

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA**  
**SETOR DE ENGENHARIAS, CIÊNCIAS AGRÁRIAS E TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**RENAN GABRIEL MAGNONI**

**ESTUDO MATEMÁTICO DA CONVERSÃO BIOLÓGICA COMBINADA DE  
CARBONO E NITROGÊNIO EM REATOR DE LEITO FIXO**

**PONTA GROSSA**

**2022**

**RENAN GABRIEL MAGNONI**

**ESTUDO MATEMÁTICO DA CONVERSÃO BIOLÓGICA COMBINADA DE  
CARBONO E NITROGÊNIO EM REATOR DE LEITO FIXO**

Trabalho apresentado à disciplina de OTCC como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharelado em Engenharia Civil, da Universidade Estadual de Ponta Grossa.

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Araújo Vuitik.

**PONTA GROSSA**

**2022**

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar agradeço a Deus por me permitir chegar até aqui e realizar essa etapa da minha vida.

Ao meu orientador por me apoiar durante todo o desenvolvimento do trabalho e por me dar a oportunidade de desenvolver uma pesquisa de grande importância.

Ao meu amigo Matheus Minski por me auxiliar em muitos momentos onde o código chegou em um lugar aparentemente sem saída, e com maestria me ajudar a melhorar o código cada vez mais.

A todos os demais que direta ou indiretamente contribuíram neste trabalho.

A Universidade Estadual de Ponta Grossa por toda a estrutura durante todos os meus anos como estudante.

De coração, meu muitíssimo obrigado!

## RESUMO

As águas residuárias, quando não tratadas adequadamente, podem levar a danos aos ecossistemas. Havendo grande disponibilidade de matéria orgânica na água, haverá concomitante consumo de oxigênio o que pode ser prejudicial aos organismos aquáticos. O nitrogênio, por sua vez, quando despejado sem o devido tratamento e associado ao fósforo, resulta no processo da eutrofização. Biorreatores de biomassa imobilizada têm se mostrado efetivos para tratamento de água residuárias ricas em carbono e nitrogênio. Estudos experimentais têm sido realizados para investigar a dinâmica destes reatores, no entanto esse processo se mostra muitas vezes lento. Uma maneira de tornar a investigação mais célere é o emprego de modelos matemáticos para presumir o comportamento dos reatores de maneira a subsidiar seu dimensionamento e operação. O objetivo desta pesquisa é estudar matematicamente a conversão biológica combinada de carbono e nitrogênio em reator de leito fixo. Para tanto foi modelado em Python um reator de leito fixo de mistura perfeita com recirculação e feita uma análise de seus resultados em comparação com o trabalho de Oliveira (2020), onde foi observada uma maior velocidade de consumo de carbono e uma estabilização rápida para o nitrogênio, resultados que mostram a eficiência da modelagem matemática em relação ao reator em escala Piloto. É possível concluir que a remoção de nitrogênio está diretamente ligada a remoção de carbono, podendo encontrar problemas na remoção quando o carbono chegar a níveis críticos.

**Palavras-chave:** biorreatores, cinética, modelagem.

## ABSTRACT

Wastewater, when not properly treated, can lead to damage to ecosystems. If there is a high availability of organic matter in the water, there will be a concomitant consumption of oxygen which can be very harmful to aquatic organisms. Nitrogen, in turn, when dumped without proper treatment, and associated with phosphorus, results in the process of eutrophication. Immobilized biomass bioreactors have been shown to be effective for treating wastewater rich in carbon and nitrogen. Experimental studies have been carried out to investigate the dynamics of these reactors, however, this process is often slow. One way to make the study abouts bioreactor faster is the use of mathematical models to predict the behavior of these reactors in order to subsidize their sizing and operation. The objective of this research is to mathematically study the combined biological conversion of carbon and nitrogen in a fixed bed reactor with perfect mixing and recirculation, to reach the results the bioreactor was modeled in python, and an analysis of the results was made with some other studies that used the same bioreactor in the literature, Where a higher rate of carbon consumption and a quick stabilization for the nitrogen was observed, results that show the efficiency of the mathematical modeling about the bench scale reactor. It is possible to conclude that nitrogen removal is directly linked to carbon removal, and may encounter problems When the carbon reaches critical levels

**Keyword:** bioreactors, Kinect, modeling.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação gráfica do modelo cinético de Monod.....	11
Figura 2 – Fluxograma das etapas da pesquisa.....	15
Figura 3 – Diagrama de blocos do modelo matemático.....	15
Figura 4 – Biorreator de leito fixo em escala piloto.....	16
Figura 5 – Interação entre as reações de conversão biológica de carbono e nitrogênio.....	17
Figura 6 – Gráfico de consumo de carbono por tempo de detenção hidráulica em diferentes recirculações.....	20
Figura 7 – Gráfico de consumo de nitrato por tempo de detenção hidráulica em diferentes recirculações.....	22
Figura 8 – Gráfico de consumo de DQO para diferentes taxas de recirculação.....	23
Figura 9 – Gráfico de consumo de nitrato para diferentes taxas de recirculação.....	24

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Constantes cinéticas para o nitrogênio e carbono.....	10
--	----

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO .....	8
2.	OBJETIVO.....	9
2.1.	OBJETIVO GERAL.....	9
2.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	9
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	10
3.1.	CONVERSÃO BIOLÓGICA DE CARBONO E NITROGÊNIO.....	10
3.2.	CINÉTICA DA CONVERSÃO DE MATERIA ORGÂNICA .....	10
3.3.	REATOR DE LEITO EMPACOTADO.....	13
4.	METODOLOGIA.....	15
4.1.	ETAPAS DA PESQUISA .....	15
4.2.	DESCRIÇÃO DO REATOR.....	15
4.3.	VARIÁVEIS DE ENTRADA .....	16
4.4.	EQUACIONAMENTO MATEMÁTICO .....	17
4.5.	APRESENTAÇÃO DAS VARIÁVEIS DE SAÍDA .....	19
5.	RESULTADOS .....	20
5.1.	REMOÇÃO DE CARBONO .....	20
5.2.	REMOÇÃO DE NITROGÊNIO .....	21
5.3.	DISCUSSÃO .....	23
6.	CONCLUSÃO.....	25



## 1. INTRODUÇÃO

As águas residuárias podem, quando contaminadas, apresentar efeitos danosos para os ecossistemas, principalmente se não tratadas de maneira efetiva. Quando existe uma grande disponibilidade de matéria orgânica na água, há também o elevado consumo de oxigênio pelos microrganismos. (GRADY JUNIOR et al., 2011) No caso do nitrogênio quando despejado em grandes quantidades e associado ao fósforo decorre no processo da eutrofização, que também diminui a quantidade de oxigênio dissolvido no meio, e promove o crescimento excessivo de plantas aquáticas, modificando características da água, como turbidez e odor. (BARRETO, 2013).

