

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

LUIZ CARLOS ZOBY JÚNIOR

**ESTUDO DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE EFLUENTES INDUSTRIAIS
E DOMÉSTICAS: AVALIAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA E DA MICROBIOTA**

Recife
2018

LUIZ CARLOS ZOBY JÚNIOR

**ESTUDO DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE EFLUENTES INDUSTRIAIS
E DOMÉSTICAS: AVALIAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA E DA MICROBIOTA**

Tese submetida ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Pernambuco, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Doutor em Engenharia Química.

Área de concentração: Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos

Linha de pesquisa: Engenharia Ambiental

Orientador: Prof. Dr. Maurício Alves da Motta Sobrinho

Coorientador: Prof. Dr. António Luís Pereira do Amaral

Recife

2018

Catálogo na fonte
Bibliotecária Maria Luiza de Moura Ferreira, CRB-4 / 1469

Z83e Zoby Júnior, Luiz Carlos.
Estudo de estações de tratamento de efluentes industriais e domésticas: avaliação físico-química e da microbiota / Luiz Carlos Zoby Júnior. - 2018.
99 folhas, il.; tab.

Orientador: Prof. Dr. Maurício Alves da Motta Sobrinho.
Coorientador: Prof. Dr. António Luís Pereira do Amaral.
Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, 2018.
Inclui Referência e Apêndices.

1. Engenharia Química. 2. Análise de componente principal. 3. Análise de correlação. 4. Análise de imagem. 5. Árvore de decisões. 6. Eficiência. 7. Lodo ativado. I. Motta Sobrinho, Maurício Alves da (Orientador). II. Amaral, António Luís Pereira do (Coorientador). III. Título.

UFPE

660.2 CDD (22. ed.)

BCTG/2018-321

ESTUDO DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE EFLUENTES INDUSTRIAIS E DOMÉSTICAS: AVALIAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA E DA MICROBIOTA E ANÁLISE QUIMIOMÉTRICA

Linha de Pesquisa: Engenharia Ambiental

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Pernambuco, defendida e aprovada em 15 de Junho de 2018 pela banca examinadora constituída pelos seguintes membros:

Prof. Dr. Maurício Alves da Motta Sobrinho/DEQ-UFPE
(Orientador)

Prof. Dr. António Luís Pereira do Amaral/DEQ-ISEC-IPC
(Coorientador)

Prof^a. Dr^a. Daniella Carla Napoleão/DEQ-UFPE
(Examinadora Interna)

Dr. Erik Jonne Vieira de Melo/D.ANTIBIÓTICOS-UFPE
(Examinador Externo)

Prof^a. Dr^a. Glória Maria Vinhas/DEQ-UFPE
(Examinadora Interna)

Prof. Dr. Jorge Vinícius Fernandes Lima Cavalcanti/DEQ-UFPE
(Examinador Externo)

Prof^a. Dr^a. Maria de Los Angeles Perez Fernandez Palha/DEQ-UFPE
(Examinadora Externa)

**Aos meus pais, Lula Zoby e Ceiça Viana, à
minha irmã Janaina e minhas sobrinhas, Nanda e Malu.**

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela minha existência, por me dar força e coragem para que pudesse concluir mais esta etapa da minha vida.

Aos meus pais Lula Zoby e Ceíça Viana e minha irmã Janaina que sempre me deram total apoio, incentivo nas minhas decisões e muitos conselhos também. Não poderia deixar de faltar minhas sobrinhas Nanda e Malu e meu cunhado Fernando Prado.

As famílias: Viana de Melo e Zoby. Um especial para Lilita, Leninha, Corinho e Leonardo.

À UFPE. Ao Professor Dr. Maurício Alves da Motta Sobrinho pela orientação e realização deste projeto. A colega de turma Daniella Carla atualmente professora do DEQ pela contribuição neste trabalho. A Jorge Vinicius pela ajuda e dicas passadas. A técnica Ana Maria Bastos. Aos funcionários da pós-graduação em Engenharia Química Priscila Macêdo e Flávio Garrett. Aos amigos de laboratório Thiago Fraga, Monize, Ana Maria, Luiz Neto e Tarsila.

Ao ISEC – IPC (Coimbra – Portugal). Ao Professor António Luís Pereira do Amaral, por ter me dado total apoio na temporada que estive em Portugal, pelos conhecimentos passados, dúvidas tiradas e sugestões para contribuir para conclusão desta tese. Um agradecimento especial para os funcionários do ISEC que convivi e que sempre abriram a sala do laboratório que usava. Ao turco Serhat com quem dividi quarto no alojamento e tive oportunidade de praticar inglês.

Aos meus amigos: Henrique, Breno, Marema, Fernando, Marcilio, Pérsio, Rafaella, Luiz Cláudio, Verônica, Juliana Figueirôa, Rafael Formiga, Edgar, Rita, Danielle Pires, André Diego, Josemar, Carol Maia e Léo Estevam.

À minha namorada Priscila Madeira.

Aos amigos conseguiram que eu coletasse efluentes nas indústrias onde trabalham.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da UFPE pela oportunidade concedida. A FACEPE e a CAPES pela bolsa concedida durante todo o curso.

RESUMO

A identificação dos micro-organismos presentes no lodo ativado tem sido uma ferramenta útil na identificação da qualidade do efluente tratado e para o controle operacional, através das espécies de protozoários e metazoários que ocorrem nesses ecossistemas. O presente estudo apresenta um monitoramento de estações de tratamento de efluentes (ETEs) domésticas e industriais, localizadas no estado de Pernambuco (Brasil), avaliando-se não apenas os parâmetros físico-químicos, como a microfauna e sua correlação com a eficiência da ETE. Foram estudadas 6 estações, das quais 2 de efluentes domésticos e 4 de efluentes industriais, com apenas 1 no interior do estado. As amostras de efluentes foram coletadas na entrada e na saída da estação para se verificar a eficiência das mesmas. Já as amostras de lodo ativado, coletadas no tanque de aeração, foram utilizadas para observar a população de protozoários e metazoários. A caracterização dos efluentes foi realizada de acordo com o *Standard Methods*. Apenas a coleta 1 do abatedouro de aves não apresentou o pH na faixa recomendada pela Resolução CONAMA 430/2011, os demais parâmetros estavam de acordo com a resolução. Posteriormente foi efetuado um estudo da Análise de Componente Principal (ACP) e de Análise de Correlação (AC) a partir destes parâmetros. Na análise ACP, para os efluentes de entrada, foi possível relacionar os parâmetros físico-químicos com as coletas com os maiores valores para esses parâmetros. Já as coletas de saída encontraram-se agrupadas, longe da série dos sólidos e dos parâmetros representando a carga orgânica e em termos de nitrogênio, demonstrando a redução obtida na maior parte destes parâmetros. Verificou-se ainda que os parâmetros que apresentaram maiores fatores de correlação na AC, também estavam próximos em alguma das PC's na ACP. O Índice Volumétrico do Lodo (IVL) foi maior para a indústria de processamento de amido, indiciando *bulking* filamentosos ou viscosos, e menor para a coleta 1 do abatedouro de aves, indiciando má formação da estrutura do floco e possível *washout* da biomassa. A identificação dos micro-organismos foi realizada através de árvore de decisões (DT) utilizando o *Matlab*, com validação visual. Os protozoários identificados em maior quantidade foram o *Euplotes* sp., *Aspidisca cicada*, *Vorticella aquadulcis*, *Vorticella microstoma*,

