz de entrar nos poros da membrana. Para a combinação (0,4 $\mu\text{m}$ /38 $\mu\text{m}$ ), o resultado máximo de  $g_{\text{mem}}$  é um valor próximo de  $9 \times 10^{-3} \text{ (m}^{-1}\text{)}$ , enquanto que para a combinação (0,4 $\mu\text{m}$ /76 $\mu\text{m}$ ) esse valor é próximo de  $2 \times 10^{-3} \text{ (m}^{-1}\text{)}$ . Contudo, para a membrana de microfiltração que estamos considerando nesse estudo, temos resultado de  $4 \times 10^{-3}$  e  $1,7 \times 10^{-3} \text{ (m}^{-1}\text{)}$ , respectivamente.



**Figura 3:**

**Figura 3:** Distribuição da densidade das partículas no sistema ( $g_{\text{bulk}}$ ) e nos poros da membrana ( $g_{\text{mem}}$ ) para a combinação (0.4 $\mu\text{m}$ /38 $\mu\text{m}$ )



**Figura 4:** Distribuição da densidade das partículas no sistema ( $g_{bulk}$ ) e nos poros da membrana ( $g_{mem}$ ) para a combinação (0.4 $\mu$ m/76 $\mu$ m)

Esses dados representam uma estimativa da densidade das partículas que possivelmente irão entrar pelos poros da membrana. Essa análise parece um pouco óbvia, mas se faz necessária visto que até mesmo as partículas menores podem se aproximar dos poros e não passar através deles, tendo a chance de serem anexadas à superfície da membrana, e, conseqüentemente, contribuir para a formação da camada de torta.

É importante salientar que nos estudos aqui referenciados, os valores para  $g_{mem}$  são consideravelmente maiores, o que pode ser justificado pelo tamanho médio dos poros da membrana. Como a maioria desses estudos foi realizada para tratamento de esgoto industrial, o tamanho médio do poro considerado foi de 5 $\mu$ m, enquanto que o desta pesquisa enfocando o tratamento de água cinza foi de 0,4 $\mu$ m.

A mesma análise feita para o tamanho de partícula, comparando os valores que são encontrados no tanque de alimentação e no MBR durante a filtração, também é aplicada para a concentração de massa. A tabela 4 tem como objetivo apresentar tais resultados nas

diversas pesquisas encontradas na literatura à título de comparação com a tabela 5 que apresenta ainda resultados relacionados à resistência do bloqueio dos poros.

**Tabela 4:** Concentração de massa no tanque de alimentação do sistema

$C_0$ (mg.L <sup>-1</sup> )	Efluente	Referência
48 – 120	Água Cinza (Banheiro)	Christova-Boal et al, 1996
210	Esgoto Doméstico	Orhon et al, 1997
50 – 150	Esgoto Doméstico	Jordão e Pessôa, 2009
63	Água Cinza	Hocaoglu et al, 2010
78	Água Cinza	Bani-Melhem e Smith, 2012
51	Água Cinza	Hocaoglu et al, 2013

**Tabela 5:** Concentração de massa no reator (água cinza + flocos de biomassa)

$C_0$ (mg.L <sup>-1</sup> )	Efluente	Filtração	Membrana	$R_b$ (m <sup>-1</sup> )	Referência
3300	Esgoto	Dead-end	Microfiltração	$1,5 \times 10^8$	[3]
1400	Esgoto	Dead-end	Ultrafiltração	$2,0 \times 10^8$	[3]
NI	Esgoto	Cross-flow	Ultrafiltração	$6,9 \times 10^{10}$	[2]
2000 - 8000	Efluente Sintético	Cross-flow	Microfiltração	$1,5 \times 10^{12}$	[5]
NI	Esgoto	Cross-flow	Microfiltração	$1,66 \times 10^{12}$	[1]
500	Latex (partículas)	Dead-end	Microfiltração	$3,1 \times 10^{10}$	[4]
1000	Latex (partículas)	Dead-end	Microfiltração	$2,6 \times 10^{10}$	[4]
5000	Latex (partículas)	Dead-end	Microfiltração	$1,7 \times 10^{10}$	[4]
1000	Esgoto	Cross-flow	Ultrafiltração	$0,9 \times 10^{12}$	[6]
3000	Esgoto	Cross-flow	Ultrafiltração	$0,54 \times 10^{12}$	[7]
3000	Água Cinza	Cross-flow	Microfiltração	$6 \times 10^{12}$	EP

NI: Não Informado pelo autor. EP: Esta Pesquisa.  $R_b$ : Resistência do bloqueio dos poros. [1] Rafiei et al, 2014. [2] Jiang et al, 2003. [3] kawakatsu et al, 1993. [4] Nakamura et al, 2012. [5] Provenzi, 2005. [6] Maqbool et al, 2014. [7] Choo e Lee, 1998.

O valor de concentração de massa considerado foi obtido através da média aritmética dos valores encontrados, o que é razoável para os estudos de modelagem e simulação.

Para os cálculos de  $G_{mem}$  o resultado obtido foi um valor próximo de  $5 \times 10^{-5}$  quando considerado o  $d_{bulk}$  igual a  $38\mu m$  ( $d_{38}$ ) e  $1,25 \times 10^{-5}$  quando  $d_{bulk}$  foi  $76\mu m$  ( $d_{76}$ ), o que indica que, em ambos os casos, a maior parte das partículas (cerca de mais de 99%) será retida na

superfície da membrana, podendo contribuir para a formação da camada de torta e, futuramente, reduzir a permeabilidade da membrana. Essa informação pode ser afirmada, pois um valor próximo de 1 indica que a maioria das partículas vão entrar pelos poros e, conseqüentemente, um intenso bloqueio dos poros ocorrerá. Em contrapartida, um valor próximo a 0 significa que grande parte das partículas serão retidas na superfície da membrana e, possivelmente, irão contribuir para a formação da camada de torta.

Apesar de uma pequena parcela das partículas entrar pelos poros da membrana, o bloqueio dos poros ainda assim ocorrerá, todavia num intervalo de tempo mais longo, tendo em vista que a remoção durante a retrolavagem é incompleta e, portanto, há uma tendência de se acumular partículas ao longo do tempo de filtração (Broeckmann et al., 2006).

Através da equação 9 obtém-se o valor de 0,15 mg/l (quando  $d_{38}$ ) e 0,0375 mg/l ( $d_{76}$ ) para  $c_{mem}^{bulk}$ , o que, em ambos os casos, permite a estimativa da porosidade da membrana em cerca de 70%. Esta porosidade também se encontra de acordo com as diversas pesquisas encontradas apresentadas na tabela 6.

**Tabela 6:** Porosidade da Membrana de Microfiltração

Porosidade	Referência
0.5 – 0.75	Nilsson, 1989
0.7	Busch, 2007
0.05 – 0.5	Trindade, 2010
0.75	Milipore, 2014

Com base nestes resultados, utilizando a equação 7, chegamos à  $1,52 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$  para o resultado da resistência do bloqueio dos poros. Este resultado encontra-se de acordo com a grande maioria das pesquisas, como pode ser observado através da tabela 5. A diferença da ordem de grandeza entre alguns resultados do bloqueio dos poros expostos na tabela se refere à diferença da resistência intrínseca da membrana.

## CONCLUSÃO

O modelo da resistência do bloqueio dos poros, que descreve a influência da distribuição do tamanho das partículas, bem como o tamanho dos poros na filtração da membrana, pode ser considerado como uma ferramenta adequada para previsão do fenômeno ao qual foi proposto.

Os resultados mostraram que o bloqueio dos poros, não somente desta pesquisa, mas também nas outras aqui referenciadas, é um fenômeno que possui pouca influência no processo completo da filtração, visto que de maneira geral, a maioria das partículas são maiores que os poros. Esta interpretação leva diversos autores a negligenciarem este fenômeno ou utilizarem modelos que consideram o bloqueio dos poros juntamente com algum outro fenômeno, como a formação da camada de torta.

Assim, avaliar uma determinada resistência simplesmente por sua definição pode levar a errada interpretação, sendo necessário verificar os fenômenos os quais estão sendo considerados para cálculo.

## REFERÊNCIAS

BANI – MELHEM, K; SMITH E. Grey Water treatment by a continuous process of an eletrocoagulation unit and a submerged membrane bioreactor system. *Chemical Engineering Journal*, 198. 201 – 210. 2012.

BROECKMANN, A; BUSCH, J; WITGENS, T; MARQUARDT, W. Modeling of pore blocking and cake layer formation in membrane filtration for wastewater treatment. *Desalination*, 189, 97-109, 2006.

BUSCH, J; CRUZE, A; MARQUERDT, W. Modeling submerged hollow-fiber membrane filtration for wastewater treatment. *Journal of Membrane Science*, 288, 94-111, 2007a.

BUSCH, J. Publicação eletrônica [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por < > em 27 nov. 2013.

CHEN, Y. KIM, H. Monte Carlo simulation of pore blocking and cake formation by interfacial interactions during membrane filtration. *Desalination*, 233. 258 – 266. 2008.

CHRISTOVA-BOAL, D; ROBERT, E; EDENB, R. E; MCFARLANE, S. An investigation into grey water reuse for urban residential properties. *Desalination*, 106,391-397. 1996.

HOCAOGLU, S. M; INSEL, G; COKGOR, E.U; BABAN, A; ORHON, D. COD fractionation and biodegradation kinetics of segregated domestic wastewater: black and grey water fractions. *Journal Chemical Technology Biotechnology*, 85, 1241-1249, 2010.

HOCAOGLU, S. M; ATASOY, E; BABAN, A; ORHON, D. Modeling biodegradation characteristics of grey water in membrane bioreactors. *Journal of Membrane Science*, 429, 139-146, 2013.

JIMENEZ, J; GRELIER, P; MEINHOLD, J; JAZI – PAIN, A. Biological Modelling of MBR and impact of primary sedimentation. *Desalination*, 250. 562 – 567. 2010.

JIANG, T; KENNEDY, M. D; MEER, W. G. J; VANROLLEGHEM, P. A; SCHIPPERS, J. C. The role of blocking and cake filtration in MBR fouling. *Desalination*, 157. 335 – 343. 2003.

JORDÃO, E. P; PESSÔA, C. A. Tratamento de Esgotos Domésticos. Abes. 5ª Ed. 2009.

KAWAKATSU, T; NAKÃO, S; KIMURA, S. Effects of size and compressibility of suspended particles and surface pore size of membrane on flux in crossflow filtration. *Journal of Membrane Science*, 81. 173 – 190. 1993.

LI, X; WANG, X. Modeling of membrane fouling in a submerged membrane bioreactor. *Journal of Membrane Science*, 278, 151-161, 2006.

LIN, H; PENG, W; ZHANG, M; CHEN, J; HONG, H, ZHANG, Y. A review on anaerobic membrane bioreactors: Applications, membrane fouling and future perspectives. *Desalination*, 314, 169-188.

MANSER, R; GUJER, W; SIEGRIST, H. Consequences of mass transfer effects on the kinetics of nitrifiers. *Water Research*, 39. 4633 – 4642. 2005.

MAQBOOL, T; KHAN, S.J; LEE, C.H. Effects of filtration modes on membrane fouling behavior and treatment in submerged membrane bioreactor. *Bioresource Technology*. 2014.

MULDER, M. Basic principles of membrane technology. Center for membrane science and technology. University of Twente, Enschede. *The Netherlands*, 564p. 2000.

NAKAMURA, K; ORIME, T; MATSUMOTO, K. Response of zeta potential to cake formation and pore blocking during the microfiltration of látex particles. *Journal of Membrane Science*, 402. 274 – 281. 2012.

NAKÃO, S. DETERMINATION OF PORE-SIZE AND PORE SIZE DISTRIBUTION. Filtration membrane. *Journal of membrane science*, 96, 131-165.

ORHON, D; ATES, E; SOZEN, S; COKGOR, E.U. Characterization and COD fractionation of domestic wastewaters. *Environmental Pollution*, 95, 191-204, 1997.

PROVENZI, G. Biorreator à Membrana submersa para tratamento biológico de efluentes.: Estudos Hidrodinâmicos e físico-químicos no controle da colmatação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. Tese de doutorado. UFSC. 2005.

RAFIEI, B; NAEIMPOOR, F; MOHAMMADI, T. Bio-film and bio-entrapped hybrid membrane bioreactors in wastewater treatment: comparison of membrane fouling and removal efficiency. *Desalination*, 337. 16 – 22. 2014.

RAUTENBACK, K; MELIN, T. *Membranverfahren, spring*. Nr. 3-540-00071-2. Berlin. 2004.