Uma das tecnologias empregadas para o tratamento de efluentes é o emprego de reatores biológicos, os quais reproduzem processos que ocorreriam naturalmente no meio ambiente, porém em ambiente controlado. (VON SPERLING, 2007).

Os biorreatores de leito fixo têm a característica de serem reatores de coluna, onde é inserido material suporte em seu interior, e o fluido passa de forma ascendente ou descendente, através do meio suporte. (HUILIÑIR, 2010) Esse modelo de biorreator tem sido amplamente estudado, porém quase sempre sua operação e dimensionamento são baseados em dados empíricos, seja em escala de bancada ou escala real. (FERREIRA, 2017; CALLADO; CHAGAS; DAMIANOVIC, 2020; BARANA et al., 2013; LIU et al., 2010).

A análise numérica pode ser uma solução para estimar a eficiência dos reatores de uma maneira mais rápida, otimizando o tempo de pesquisa em laboratório. Há estudos em que foram feitas análises numéricas para a previsão de eficiência de reatores de leito fixo (CUNHA, 2009; TOSON; DOSHI; JAJCEVIC, 2019; LIMA et al., 2022; ALVES, 2010).

Assad e Gomes (2022) utilizaram os métodos matemáticos para analisar a eficiência de um biorreator de leito fixo empregado para remoção de carbono e nitrogênio, variando o tempo de detenção hidráulico e taxa de recirculação. No entanto, os autores não avaliaram a interrelação entre os processos, suscitando a necessidade de novos estudos que unifiquem suas análises em modelos mais complexos e realistas.

## **2. OBJETIVO**

### **2.1. OBJETIVO GERAL**

Estudar matematicamente a conversão biológica combinada de carbono e nitrogênio em reator de leito fixo.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Avaliar a eficiência de remoção de carbono e nitrogênio em um reator de leito fixo em diferentes tempos de detenção hidráulica;
- Avaliar a eficiência de remoção de carbono e nitrogênio em um reator leito fixo em diferentes taxas de recirculação.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. CONVERSÃO BIOLÓGICA DE CARBONO E NITROGÊNIO

O nitrogênio possui em sua fração orgânica os aminoácidos e as proteínas que podem ser encontradas tanto na forma solúvel quanto na forma particulada, quando ocorre o contato dessa fração orgânica do nitrogênio com os microrganismos, ocorre a conversão para nitrogênio amoniacal. Os estados de oxidação mais comumente encontrados do nitrogênio nos efluente são as formas amônia ( $NH_3$ ) e o íon amônio ( $NH_4^+$ ) sendo que a concentração desses dois estados sofre influência direta do pH, sendo que em pH neutro (próximo de 7) é encontrada em maior abundância a forma de íon amônio ( $NH_4^+$ ) quando o pH se encontra entre 8 e 9, existe a predominância da forma não ionizada do nitrogênio e quando tem-se o pH maior do que 11 é encontrado em maior quantidade a forma de ( $NH_3$ ). (METCALF; EDDY, 2003; NASCIMENTO et al., 2008; VAN HAANDEL; MARAIS, 1999).

Para a remoção do nitrogênio contido nas águas residuárias são necessárias duas etapas, sendo a primeira dessas etapas a nitrificação, um processo que acontece em meio aeróbio, onde ocorre a oxidação do nitrogênio amoniacal a nitrato. A segunda etapa se dá na ausência do oxigênio livre onde o nitrato é convertido em nitrogênio gasoso. Essa etapa também é conhecida como desnitrificação. (ARAÚJO, 2006; FOCO; NOUR, 2014; VON SPERLING, 2017)

#### 3.2. CINÉTICA DA CONVERSÃO DE MATERIA ORGÂNICA

O estudo da cinética da conversão de matéria orgânica é muito utilizado para descrever como funciona o metabolismo bacteriano, e muitas dessas expressões utilizam o trabalho de Monod (1950) como base. No trabalho de Monod foram encontradas três equações básicas, a primeira dessas reações diz que a velocidade bruta de crescimento dos microrganismos é proporcional a velocidade de utilização do substrato (Equação 1).

$$\left(\frac{dC_x}{dt}\right)_c = Y_{x/s} \left(\frac{dC_s}{dt}\right)_u \quad (1)$$

Na expressão  $C_x$  é a concentração de microrganismos,  $C_s$  é a concentração de substrato,  $t$  é o tempo e  $Y_{X/S}$  é o fator de crescimento ou a produção bruta de bactérias, sendo assim a parte da reação representada pelo índice  $c$  representa o crescimento e a parte representada pelo índice  $u$  representa o consumo de matéria orgânica.

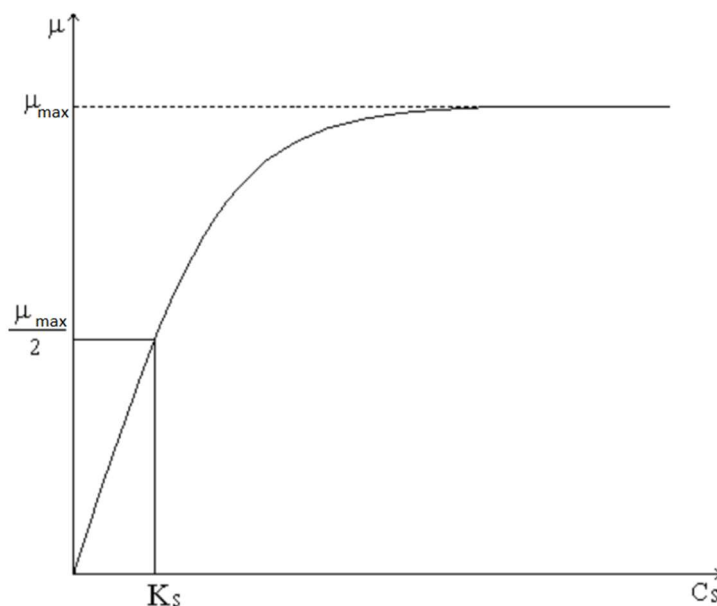
Na segunda das equações de Monod temos que o crescimento dos microrganismos depende da própria concentração de microrganismos e da concentração do substrato (Equação 2);

$$r_x = \left(\frac{dC_x}{dt}\right)_c = C_x \cdot \mu = \mu_{max} \left(\frac{C_s \cdot C_x}{K_s + C_s}\right)_u \quad (2)$$

Tem-se nessa equação que  $r_x$  é a velocidade de crescimento celular,  $\mu$  é a velocidade específica desse mesmo crescimento e  $\mu_{max}$  e  $K_s$  são duas constantes cinéticas, sendo a primeira a velocidade máxima do crescimento celular e a segunda sendo a constante de saturação do substrato. Essa constante  $K_s$  representa a concentração de substrato quando  $\mu$  chega na metade do seu valor máximo.