Vorticella sp., *Trachelophyllum* sp., *Arcella* sp., *Trithigmostoma* sp., *Opercularia* sp., amebas nuas e metazoários. Com o lodo ativado do efluente fornecido por uma indústria de processamento de amido, foi utilizado um reator canal simulando uma ETE. Este reator foi monitorado durante 30 dias, alimentado por um efluente sintético com DQO de 761 mg O₂.L⁻¹ e obtida uma remoção média de DQO de 80%. A microfauna presente em maior número foi *Monogononta* e *Paramecium* sp.. Pôde-se concluir que as correlações entre micro-organismos e funcionamento da ETE existentes na literatura para Europa e América do Norte são válidas para as ETEs estudadas e que a maioria dos parâmetros das ETEs estudadas atendem à legislação para descarte de efluentes. A ferramenta de identificação das espécies presentes mostrou-se eficiente, fornecendo informações sobre problemas e eficiências nas ETEs.

Palavras-Chave: Análise de componente principal. Análise de correlação. Análise de imagem. Árvore de decisões. Eficiência. Lodo ativado.

ABSTRACT

The identification of the microorganisms present in the activated sludge has been a useful tool to identify the quality of the treated effluent and to the operational control through the protozoan and metazoan species that occur in these ecosystems. The present study presents the monitoring of domestic and industrial effluent treatment plants (WWTPs) located in the state of Pernambuco (Brazil), evaluating not only the physical-chemical parameters, but also the microfauna and its correlation with the WWTP efficiency. Six plants were studied, including two with domestic effluents and four with industrial effluents. The effluent samples were collected in the entry and exit of the plant to verify their efficiency. The activated sludge samples, collected in the aeration tank, were used to observe the microorganisms population. The characterization of the effluents was performed according to *Standard Methods*. Only the first sample collection of the poultry slaughterhouse did not present the pH in the range recommended by the Brazilian regulatory resolution (CONAMA 430/2011), with the other parameters being in agreement with the resolution. Subsequently, a Principal Component Analysis (PCA) and Correlation Analysis (CA) study were carried out from these parameters. In the PCA analysis, it was possible to relate the physico-chemical parameters of the incoming effluents to the sample collections with the highest values for those parameters. On the other hand, the outgoing effluents sample collections were grouped far from the solids series and the parameters representing the organic and nitrogen loads, demonstrating the reduction obtained in most of these parameters. Furthermore, the parameters that presented higher correlation factors in the CA were also close in some of the PCs in the PCA. The Volumetric Sludge Index (SVI) was higher in the starch processing industry, indicating filamentous or viscous bulking, and lower for the poultry slaughterhouse first sample collection, indicating poor floc structure formation and possible biomass washout. The identification of the microorganisms was performed through a decision tree (TD) using Matlab, with visual validation. The protozoa identified in greater numbers were *Euplotes* sp., *Aspidisca cicada*, *Vorticella aquadulcis*, *Vorticella microstoma*, *Vorticella* sp., *Trachelophyllum* sp., *Arcella* sp., *Trithigmostoma* sp., *Opercularia* sp., naked amoebas and metazoa. With the activated sludge

effluent provided by a starch processing industry, a channel reactor simulating a WWTP was operated. This reactor was monitored for 30 days and fed with a synthetic effluent with a COD of 761 mg O₂.L⁻¹. An average COD removal of 80% was obtained and the most present microorganisms were *Monogononta* and *Paramecium* sp. It was concluded that the correlations found in the literature between the microorganisms present in the WWTP aeration tanks for Europe and North America are valid for the studied WWTPs and that most of the parameters of the studied WWTPs comply with the legislation for effluent disposal. The identification tool of the present species proved to be efficient, providing information about problems and efficiencies in WWTPs.

Keywords: Activated sludge. Correlation analysis. Decisions tree. Efficiency. Image analysis. Principal component analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma de um processo de uma ETE por lodo ativado.....	22
Figura 2 – Evolução dos grupos de micro-organismos em função da idade do lodo	25
Figura 3 – Reator descontínuo	42
Figura 4 – Esquema do sistema utilizando o reator canal	43
Figura 5 – Sistema de aquisição de imagens	44
Figura 6 – Representação do conjunto lâmina e lamínula para aquisição das imagens	44
Figura 7 – Os passos principais do programa: imagem original (a), imagem pré-tratada (b), região de interesse (c), a imagem binária após a segmentação (d), imagem final (e)	45
Figura 8 – Árvore de decisões	46
Figura 9 – Valores dos loadings (parâmetros analisados) em PC1 e PC2. (Onde: pH: potencial hidrogeniônico, N-NO ₃ : nitrato, N-NH ₃ : nitrogênio amoniacal, DBO ₅ : demanda biológica de oxigênio, ST: sólidos totais, SF: sólidos fixos, SV: sólidos voláteis, SST: sólidos suspensos totais, SSF: sólidos suspensos fixos, SSV: sólidos suspensos voláteis)	55
Figura 10 – Valores dos scores (amostras estudadas) em PC1 e PC2. (Onde: ent: entrada, sai: saída, AMIDO: ETE processamento de amido, HIGIENE: ETE indústria de produtos de higiene pessoal, ABATE: ETE do abatedouro de aves, PEÇA: ETE indústria de peças automotivas, PEQUENA: ETE doméstica pequeno porte e GRANDE: ETE doméstica de grande porte).....	56
Figura 11 – Imagens de amebas nuas, amebas com teca e grandes flagelados	64
Figura 12 – Imagens de ciliados sésseis	65
Figura 13 – Imagens de ciliados móveis de fundo	65
Figura 14 – Imagens de ciliados nadadores	66