ROBLES, A; RUANO, M.V; RIBLES, J; SECO, A; FERRER, J. A filtration model applied to submerged anaerobic MBRs (SAnMBRs). *Journal of Membrane Science*, 444. 139 – 147. 2013

SARKAR, B. A combined complete pore blocking and cake filtration model during ultrafiltration of polysaccharide in a batch cell. *Journal of food engineering*, 116. 333 – 343. 2013.

SUBTIL, E. L; HESPANHOL, I; MIERZWA, J. C. Biorreatores com membranas submersas (BMRs): Alternativa promissora para o tratamento de esgotos sanitários para reúso. *Ambiente e água: Na Interdisciplinary Journal of Applied Science*. 2013.

SUBTIL, E. L; MIERZWA, J. C; HESPANHOL, I. Comparison between a conventional membrane bioreactor (C-MBR) and a biofilm membrane bioreactor (BF-MBR) for domestic wastewater treatment.

VOBENKAUL, K. The puron membrane system: New concepts for submerged membrane technology in wastewater treatment. Pre-prints, *Aachen Membrane Colloquium*, 16-17, 2005.

WANG, X; CHEN, Y; YUAN, B; LI, X; REN, Y. Impacts of sludge retention time on sludge characteristics and membrane fouling in a submerged osmotic membrane bioreactor. *Bioresource Technology*, 161. 310 – 347. 2014

WISNINWSKI, C; GRASMICK, A. Floc size distribution in a membrane bioreactor and consequences for membrane fouling. *Colloids and surfaces A: Physicochemical and Engineering aspects*, 138. 403 – 411. 1998.

WITGENS, T; ROSEN, J; MELIN, C; BREPOLS, K; ENGELHARDT, N. Modelling of a membrane bioreactor system for municipal wastewater treatment. *Journal membrane science*, 216, 55-65. 2003.

## ARTIGO 2

---

### MODELAGEM DA FORMAÇÃO DA CAMADA DE TORTA EM UMA MEMBRANA DE MICROFILTRAÇÃO APLICADA AO TRATAMENTO DE ÁGUA CINZA

**Resumo:** Filtração com membranas é um processo altamente complexo em que uma variedade de fenômenos físicos, químicos e biológicos ocorre em diferentes tempos e escalas. A interação destes fenômenos com o sistema de filtração é complexa e de decisivo impacto no rendimento do processo aplicado ao tratamento de águas cinza. Assim, para este estudo um modelo matemático do desempenho da filtração que analisa a formação da camada de torta é apresentado. A modelagem é realizada considerando a filtração de um sistema anaeróbio com membrana de fibra oca para a realização do tratamento de água cinza. O modelo foi implementado na plataforma do software MatLab/Simulink® (versão R2012b) para a simulação. Ao final da simulação, o modelo comprovou ser uma ferramenta significativa para a previsão do comportamento referente à resistência da camada de torta, bem como essencial para a concepção de estratégias operacionais adequadas e de processos para aplicações de filtração com membranas.

**Palavras-Chave:** Água Cinza, Camada de Torta, Membrana, Modelagem

**Abstrat:** Filtration membranes is a highly complex process in which a variety of physical, chemical and biological phenomena occur at different times and schedules. The interaction of these phenomena with the filtration system is complex and decisive impact. Thus, in this study a mathematical model of the performance from the filter which analyses the formation of the cake layer is displayed. The modeling is carried out considering a filtration system with hollow fiber membrane for carrying out the greywater treatment. The model was implemented in Matlab Simulink® software (version R2012b), software for the simulation platform. At the end of the simulation, the model proved to be a significant tool for predicting the behavior related to the resistance of the cake layer as well as essential for the design of appropriate operational strategies and process for membrane filtration applications.

**Keywords:** Greywater, Cake layer, Membrane, Modeling.

## INTRODUÇÃO

Nos últimos anos biorreatores com membranas (MBR), principalmente os modelos com membrana submersa tem atraído a atenção no campo do tratamento de águas residuárias. Ao invés de sistemas convencionais, os biorreatores anaeróbios com membrana submersa (AnMBRS) tem se apresentado como uma tecnologia promissora para estas aplicações, particularmente devido às diversas vantagens conhecidas, tais como a baixa produção de lodo (devido à baixa taxa de anabolismo), o baixo consumo de energia (não há necessidade de aeração) e, finalmente, a geração de biogás que pode ser usado como recurso energético (Mannina, Di Bella e Viviani, 2011). Entretanto, lacunas tecnológicas importantes ainda subsistem, o que vem limitando o emprego em larga escala deste tipo de processo (Robles et al., 2013). O controle do fouling na membrana filtrante é uma delas, dado o efeito que metabólitos da digestão anaeróbia exercem sobre a mesma (Skouteris et al., 2012).

O maior desafio operacional concentra-se no desempenho da membrana, que pode ser otimizado através de uma estratégia adequada de remoção da camada de torta e de controle do fouling (Skouteris et al., 2012). Nesse contexto, a modelagem matemática de MBRs pode ajudar a fornecer uma visão sobre os fatores que desempenham um papel fundamental no crescimento da camada de torta e, conseqüentemente, o aumento da resistência à filtração do conjunto formado pela membrana e pela torta.

Duclos-Orsello et al. (2006) propuseram um modelo para estimar a diminuição do fluxo durante a microfiltração, (considerando a concentração de sólidos como uma função) usando três mecanismos clássicos de incrustação: bloqueio dos poros, compressão dos poros e formação da camada de torta. Li e Wang (2006) propuseram um modelo de previsão do fouling e inclui o impacto da tensão de cisalhamento na limpeza da membrana. Bush et al (2007) criaram um modelo de membrana de fibra oca submersa incorporado à geometria e hidrodinâmica do sistema e González et al. (2008) desenvolveram um modelo matemático para simular o processo de filtração incluindo a cinética biológica e a dinâmica da camada de torta. A maioria das abordagens de modelagem acima mencionadas pode reproduzir a

maneira em que o lodo afeta o desempenho da membrana. No entanto, estes modelos geralmente dependem de parâmetros que não podem ser mensurados e requerem equipamentos de laboratório específicos. Além disso, alguns deles não podem facilmente serem combinados em conjunto com um determinado modelo biológico.

Em alguns casos, os resultados da simulação não podem ser comparados, pois a interpretação dos dados de maneira conjunta pode tender a falsas conclusões, visto que os sistemas são cada vez mais específicos (tipo de membrana, efluente, tamanho dos poros, etc) e, portanto, cada caso deve ser analisado separadamente.

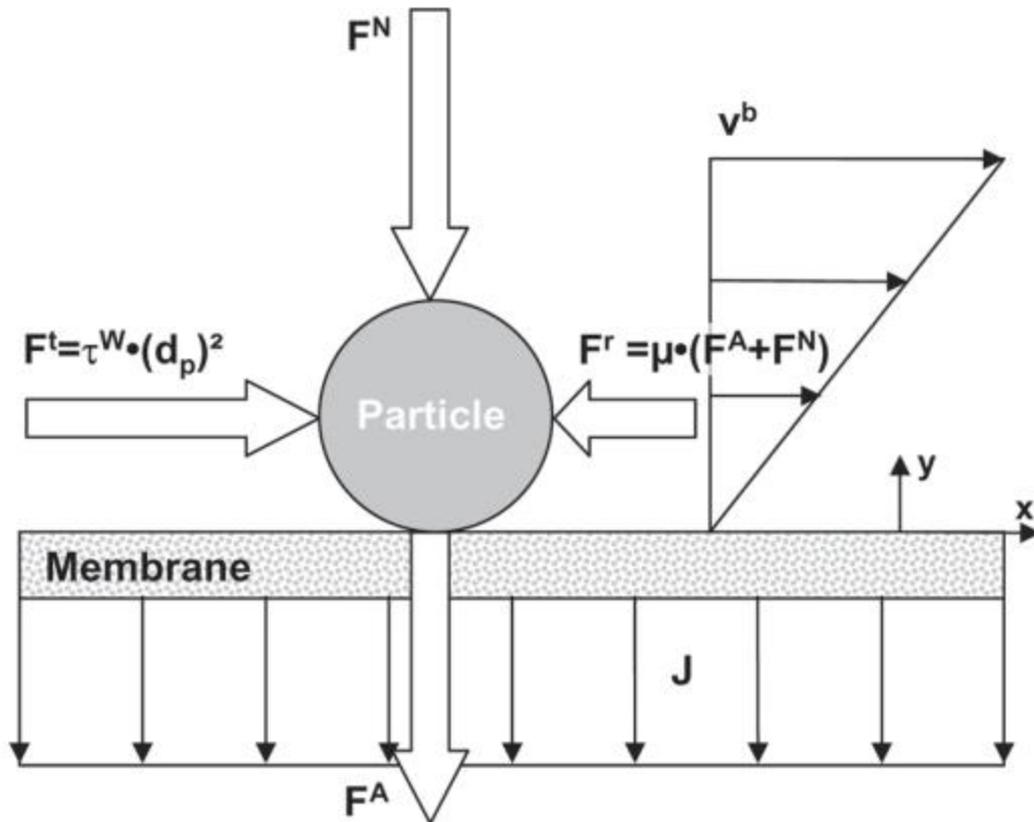
A este respeito, o modelo de filtração utilizado nesta pesquisa foi escolhido porque ele baseia-se na simplicidade e principalmente na sua capacidade de ser facilmente usado, posteriormente, em conjunto com os processos biológicos, numa tentativa de reproduzir o impacto das variáveis do fouling mais críticas. Assim, este estudo é baseado no modelo de resistência em série para simular o comportamento da camada de torta, bem como a resistência causada por este fenômeno. Para tanto, forças de adesão entre as partículas e a superfície da membrana foram analisadas.

## **FORMAÇÃO DA CAMADA DE TORTA**

Durante o tratamento da água cinza em um RBM, as partículas que são retidas na superfície da membrana podem tanto se anexar à membrana e contribuir para a formação da camada de torta e, conseqüentemente, o aumento da resistência à filtração, quanto podem retornar para a fase inicial. Um dos dois fenômenos irá ocorrer, dependendo das forças envolvidas devido ao fluxo hidráulico e ao atrito superficial. Essas duas forças são consensualmente consideradas em todos os modelos que simulam o processo de filtração (Hwang et al., 2001).

Conforme modelo desenvolvido por Broeckmann et al. (2006), o equilíbrio de forças em conjunto com o equilíbrio de massa em torno da camada de torta, juntamente com a

equação de *Blacke-Kozeny* para descrever a dinâmica do fluido, origina um modelo dinâmico para descrever a formação da camada de torta e prever a respectiva resistência à filtração do sistema formado pela membrana e pela torta



**Figura 1:** Forças sobre a partícula durante a filtração

As partículas presentes na fase líquida aderem-se à superfície da membrana, o que resulta na formação da camada de torta, ou são transportados novamente para esta fase pelas forças de cisalhamento.

Na direção  $x$ , a força tangencial  $F^t$  resulta da tensão de cisalhamento  $\tau^w$  induzido pelas condições do fluxo que o cerca (Foley e Malone, 1995):

$$F^t = \tau^w \cdot d_p^2 \quad \text{Equação (1)}$$

em que:

$d_p$ : diâmetro da partícula (m)

$F^t$ : força tangencial (N)

$$F^t = \mu \cdot F^y, \mu \leq \mu_{\max}$$

**Equação (2)**

Onde:

$F^y$ : força resultante que atrai a partícula para a superfície da membrana (N)

$\mu$ : é o coeficiente de atrito

$\mu_{\max}$ : coeficiente máximo de atrito

Foley e Malone (1995) sugerem que um valor para  $\mu_{\max}$  comum seja adotado, tanto para a membrana quanto para a superfície da camada de torta, porque os estudos realizados por eles comprovam que, de maneira geral, este parâmetro possui resultados próximos, considerando diferentes sistemas, com diferentes aplicações de tratamento.

Na direção  $y$ , normalmente apenas a força normal  $F^N$ , resultante do fluxo através da membrana, é considerado.