A representação gráfica da expressão cinética de Monod é apresentada na Figura 1:

Figura 1 representação gráfica do modelo cinético de Monod



Fonte: Von Sperling (2007).

A terceira das equações de Monod representa um paralelo entre o crescimento dos microrganismos devido à atividade anabólica e o decaimento devido a morte de células vivas, a velocidade desse decaimento pode ser representada como um processo de primeira ordem (Equação 3).

$$\left(\frac{dC_x}{dt}\right)_d = -C_x \cdot K_d \quad (3)$$

Sendo  $K_d$  a constante da morte celular que também pode ser chamada de constante da velocidade de decaimento a parte da equação representada pelo índice  $d$  é a parte que diz respeito sobre o decaimento da massa bacteriana. (VON SPERLING, 2007).

Para serem realizados os testes envolvendo o consumo de carbono e nitrogênio, foram utilizados valores constantes encontrados na literatura. Na Tabela 1 são apresentados exemplos de constantes cinéticas de conversão biológica de carbono e nitrogênio.

Tabela 1 - Constantes cinéticas para nitrogênio e carbono

Constantes cinéticas para o carbono		Constantes cinéticas para o nitrogênio	
Constante	Valor	Constante	Valores
$r_{max}$	125 mg.L <sup>-1</sup> .h <sup>-1</sup>	$r_{max}$	20 mg.L <sup>-1</sup> .h <sup>-1</sup>
			5 – 40 mg.L <sup>-1</sup> .h <sup>-1</sup>
$k_s$	234 mg.L <sup>-1</sup>	$k_s$	5 mg.L <sup>-1</sup>
			5 – 15 mg.L <sup>-1</sup>

FONTE: adaptado de (VAN HAANDEL e MARAIS, 1999; METCALF e EDDY, 2003; MULCHANDANI et al., 1989)

As reações ocorrem de duas maneiras, sendo elas em paralelo e em série, de forma que em biorreatores, sempre terão reações ocorrendo e essas reações podem gerar diferentes produtos que são ou não desejáveis. Essas ocorrências sempre são representadas por diferentes equações dessa forma mais de uma equação cinética é necessária para ter uma descrição completa (LEVENSPIEL, 2000).

Reações em série são as reações que seguem uma certa linearidade onde os produtos formados pela equação sofrem reações subsequentes gerando os produtos, a reação mais simples que pode ser utilizada para descrever a reação em série seria uma reação de primeira ordem com um único produto intermediário. Já as reações em

paralelo o reagente pode sofrer duas ou mais reações e essas reações podem gerar produtos em mesma quantidade que o reagente ou mais produtos do que reagentes, existem casos em que um único reagente pode gerar produtos diferentes e também existem as reações em que mais de um reagente pode gerar mais de um produto (LEVENSPIEL, 2000).

Essas duas reações estão sempre ligadas, pois em um sistema poderão ocorrer as duas reações ao mesmo tempo, quando possui-se as duas reações ocorrendo ao mesmo tempo são chamadas de reações mistas. essa reação mista é um caso em que sua velocidade não pode ser derivada diretamente das equações estequiométricas (FOGLER, 2018).

### 3.3. REATOR DE LEITO FIXO

Os reatores de leito fixo são reatores que utilizam o princípio do crescimento aderido, ou seja, o fluido passa sobre as partículas catalisadoras que estão aderidas em um material suporte sem liberdade de movimento. Os reatores de leito empacotado são considerados reatores heterogêneos devido ocorrer interação das duas fases, sendo elas a fase reacional fluida e a fase catalizadores sólida (RASE, 1990).

O método da imobilização celular proporcionou avanços na área de tratamento de efluentes entendendo os processos biológicos, principalmente nos modelos que utilizam o princípio da retenção da biomassa ativa. Esse princípio é o qual garante a permanência das bactérias no reator tempo o suficiente para que ocorra o processo da divisão celular. (ORTEGA et al., 2011)

O meio suporte dos reatores de leito empacotado possui a função de retenção de biomassa ativa dentro do reator e funciona com a formação de biofilme ou mesmo pela retenção nas mídias ou abaixo delas (CHERNICHARO, 2007). Existe uma concentração constante de biomassa dentro do biofilme pois o mesmo descama quando chega a determinados valores de espessura, sendo esses entre 0,3 mm e 0,5 mm (NARAYANAN; NARAYAN, 2019).

Os materiais suportes possuem diversas formas e devem ser escolhidos de acordo com as análises do reator levando em consideração superfície específica, volume de vazios, resistência natural, densidade, custo de manufatura, entre outros.

Essa escolha possui uma grande importância no reator, pois a escolha incorreta do material pode ocasionar diversos problemas, entre esses temos esmagamento e abrasão, obstrução de fluxo e inibição do desenvolvimento dos microrganismos (AFANDIZADEH; FOUMENY, 2001). Dentre os materiais utilizados como suporte temos cilindros ocos, PVC cilíndrico, granito, esferas de polietileno, anéis plásticos, lascas de bambu, entre outros. (CHERNICHARO, 2007)

Um cenário benéfico que é criado para a remoção de nitrogênio se dá por meio da utilização de mídias porosas onde essas proporcionam uma grande concentração de oxigênio dissolvido, pois existe uma dificuldade física de remover completamente esse gás e isso acarreta na formação de zonas anóxicas através dos processos de nitrificação e desnitrificação simultâneas.

O processo mais comum de remoção do nitrogênio necessita do processo de mais de um tipo de microrganismo, sendo eles um autótrofo que é o responsável pela nitrificação que ocorre de forma aeróbia e consiste na conversão do amônio ( $\text{NH}_4^+$ ) em nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) e após isso convertido em nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) para essa conversão é utilizado o oxigênio molecular como aceptor de elétrons.

Já o processo de desnitrificação anóxica ocorre quando há a conversão do nitrito e do nitrato em nitrogênio molecular ( $\text{N}_2$ ), os organismos responsáveis por essa redução do nitrato são organismos facultativos. (VON SPERLING, 2007). Possuindo as condições necessárias, é possível ocorrer os dois processos de maneira simultânea no mesmo reator, possuindo assim uma vantagem em relação a outros modelos de reatores e outros processos biológicos, tendo um custo reduzido. (CALIJURI; CUNHA, 2013)

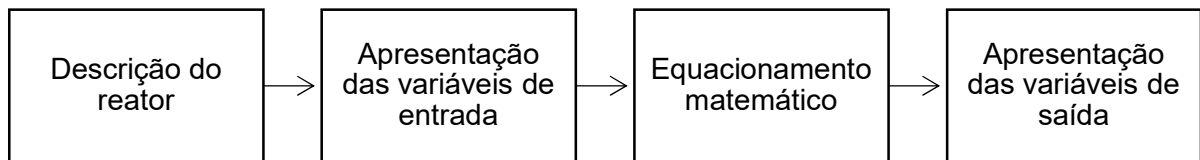
## 4. METODOLOGIA

### 4.1. ETAPAS DA PESQUISA

Trata-se de uma pesquisa de natureza aplicada, exploratória no que tange aos objetivos e de abordagem quantitativa, em que será modelado na linguagem de programação Python um reator MBBR (*moving bed biofilm reator*) na forma de reator de mistura completa, com recirculação.