Figura 15 – Imagens de metazoários	66
Figura 16 – Micro-organismos identificados para as estações pequena e grande	67
Figura 17 – Grupos de micro-organismos nas estações pequena e grande. (Onde: AME: amebas nuas, ATC: amebas com teca, SES: ciliados sésseis, CMF: ciliados móveis de fundo, CND: ciliados nadadores, MET: metazoários e DES: desconhecidos)	68
Figura 18 – Micro-organismos identificados para a indústria de peças automotivas	69
Figura 19 – Grupos de micro-organismos na estação da indústria de peças automotivas. (Onde: AME: amebas nuas, ATC: amebas com teca, SES: ciliados sésseis, CMF: ciliados móveis de fundo, CND: ciliados nadadores, FLA: flagelados, MET: metazoários e DES: desconhecidos)	70
Figura 20 – Micro-organismos identificados para estação do abatedouro de aves	71
Figura 21 – Grupos de micro-organismos na estação do abatedouro de aves. (Onde: ATC: amebas com teca, SES: ciliados sésseis, CMF: ciliados móveis de fundo, CND: ciliados nadadores e DES: desconhecidos)	72
Figura 22 – Micro-organismos identificados para indústria de produtos de higiene pessoal	73
Figura 23 – Grupos de micro-organismos na estação da indústria de produtos de higiene pessoal. (Onde: ATC: amebas com teca, SES: ciliados sésseis, CMF: ciliados móveis de fundo, CND: ciliados nadadores, MET: metazoários e DES: desconhecidos)	74
Figura 24 – Monitoramento da DQO da entrada e saída, DBO ₅ da saída e a remoção da DQO para o reator canal	76
Figura 25 – Monitoramento do pH, condutividade e oxigênio dissolvido para o reator canal	77
Figura 26 – Monitoramento do cloreto de sódio para o reator canal	77

Figura 27 – Micro-organismos identificados no reator canal	78
Figura 28 – Grupos de micro-organismos no reator canal. (Onde: AME: amebas nuas, ATC: amebas com teca, SES: ciliados sésseis, CMF: ciliados móveis de fundo, CND: ciliados nadadores, MET: metazoários e DES: desconhecidos)	78
Figura 29 – Grupos de micro-organismos identificados durante o monitoramento do reator canal. (Onde: AME: amebas nuas, ATC: amebas com teca, SES: ciliados sésseis, CMF: ciliados móveis de fundo, CND: ciliados nadadores e MET: metazoários)	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Condições do funcionamento de uma ETE por lodo ativado	27
Tabela 2 –	Descrição das coletas realizadas	40
Tabela 3 –	Descrição tipo de indústria e valor da remoção da DQO exigido pelo CPRH	41
Tabela 4 –	Caracterização físico-química dos efluentes das estações de tratamento doméstico	48
Tabela 5 –	Caracterização físico-química do efluente da estação de tratamento da indústria de peças automotivas	50
Tabela 6 –	Caracterização físico-química do efluente da estação de tratamento do abatedouro de aves	51
Tabela 7 –	Caracterização físico-química do efluente da estação de tratamento da indústria de produtos de higiene pessoal .	52
Tabela 8 –	Caracterização físico-química do efluente da estação de tratamento da indústria de processamento de amido	53
Tabela 9 –	Valores dos pesos dos parâmetros físico-químicos estudados em PC1 e PC2	54
Tabela 10 –	Análise de correlação dos parâmetros das estações	60
Tabela 11 –	Comparação AC de de Andrade <i>et al.</i> (2007) com a presente tese	61
Tabela 12 –	Análises do lodo ativado	62
Tabela 13 –	Grupos de micro-organismos	63
Tabela 14 –	Micro-organismos presentes nas ETES	64
Tabela 15 –	Valores médios e desvios padrões para o monitoramento do reator canal	75

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABATE	Abatedouro
AC	Análise de Correlação
ACP	Análise de Componentes Principais
AD	Análise Discriminante
AMB	Ameba
ARC	<i>Arcella</i> sp.
ATC	Ameba com teca
ASP	<i>Aspidisca cicada</i>
CAR	<i>Carchesium</i> sp.
CLP	<i>Colpoda</i> sp.
COL	<i>Colpidium</i> sp.
CMF	Ciliado móveis de fundo
CND	Ciliado nadador
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CPRH	Companhia Pernambucana de Recursos Hídricos
DBO ₅	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DIG	Digononta
DQO	Demanda Química de Oxigênio
DT	<i>Decision trees</i>
DRP	<i>Drepanomonas</i> sp.
EBC	<i>European Brewery Convention</i>
EPI	<i>Epistylis</i> sp
ETE	Estação de Tratamento de Efluente
EUG	<i>Euglypha</i> sp
EUP	<i>Euplotes</i> sp.
FC	Fator de Correlação
FISH	<i>Fluorescence in Situ Hybridization</i>
GLA	<i>Glaucoma</i> sp.
IVL	Índice Volumétrico do Lodo
MLSS	Licor Misto de Sólidos em Suspensão
MON	Monogononta

MPCA	Análise de Componente Principal Multi-Pista
MRA	Análise Multi-Resolução
NEM	Nematoda
NTK	Nitrogênio Total de Kjeldahl
NTU	<i>Nephelometric Turbidity Unit</i>
OD	Oxigênio Dissolvido
OPE	<i>Opercularia</i> sp.
PAR	<i>Paramecium</i> sp.
PC	Principal Componente
PER	<i>Peranema</i> sp.
pH	Potencial Hidrogeniônico
PLS	<i>Partial least squares</i>
RNA	Rede Neural Artificial
SBI	<i>Sludge Biotic Index</i>
SBR	<i>Sequential Bath Reactor</i>
SF	Sólidos Fixos
SI	<i>Sludge Index</i>
SS _{dec30}	Volume do lodo decantado em 30 minutos
SSF	Sólidos Suspensos Fixos
SST	Sólidos Suspensos Totais
SST _{lodo}	Sólidos Suspensos Totais do lodo
SSV	Sólidos Suspensos Voláteis
ST	Sólidos Totais
STD	Sólidos Totais Dissolvidos
STY	<i>Stylonychia</i> sp.
SV	Sólidos Voláteis
TRA	<i>Trachelophylum</i> sp.
TRI	<i>Trithigmostoma</i> sp.
TRO	<i>Trochilia</i> sp.
VAQ	<i>Vorticella aquadulcis</i>
VCT	<i>Vorticella</i> sp.
VMC	<i>Vorticella microstoma</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
2	OBJETIVOS	20
2.1	Objetivo geral	20
2.2	Objetivos específicos	20
3	REVISÃO DA LITERATURA	21
3.1	Esgoto	21
3.2	Estação de tratamento de efluentes por lodo ativado	21
3.3	Micro-organismos	23
3.4	Análise de imagem por microscopia óptica	31
3.5	Técnicas de estatísticas de análise multivariadas	35
4	MATERIAIS E MÉTODOS	39
4.1	Estações de tratamento estudadas	39
4.2	Coletas e análises	39
4.3	Análises das estações de tratamento de efluente	40
4.4	Reatores utilizados para conservação dos micro-organismos	42
4.5	Aquisição das imagens	43
4.6	Tratamento das imagens	44
4.7	Linguagens utilizadas para tratamento dos dados	45
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
5.1	Caracterizações das amostras de efluentes brutos e tratados	47
5.1.1	<i>Caracterizações dos efluentes domésticos (PEQUENA e GRANDE)</i>	47
5.1.2	<i>Caracterização dos efluentes industriais</i>	49
5.1.2.1	<i>Indústria de Peças Automotivas (PEÇA)</i>	49
5.1.2.2	<i>Abatedouro de aves (ABATE)</i>	51
5.1.2.3	<i>Produtos de Higiene Pessoal (HIGIENE)</i>	52
5.1.2.4	<i>Processamento de Amido (AMIDO)</i>	53
5.2	Análise de componentes principais para os dados das caracterizações das estações de tratamento de efluentes	54