No modelo proposto neste trabalho, forças adesivas  $F^A$  entre as partículas e a membrana também são consideradas. Isso resulta da idéia de Hwang et al. (2001), que considera tais forças em seu trabalho sobre simulação de trajetórias de microorganismos em filtração por membrana. A condição para as partículas fixem-se à membrana é então:

$$\tau^w \cdot d_p^2 - \mu_{\max} \cdot (F^N + F^A) \leq 0$$

**Equação (3)**

A equação anterior é resolvida por  $d_p$ , a fim de determinar o diâmetro máximo de partícula  $d_p^{\text{cutoff}}$ , considerando as partículas aderentes.  $d_p^{\text{cutoff}}$  é conhecido como diâmetro de corte e de acordo com Chang et al. (2002).  $F^N$  é calculada a partir de:

$$F^N = K_s \cdot \eta \cdot d_p \cdot J \cdot \left( \frac{d_p^2}{k^*} \right)^{0.4}$$

**Equação (4)**

em que

$K_s$ : parâmetro ajustável

J: fluxo da fase líquida através da membrana (m)

$K^*$ : permeabilidade da camada de torta. (m<sup>2</sup>)

$\eta$ : Viscosidade (kg/s/m)

Este último é modelado pela equação conhecida de Blacke-Kozeny (Foley e Malone, 1995 e Kaulilzky, 1999):

$$\frac{1}{K^*} = K_{cake}^* = \frac{K_{kozeny} \cdot 90}{(d_p^*)^2} \cdot \frac{\left( \frac{c_{cake}}{\rho_p} \right)^2}{\left( 1 - \frac{c_{cake}}{\rho_p} \right)^3}$$

**Equação (5)**

em que,

$K_{kozeny}$ : Parâmetro ajustável

$d_p^*$ : diâmetro médio da partícula (m)

$C_{cake}$ : concentração média de massa de todas as partículas na camada de torta (g/L)

$\rho_p$ : densidade das partículas (kg/m<sup>3</sup>)

$K_{cake}^*$ : resistência específica da camada de lodo (1/m<sup>2</sup>)

Alternativamente,  $d_p^*$  deve ser integrado juntamente com crescimento da camada de torta, levando a uma expressão implícita de  $d_p^{cutoff}$ . Considerando-se as forças de aderência introduzidas, Sommer (2004) sugere um modelo na forma:

$$F^A = K^{FA} \cdot d_p \quad \text{Equação (6)}$$

Uma interpretação física de  $F^A$  e algumas observações de  $K^{FA}$  serão dadas posteriormente. Assim, substituindo as equações (4)-(6) na equação (3), temos:

$$d_p \leq \frac{\mu_{\max} \cdot k^{FA} + k_{cutoff} \cdot \eta \cdot J}{\tau^w} \cdot \left[ \frac{\left( \frac{c_{cake}}{\rho_p} \right)^2}{\left( 1 - \frac{c_{cake}}{\rho_p} \right)^3} \right] = d_p^{cutoff} \quad \text{Equação (7)}$$

Desse modo é possível calcular o diâmetro máximo  $d_p^{cutoff}$  de partículas que serão aderidas à camada de torta ou à superfície da membrana sob consideração das forças de adesão. A fim de calcular a resistência da camada de torta por meios da equação de Blacke-Kozeny, o diâmetro médio da partícula específica aderente à membrana deverá ser obtido. Ele pode ser calculado a partir dos resultados de Esteves (2014a). A distribuição de partículas  $g_{cake}$  que corresponde à distribuição de partículas que foram retidas na superfície da membrana, é transformada na distribuição das partículas específicas  $g_{cake,part}$ :

$$g_{cake,part}(x) = \frac{x^{-3} \cdot g_{cake}(x)}{\int_{-\infty}^{d_p} x^2 \cdot g_{cake,part} dx} \quad \text{Equação (8)}$$

Assim,  $d_p$  é calculado por:

$$\bar{d}_p = \frac{\int_{-\infty}^{d_p} x^3 \cdot g_{cake,part} dx}{\int_{-\infty}^{d_p} x^2 \cdot g_{cake,part} dx} \quad \text{Equação (9)}$$

em que:

$g_{cake,part}$ : distribuição da densidade para as partículas que são retidas na superfície (partículas específicas) (1/m).

Tendo obtido  $d_p$ , o cálculo de  $R_c$  torna-se relativamente simples. A equação de Blacke-Kozeny pode ser novamente usada para calcular a resistência específica relacionada às partículas fixadas:

$$K_{cake} = \frac{k_{kozeny} \cdot 90}{d_p^2} \cdot \frac{\left(\frac{c_{cake}}{\rho_p}\right)^2}{\left(1 - \frac{c_{cake}}{\rho_p}\right)^3} \quad \text{Equação (10)}$$

Assumindo uma curvatura negligenciável da camada de torta,  $R_c$  pode ser obtido a partir de:

$$\frac{dR_{cake}}{dt} = \frac{dL_{cake}}{dt} \cdot K_{cake} \quad \text{Equação (11)}$$

onde,

$L_{cake}$  é a espessura da camada de torta.

Um balanço de massa da camada de torta rende uma equação para a falta de  $dL_{cake}/dt$ . Para uma camada de torta considerada incompressível, o balanço pode ser definido como:

$$c_{cake} \cdot \frac{dL_{cake}}{dt} = J \cdot \Omega \cdot c_{cake}^{bulk} \quad \text{Equação (12)}$$

onde:

$\Omega$  é a fração de  $c_{cake}^{bulk}$  que contribui para a camada de torta

A fração de  $c_{cake}^{bulk}$  pode ser obtida de:

$$\Omega = \frac{\int_{-\infty}^{d_p} g_{cake} dx}{\int_{-\infty}^{\infty} g_{cake} dx}$$

**Equação (13)**

## **MATERIAIS E MÉTODOS**

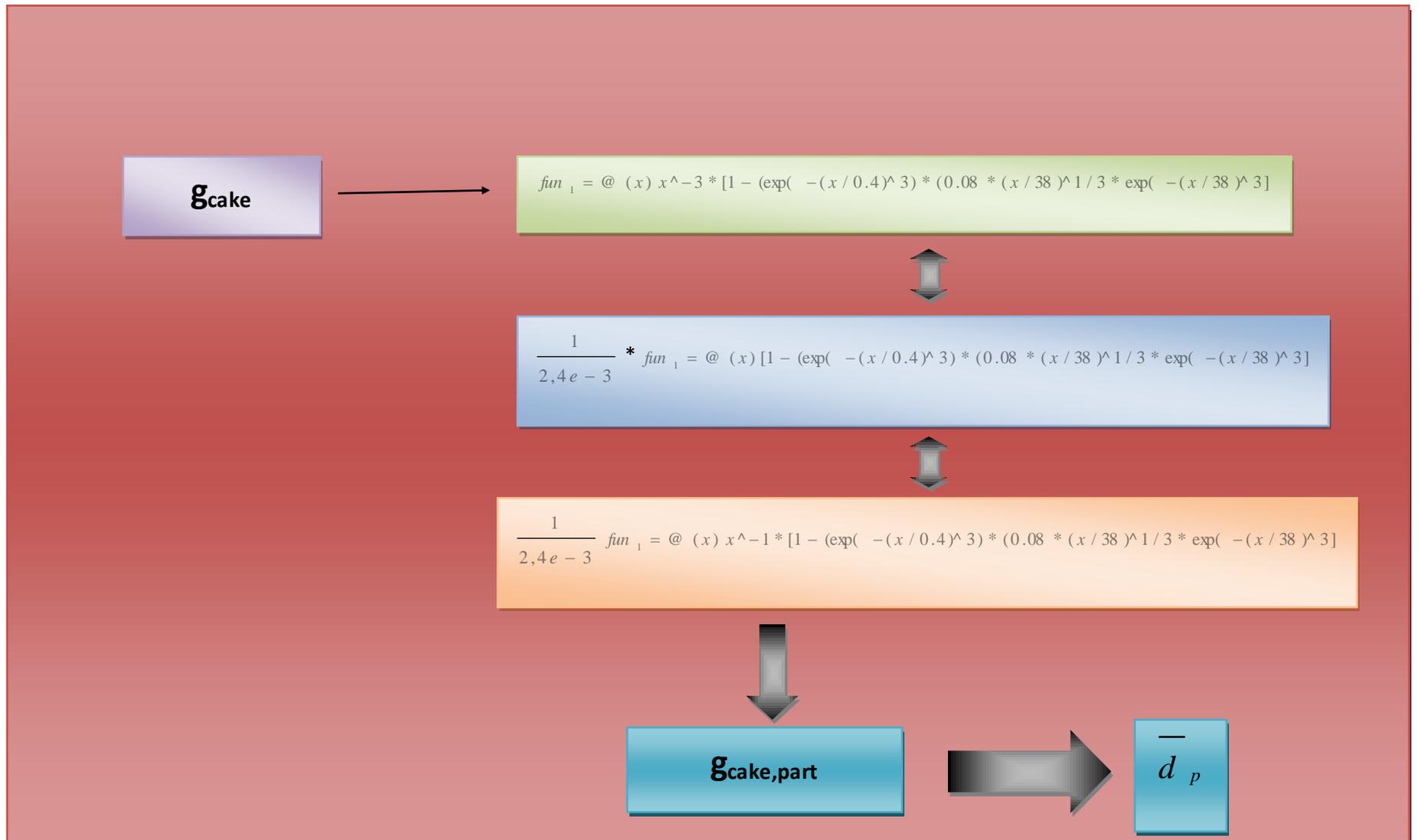
O estudo relacionado à resistência da camada de torta se iniciou com a análise das forças entorno das partículas. Feito isso, foi realizado o cálculo das partículas que iriam contribuir para a formação da camada de torta. Nem todas as partículas que foram retidas (partículas que não contribuíram para o bloqueio dos poros) se fixarão à membrana, logo somente uma fração fará parte desta camada. Assim, foi necessário calcular, através da equação 8, a distribuição da densidade das partículas específicas partículas essas que irão compor a camada. Esse cálculo é necessário para que posteriormente seja também calculado o diâmetro médio das partículas que estão compondo a camada de torta do sistema.

Os modelos de filtração foram implementados usando um pacote de programação Matlab/Simulink®, de modo que uma interface para a simulação fosse desenvolvida. Os estudos de simulação foram realizados para reproduzir matematicamente o comportamento do crescimento da camada de torta durante o processo de filtração nos MBRs

Para a simulação, alguns dados foram utilizados com base na literatura, outros foram calculados e/ou estimados, conforme a Tabela 1. A validade desses parâmetros já foi confirmada através de testes realizados em estudos anteriores (Broeckmann et al., 2006; Busch, Cruse e Marquardt, 2007).

Os parâmetros de entrada implementados na interface do software MatLab/Simulink® (versão R2012b) para o cálculo do tamanho médio da partícula na camada superior da torta se deu conforme a programação abaixo, o qual apresenta a linguagem apresentada no quadro 1.

**Quadro 1:** Diagrama com linguagem implementada para o cálculo do tamanho médio da partícula na camada superior da torta

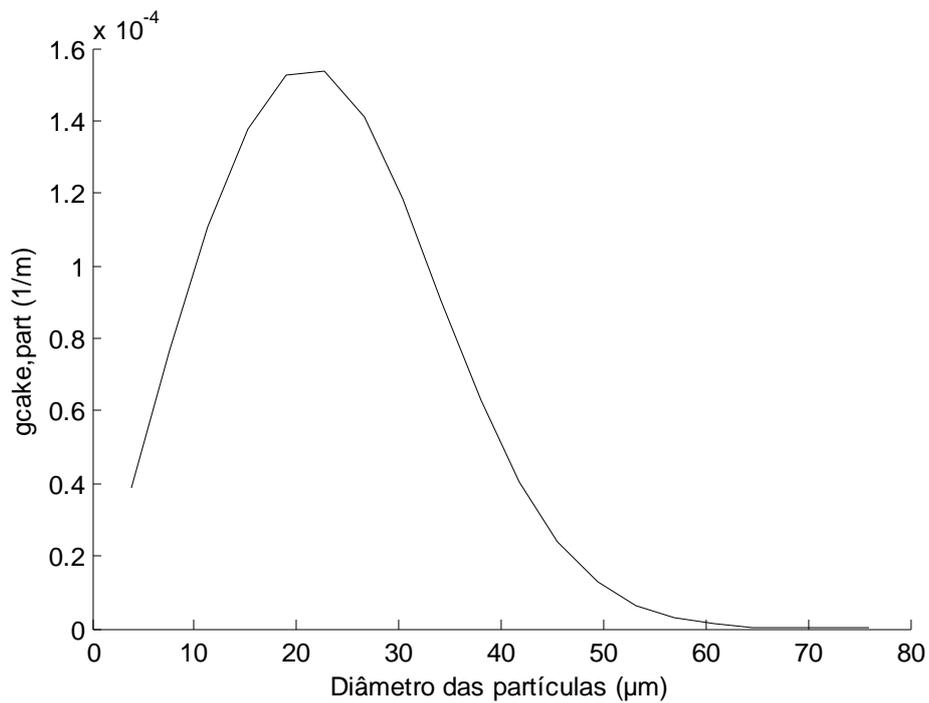


**Tabela 1:** Parâmetros de entrada do modelo da Resistência à filtração da Camada de Torta

PARÂMETRO	VALORES	UNIDADE	REFERÊNCIA
$d_p$	$3,8 \times 10^{-5}$	M	Wisninwshi e Graswich, 1998
$\bar{d}_p$	$1,7 \times 10^{-7}$	M	Calculado
$d_p^{cutoff}$	$7,6 \times 10^{-5}$	M	Bani-Melhem e Smith, 2012
$\mu$	0,02	-	René, Leulict e Deplace, 1993
$\mu_{max}$	0,03	-	René, Leulict e Deplace, 1993; Broeckmann et al., 2006
$k_s$	0,185	-	René, Leulict e Deplace, 1993
$k_{kozeny}$	10	-	Bush, Cruse e Marquart, 2007
$k_{cutoff}$	20	-	Bush, Cruse e Marquart, 2007
$k^{FA}$	0,001345	N/m	Broeckmann et al., 2006
$J$	5	L/h/m <sup>2</sup>	Skouteris et al., 2012
$p_\rho$	999,53	Kg/m <sup>3</sup>	Freire, Pires e Freire, 2007
$\eta$	0,0030	N.s/m <sup>2</sup>	Rosenberger et al, 2011
$c_{cake}$	691,76	g/l	Calculado
$c_{cake}^{bulk}$	2,999	g/l	Calculado
$\tau^w$	0,5	N/m <sup>2</sup>	Bérubé et al., 2006