As etapas da pesquisa são apresentadas no fluxograma da Figura 2.

Figura 2 - Fluxograma das etapas da pesquisa

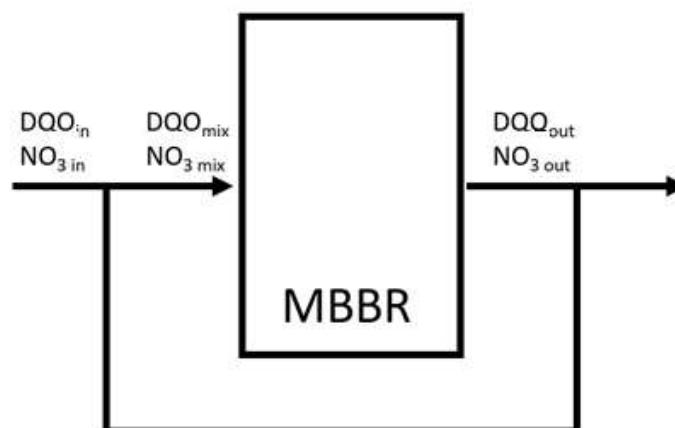


Fonte: o autor

### 4.2. DESCRIÇÃO DO REATOR

O reator modelado, apresentado no esquema da Figura 3, é um reator de biomassa imobilizada, mistura perfeita e com recirculação. Esse reator simulou as dimensões e condições experimentais da pesquisa de Oliveira (2020) (Figura 4).

Figura 3 - Diagrama de blocos do modelo matemático



Fonte: o autor

Legenda: MBBR – reator biológico, DQO – demanda química de oxigênio,  $NO_3$  – concentração de nitrato, índices: in = entrada, out = saída, mix = mistura



Figura 4 - Biorreator de leito fixo em escala piloto



Fonte: Oliveira (2020)

#### 4.3. VARIÁVEIS DE ENTRADA

As variáveis de entrada, que irão alimentar o modelo, serão:

a) Concentração de Carbono orgânico

A concentração de carbono orgânico será investigada por meio de uma medida indireta dessa grandeza, a DQO, a qual representa a quantidade de oxigênio necessária para estabilizar quimicamente a matéria orgânica.

De acordo com o verificado por Oliveira (2020) será utilizada uma DQO de entrada de  $500 \text{ mg.L}^{-1}$ , valor comumente encontrado em esgotos sanitários (VON SPERLING, 2007).

b) Concentração de Nitrogênio

Nesta pesquisa será considerado que todo o nitrogênio amoniacal presente no esgoto sanitário já fora convertido a nitrato ( $\text{NO}_3$ ), não havendo, portanto, competição pela fonte de oxigênio entre as comunidades microbianas aeróbias.

De acordo com o verificado experimentalmente por Oliveira (2020) será utilizada uma concentração de nitrato de entrada de  $50 \text{ mg.L}^{-1}$ , valor também comumente encontrado em esgotos sanitários (VON SPERLING, 2007).

c) Tempo de detenção hidráulico (TDH)

O TDH será vetorizado, variando entre 0 e 24 h, em intervalos de 1,0 h.

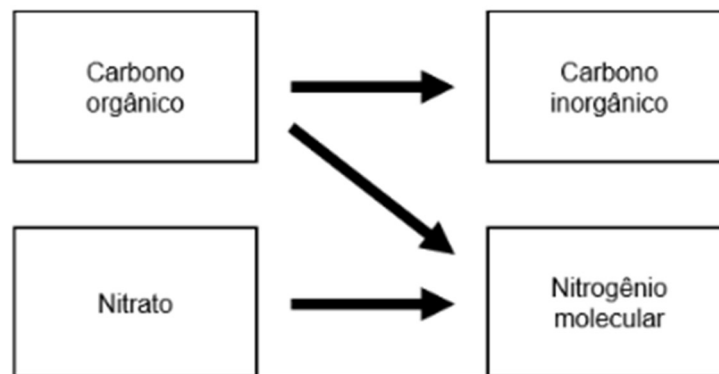
d) Taxa de recirculação (Rec)

A taxa de recirculação também será vetorizada, variando entre 0 e 2, em intervalos de 0,5.

#### 4.4. EQUACIONAMENTO MATEMÁTICO

Ambas as cinéticas, conversão biológica de carbono e de nitrogênio, seguem o modelo proposto por Monod (1950). Será investigada a interação entre as cinéticas que ocorrem com processos em paralelo, empregando a mesma fonte de carbono orgânico, conforme esquema apresentado na Figura 5.

Figura 5 - Interação entre as reações de conversão biológica de carbono e nitrogênio



Fonte: o autor

Para reatores de mistura completa, em estado estacionário, é válida a expressão apresentada na Equação 4, onde TDH representa do tempo de detenção hidráulico,  $C_0$  a concentração de entrada,  $C$  a concentração de saída e  $r$  a velocidade de reação.

$$TDH = \frac{C_0 - C}{r} \quad (4)$$

Ao introduzir um fluxo de recirculação, a concentração de alimentação do reator muda em função da eficiência global do sistema. Desta forma, será necessário incluir a Equação 5 ao modelo, a qual calcula  $C_{mix}$ , concentração da mistura afluenta ao reator, em função da taxa de recirculação ( $Rec$ ), concentração de entrada ( $C_{in}$ ) e de saída do reator ( $C_{out}$ ).

$$C_{mix} = \frac{Rec \cdot C_{out} + C_{in}}{Rec + 1} \quad (5)$$

O modelo cinético de Monod (1950) (Equação 2) descreve matematicamente a cinética de conversão em processos microbiológicos, o qual será inserido na Equação 4 substituindo o termo  $r$ . Para o emprego desse modelo, será realizada uma pesquisa bibliográfica, buscando as constantes cinéticas obtidas experimentalmente que mais se aproximem das condições investigadas nesta pesquisa, no que tange às características do substrato, meio suporte e condições de mistura do reator

Para investigar a interação entre as cinéticas de consumo de carbono e nitrato, será abordada o modelo matemático, na região em que a cinética segue um equacionamento de primeira ordem, região de baixas concentrações de substrato, inferiores a  $K_M/2$ .