5.3	Análise de correlação para os dados das caracterizações das estações de tratamento de efluentes	59
5.4	Índice volumétrico do lodo (IVL)	61
5.5	Identificações dos micro-organismos	62
5.6	Monitoramento do Reator Canal	75
6	CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS	81
6.1	CONCLUSÕES	81
6.2	PERSPECTIVAS	83
	REFERÊNCIAS	85
	APÊNDICE A - Caracterização dos efluentes das estações	97
	APÊNDICE B - Matriz de Correlação para a Caracterização dos efluentes das estações	98
	APÊNDICE C - Monitoramento reator canal	99

1 INTRODUÇÃO

Um exame microscópico do lodo ativado revela que ele é formado por uma população heterogênea de micro-organismos, responsáveis pela biodegradação dos substratos orgânicos. Essa população pode sofrer variações das condições do meio, e mudar continuamente de acordo com a variação na composição do esgoto e condições ambientais, constituindo-se num importante parâmetro do estado de funcionamento do processo, sendo assim, um bom indicador biológico. O lodo ativado é composto por uma população bacteriana agregada sob a forma de flocos biologicamente ativos que degradam o substrato complexo ou simples (ZOBY JÚNIOR, 2011).

Mesquita *et al.* (2016) utilizaram a análise quantitativa de imagem microscópica para caracterizar a comunidade microbiana e avaliar o funcionamento da Estação de Tratamento de Efluente (ETE) por lodo ativado, sendo este um método rápido para avaliação da estação quando comparado com os métodos tradicionais (avaliação microscópica manual, com especialista e com uso de reagentes) que requerem mais trabalho, tempo e geram resíduos para o meio ambiente. As comunidades bacterianas e a identificação de protozoários por análise microscópica já é rotineiramente empregada em um número considerável de casos, como para avaliação dos agregados e propriedades filamentosas das bactérias. Estes procedimentos são capazes de fornecer uma quantidade cada vez maior de dados para realizar uma análise dos processos de tratamento de efluentes (MESQUITA *et al.*, 2013).

O procedimento de análise de imagem associado a técnicas quimiométricas para avaliar o funcionamento da ETE, pode fornecer uma identificação precoce e uma prevenção de problemas operacionais (AMARAL *et al.*, 2013).

Nos sistemas por lodos ativados, para se alcançar altos níveis de remoção dos poluentes orgânicos, inorgânicos e manter a eficiência na sedimentação da matéria particulada (sólidos e agregados microbianos) no decantador secundário, é necessário compreender a importância da microfauna do sistema nos processos de tratamento dos efluentes. Estudos demonstraram que a estrutura da comunidade de micro-organismos que se desenvolvem no tanque de aeração é um valioso instrumento de diagnóstico

para avaliação do desempenho das estações de tratamento de efluentes por lodo ativado (NICOLAU *et al.*, 1997, 1999; NICOLAU, 2002).

A motivação para o presente trabalho foi utilizar a análise de imagens dos protozoários e metazoários, para fazer um diagnóstico do funcionamento de uma estação de tratamento por lodo ativado, uma vez que é um processo em que se obtém uma resposta mais rápida quando comparado com as análises clássicas como Demanda Química de Oxigênio (DQO), Demanda Biológica de Oxigênio (DBO₅), série dos sólidos, série dos compostos nitrogenados, entre outras.

2 OBJETIVOS

Neste capítulo serão apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos da presente tese de doutorado.

2.1 Objetivo geral

O objetivo dessa pesquisa foi a identificação dos micro-organismos através de técnicas de análise de imagens para avaliar estações de tratamento de efluente por lodo ativado.

2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar os efluentes para avaliar seus parâmetros físico-químicos;
- Reconhecer e identificar espécies de protozoários e metazoários presentes no lodo ativado;
- Utilizar técnicas estatísticas de análise multivariada: árvores de decisões (do inglês *decision trees* – DT), análise de componentes principais (ACP) e análise de correlação (AC);
- Estudar a correlação dos micro-organismos com os parâmetros físico-químicos;
- Monitorar o reator canal.

3 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo será apresentada uma revisão da literatura com os principais aspectos referentes ao tema da presente tese de doutorado.

3.1 Esgoto

Nuvolari *et al.* (2011) definem que o esgoto é um líquido formado basicamente por água quando não contém resíduos industriais, com composição de aproximadamente: 99,87% de água, 0,04% de sólidos sedimentáveis, 0,02% de sólidos não sedimentáveis e 0,07% de substâncias dissolvidas. Os autores consideram o esgoto doméstico a parte que contém água para higiene e necessidades fisiológicas humanas e o esgoto industrial a fração referente ao despejo líquido resultante dos processos industriais.

3.2 Estação de tratamento de efluentes por lodo ativado

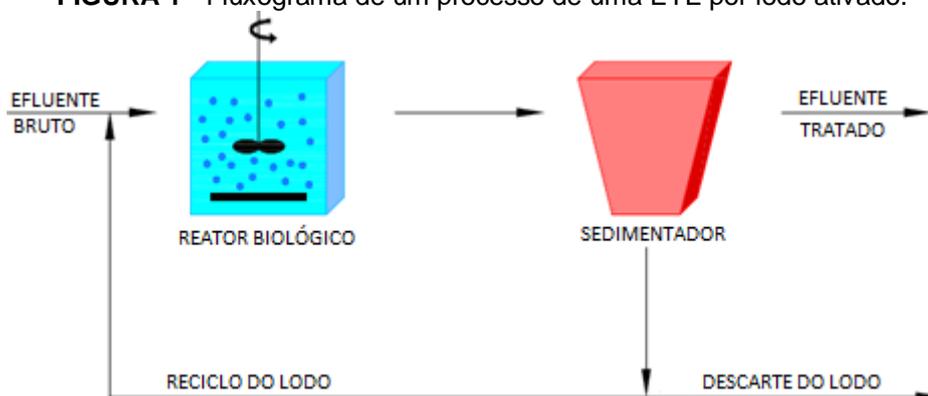
Os processos de tratamento de efluentes por lodos ativados foram utilizados pela primeira vez no começo do século XX em Manchester na Inglaterra. Eles foram empregados empiricamente para o tratamento de esgotos, utilizando oxigênio para acelerar o processo de oxidação dos poluentes (DA SILVA, 2008).