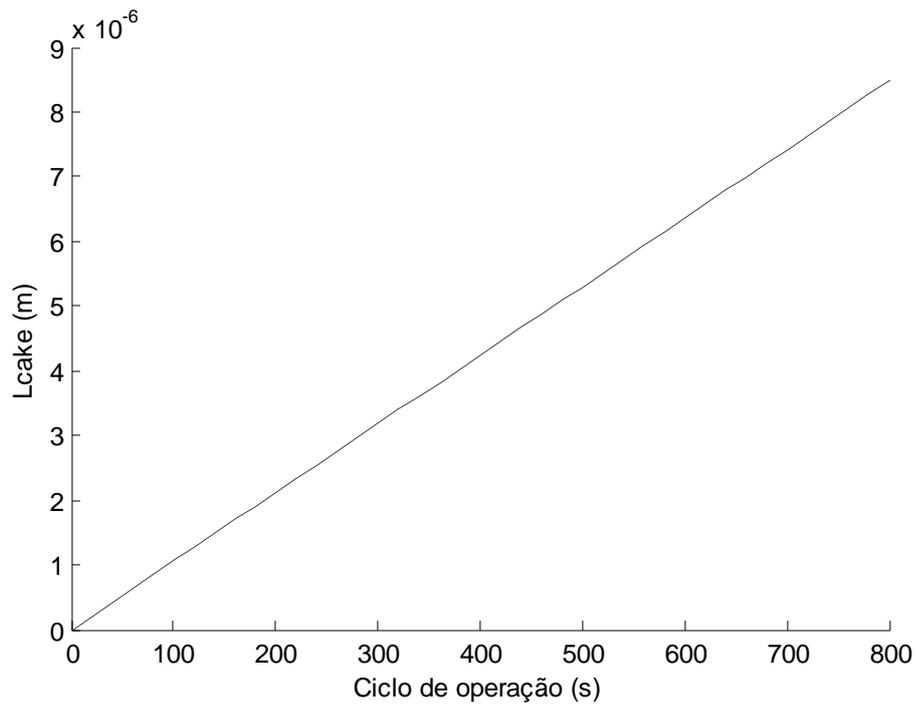
## RESULTADOS E DISCUSSÃO

O cálculo da distribuição da densidade das partículas específicas é apresentado através da Figura 1. Através dele é possível analisar a distribuição densidade através do aumento do diâmetro da partícula.



**Figura 1:** Distribuição da densidade das partículas: Partículas Específicas

Para analisar o comportamento da espessura da camada de torta foi utilizada a equação 12. Considerando um ciclo de 180s de operação temos uma espessura com valor próximo de  $2 \times 10^{-6}$  (m), o que está de acordo com a espessura de  $1,5 \times 10^{-5}$  estimada por Robles et al. (2013) para um MBR operando em condições semelhantes.

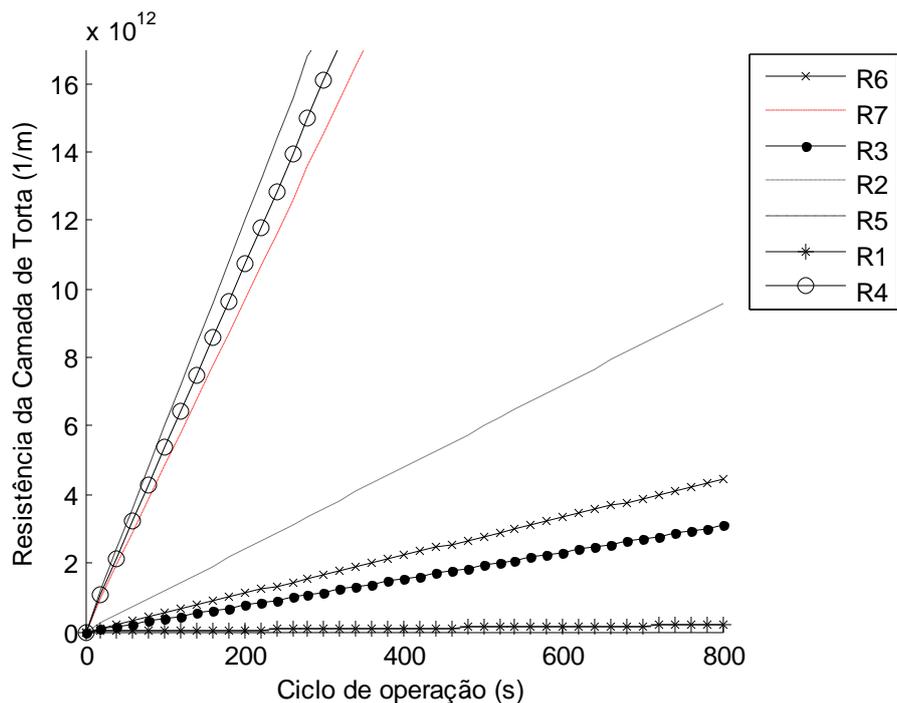


**Figura 2:** Largura da Camada de Torta ao longo do tempo

A tabela 2 e a figura 3 apresentam diversas pesquisas com resultados a respeito da resistência à filtração global da camada de torta, incluindo o resultado encontrado para esta pesquisa. É interessante perceber que, apesar do efluente e o ciclo de operação serem diferentes, a resistência à filtração global da camada de torta apresenta ordem de grandeza igual ou próxima na maior parte das pesquisas consultadas.

**Tabela 2:** Resistência à filtração global da Camada de Torta

	<b>Efluente</b>	<b>R<sub>c</sub> (m<sup>-1</sup>)</b>	<b>Ciclo (s)</b>	<b>Referência</b>
R <sub>1</sub>	Esgoto	1,23 x 10 <sup>11</sup>	500	Geankplis et al, 1993
R <sub>2</sub>	Esgoto Urbano	24 x 10 <sup>11</sup>	200	Chang et al, 2002
R <sub>3</sub>	Esgoto Urbano	7 x 10 <sup>11</sup>	180	Busch et al, 2007
R <sub>4</sub>	Cerveja	1,61 x 10 <sup>13</sup>	300	Alicieo et al, 2007
R <sub>5</sub>	Água Cinza (Banheiro)	4 x 10 <sup>12</sup>	720	Guo et al, 2008
R <sub>6</sub>	Esgoto Urbano	18 x 10 <sup>12</sup>	300	Chen et al, 2008
R <sub>7</sub>	Água Cinza	8,73 x 10 <sup>12</sup>	180	Esta Pesquisa



**Figura 3:** Resistência à filtração Global da Camada de Torta (1/m)

Ao introduzir as forças adesivas para o modelo, foi observado que  $\mu_{\max}$  e  $K^{FA}$  são os parâmetros que mais influenciam na interpretação dos. Os seus respectivos valores são determinados por meio de experimentos, uma vez que é evidente que eles dependem das respectivas propriedades do sistema (afluente, membrana, etc). Todavia, vários estudos explicitaram uma convergência de resultados no que tange a estimativa, conforme o relatado por Busch (2007) e Witgens (2003). Infelizmente, poucos trabalhos de pesquisa informam na literatura especializada valores de  $\mu_{\max}$  e  $K^{FA}$ , especialmente para aplicações de tratamento de águas residuárias,. O coeficiente de atrito  $\mu_{\max}$  foi assumido estimado por Jeon et al. (2004) para bolos de filtração de poeira, os quais tiveram valores entre 0,1 e 0,3. Radjai et al. (1996) tentaram prever a força de atritos usando modelos matemáticos e adotaram para  $\mu_{\max}$ , valores entre 0,05 e 0,1. É difícil traduzir esses valores para o atrito que ocorre nos MBRs, uma vez que o atrito nos sistemas sólidos é geralmente cerca de uma ordem de grandeza maior do que em sistemas parcialmente líquidos (Czichos, 1996 e Stieb, 2004). Não obstante, de acordo com Busch (2007) e Witgens (2003) o valor de  $\mu_{\max}$  pode ser estimado em 0,03 .

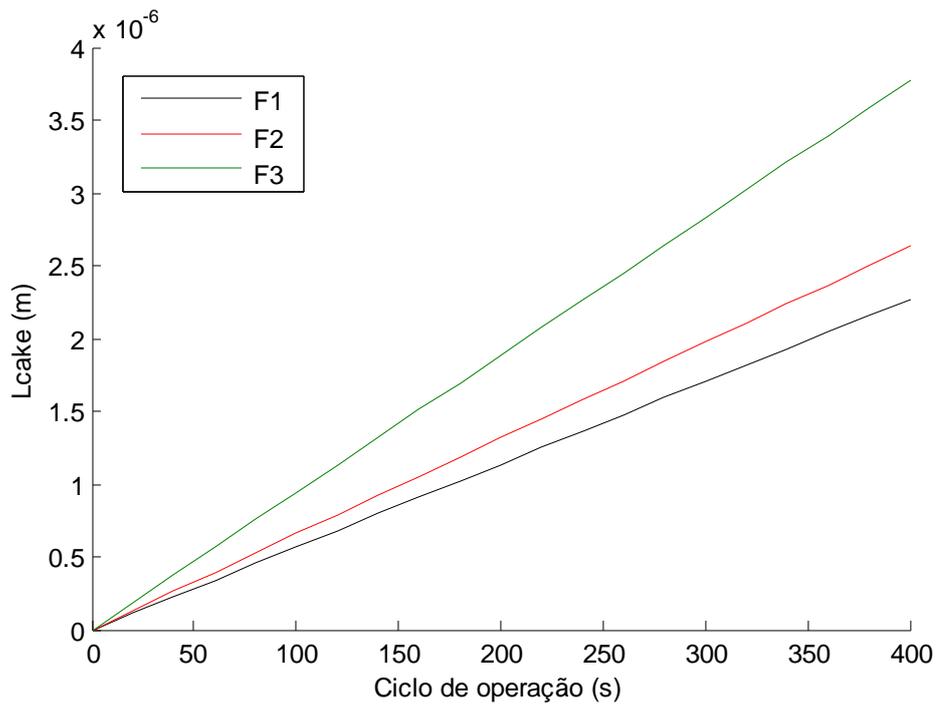
Para  $K^{FA}$ , poucos valores também foram encontrados na literatura especializada. Sommer et al. (2004) afirmam que, especialmente em soluções aquosas, as forças de repulsão não podem ser negligenciadas. Para partículas de vidro, eles encontraram forças de adesão entre  $0,01\mu\text{N}$  (superfície metálica) e  $0,03\mu\text{N}$  (superfície plástica), enquanto o valor teórico é  $3\mu\text{N}$ . O resultado de Sommer et al. (2004) para partículas de vidro pode ser transferida para partículas em MBR, visto que os valores determinados experimentalmente por Foley e Malone (1995) apresentam valores na mesma ordem de grandeza (entre  $10^{-3}$  e  $10^{-4}$  N/m).