O consumo de carbono ocorre simultaneamente pelas bactérias aeróbias e desnitrificantes heterotróficas, portanto, trata-se de um processo em paralelo. O consumo de substrato nas reações paralelas pode ser representado pela Equação 6, onde  $r_{max,DQO}$  e  $r_{max,DQO-NO_3}$  representam a velocidade máxima de consumo de DQO e nitrato, respectivamente (FOGLER, 2018).

$$DQO_{out} = \frac{DQO_{mix}}{1 + TDH(r_{max,DQO} + r_{max,DQO-NO_3})} \quad (6)$$

A cinética de consumo de Nitrato, por sua vez, emprega tanto a concentração de carbono como nitrato. Conhecendo a concentração disponível no reator de mistura completa (Equação 6), pode-se estimar a concentração de saída pela Equação 7 (FOGLER, 2018).

$$NO_{3out} = NO_{3mix} \cdot e^{-r_{max,NO_3} \cdot DQO_{out} \cdot TDH} \quad (7)$$

Na modelagem matemática realizada, foram utilizados valores constantes de entrada no reator, sendo esses valores 512 para a DQO de entrada, 54,5 para o  $NO_3$  de entrada, para os valores de  $r_{max}$  foram utilizados  $3000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$  para o carbono e

0,06  $mg.L^{-1}.h^{-1}$  para o nitrogênio para a taxa de recirculação foi adotada de 0 a 2,5 variando a cada 0,5 e para o valor de TDH de 0 a 1 dia variando a cada 0,05 dia. Foi necessário investigar o emprego de diferentes combinações de constantes cinéticas por isso foram feitos adotando essas diferentes constantes após ser concluída a modelagem do reator e por meio desses testes foram obtidos os valores mencionados a cima.

Por se tratar de um sistema de duas equações e duas incógnitas, as quais interagem entre si, em função do tempo, essa rotina precisa ser programada em método recursivo.

A eficiência (E%) de remoção de carbono e nitrogênio podem ser expressos pela Equação 8, onde  $C_{in}$  e  $C_{out}$  são as concentrações genéricas de entrada e saída.

$$E(\%) = \frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in}} \cdot 100 \quad (8)$$

#### 4.5. APRESENTAÇÃO DAS VARIÁVEIS DE SAÍDA

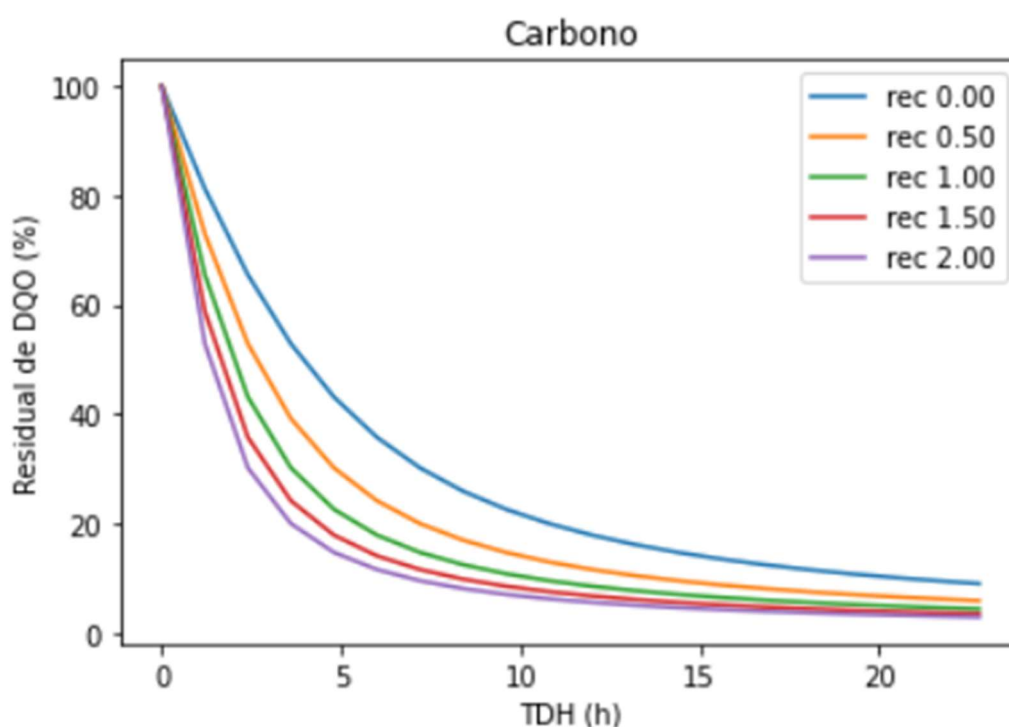
Foram gerados gráficos independentes que relacionam a eficiência de remoção de carbono e nitrogênio em relação ao TDH, para as diferentes taxas de recirculação.

## 5. RESULTADOS

### 5.1. REMOÇÃO DE CARBONO

Empregando-se o código apresentado no Anexo 1, foi obtido o gráfico de eficiência de remoção de carbono, apresentado na Figura 6.

Figura 6 – Gráfico de consumo de carbono por tempo de detenção hidráulica em diferentes recirculações



Fonte – O autor

É possível observar que em todas as faixas representantes das diferentes taxas de recirculação, o resultado da remoção de carbono após o TDH de 5h se dá dentro da quantidade aceitável pelo CONAMA. Segundo a resolução CONAMA 430/2011, recomenda-se a eficiência de 60% tanto para carbono quanto para nitrogênio, podendo esse valor ser reduzido de acordo com estudos em relação a autodepuração do corpo receptor. Como os valores obtidos para a remoção de carbono estão enquadrados na resolução do CONAMA em todas as faixas, mesmo na recirculação de 0%, também considerada a mais simples, estão dentro das normas a partir de um tempo de detenção hidráulica de 2,86 horas.

Já nos testes de Oliveira (2020) foram verificados resultados de uma remoção de 80% da DQO após 10 horas com uma taxa de recirculação de 200%, considerando

a mesma taxa de recirculação, os 80% de DQO removidos foram obtidos após um TDH de 3,6 horas, apresentando uma diferença considerável aos testes de Oliveira (2020).