O tratamento de efluentes geralmente é realizado pela utilização de processos físicos, químicos e biológicos. Os processos físicos incluem triagem, sedimentação, filtração e flotação; os processos químicos englobam processos de desinfecção, adsorção e precipitação, e os processos biológicos envolvem a atividade microbiana, responsável pela decomposição da matéria orgânica e remoção de nutrientes. A escolha do processo para ser utilizado vai depender do tipo de efluente que se pretende tratar, de sua biodegradabilidade, da produção de lodos e presença de compostos tóxicos. Devido ao baixo custo de funcionamento, eficiência e eliminação de poluição secundária serem sistemas simples, os processos biológicos têm sido preferidos para o tratamento secundário de efluentes domésticos, urbanos e para alguns tipos de despejos industriais (AMARAL, 2013; HE *et al.*, 2017).

Os processos de tratamento de efluentes comportam essencialmente duas etapas de processamento da corrente líquida: a etapa de biotransformação e a etapa de separação do efluente líquido tratado, sendo possível efetuar o tratamento em processo contínuo (lodo ativado convencional) ou em batelada com reator sequencial em batelada (do inglês *sequencing batch reactor* – SBR), (METCALF e EDDY, 2003).

O tratamento biológico, para efluente mais comum, é o processo de lodo ativado, que consiste na utilização de uma comunidade de bactérias filamentosas e formadoras de flocos, responsável pela oxidação da matéria orgânica num tanque de aeração. Posteriormente, a biomassa agregada presente no tanque de aeração é separada do efluente tratado, por meio de sua capacidade de sedimentação num decantador secundário (sedimentador ou clarificador). Parte da biomassa sedimentada é recirculada para o tanque de aeração de modo a ser mantida uma concentração adequada dos micro-organismos (AMARAL, 2013). Na Figura 1 tem-se o fluxograma de uma parte do processo de uma estação de tratamento de efluentes (ETE) por lodo ativado.

FIGURA 1 - Fluxograma de um processo de uma ETE por lodo ativado.



Fonte: Autor (2018).

O lodo ativado apresenta uma constituição de mais de 95% de água e os seguintes subprodutos gerados no tratamento: material agregado, areia, espuma, lodo primário, lodo secundário e lodo químico (caso tenha etapa físico-química) (ANDREOLI *et al.*, 2014).

O sistema de lodo ativado é o principal processo biológico para tratamento de efluentes domésticos e industriais caracterizados por

apresentarem uma carga orgânica biodegradável e produtos nitrogenados. Trata-se de um processo de tratamento que apresenta baixo custo, apresenta uma eficiência entre 95 e 98% na remoção de carga orgânica, reduzindo as cargas poluidoras a níveis que podem até possibilitar o reaproveitamento das águas (HAMMER e HAMMER, 2006; WIESMANN *et al.*, 2007; MORETTI *et al.*, 2016).

As principais vantagens do tratamento biológico por lodo ativado são as seguintes: elevadas remoções de matéria orgânica, turbidez e material em suspensão, oxidação da amônia (nitrificação biológica), maior flexibilidade de operação, baixos requisitos de área e a possibilidade de remoção de nitrogênio e fósforo. Contudo, este sistema apresenta também desvantagens: grande produção de biomassa, elevado custo energético e de instalação, mecanização mais sofisticada, exige operadores treinados e problemas com ruídos e aerossóis (JORDÃO e PÊSSOA, 2005).

O processo microbiano endógeno tem um papel significativo no projeto e operação de plantas de lodo ativado. Como o sistema de lodo ativado é periódico, foi proposta uma configuração onde as etapas de biodegradação e de decantação ocorrem no mesmo tanque, denominado de SBR. Ele tem sido bastante usado para tratamento de efluentes industriais e domésticos desde a sua invenção nos anos 1980 (NI *et al.*, 2011).

3.3 Micro-organismos

Com o aumento da população humana, o tratamento biológico de efluente é cada vez mais importante, tendo como objetivo de manter alta densidade e os níveis de atividades dos micro-organismos. As estações de tratamento por lodo ativado são formadas por um tanque de aeração, que é o reator biológico, onde se encontram os micro-organismos com a função de realizar a conversão biológica dos contaminantes (MESQUITA *et al.*, 2013).

O lodo ativado consiste em uma complexa associação de micro-organismos composta por bactérias, protozoários, fungos e micrometazoários que oxidam os compostos orgânicos e inorgânicos presentes nos efluentes (BENTO *et al.*, 2005; DAVIES, 2005). A comunidade estabelecida nesse sistema é dinâmica e fundamental ao tratamento, sendo que cada espécie tem

sua importância para o bom funcionamento do sistema de tratamento (AMMAN *et al.*, 1997).

Depois das bactérias, os protozoários são os micro-organismos mais importantes numa estação de tratamento de efluentes. A sua sensibilidade às variações das condições do meio (concentração do substrato, oxigênio dissolvido e presença de substâncias tóxicas), tornam os protozoários excelentes indicadores do funcionamento da estação (DA MOTTA *et al.*, 2003). De fato, a relação entre protozoários e os parâmetros físico-químicos e operacionais revelaram que a estrutura dos micro-organismos pode ser um indicador da eficiência da estação (MADONI, 2011).

Nesses sistemas, a componente biótica é representada pelos “decompositores” (bactérias e fungos) que são responsáveis pela oxidação da matéria orgânica dissolvida, e pelos “consumidores”, dentre os quais se encontram os protozoários heterotróficos (flagelados, ciliados, rizopódios ou amebas) e pequenos metazoários (rotíferos, nemátodos e gastrotríquios) que se alimentam de bactérias e outros organismos (MADONI, 1994). As bactérias aglomeram-se, geralmente, sob a forma de flocos bacterianos. Em torno destes flocos e no seio do líquido, encontram-se os protozoários e metazoários. Estes grupos possuem relações de predação, competição e canibalismo que criam, ao longo do tempo, oscilações e sucessões das populações no sentido de se alcançar uma estabilidade dinâmica nos sistemas de tratamento, as quais podem ser agrupadas em três fases distintas. Nessas fases o sistema de tratamento apresenta uma carga orgânica muito elevada, uma carga média e uma fase com a aeração prolongada (MADONI, 1994; NICOLAU *et al.*, 1997).