Para verificar a influência de  $K^{FA}$  na camada de torta, foram considerados três valores relacionados às forças adesivas (tabela 3):

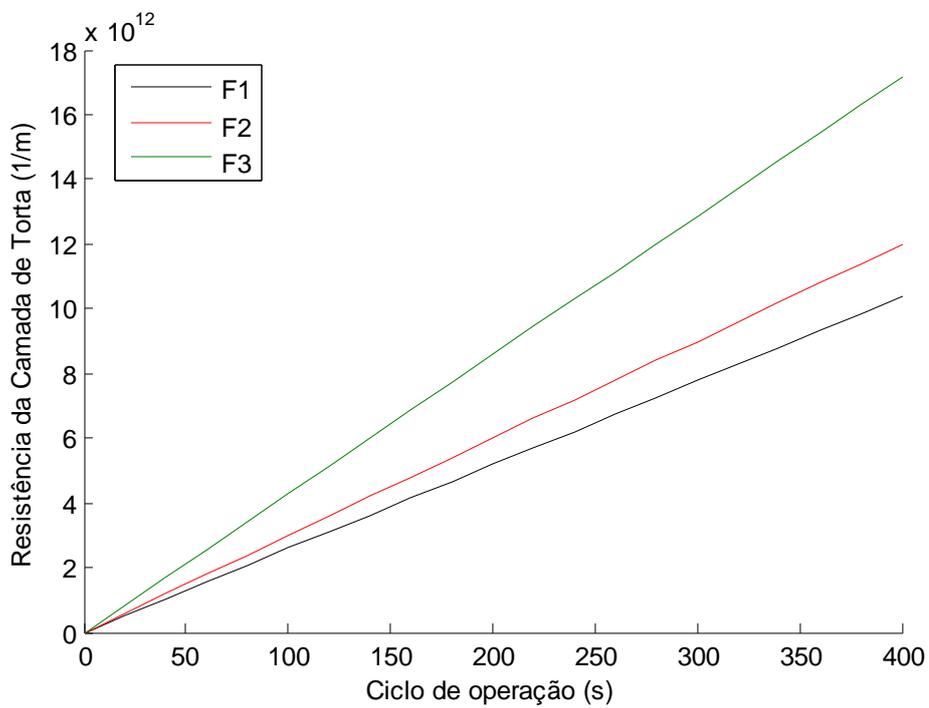
**Tabela 3:** Influência da força de adesão sobre a espessura da camada de torta

	<b>Força de Adesão (N/m)</b>	<b><math>L_{\text{cake}}</math> (m)</b>	<b><math>R_c</math> (<math>\text{m}^{-1}</math>)</b>
<b>F<sub>1</sub></b>	0,0008	$1,02 \times 10^{-6}$	$4,66 \times 10^{12}$
<b>F<sub>2</sub></b>	0,0009	$1,18 \times 10^{-6}$	$5,4 \times 10^{12}$
<b>F<sub>3</sub></b>	0,0012	$1,70 \times 10^{-6}$	$7,72 \times 10^{12}$

Observa-se que a redução das forças de adesão leva a uma redução tanto da espessura quanto da resistência à filtração da camada de torta (figuras 4 e 5). Isso acontece porque a diminuição das forças de adesão tem um efeito similar a um aumento da tensão de cisalhamento sobre o diâmetro de corte (Broeckmann et al, 2006).



**Figura 4:** Influência das forças de adesão na espessura da camada de torta



**Figura 5:** Influência das forças de adesão na resistência à filtração da camada de torta

Para o cálculo da resistência específica à filtração da camada de torta, considerada incompreensível ao longo do tempo no modelo em questão, foi utilizada a equação 10. Sabe-se que na prática, em MBRs, a camada de torta tende a ser compreensível, visto que ao longo do tempo algumas partículas se deformam e outras se reorganizam, modificando o formato e estrutura da camada (Robles et al., 2013). Todavia, realizar este tipo de previsão requer uma modelagem matemática bem mais complexa, que considera uma quantidade maior de parâmetros cuja estimativa é revestida de elevado grau de incerteza. Com base nessas considerações, o modelo ora em desenvolvimento estimou o valor de  $K_{\text{cake}}$  próximo de  $2,5 \times 10^{16}(\text{m}^{-1})$ . É importante ressaltar que, assim como a espessura e a resistência global à filtração, a resistência específica da camada de torta também se altera com o aumento das forças de adesão, todavia de maneira inversamente proporcional. Um aumento de  $K^{\text{FA}}$  conduz a menores resistências específicas, porque forças de adesão maiores permitem que as partículas maiores se anexem à membrana. Ao mesmo tempo, uma maior massa de partículas é arrastada para a camada de torta provocando um aumento na espessura

## CONCLUSÃO

Neste estudo, o processo de formação da camada de torta foi reproduzido usando um método matemático estruturado por Broeckmann et al (2006). O modelo tenta exprimir as complexas relações entre as partículas presentes na água cinza e na biomassa e as forças envolvidas nas proximidades e sobre uma membrana de microfiltração em um AnMBRs .

Os resultados revelam que a resistência à filtração da camada de torta é consideravelmente superior à resistência à filtração oferecida pelo bloqueio dos poros, o que está de acordo com a literatura. Vários autores confirmam que a espessura da camada de torta é o parâmetro de maior influência no desempenho do sistema.

Foi comprovado que as forças de adesão representam um importantíssimo parâmetro para análise do crescimento e das resistências à filtração específica e global da camada de torta.

Portanto, é importante que este parâmetro seja observado no funcionamento de um AnMBR.

## REFERÊNCIAS

BARD, Y. Nonlinear Parameter Estimation. Academic Press. New York, London, 1974.

BROECKMANN, A; BUSCH, J; WITGENS, T; MARQUARDT, W. Modeling of pore blocking and cake layer formation in membrane filtration for wastewater treatment. *Desalination* 189, 97 – 109, 2006.

BUSCH, J; CRUSE, A; MARQUERDT, W. Modeling submerged hollow-fiber membrane filtration for wastewater treatment. *Journal of Membrane Science* 288, 94 – 111, 2007a.

CHANG, I.S; LE-CLECH, P; JEFFERSON, B; JUDD, S. J. Membrane fouling in membrane bioreactors for wastewater treatment. *Journal Environment Engineering* 128, 10 – 18, 2000.

CHANG, S; FANE, A.G. Characterisitcs of microfiltration of suspensions with inter-filter two-phase flow. *Journal Chemical Technology and Biotechnology* 17. 533 – 540, 2000.

FERRER, J; TEMPLIER, Y. Study of filter cake formation mechanisms during tangential filtration of dustladen gases at high temperature. *Powder Tech* 113, 197 – 204, 2000.

HAMAKER, H. C. The London Van-der- Waals attraction between spherical Particles. *Physica* 4, 1937.

HWANG, Y; YU, K. Cross-flow microfiltration of submicron microbial suspension. *Journal Membrane Science* 194, 229 – 243, 2001.

JUDD, S.J. LE-CLECH P; TAHA, T; CUI, Z.F. theoretical and experimental representation of a submerged MBR system. *Membrane Technology* 135, 4 – 9, 2001.

LE-CLECH, P; CHEN, V; FANE, T.A.G. Fouling in membrane bioreactors used in wastewater treatment. *Journal Membrane. Science.* 284, 17 – 53, 2006.

LI, X.Y; WANG, X.M. Modelling of membrane fouling in a submerged membrane bioreactor. *Journal of Membrane Science* 278, 151 – 161, 2006.

LIN, H; PENG, W; ZHANG, M; CHEN, J; HONG, H; ZHANG, Y. A review on anaerobic membrane bioreactors: Applications, membrane fouling and future perspectives. *Desalination* 314, 169 – 188, 2013.

IU, X; HUANG, R. Study on hydraulic characteristics in a submerged membrane bioreactor process. *Process Biochemical* 36, 249 – 254, 2000.

NAESSENS, W; MAERE, T; NOPENS, I. Critical review of membrane bioreactors models: Part 1: Biokinetic and filtration models. *Bioresource Technology* 122, 95 – 106, 2012.

RAUTENBACH, R; MELIN, T. *Membranverfahren*, Springer, Nr. 3-540-00071-2, Berlin, 2004.

STIEB, M. *Mechanische Verfahrenstechnik 1*, Springer. Nr. 3-540-55852-7, Berlin, Heidelberg, New York, 2004.

VOBENKAUL, K. The Puron membrane system: New concepts for submerged membrane technology in wastewater treatment. Pre-prints, Aachen Membrane Colloquium, 16 – 17. March 2005.

WINTGENS, T; ROSEN J; MELIN, C; BREPOLS, K; ENGELHARDT, N. Modelling of a membrane bioreactor system for municipal wastewater treatment. *Journal Membrane Science* 216, 55-65, 2003.

## ARTIGO 3

---

### MODELAGEM DO PROCESSO DE FILTRAÇÃO DE UM BIORREATOR COM MEMBRANA SUBMERSA TRATANDO ÁGUA CINZA: FOULING IRREVERSÍVEL

**Resumo:** Um modelo para descrever o desempenho da filtração através dos módulos de microfiltração com membranas de fibra oca submersa foi testado. O modelo foi aplicado sob as condições de um AnMBR empírico utilizado para o tratamento de água cinza. O modelo foi implementado na plataforma do software MatLab Simulink® (versão R2012b) para a realização da simulação. Expressões matemáticas para simular o comportamento da resistência na filtração pela camada de torta e pelo fouling integram o modelo matemático em questão. Os resultados de simulação comprovam que o modelo é capaz de prever o comportamento da filtração, bem como simular o declínio da permeabilidade da membrana ao longo do tempo.

**Palavras chave:** Água cinza, Filtração, Fouling, Modelagem, Resistência

#### **Abstract**

For this study a model to describe the performance of filtration through a submerged hollow fibre membrane module was described. The model was applied under the conditions of an empirical system for the treatment of greywater. Thus, the model was implemented on MatLab Simulink® (versão R2012b) software to perform the simulation platform. Mathematical expressions for resistance in filtration such as the formation of fouling cake layer are presented for further discussion of the treatment process. The results show that the model is able to predict the actual performance of the filtration and simulate the decline in permeability over time.

**Keywords:** Grey Water, Filtration, Fouling, Modeling, Resistance

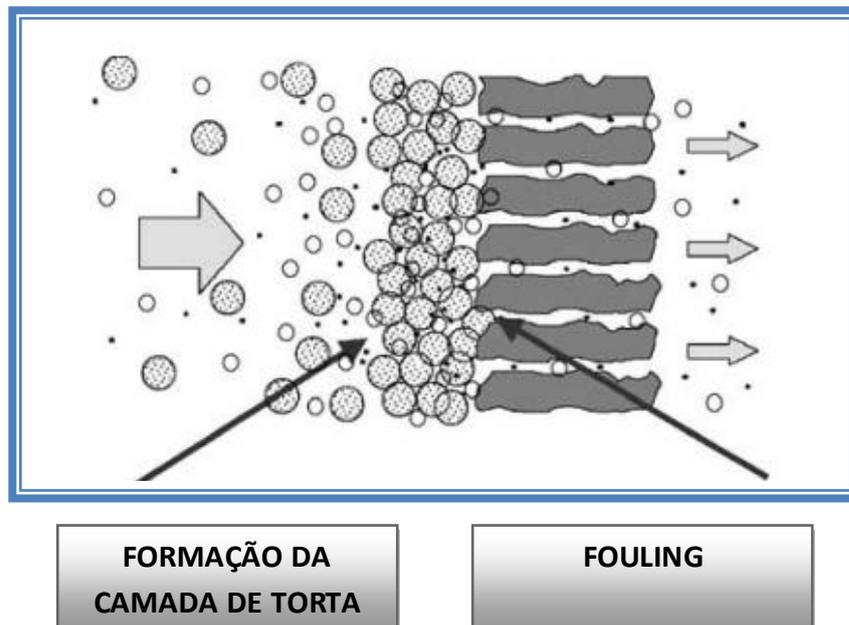
## INTRODUÇÃO

Sistemas com membranas projetados para tratamento de águas cinza possuem diversas vantagens se comparados com as tecnologias convencionais (Martin-Garcia, 2011). Isso porque o processo de separação é um veículo utilizado para a observação de determinados parâmetros importantes, os quais são capazes de direcionar determinadas tomadas de decisão. Para tanto, modelos de filtração vêm sendo usados para otimizar este processo.

Para tanto, diferentes modelos de simulação foram desenvolvidos, dentre eles alguns que dependem, em parte, de parâmetros que são impossíveis de serem mensurados (Martin-Garcia, 2007). Alguns desses modelos são capazes de descrever efeitos biológicos na superfície da membrana, como por exemplo, características do fouling, mas eles são baseados nas especificações definidas para o sistema e em condições operacionais específicas como o tipo de filtração ou geometria da membrana (Robles et al., 2013)

O fenômeno de fouling na superfície da membrana, bem como nos seus poros reduz em longo prazo a estabilidade do desempenho do fouling (Figura 1) (Witgens et al., 2003). A retrolavagem ou as limpezas químicas são procedimentos padrões aplicados com o propósito de minimizar estes efeitos e estabilizar a permeabilidade global do sistema. Contudo, o fouling é um fenômeno complexo de difícil controle, o que resulta na perda da eficiência da filtração do sistema de tratamento além de pôr a membrana em risco (Naessens et al., 2012).