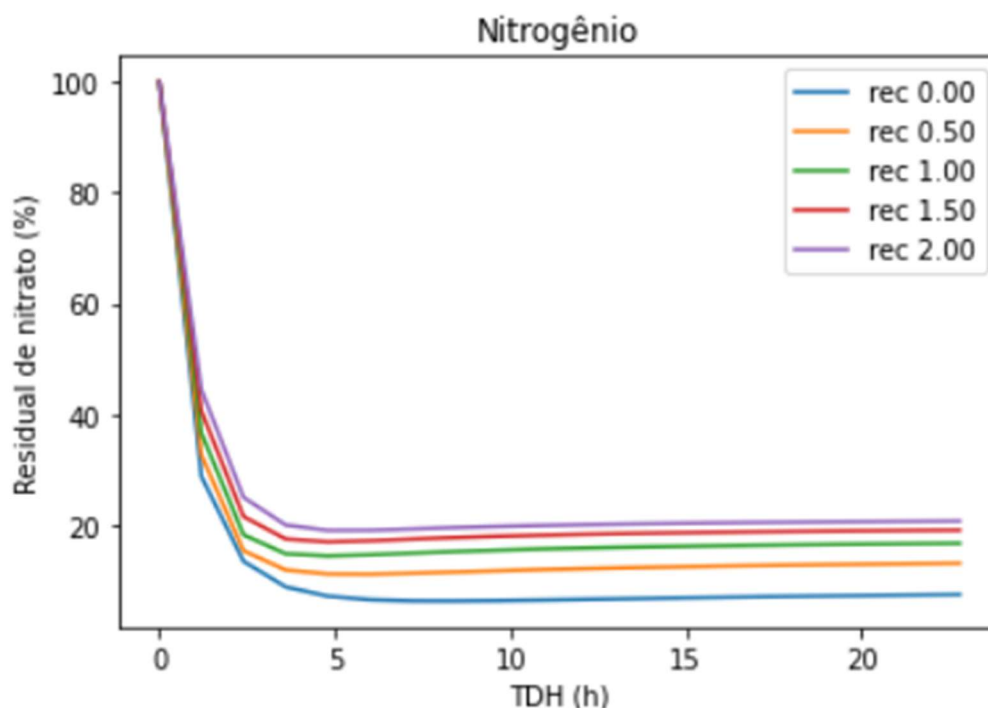
Outro resultado importante de ser analisado por meio do gráfico da Figura 6 é a perda de eficiência da remoção do carbono, onde em diferentes taxas de recirculação a eficiência de remoção deixou de aumentar em função do incremento no TDH, sendo o mais rápido e o mais lento respectivamente os resultados obtidos nas recirculações 0% e 200% onde na primeira houve uma estabilização a partir 15 horas de TDH e na última essa estabilização acontecendo muito mais cedo, sendo a partir das 8 horas de TDH.

Foram obtidos resultados muito próximos para algumas recirculações, sobretudo nas três últimas (100%, 150% e 200%) onde a estabilização das curvas de eficiência ocorreu muito próximas umas das outras sendo a de 200% já apresentada a cima em 8 horas tivemos também essas estabilizações nas recirculações 100% acontecendo próximo a 9 horas de detenção e 150% acontecendo aproximadamente em 8,5 horas.

## 5.2. REMOÇÃO DE NITROGÊNIO

Empregando-se o código apresentado no Anexo 1 também foram obtidos os resultados referentes a remoção de nitrogênio, apresentado no código através do nitrato ( $\text{NO}_3$ ) e esse gráfico apresentado na Figura 7.

Figura 7 – Gráfico de consumo de nitrato por tempo de detenção hidráulica em diferentes recirculações



Fonte – O autor

Como citado na apresentação do consumo de carbono, tem-se a resolução CONAMA 430/2011 recomenda remoção de 60% do nitrogênio, podendo variar de acordo com as características do corpo hídrico e sua autodepuração.

Nos resultados apresentados na Figura 7, observa-se que em todas as taxas de recirculação e TDH foram obtidos valores maiores do que 60% da remoção, mesmo na menor das taxas de recirculação (0%) o valor removido foi superior a 80%, nos testes de Oliveira (2020) a remoção de nitrogênio chegou em 98%, valor que não pode ser visto nesse trabalho, em que no melhor resultado chegou-se a uma remoção de 94% após 5 horas de detenção hidráulica, tempo também que determinou o máximo de eficiência, sendo após isso considerado estabilizado o reator e não tendo mudança considerável na remoção.

Observou-se que a remoção de nitrogênio aconteceu de forma muito mais rápida do que a remoção de carbono, onde a velocidade mais lenta para estabilizar a remoção de nitrogênio foi obtida com 5 horas e a de carbono com 15 horas.

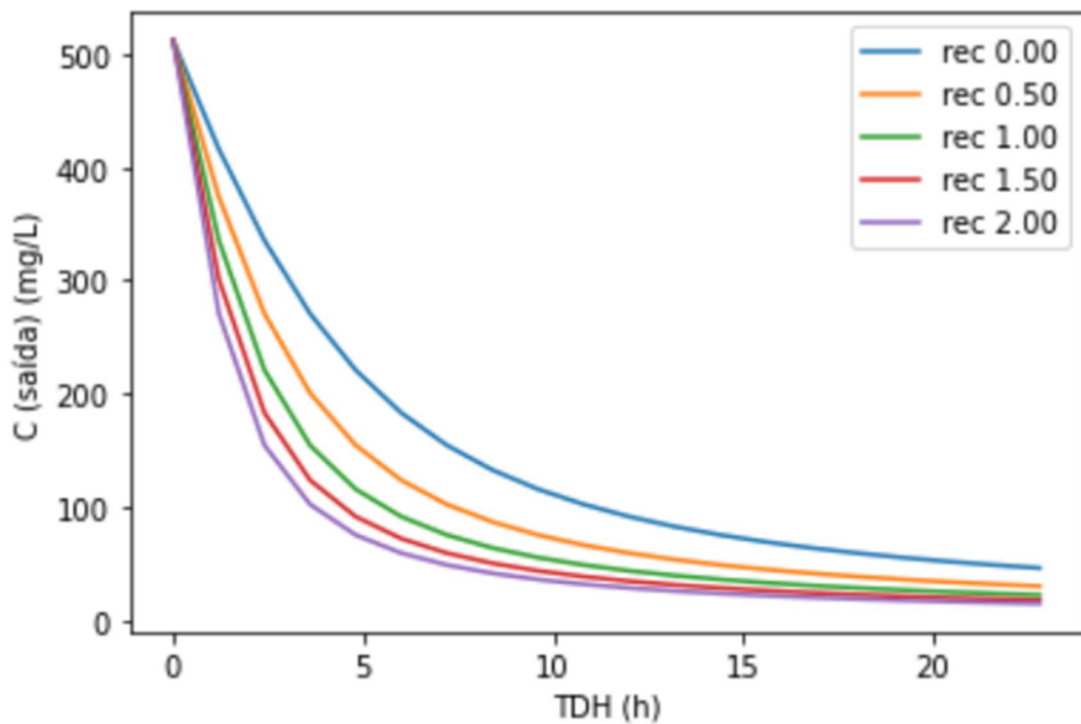
Nota-se no gráfico também uma grande semelhança em diferentes taxas de recirculação, onde há uma variação de 10% de remoção entre os extremos 0% e 200% de recirculação.

A aparente redução na eficiência com incremento de TDH se deve ao efeito da recirculação demasiada incidindo sobre a cinética de conversão de um reator em estado estacionário, bem como ao efeito da redução de carbono, essencial à conversão de nitrogênio. No entanto, essa situação não seria observada na prática.