Como citado, a biota presente no lodo ativado de uma ETE é composta principalmente de bactérias, protozoários e metazoários. Na Figura 2 pode-se observar a evolução da população dos micro-organismos desde o momento de partida do sistema até a fase de estabilização no tanque de aeração, onde pode ser observado: (1) fase inicial, caracterizada pela presença de espécies típicas do afluente – flageladas e ciliados nadadores – independente dos lodos ativados e que estão continuamente entrando no sistema; (2) segunda fase, caracterizada pelo forte desenvolvimento de ciliados típicos – móveis de fundo e sésseis – e pelo rápido declínio das espécies pioneiras, nesta fase a comunidade apresenta uma grande riqueza em espécies, mas a sua

composição varia com o progressivo aumento da quantidade de lodo; (3) terceira fase ou fase de estado estacionário caracterizada por uma microfauna, cuja composição e estrutura refletem as condições estáveis decorrentes do balanço entre a carga orgânica e os lodos produzidos, removidos e reciclados (CANLER *et al.*, 1999).

FIGURA 2 - Evolução dos grupos de micro-organismos em função da idade do lodo.



Fonte: adaptado de CANLER *et al.* (1999).

A colonização do lodo inicia-se com as bactérias, flagelados e ciliados nadadores livres, que vêm geralmente com o esgoto para ser tratado. Em seguida, à medida que a idade do lodo ativado aumenta os ciliados móveis de fundo e os ciliados sésseis (fixos) começam a instalar-se. Salienta-se ainda que os móveis de fundo e principalmente os ciliados sésseis retornam pelo canal de recirculação, enquanto, que os nadadores livres e os flagelados podem sair junto com o efluente final (DA MOTTA *et al.*, 2001a). Sendo estes micro-organismos importantes, participando no equilíbrio do ecossistema das estações e sendo bastante sensíveis a processos físicos, químicos e operacionais (AMARAL *et al.*, 2004).

Comparando-se a comunidade bacteriana no esgoto afluente, lodo (ativado e retorno) e água efluente, observou-se que a comunidade bacteriana do lodo era completamente diferente daquela do afluente, o que sugere que as populações afluentes têm pouco impacto sobre a comunidade bacteriana do lodo ativado no biorreator de uma estação de tratamento de efluentes (LIU *et al.*, 2007). Por outro lado, por apresentar um ambiente com uma agitação constante e uma elevada turbidez o ecossistema do lodo ativado não se apresenta adequado para macrofauna aquática e algas (GOMES, 2009).

Outro critério muito utilizado na avaliação do funcionamento de uma ETE em função da densidade e variedade da microfauna é o Índice Biótico de Lodo

(do inglês *Sludge Biotic Index - SBI*) desenvolvido por Madoni (1994). Esse índice se baseia nas diferentes sensibilidades reveladas por cada grupo da microfauna em relação aos parâmetros físico-químicos e operacionais prevalentes no sistema, bem como na abundância e diversidade da microfauna. Este mesmo autor determinou que os protozoários eram bons indicadores da qualidade do tratamento dos sistemas por lodo ativado, porém sensíveis aos processos físicos, químicos e operacionais, tendo correlacionado as espécies ou grupos de micro-organismos presentes com vários parâmetros operacionais. De fato, os micro-organismos *Carchesium* sp., *Zoothamnium* sp. e *Vorticella aquadulcis* (entre outros) estavam relacionados com um efluente de boa qualidade e uma boa aeração no sistema. Já a *Opercularia* sp. e *Vorticella microstoma* (entre outros) apresentaram um efluente de uma qualidade ruim e uma aeração deficiente. Vários outros trabalhos, apresentados em seguida, envolveram ainda o estudo dos protozoários.

Lee *et al.* (2004) determinaram quais os micro-organismos relacionados com a eficiência do tratamento de efluente por lodo ativado através de análises estatísticas; tendo selecionado 22 espécies de ciliados o que representou 50% dos protozoários presentes representados por *Vorticella* sp., *Carchesium* sp., *Opercularia* sp. e *Epistylis* sp.. A *Vorticella microstoma* apresentou a maior população durante o experimento; *Vorticella campanula* estava relacionada com a baixa concentração de demanda bioquímica de oxigênio (DBO₅); *Carchesium* sp. e *Opercularia microdiscos* indicaram a falta de oxigênio dissolvido no tanque de aeração e os protozoários carnívoros como *Litonous lamella* e *Amphileptus* sp. estavam relacionados com o Índice Volumétrico do Lodo (IVL). Este indicador representa o volume em mL ocupado por um grama de sólido em suspensão, indicando qualitativamente os padrões de sedimentabilidade do lodo.

Zhou *et al.* (2006) analisaram 50 amostras de lodo ativado de tanques de aeração de uma estação na China no período de 1 ano e conseguiram determinar 94 espécies de ciliados, 40 espécies de amebas e 13 espécies de grandes flagelados. Dentre os micro-organismos encontrados a *Aspidisca cicada* estava presente em 98% das amostras analisadas. As *Vorticella convallaria* e *Arcella hemisphaerica* estavam relacionadas com o bom desempenho da estação. Por outro lado o elevado número de *Litonotus*

obtusus relacionou-se positivamente com condições precárias de fixação do lodo. Num estudo posterior, estes autores compararam a incidência dos grupos destes micro-organismos com os parâmetros físico-químicos e operacionais de uma estação de tratamento de efluente por lodo ativado, com os ciliados fixos e os móveis de fundo a serem os mais frequentes. Os ciliados móveis e as tecamebas apresentaram uma forte relação com a DBO₅, sendo estes dois grupos bons bioindicadores, a quantidade deles diminuía à medida que o processo produzia efluente de com qualidades abaixo do esperado (ZHOU *et al.*, 2008).

Na Tabela 1 estão dispostos a relação entre o grupo de protozoários dominante e a eficiência biológica da estação, assim como possíveis causas do mau funcionamento do sistema.

TABELA 1 - Condições do funcionamento de uma ETE por lodo ativado.

Grupo Dominante	Eficiência	Causa Possível
Pequenos Flagelados	Baixa	Baixa oxigenação do meio, entrada de substâncias em vias de fermentação
Pequenas amebas nuas e flagelados	Baixa	Carga elevada e/ou dificilmente degradável
Pequenos ciliados nadadores	Mediana	Baixo tempo de residência e baixa oxigenação do meio
Grandes ciliados nadadores	Madiana	Carga demasiado alta
Ciliados sésseis	Baixa	Fenômenos transitórios
Ciliados móveis de fundo	Boa	
Ciliados sésseis + móveis de fundo	Boa	
Amebas com teca	Boa	Carga baixa e/ou diluída e boa nitrificação

Fonte: adaptado de NICOLAU *et al.* (1997).