Assim, esse trabalho visou determinar o desempenho da filtração, descrevendo matematicamente o seu comportamento. Para tanto, a simulação da resistência do fouling ao longo do tempo foi realizada.



**FIGURA 1:** Fenômeno limitando o desempenho do fluxo na filtração da Membrana. Adaptado de Wintgens et al. (2003)

### PROCESSOS DE FILTRAÇÃO EM BIORREATORES COM MEMBRANA (BRMs)

Nas configurações de biorreatores com membrana para tratamento de águas cinza, membranas de micro e ultrafiltração são usadas para reter a biomassa nos sistemas, o que conduz a uma considerável alta concentração de sólidos suspensos totais nos biorreatores. O desempenho da filtração, isto é, a permeabilidade da membrana e sua evolução ao longo do tempo é o principal foco de interesse, devido à sua influência direta sobre a viabilidade econômica do sistema de tratamento (Gander, Jefferson e Judd, 2000). Para esses autores, a compreensão e a descrição quali-quantitativa do desempenho do fenômeno constituem-se em um requisito essencial para posterior otimização do processo.

De acordo com Witgens et al. (2003), os fluxos elevados da fase líquida através de membranas porosas de micro e ultrafiltração em sistemas que tratam águas residuárias se devem ao fenômeno de polarização de concentração. Essa informação é contestada por

Rautenbach e Melin (2004), que afirmam que devido, ao tamanho das partículas na ordem de 1 - 100µm, esse fenômeno pode ser considerado negligenciável, pois outros efeitos devem dominar sobre os efeitos de polarização de concentração.

As partículas retidas formam a camada de torta na superfície da membrana, que, além da própria membrana, também oferece resistência à filtração da fase líquida. Esse é um fator que, associado ao fouling, é considerado como crítico para o desempenho global do sistema. O fenômeno de fouling é definido como qualquer interação limitante no desempenho entre as partículas presentes na fase líquida e o material de membrana, sobre a superfície da membrana e dentro dos poros. Isso mostra que a presença de componentes extracelulares armazenados aumenta o potencial do fouling dramaticamente (Jorand et al., 1998).

### **RESISTÊNCIA DO FOULING ( $R_F$ )**

O fluxo de duas fases termodinâmicas entre as fibras ocas, compostos pela fase gasosa e partículas em suspensão, foi descrito como um fluxo de regime de bolhas tubulares por Chang e Fane (2000). Para seus experimentos, realizado com um par de membranas de fibra oca, eles introduziram um sistema de equações que consiste em um balanço de massa e correlações empíricas que podem ser resolvidas de forma coerente em um caso ideal e para condições de limites conhecidos. Abordagens sobre modelagens anteriores explicam o efeito de aumento da transferência de massa induzida por regime de bolhas tubulares com base em dinâmica de fluídos. A região altamente turbulenta do gás supostamente cria um pico de tensão de cisalhamento na parede (Judd et al., 2001). Em contrapartida, a abordagem aqui introduzida representa efeitos de cisalhamento hidrodinâmicos médios no caso de transferência de massa.

O modelo matemático usado nesta pesquisa é baseado nas resistências em série, descrito por Witgens et al.(2003):

$$F = \frac{\Delta_{PTM}}{(R_m + R_c + R_p + R_F) \eta_p} \quad \text{Equação (1)}$$

Onde:

F: fluxo do permeado, (L/h/m<sup>2</sup>)

R<sub>M</sub>: resistência hidráulica da membrana limpa, (1/m)

R<sub>c</sub>: a resistência da camada de torta, (1/m)

R<sub>p</sub>: a resistência do bloqueio dos poros (1/m)

R<sub>F</sub>: a resistência de fouling, multiplicado pela viscosidade dinâmica em função da temperatura do permeado (1/m)

η<sub>p</sub>: Viscosidade (1/m)

O gradiente de pressão ao longo da fibra é determinada pela profundidade H (m) para a qual o módulo está submerso, pela pressão de sucção p (Pa) aplicado pela bomba de sucção do permeado e pelas perdas de pressão causada pelo fluxo do permeado através da fibra oca.

A resistência da camada de torta R<sub>c</sub> é supostamente dependente da formação da camada de torta na superfície da membrana, onde C<sub>M</sub> representa a concentração de partículas correspondente à superfície da membrana.

$$R_c = K_c \cdot C_M \quad \text{Equação (2)}$$

em que:

K<sub>c</sub>: parâmetro do modelo da camada de torta (m<sup>2</sup>/kg)

A concentração C<sub>M</sub> na superfície da membrana depende do perfil de concentração de partículas na membrana e é expressa por outra relação, representando os efeitos da polarização de concentração:

$$F = K_p \cdot \ln \left( \frac{C_M}{C_b} \right) \quad \text{Equação (3)}$$

Onde:

$K_p$ : Coeficiente de transferência de massa ( $m^3/m^2s$ )

$C_b$ : Concentração de partículas na fase inicial (g/L)

Esta expressão descreve o desvio entre a concentração em massa  $C_b$  e a concentração de componentes formadores da camada de lodo na superfície da membrana, que depende do coeficiente de transferência de massa local  $K_p$  e o fluxo do permeado:

$$K_p = \frac{\tau_w d_c}{\eta_F} \quad \text{Equação (4)}$$

Onde:

$\tau_w$ : caracteriza a média de tensão de cisalhamento exercida pelo meio das duas fases de lodo e o gás sobre a superfície da membrana (Pa)

$\eta_F$ : a viscosidade de lodo (Kg/s/m)

$d_c$ : uma característica do diâmetro, que é dependente da distribuição do tamanho das partículas no sistema e sobre a extremidade inferior determinada pelo tamanho das partículas rejeitadas pela membrana aplicada (m)

A resistência de fouling, então, é assumida para ser dependente do volume total do permeado produzido num intervalo de filtração sob consideração, por exemplo, entre duas limpezas químicas:

$$R_F = S_F \left( 1 - e^{-k_F \int_0^t F(t) dt} \right) \quad \text{Equação (5)}$$

Onde:

$S_F$ : Parâmetro do modelo da resistência do fouling (1/m)

Os coeficientes  $K_c$  e  $K_F$  têm que estar equiparados com as características de curto prazo e longo prazo da resistência total da membrana, respectivamente.

O parâmetro  $K_F$ , em especial, é considerado fortemente dependente da concentração de bloqueio dos poros da membrana e os componentes adesivos na suspensão de alimentação. O outro parâmetro  $S_F$  é uma constante de membrana e, muito semelhante aos processos de absorção, o que representa um fator para a área superficial específica do material da membrana, o que em última análise pode ser coberto por produtos de fouling.

## MATERIAS E MÉTODOS

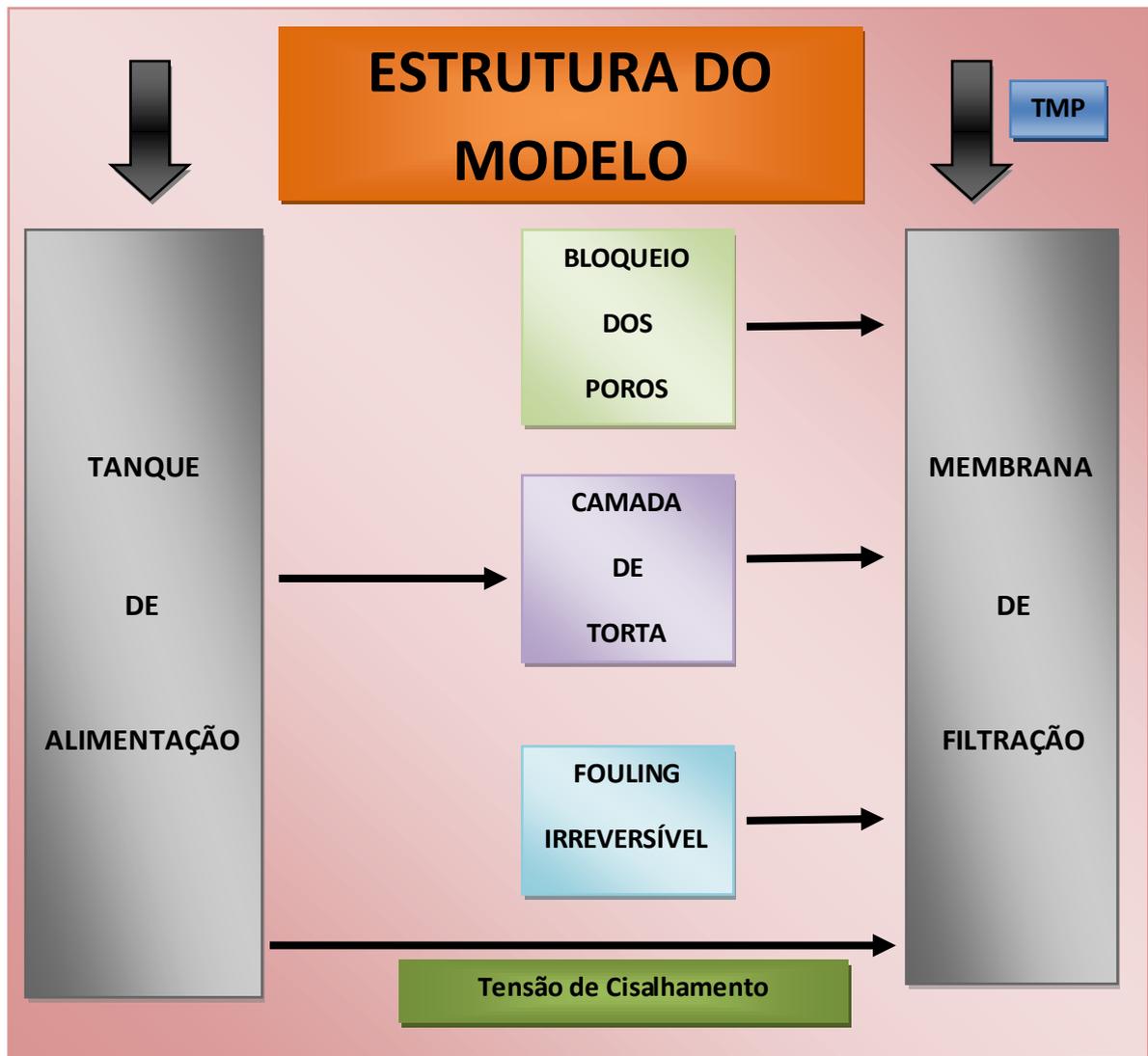
Os modelos de filtração foram implementados usando um pacote de programação Matlab/Simulink®, de modo que uma interface para a simulação fosse desenvolvida. Os estudos de simulação foram realizados para reproduzir matematicamente o comportamento do crescimento da camada de torta durante o processo de filtração nos MBRs. A tabela 1 apresenta os dados de entrada do modelo utilizados para a simulação.

**Tabela 1:** Parâmetros de entrada do Modelo de Resistência do Fouling

Parâmetro	Valor	Unidade	Referências
$R_M$	$1.4 \times 10^{12}$	1/m	Esteves, 2014a
$C_M$	2,999	Kg/m <sup>3</sup>	Esteves, 2014b
$\Delta p_{TM}$	0.5	bar	Giacobbo, 2010
$C_b$	3	Kg/m <sup>3</sup>	Maqbool et al, 2014
$S_F$	$0.7 \times 10^{10}$	1/m	Witgens et al, 2003

Parte desse conjunto de parâmetros foi determinado com base em Esteves (2014a,b) e outra parte foi estimada nos estudos de simulação com base em diversos autores. A estrutura do modelo foi adaptada de Marquardt et al. (2006), no intuito de destacar as conexões entre os submodelos. Aplicando-se o fluxo, que caracteriza a alimentação do sistema, resultará a tensão de cisalhamento na superfície da membrana e a pressão na alimentação, as quais serão computadas. Os modelos ( $R_p$ ,  $R_c$  e  $R_f$ ) são independentes, tal como indicado pelas setas. A tensão de cisalhamento é fornecida apenas para o modelo que representa a formação da camada de torta, visto que o bloqueio dos poros e o fouling são em alguns

momentos irreversíveis, ao menos em parte. Esta interpretação se dá através dos trabalhos realizados por Chang e Fane (2000), os quais afirmam que a tensão de cisalhamento tem considerável influência sobre a resistência reversível. O modelo referente ao bloqueio dos poros e a camada de torta estão interligados devido à concentração e distribuição do tamanho de partículas (PSD).