### 5.3. DISCUSSÃO

Assad e Gomes (2022), em seu modelo encontraram valores apresentados na Figura 8 para carbono e Figura 9 para nitrogênio.

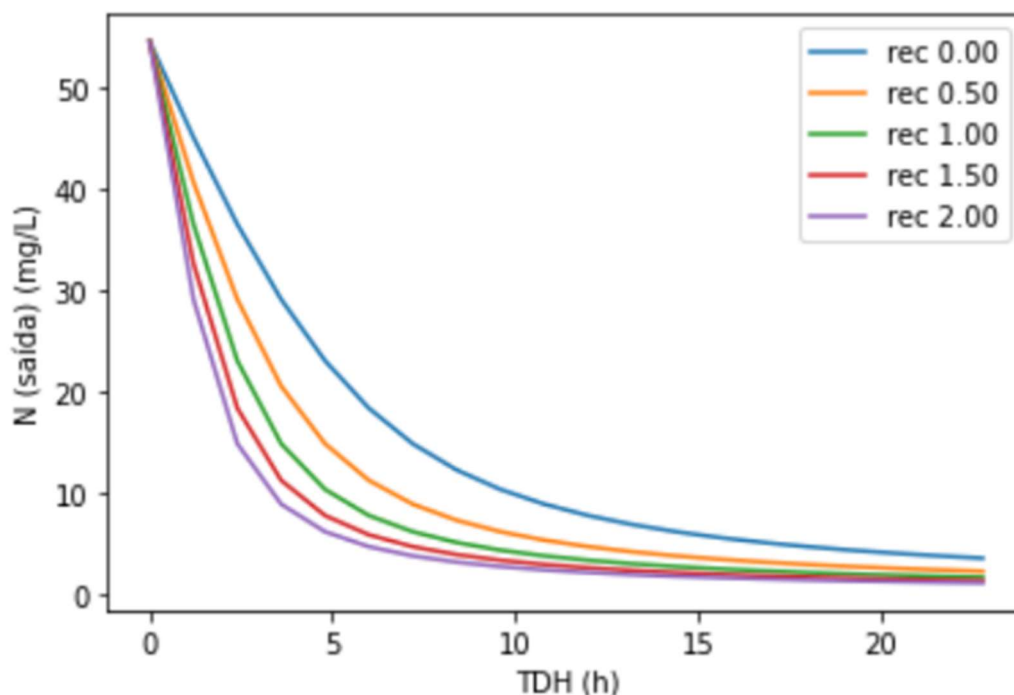
Figura 8 – Gráfico de consumo de DQO para diferentes taxas de recirculação



Fonte – Assad e Gomes (2022)



Figura 9 – Gráfico de consumo de Nitrato para diferentes taxas de recirculação



Fonte – Assad e Gomes (2022)

Comparativamente, neste trabalho e na pesquisa de Assad e Gomes (2022), há variações significativas, sendo a principal diferença no consumo do nitrato, que ocorreu com uma velocidade muito elevada em relação aos valores de Assad e Gomes (2022). Isso se deve a interação entre o consumo de nitrogênio e o consumo de carbono, onde o presente trabalho considerou a concentração de carbono em ambos os consumos, correlação essa observada na Equação 7 para nitrogênio e na Equação 6 para o carbono, no trabalho de Assad e Gomes (2022) os dois consumos ocorriam de forma independente.

Essa comparação pode ser feita através dos gráficos em que Assad e Gomes (2022) chegaram à remoção de 90% de carbono com 21,6 horas de TDH com recirculação em 0%. Neste trabalho com a mesma recirculação, e com TDH de 19,7 horas foi obtida a mesma porcentagem de DQO removida.

Com a análise de todos os resultados é possível verificar que a taxa de recirculação 0,5 com o TDH de pelo menos 10 h chegaria em resultados satisfatórios para a remoção tanto de carbono quanto de nitrogênio para esse tratamento. Neste sentido, recomenda-se investigações experimentais nesta faixa de operação.

## 6. CONCLUSÃO

Conclui-se neste trabalho que a remoção de nitrogênio está diretamente ligada a remoção do carbono, para acontecer o processo de desnitrificação também é necessário o carbono como reagente e isso pode ser observado nos resultados obtidos nos resultados representados nos gráficos, onde quanto maior a remoção de carbono mais rápido a remoção de nitrogênio perde sua eficiência.

É possível observar também que quando há o aumento demasiado da recirculação, há uma interferência na cinética de conversão de um reator em estado estacionário, entretanto essa situação não seria observada na prática, sendo essa uma característica da modelagem feita.

Outro fator que deve ser levado em conta nesta análise é a dificuldade de estimar corretamente o consumo de carbono e nitrogênio simultaneamente, onde na modelagem foi utilizada uma alternância entre os consumos em pequenos intervalos de tempo para se aproximar mais do fator real em que os consumos acontecem de forma simultânea.

## REFERENCIAS

- AFANDIZADEH, S.; FOUMENY, E. A. Design of Packed Bed Reactors: Guides to Catalyst Shape, Size, and Loading Selection. **Applied Thermal Engineering**, Leeds, ed. 21, p. 669-682, 2001.
- ALVES, F. **Modelagem e simulação de biorreator operando com fungos Trametes Versicolor para produção de enzima lacase**. 2010.
- ARAÚJO, M. M. **Reator combinado anaeróbio-aeróbio de leito fixo para remoção de matéria orgânica e nitrogênio de água residuária de indústria produtora de lisina**. 2006. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2006.
- ASSAD, M.; GOMES, J. Estudo numérico da conversão biológica de carbono e nitrogênio em reator de leito fixo. Universidade Estadual de Ponta Grossa, 2022
- BARANA, A.C.; LOPES, D.D.; MARTINS, T.H.; POZZI, E.; DAMIANOVIC, M.H.R.Z.; NERY, V. del; FORESTI, E. Nitrogen and Organic Matter Removal in an Intermittently Aerated Fixed-bed Reactor for Post-treatment of Anaerobic Effluent from a Slaughterhouse Wastewater Treatment Plant. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, [S.l.], p. 453-459, 2013.
- BARRETO, L., BARROS, F., BONOMO, P., ROCHA, F., AMORIM, J. Eutrofização em rios brasileiros. **Enciclopédia biosfera**, v. 9, n. 16, 2013.
- CALIJURI, M. C.; CUNHA, D. G. F.. **Engenharia Ambiental: Conceitos, Tecnologia e Gestão**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013. 789 p.
- CALLADO, N. H.; CHAGAS, H. C. de A.; DAMIANOVIC, M. H. R. Z. Remoção de matéria orgânica e nitrogênio em reator híbrido anaeróbio/aeróbio/anóxico operado em bateladas sequenciais. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais**, [S. l.], v. 8, n. 2, p. 1–14, 2020. DOI: 10.9771/gesta.v8i2.36947. Disponível em: <https://periodicos.ufba.br/index.php/gesta/article/view/36947>. Acesso em: 26 jun. 2022.
- CUNHA, D. C. da. **Modelagem, simulação e otimização de biorreatores de leito fixo para fermentação/bioprocessos em estado sólido**. 2009. <http://repositorio.furg.br/handle/1/6096>
- CHERNICHARO, Carlos Augusto de Lemos. **Anaerobic Reactors**. London: IWA Publishing, 2007. 175 p. 4 v.
- FOCO, M. L. R.; NOUR, E. A. A. Desempenho de sistema combinado anaeróbio-aeróbio na remoção de nitrogênio no tratamento de esgoto sanitário. **Ciências Exatas e Tecnológicas**, v. 35, n. 2, p.131-138, dez. 2014.
- FOGLER, H.S. **Essentials of Chemical Reaction Engineering**. 2. ed. [S.l.]: Pearson Prentice Hall, 2018. 775 p.
- GRADY JUNIOR, C.P.L.; DAIGGER, G.T.; LOVE, N.G.; FILIPE, C.D.M. **Biological Wastewater Treatment**. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2011. 962 p.