Papadimitriou *et al.* (2007) verificaram que a presença dos micro-organismos *Tokophrya* sp. e *Podophrya* sp. estavam associadas com a eficiência da remoção de fenol, já a presença de *Chilodonella* sp. e *Colpidium* sp. estavam relacionada com uma boa remoção de cianeto. Papadimitriou *et al.* (2010) verificaram a importância da comunidade da microfauna, observaram que o aumento da presença de espécies de protozoários estava relacionado com a taxa de remoção de coliformes totais e fósforo; e a remoção de carga orgânica e nitrogênio inorgânico foram maiores quando aumentou a

diversidade de protozoários na interface solo/água. Já Tyagi *et al.* (2008) compararam dois sistemas de lodo ativado sendo um convencional e outro com aeração prolongada. No sistema convencional os ciliados *Euplotes* e *Chilodonella* foram os observados com mais frequência, associados com a baixa concentração de DBO₅, sólidos suspensos e coliformes. No sistema com aeração prolongada foram encontrados os mesmos ciliados em menor quantidade, apresentando uma menor remoção de DBO₅, sólidos suspensos e uma maior remoção de coliformes.

Fiałkowska e Pajdak-Stós (2008) realizaram experimentos com o rotífero *Lecane inermis*, alimentando-se das bactérias filamentosas, sendo capazes de reduzir a quantidade no lodo ativado e melhorando a sedimentação do lodo. Segundo estes autores os rotíferos se alimentam mais das bactérias *Microthrix parvicella* que *Actinomyces* e apresentam a capacidade de sobreviver e proliferar quando são transferidos para outro ambiente não habitado antes por eles.

Arévalo *et al.* (2009) observaram o desenvolvimento de protozoários e identificaram um grande número de micro-organismos indicadores da má qualidade da água, como pequenos flagelos e ciliados livres, principalmente nas fases de estabilização da biomassa. O SBI apresentou um papel útil no controle da estabilização do lodo ativado e para a identificação de problemas que surgem no processo, tais como a oxigenação incorreta e a presença de substâncias tóxicas. Também Oliveira *et al.* (2009) utilizaram a análises microscópicas dos micro-organismos presentes no lodo ativado do tanque de aeração de uma estação de tratamento industrial, apenas com identificação visual para identificar os ciliados de vida livre, ciliados livres nadadores, ciliados pedunculados, suctórias, flagelados, amebas, nematóides e rotíferos.

Drzewicki e Kulikowska (2011) encontraram com mais frequência em uma estação de tratamento de efluente doméstico os micro-organismos *Opercularia coarctata*, *Vorticella infusionum*, *Vorticella convallaria* e *Aspidisca cicada*. O aumento do número de *Vorticella infusionum*, *Opercularia coarctata* e pequenos flagelados, ocorrido quando o efluente recebia o esgoto de fossa séptica, levou a que fossem considerados como os mais sensíveis indicadores da qualidade do efluente e desestabilização do processo. Dubber e Gray (2011) determinaram que a presença da *Aspidisca cicada* estava associada

com as baixas concentrações de oxigênio dissolvido e nitrato, a *Trochilia minuta* indicava boas condições de nitrificação e boa estabilidade do lodo e a *Trithigmostoma cucullulus* apresentou-se sensível a amônia e ao fosfato, podendo ser útil como indicador de alta qualidade dos efluentes nas saídas das estações.

Leal *et al.* (2013) realizaram análises microscópicas uma vez por semana durante um ano em uma ETE de uma indústria petroquímica localizada no Rio Grande do Sul, Brasil. Fizeram relações entre os parâmetros operacionais, biológicos e físico-químicos para avaliar o sistema e suas variações. Também foi utilizado o SBI para avaliar a estação de tratamento. Eles verificaram que com uma análise microscópica rotineira da estação seria possível perceber pequenas mudanças na comunidade biológica. Estas não foram suficientes para diminuir a classificação do SBI, mas serviram para mostrar com certa antecedência, aos operadores quando tomar medidas corretivas sobre um aumento da DQO e da DBO₅, e o momento para descartar o excesso de lodo.

Hu *et al.* (2013) identificaram 57 espécies de ciliados, 14 espécies de amebas, 14 espécies de flagelados e 4 classes de pequenos metazoários, destacando-se *Arcella hemisphaerica*, *Vorticella striata*, *Vorticella convallaria* e *Epistylis plicatilis* em uma ETE por lodo ativado na China no período de 14 meses. Os pequenos flagelos foram os protozoários dominantes e os rotíferos os metazoários dominantes. Os ciliados sésseis apresentaram-se relacionados com as remoções de DBO₅ e DQO; as tecamebas, alguns flagelados, metazoários e espécies de *Aspidisca cicada* estavam possivelmente relacionadas com a nitrificação; o excesso de *Aspidisca cicada* estava relacionado com a remoção do nitrogênio total e os sésseis *Carchesium polypinum* e *Epistylis plicatilis* relacionadas com a remoção dos sólidos suspensos.

Soares *et al.* (2014) investigaram a microscopia dos flocos e a microfauna presente em uma ETE por lodo ativado de uma indústria de bebidas utilizando técnicas de análise microscópica. Essas análises complementaram a avaliação do desempenho da estação junto com os parâmetros físico-químicos. Os micro-organismos observados com mais

frequência foram as amebas com teca, rotíferos e ciliados fixos. A presença desses é indicativo de um sistema com uma boa eficiência. Por outro lado, a predominância dos ciliados nadadores é um indicador de uma baixa eficiência. Também realizaram uma análise quantitativa da estrutura do floco biológico para identificar casos de excesso de lodo. Dos Santos *et al.* (2014) estudaram os micro-organismos presentes em uma ETE por lodo ativado que recebia efluente têxtil industrial (70%) e efluente doméstico (30%). Os protozoários encontrados com mais frequência foram os *Epistylis* sp., presentes em 100% das amostras e indicando uma boa qualidade do efluente tratado, *Arcella* sp., em 94% das amostras e indicando um sistema com uma boa oxigenação, aeração prolongada e boa nitrificação, *Vorticella microstoma*, em 77% das amostras e indicando uma oxigenação insuficiente e uma alta carga orgânica. Em seu trabalho eles certificaram que a microfauna pode ser usada para avaliar o funcionamento da ETE de plantas não convencionais e que possam receber efluente industrial.

Pedrazzani *et al.* (2016) analisaram uma estação de tratamento de efluente por lodo ativado na Itália que recebia efluente de um matadouro de porcos, apresentando uma carga orgânica muito elevada. Para monitoramento da estação foram determinados os parâmetros físicos, químicos e operacionais da estação incluindo o SBI, Índice de Lodo (do inglês *Sludge Index* - SI), flocos e bactérias filamentosas. A comunidade microbiana, formada por ciliados, flagelados, amebas e pequenos metazoários, foi utilizada para se calcular o SBI e o SI.