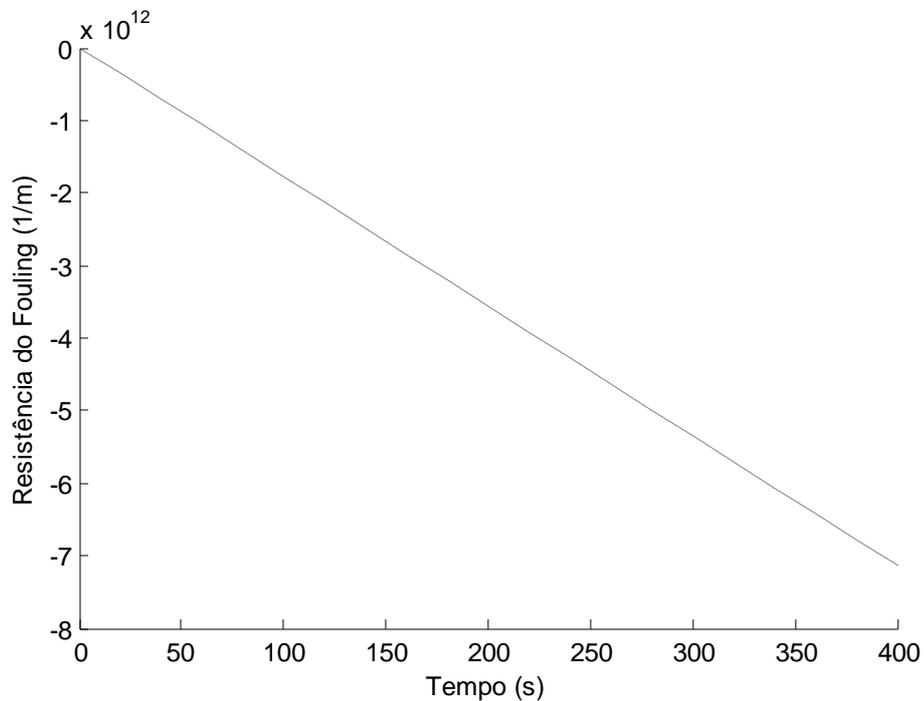


**Figura 2:** Estrutura do Modelo (adaptado de Busch et al., 2007)

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A figura 3 mostra a resistência à filtração decorrente do fouling durante a filtração da água cinza no AnMBR. Uma resistência à filtração devida ao fouling negativo foi encontrada, o que significa que, no início da filtração, o sistema possui uma baixa ou média velocidade do fluxo (Shen et al, 2014). Além disso, para esses autores o resultado negativo ocorre quando o fouling é quantificado através do monitoramento de transferência de calor. Pequenas quantidades de partículas depositadas podem melhorar a transferência de calor em relação à superfície limpa da membrana, o que gera taxa de fouling aparentemente negativa.. Porém, ainda segundo Shen et al. (2014), após o período inicial de controle de rugosidade da superfície o fouling, em geral, torna-se fortemente positivo. O fouling negativo é geralmente observado na fase inicial de estabilização do sistema.

Para um ciclo de filtração de 180 segundos, a resistência à filtração decorrente do fouling irreversível foi de  $-1.26 \times 10^{12}$  (Figura 3).



**FIGURA 3:** Resistência à filtração decorrente do Fouling em função do tempo

A título de comparação, a tabela 2 apresenta o resultado da resistência à filtração decorrente do fouling comparativamente a diversas pesquisas encontradas na literatura. A ordem de grandeza calculada pelo modelo matemático dessa pesquisa encontra-se coerente com as demais.

**Tabela 2:** Resistência do Fouling (1/m)

Efluente	$R_f$	Referência
Cerveja	$1,83 \times 10^{12}$	Alicieo et al, 2007
Esgoto	$2,0 \times 10^{13}$	Gao et al, 2012
Esgoto	$2,0 \times 10^{12}$	Subtil, Hespanhol e Mierzwa, 2013
Esgoto	$3,4 \times 10^{13}$	Ochando – Pulido, Hodaifa e Martinez-Ferez, 2014
Esgoto	$-0,3 \times 10^{13}$	Shen et al, 2014
Água Cinza	$-1,26 \times 10^{12}$	Esta Pesquisa

A tabela 3 apresenta uma comparação entre as resistências à filtração  $R_m$  (resistência intrínseca da membrana),  $R_p$  (resistência do bloqueio dos poros),  $R_c$  (resistência da camada de torta) e  $R_f$  (resistência do fouling). Os resultados de  $R_m$ ,  $R_p$  e  $R_c$  são os obtidos por Esteves (2014a e 2014b).

**Tabela 3:** Valores das resistências encontradas

$R_m$	%	$R_p$	%	$R_c$	%	$R_f$	%	Ref
$2,16 \times 10^{12}$	<b>3,4</b>	$0,54 \times 10^{12}$	<b>0,8</b>	$59 \times 10^{12}$	<b>92,7</b>	$2 \times 10^{12}$	<b>3,1</b>	[4]
$2,52 \times 10^{11}$	<b>1,4</b>	$0,60 \times 10^{12}$	<b>3,2</b>	$1,61 \times 10^{13}$	<b>88,9</b>	$1,23 \times 10^{12}$	<b>6,5</b>	[1]
$2,87 \times 10^{12}$	<b>5,6</b>	$1,0 \times 10^{12}$	<b>1,9</b>	$46,9 \times 10^{12}$	<b>91,2</b>	$0,66 \times 10^{12}$	<b>1,3</b>	[2]
$0,70 \times 10^{12}$	<b>20</b>	$0,75 \times 10^{12}$	<b>21</b>	$1,90 \times 10^{12}$	<b>54</b>	$0,15 \times 10^{12}$	<b>5</b>	[3]
$1,4 \times 10^{12}$	<b>10,9</b>	$1,52 \times 10^{12}$	<b>11,8</b>	$8,73 \times 10^{12}$	<b>68</b>	$-1,2 \times 10^{12}$	<b>9,3</b>	EP

EP: Esta Pesquisa. [1] Alicieo et al, 2007. [2] Rafiei et al, 2014. [3] Maqbool et al, 2014. [4] Choo e Lee, 1998.

Através dos resultados apresentados na tabela 3, observou-se que as resistências possuem um comportamento de acordo com as expectativas: a resistência da camada de torta é dominante.

Não é fácil comparar os resultados da simulação com os dados experimentais de outras pesquisas, principalmente porque a grande maioria das pesquisas encontradas possui sistemas para escala industrial. Além disso, muitos autores desconsideram a resistência do bloqueio dos poros, principalmente quando sua influência no sistema é menor que 1% (Gao et al, 2012; Shen et al, 2014) .

Ainda é muito difícil diferenciar, experimentalmente, as diversas resistências à filtração: bloqueio dos poros, camada de torta e fouling irreversível. Sem contar que existem muitos fatores que influenciam a incrustação da membrana, o que torna os valores apresentados muito diferentes e, portanto, não comparáveis. Mesmo assim, optou-se por realizar uma comparação entre algumas pesquisas, para se observar não somente os valores das resistências, mas principalmente o percentual que cada uma delas representa dentro do sistema.

Modelos de retrolavagem podem ser empregados para verificar o efeito na redução do fenômeno (fouling), todavia parâmetros para estimar a perda na filtração ainda são escassos (Shen et al, 2014). Por isso, a redução do fouling gerada pela retrolavagem e pela limpeza química da membrana é considerada somente quando um sistema operante pode ser analisado. O principal motivo é o possível dano na membrana, comprometendo a filtração.

## **CONCLUSÃO**

O estudo apresentado demonstra que o conceito de modelagem traçado para biorreatores com membrana pode ser aplicado com sucesso para descrever o comportamento do sistema de uma estação de tratamento de águas residuais. Em particular, o modelo que descreve o desempenho de filtração de membranas pode ser aplicado a reproduzir a resistência teórica do fenômeno de fouling, salvo os parâmetros que não podem ser mensurados já discutidos neste trabalho.

Assim, mais atenção deve ser dada ao comportamento transitório da camada de torta e a evolução de permeabilidade em uma escala de curto tempo, caso seja considerado modelos de retrolavagem.

## REFERÊNCIAS

ALICIEO, T. V. R; MENDES, E, S; PEREIRA, N. C; BARROS, S. T. D; ALVES, J. A. Avaliação do fouling na microfiltração da cerveja – estudo das resistências. *Acta Scienriarum. Technology*, vol. 29, num. 2. 151 – 156. 2007.

CHOO, K; LEE, C. Hydrodynamic behavior of anaerobic biosolids during crossflow filtration in the membrane anaerobic bioreactor. *Water Reuse*, 32. 3387 – 3397. 1998.

ESTEVES, L. F. Modelagem da formação da camada de torta em uma membrana de microfiltração aplicada ao tratamento de água cinza. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável. Vitória: Universidade Federal do Espírito Santo – UFES, 2014a.

ESTEVES, L. F. Modelagem da formação da camada de torta em uma membrana de microfiltração aplicada ao tratamento de água cinza. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável. Vitória: Universidade Federal do Espírito Santo – UFES, 2014b.

GAO, W.J; QU, X; LEDING, K.T; LIÃO, B. Q. Influence of temperature and temperature shock on sludge properties cake layer structure and membrane fouling in a submerged anaerobic membrane bioreactor. *Journal of membrane Science*, 422. 131 – 144. 2012.

GIACOBBO, A. Biorreator à membrana aplicado ao tratamento de efluentes. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais). Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, 2010.

JUDD, S.J. LE-CLECH P; TAHA, T; CUI, Z.F. theoretical and experimental representation of a submerged MBR system. *Membrane Technology* 135, 4 – 9, 2001.

MAQBOOL, T; KLAN, S. J; LEE, C. H. Effects of filtration modes on membrane fouling behavior and treatment in submerged membrane bioreactor. *Bioresource Technology*. 2014.

OCHANDO-PULIDO, J. M; HODAIFA, G; MARTINEZ – FEREZ, A. Permeate recirculation impact on concentration polarization and fouling on reverse osmosis purification of olive mill wastewater. *Desalination*, 343. 169- 179. 2014.

RAFIEI, B; NACIMPOOR, F; MOHAMMADI, T. Biofilm and bio-entraped hybrid membrane bioreactors in wastewater treatment: Comparison of membrane fouling and removal efficiency. *Desalination*, 337. 16 – 22. 2014.

SHEN, C; CIRONE, C; YANG, L; JIANG, Y; WANG, X. Characteristics of fouling development in shell– an–tube heat exchanger: Effects of velocity and installation location. *International Journal of heat and mass transfer*, 77. 439 – 448. 2014.

SUBTIL, E. L; HESPANHOL, I; MIERZWA, J. C. Biorreatores com membranas submersas (BRMs): Alternativa promissora para o tratamento de esgotos sanitários para reuso. *Ambiente e Água – Na Interdisciplinary Journal of Applied Science*. 2013

WINTGENS, T; ROSEN J; MELIN, C; BREPOLS, K; ENGELHARDT, N. Modelling of a membrane bioreactor system for municipal wastewater treatment. *Journal Membrane Science* 216, 55-65, 2003.

## **6. CONCLUSÃO GERAL**

---

Depois de identificada a necessidade de desenvolver uma modelagem matemática para descrever o comportamento de um biorreator anaeróbico com membrana de microfiltração aplicado ao tratamento de água cinza, visando otimizar seu desempenho operacional, três estratégias foram consideradas:

- No que diz respeito ao bloqueio dos poros, apesar de ser um fenômeno que apresentou um comprometimento consideravelmente baixo da filtração, sua análise se faz necessária, principalmente nos estudos em que é realizada a autópsia da membrana. Entender estatisticamente como que essas distribuições acontecem ainda é um campo pouco explorado e pode auxiliar inclusive gestores de grandes empresas no processo de compra de membranas, uma vez que a fração de partículas retidas pode ser obtida através dele.
- Quanto ao crescimento da camada de torta, o modelo introduzido para descrever a influência das partículas de adesão é reconhecido ter um impacto de maior influência na filtração. Através dos resultados será possível aumentar significativamente as capacidades de previsão do sistema, no que se refere à filtração e será essencial para a concepção de estratégias operacionais adequados para aplicações de filtração por membranas.
- Para o fenômeno de fouling, o modelo que descreve pode ser aplicado a reproduzir a característica de redução da permeabilidade da membrana. Apesar disso, a abordagem do fouling “negativo” pode ser ainda mais explorada neste campo de pesquisa, visto que poucos autores abordam sobre o tema, mesmo a literatura, ainda que de forma escassa, apresentar dados a respeito.

Assim, o modelo em série aqui apresentado, combinando três fenômenos, com modelos desenvolvidos por diferentes autores é considerado uma boa alternativa para a análise da filtração de biorretor à membrana.