HUILIÑIR, C.; ROMERO, R.; MUÑOZ, C.; BORNHARDT, C.; ROECKEL, M.; ANTILEO, C. Dynamic modeling of partial nitrification in a rotating disk biofilm reactor: Calibration, validation and simulation. **Biochemical Engineering Journal**, 2010.

LIU, Yanchen; SHI, Hanchang; XIA, Lan; SHI, Huiming; SHEN, Tonggang; WANG, Zhiqiang; WANG, Gan; WANG, Yingzhe. Study of Operational Conditions of Simultaneous Nitrification and Denitrification in a Carrousel Oxidation Ditch for Domestic Wastewater Treatment. **Bioresource Technology**, [S.l.], v. 101, p. 901-906, 2010.

LIMA, S., & LIMA, S. S. D. **Modelagem e simulação da produção de hidromel em biorreator em batelada utilizando a levedura *Saccharomyces Cerevisiae***. 2022.

METCALF & EDDY, Inc. **Wastewater engineering: treatment and reuse**. 4.ed. New Delhi: McGraw Hill, 2003

MONOD, J. La technique de culture continue: theory et applications. **Ann. Inst. Pasteur**, 79, 340. 1950.

MULCHANDANI, A.; LUONG, J. H. T.; GROOM, C. Substrate inhibition kinetics for microbial growth and synthesis of poly- $\beta$ -hydroxybutyric acid by *Alcaligenes eutrophus* ATCC 17697. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 30, p. 11-17, 1989.

NARAYANAN, C. M.; NARAYAN, V. Biological Wastewater Treatment and Bioreactor Design: a Review. **Sustainable Environment Research**, [S.l.], p. 29-33, 2019.

NASCIMENTO, T. S.; PEREIRA, R. O.L.; MELLO, H. L. D.; COSTA, J. **Metemoglobinemia: do diagnóstico ao tratamento**. Revista Brasileira de Anestesiologia, Campinas, v. 58, n. 6, p. 651-664, dez. 2008.

ORTEGA, F. S.; ROCHA, K. M.; ZAIAT, M.; PANDOLFELLI, V. C. Aplicação de Espumas Cerâmicas Produzidas via "Gelcasting" em Biorreator para Tratamento Anaeróbico de Águas Residuárias. **Cerâmica**, [S.l.], v. 47, n. 304, p. 199-203, 2001.

OLIVEIRA, J.G.B. **Pós Tratamento de Efluente de UASB em reator de leito empacotado com aeração intermitente em escala piloto**. 2020, 70 f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa 2020

RASE, Howard F. **Fixed-Bed Reactor Design and Diagnostics: Gas-phase Reactions**. Stoneham: Butterworth-Heinemann, 1990. 364 p.

TOSON, Peter; DOSHI, Pankaj; JAJCEVIC, Dalibor. **Explicit Residence Time Distribution of a Generalised Cascade of Continuous Stirred Tank Reactors for a Description of Short Recirculation Time (Bypassing)**. Processes, [S.l.], v. 7, n. 615, p. 1-13, 2019.

VAN HAANDEL, A. C., MARAIS, G. V. R. **O comportamento do sistema de lodo ativado: Teoria e aplicações para projetos e operações**. Campina Grande: Epgraf, 1999.

VON SPERLING, Marcos. **Basic Principles of Wastewater Treatment**. London. IWA Publishing, 2007. 195 p. 2 v.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**.v.1, n. 4. Minas Gerais: Editora UFMG, 2017.

## APÊNDICE A – CÓDIGO EM PYTHON MODELO DO REATOR

```
import matplotlib.pyplot as plt
from sympy import *
from sympy.plotting import *
init_printing(pretty_print=True)
import numpy as np
from math import e
from pprint import pprint
tempos = np.arange(0,1,0.05)
tdhgraf = np.arange(0,24,1.2)
Rmax = 3000
NRMax = 0.06
Ci2 = 512
Ni = 54.5
Cks = 234
Nks = 12
taxasRec = np.arange(0,2.5,0.5)
y = dict()
yNo = dict()
resolucoes = list()
Cx2 = symbols("Cx2")
NOut = symbols("NOut")
N = symbols("NOut")
solucao = 0

def index_in_list(a_list, index):
    return index < len(a_list)

for rec in taxasRec:
    print("rec=", rec)
    y[rec] = list()
    yNo[rec] = list()
    solucaoNo = Ni
    for tempo in tempos:
        print("    tdh= ", tempo)
        DQOOut = Eq(tempo, (((rec*Cx2+Ci2)/(rec+1))-
Cx2) / (Rmax*Cx2/(Cx2+Cks)))
        solucao = solve(DQOOut)[1]
        print("            Eq(Cx2, " + str(solucao) + ")")
        y[rec].append(float(solucao/Ci2)*100)
```

```

    No3Out = Eq(NOut, (((rec * solucaoNo) + Ni) / (rec + 1))* e **(-
NRMax*solucao*tempo))
    solucaoNo = solve(No3Out)[0]
    print("          Eq(N, " + str(solucaoNo) + ")")
    yNo[rec].append((solucaoNo/Ni)*100)

for yrec in y:
    plt.plot(tdhgraf, y[yrec], label=f'rec {yrec:.2f}')

plt.xlabel('TDH (h)')
plt.ylabel('Remoção de DQO (%)')
plt.title("Carbono")
plt.legend()
plt.show()

for yrec in yNo:
    plt.plot(tdhgraf, yNo[yrec], label=f'rec {yrec:.2f}')

plt.xlabel('TDH (h)')
plt.ylabel('Remoção de Nitrato (%)')
plt.title("Nitrogênio")
plt.legend()
plt.show()

```