## **7. RECOMENDAÇÕES**

---

Em função dos resultados obtidos nesta pesquisa recomenda-se:

- Analisar a colmatação nas membranas, bem como a polarização de concentração, visto que ambos os fenômenos apresentam dificuldades na execução de modelos matemáticos. O tipo de efluente e suas características físico-químicas são parâmetros que também interferem na formação de hipóteses e equações para a construção e execução de um modelo. Sendo assim, a modelagem de um biorreator a membrana é assunto importante para continuar a ser estudado.
- Integrar modelos biológicos aos modelos físicos, de modo a contribuir no desenvolvimento da modelagem no campo de controle e processos.

## **8. REFERÊNCIAS**

---

ALICIEO, T. V. R; MENDES, E, S; PEREIRA, N. C; BARROS, S. T. D; ALVES, J. A. Avaliação do fouling na microfiltração da cerveja – estudo das resistências. *Acta Scienriarum. Technology*, vol. 29, num. 2. 151 – 156. 2007.

BANI – MELHEM, K; SMITH E. Grey Water treatment by a continuous process of an eletrocoagulation unit and a submerged membrane bioreactor system. *Chemical Engineering Journal*, 198. 201 – 210. 2012.

BARD, Y. *Nonlinear Parameter Estimation*. Academic Press. New York, London, 1974.

BROECKMANN, A; BUSCH, J; WITGENS, T; MARQUARDT, W. Modeling of pore blocking and cake layer formation in membrane filtration for wastewater treatment. *Desalination*, 189, 97-109, 2006.

BROECKMANN, A; BUSCH, J; WITGENS, T; MARQUARDT, W. Modeling of pore blocking and cake layer formation in membrane filtration for wastewater treatment. *Desalination* 189, 97 – 109, 2006.

BUSCH, J. Publicação eletrônica [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por < > em 27 nov. 2013.

BUSCH, J; CRUSE, A; MARQUERDT, W. Modeling submerged hollow-fiber membrane filtration for wastewater treatment. *Journal of Membrane Science* 288, 94 – 111, 2007a.

BUSCH, J; CRUZE, A; MARQUERDT, W. Modeling submerged hollow-fiber membrane filtration for wastewater treatment. *Journal of Membrane Science*, 288, 94-111, 2007a.

CHANG, I.S; LE-CLECH, P; JEFFERSON, B; JUDD, S. J. Membrane fouling in membrane bioreactors for wastewater treatment. *Journal Environment Engineering* 128, 10 – 18, 2000.

CHANG, S; FANE, A.G. Characterisitcs of microfiltration of suspensions with inter-filter two-phase flow. *Journal Chemical Technology and Biotechnology* 17. 533 – 540, 2000.

CHEN, Y. KIM, H. Monte Carlo simulation of pore blocking and cake formation by interfacial interactions during membrane filtration. *Desalination*, 233. 258 – 266. 2008.

CHOO, K; LEE, C. Hydrodynamic behavior of anaerobic biosolids during crossflow filtration in the membrane anaerobic bioreactor. *Water Reuse*, 32. 3387 – 3397. 1998.

CHRISTOVA-BOAL, D; ROBERT, E; EDENB, R. E; MCFARLANE, S. An investigation into grey water reuse for urban residential properties. *Desalination*, 106,391-397. 1996.

ESTEVES, L. F. Modelagem da formação da camada de torta em uma membrana de microfiltração aplicada ao tratamento de água cinza. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável. Vitória: Universidade Federal do Espírito Santo – UFES, 2014a.

ESTEVES, L. F. Modelagem da formação da camada de torta em uma membrana de microfiltração aplicada ao tratamento de água cinza. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável. Vitória: Universidade Federal do Espírito Santo – UFES, 2014b.

FERRER, J; TEMPLIER, Y. Study of filter cake formation mechanisms during tangential filtration of dustladen gases at high temperature. *Powder Tech* 113, 197 – 204, 2000.

GAO, W.J; QU, X; LEDING, K.T; LIÃO, B. Q. Influence of temperature and temperature shock on sludge properties cake layer structure and membrane fouling in a submerged anaerobic membrane bioreactor. *Journal of membrane Science*, 422. 131 – 144. 2012.

GIACOBBO, A. Biorreator à membrana aplicado ao tratamento de efluentes. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais). Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, 2010.

HAMAKER, H. C. The London Van-der- Waals attraction between spherical Particles. *Physica* 4, 1937.

HOCAOGLU, S. M; ATASOY, E; BABAN, A; ORHON, D. Modeling biodegradation characteristics of grey water in membrane bioreactors. *Journal of Membrane Science*, 429, 139-146, 2013.

HOCAOGLU, S. M; INSEL, G; COKGOR, E.U; BABAN, A; ORHON, D. COD fractionation and biodegradation kinetics of segregated domestic wastewater: black and grey water fractions. *Journal Chemical Technology Biotechnology*, 85, 1241-1249, 2010.

HWANG, Y; YU, K. Cross-flow microfiltration of submicron microbial suspension. *Journal Membrane Science* 194, 229 – 243, 2001.

IU, X; HUANG, R. Study on hydraulic characteristics in a submerged membrane bioreactor process. *Process Biochemical* 36, 249 – 254, 2000.

JIANG, T; KENNEDY, M. D; MEER, W. G. J; VANROLLEGHEM, P. A; SCHIPPERS, J. C. The role of blocking and cake filtration in MBR fouling. *Desalination*, 157. 335 – 343. 2003.

JIMENEZ, J; GRELIER, P; MEINHOLD, J; JAZI – PAIN, A. Biological Modelling of MBR and impact of primary sedimentation. *Desalination*, 250. 562 – 567. 2010.

JORDÃO, E. P; PESSÔA, C. A. Tratamento de Esgotos Domésticos. Abes. 5ª Ed. 2009.

JUDD, S.J. LE-CLECH P; TAHA, T; CUI, Z.F. theoretical and experimental representation of a submerged MBR system. *Membrane Technology* 135, 4 – 9, 2001.

JUDD, S.J. LE-CLECH P; TAHA, T; CUI, Z.F. theoretical and experimental representation of a submerged MBR system. *Membrane Technology* 135, 4 – 9, 2001.

KAWAKATSU, T; NAKÃO, S; KIMURA, S. Effects of size and compressibility of suspended particles and surface pore size of membrane on flux in crossflow filtration. *Journal of Membrane Science*, 81. 173 – 190. 1993.

LE-CLECH, P; CHEN, V; FANE, T.A.G. Fouling in membrane bioreactors used in wastewater treatment. *Journal Membrane. Science*. 284, 17 – 53, 2006.

LI, X.Y; WANG, X.M. Modelling of membrane fouling in a submerged membrane bioreactor. *Journal of Membrane Science* 278, 151 – 161, 2006.

Li, X; Wang, X. Modeling of membrane fouling in a submerged membrane bioreactor. *Journal of Membrane Science*, 278, 151-161, 2006.

Lin, H; Peng, W; Zhang, M; Chen, J; Hong, H, Zhang, Y. A review on anaerobic membrane bioreactors: Applications, membrane fouling and future perspectives. *Desalination*, 314, 169-188.

LIN, H; PENG, W; ZHANG, M; CHEN, J; HONG, H; ZHANG, Y. A review on anaerobic membrane bioreactors: Applications, membrane fouling and future perspectives. *Desalination* 314, 169 – 188, 2013.

MANSER, R; GUJER, W; SIEGRIST, H. Consequences of mass transfer effects on the kinetics of nitrifiers. *Water Research*, 39. 4633 – 4642. 2005.

MAQBOOL, T; KHAN, S.J; LEE, C.H. Effects of filtration modes on membrane fouling behavior and treatment in submerged membrane bioreactor. *Bioresource Technology*. 2014.

MAQBOOL, T; KLAN, S. J; LEE, C. H. Effects of filtration modes on membrane fouling behavior and treatment in submerged membrane bioreactor. *Bioresource Technology*. 2014.

MULDER, M. Basic principles of membrane technology. Center for membrane science and technology. University of Twente, Enschede. *The Netherlands*, 564p. 2000.

NAESSENS, W; MAERE, T; NOPENS, I. Critical review of membrane bioreactors models: Part 1: Biokinetic and filtration models. *Bioresource Technology* 122, 95 – 106, 2012.

NAKAMURA, K; ORIME, T; MATSUMOTO, K. Response of zeta potential to cake formation and pore blocking during the microfiltration of látex particles. *Journal of Membrane Science*, 402. 274 – 281. 2012.

NAKÃO, S. Determination of pore-size and pore size distribution. Filtration membrane. *Journal of membrane science*, 96, 131-165.

OCHANDO-PULIDO, J. M; HODAIFA, G; MARTINEZ – FERREZ, A. Permeate recirculation impact on concentration polarization and fouling on reverse osmosis purification of olive mill wastewater. *Desalination*, 343. 169- 179. 2014.

ORHON, D; ATES, E; SOZEN, S; COKGOR, E.U. Characterization and COD fractionation of domestic wastewaters. *Environmental Pollution*, 95, 191-204, 1997.

PROVENZI, G. Biorreator à Membrana submersa para tratamento biológico de efluentes.: Estudos Hidrodinâmicos e físico-químicos no controle da colmatação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. Tese de doutorado. UFSC. 2005.

RAFIEI, B; NACIMPOOR, F; MOHAMMADI, T. Biofilm and bio-entrapped hybrid membrane bioreactors in wastewater treatment: Comparison of membrane fouling and removal efficiency. *Desalination*, 337. 16 – 22. 2014.

RAFIEI, B; NAEIMPOOR, F; MOHAMMADI, T. Bio-film and bio-entrapped hybrid membrane bioreactors in wastewater treatment: comparison of membrane fouling and removal efficiency. *Desalination*, 337. 16 – 22. 2014.

RAUTENBACH, R; MELIN, T. *Membranverfahren*, Springer, Nr. 3-540-00071-2, Berlin, 2004.

RAUTENBACK, K; MELIN, T. *Membranverfahren, spring*. Nr. 3-540-00071-2. Berlin. 2004.

ROBLES, A; RUANO, M.V; RIBLES, J; SECO, A; FERRER, J. A filtration model applied to submerged anaerobic MBRs (SAnMBRs). *Journal of Membrane Science*, 444. 139 – 147. 2013.

SARKAR, B. A combined complete pore blocking and cake filtration model during ultrafiltration of polysaccharide in a batch cell. *Journal of food engineering*, 116. 333 – 343. 2013.

SHEN, C; CIRONE, C; YANG, L; JIANG, Y; WANG, X. Characteristics of fouling development in shell– an–tube heat exchanger: Effects of velocity and installation location. *International Journal of heat and mass transfer*, 77. 439 – 448. 2014.

STIEB, M. *Mechanische Verfahrenstechnik 1*, Springer. Nr. 3-540-55852-7, Berlin, Heidelberg, New York, 2004.

SUBTIL, E. L; HESPANHOL, I; MIERZWA, J. C. Biorreatores com membranas submersas (BRMs): Alternativa promissora para o tratamento de esgotos sanitários para reuso. *Ambiente e Água – Na Interdisciplinary Journal of Applied Science*. 2013.

SUBTIL, E. L; MIERZWA, J. C; HESPANHOL, I. Comparison between a conventional membrane bioreactor (C-MBR) and a biofilm membrane bioreactor (BF-MBR) for domestic wastewater treatment.

VOBENKAUL, K. The puron membrane system: New concepts for submerged membrane technology in wastewater treatment. Pre-prints, *Aachen Membrane Colloquium*, 16-17, 2005.

VOBENKAUL, K. The Puron membrane system: New concepts for submerged membrane technology in wastewater treatment. Pre-prints, *Aachen Membrane Colloquium*, 16 – 17. March 2005.

WANG, X; CHEN, Y; YUAN, B; LI, X; REN, Y. Impacts of sludge retention time on sludge characteristics and membrane fouling in a submerged osmotic membrane bioreactor. *Bioresource Technology*, 161. 310 – 347. 2014.

WINTGENS, T; ROSEN J; MELIN, C; BREPOLS, K; ENGELHARDT, N. Modelling of a membrane bioreactor system for municipal wastewater treatment. *Journal Membrane Science* 216, 55-65, 2003.

WINTGENS, T; ROSEN J; MELIN, C; BREPOLS, K; ENGELHARDT, N. Modelling of a membrane bioreactor system for municipal wastewater treatment. *Journal Membrane Science* 216, 55-65, 2003.

WISNINWSKI, C; GRASMICK, A. Floc size distribution in a membrane bioreactor and consequences for membrane fouling. *Colloids and surfaces A: Physicochemical and Engineering aspects*, 138. 403 – 411. 1998.

WITGENS, T; ROSEN, J; MELIN, C; BREPOL, K; ENGELHARDT, N. Modelling of a membrane bioreactor system for municipal wastewater treatment. *Journal membrane science*, 216, 55-65. 2003.