Os protozoários e metazoários foram ainda apontados por Nicolau *et al.* (2001) como bons indicadores da presença de substâncias tóxicas no sistema, principalmente, ciliados e rotíferos, os quais são bastante sensíveis à presença de compostos tóxicos tais como metais pesados e cianeto.

Vários outros estudos, referidos na seção seguinte, utilizaram a técnica de análise de imagem para seguir a estrutura destes agregados microbianos e relacioná-la com variáveis do sistema.

3.4 Análise de imagem por microscopia óptica

Vários *softwares* para computadores foram desenvolvidos com o objetivo de monitorar os micro-organismos, tanto individuais ou agregados, incluindo protozoários e metazoários, presentes em sistemas de tratamento de efluente por lodo ativado através da técnica quantitativa de análise de imagens. Estes *softwares* foram utilizados para a determinação posterior de relações entre o IVL com os parâmetros Euclidianos dos filamentos (comprimento total e entre outros) e flocos (área, alongamento e entre outros) e de dimensão fractal. A vantagem desta metodologia é que pode ser realizada diretamente na estação em tempo real obtendo uma resposta rápida do funcionamento da mesma, enquanto que as análises tradicionais (DQO, DBO₅, série dos sólidos e série dos nitrogênios) são demoradas e praticamente impossíveis de se obter uma resposta imediata (COSTA *et al.*, 2013).

As metodologias de análise de imagem têm sido utilizadas em processos de lodos ativados com o objetivo de determinar a quantidade de bactérias filamentosas, no entanto, outros problemas podem ser previstos nas ETEs. Estes problemas podem levar a flutuações no conteúdo da biomassa, afetando sólidos em suspensão no licor misto (MLSS), e a capacidade de sedimentação de lodo afetando o IVL. Alguns dos principais trabalhos publicados neste contexto encontram-se referidos seguidamente (MESQUITA *et al.*, 2011a).

Da Motta *et al.* (2001b) desenvolveram um procedimento automático por análise de imagem que caracterizou simultaneamente os flocos e as bactérias filamentosas do lodo ativado para uma ETE doméstico em Nancy na França durante 1 ano. O mesmo procedimento podia ser utilizado para lodo ativado industrial mesmo apresentando características diferentes. Estes autores utilizaram ainda métodos automatizados de análise de imagens para caracterizar o lodo ativado em termos de tamanho e forma (dimensão fractal) dos flocos e quantidade de bactérias filamentosas numa unidade piloto (DA MOTTA *et al.*, 2001c). Depois de validado, este método foi utilizado em estações reais na França e em Portugal (DA MOTTA, 2001d; DA MOTTA *et al.*, 2003). Em estreita colaboração com estes autores, Amaral (2003) desenvolveu um programa para análise de imagens de lodo ativado no

ambiente *Matlab* para identificar e caracterizar os agregados microbianos e filamentos protuberantes. Esse programa foi posteriormente utilizado por Amaral e Ferreira (2005), Mesquita *et al.* (2009a; 2009b; 2010a; 2010b; 2011); Mesquita *et al.*, (2011a; 2011b; 2016) e Amaral *et al.*, (2013) para determinar os parâmetros morfológicos da biomassa presente nas estações de tratamento por lodo ativado. Esses parâmetros foram relacionados com parâmetros operacionais como os sólidos suspensos totais (SST) e o IVL, entre outros.

Por sua vez, Liwarska-Bizukojc (2005) utilizou a análise de imagens microscópicas de lodo ativado das ETEs para quantificar os flocos e as bactérias filamentosas fazendo uma relação deles com os parâmetros tradicionais, onde se verificou que, através da análise de imagens, se pode prever a quantidade dos flocos do lodo. Também van den Broeck *et al.* (2009) demonstraram que é possível quantificar a estabilidade de lodo ativado por meio do monitoramento do comprimento médio do filamento através de análise de imagem, do IVL e da taxa máxima específica de consumo de oxigênio.

Continuando os estudos iniciados por Amaral (2003), Mesquita *et al.* (2009a; 2009b) efetuaram o monitoramento contínuo por análise de imagens que permitiu detectar modificações nos agregados microbianos, estimar o IVL e identificar problemas dentro do tanque de aeração. Num outro estudo, estes autores caracterizaram as propriedades dos sistemas de lodo ativado utilizando análise de imagem em que realizaram uma diluição nas amostras de lodo que apresentaram grande quantidade de biomassa (MESQUITA *et al.*, 2010a). Foi verificado que o conteúdo e a estrutura de biomassa foram afetados pela diluição. Também foi estudado o efeito da ampliação, tendo a ampliação de 100x permitido que fossem observados os agregados menores a serem identificados e caracterizados, sem afetar a precisão em relação à representatividade da biomassa. Estes autores estudaram ainda dois dos métodos de aquisição de imagens mais comuns, microscopia de campo brilhante e contraste de fase, para caracterizar o sistema de lodo ativado (MESQUITA *et al.*, 2010b). A análise realizada, em sete diferentes ETEs no período de dois anos, pelo microscópio de campo brilhante mostrou-se mais simples, com um baixo custo e forneceu os melhores resultados globais.

Após estes estudos iniciais, estes autores efetuaram uma comparação entre o efluente real de uma indústria de pescados e um efluente sintético

tratados com lodo ativado (MESQUITA *et al.*, 2011). Foi observada a morfologia da biomassa e a capacidade de sedimentação através de análise de imagem com e sem adição de uma concentração de 0,5% de cloreto de sódio (NaCl). A adição de NaCl em ambos os efluentes levou a uma maior turbidez e menor IVL. Já a adição de NaCl no efluente sintético estimulou a floculação pelo crescimento dos agregados intermédios, aumentando assim a capacidade de sedimentação do lodo. Por outro lado, existiu uma pequena disrupção nos agregados do lodo responsável pelo aumento da turbidez. Para o efluente real a adição de NaCl causou uma forte desfloculação nos agregados do lodo, resultando na liberação de flocos de menores dimensões (microflocos) aumentando a turbidez. Finalmente, estes autores utilizaram ainda uma metodologia de análise de imagem para a identificação, com sucesso, de diferentes tipos de problemas (*bulking* filamentosos, *bulking* viscoso e formação de microflocos) em sistemas de tratamento de efluentes por lodo ativado (MESQUITA *et al.*, 2011a; 2011b; 2016; AMARAL *et al.*, 2013).

Outros autores ainda, como Koivuranta *et al.* (2015), realizaram uma comparação entre a análise de imagens dos flocos e filamentos diretamente na estação de efluente por lodo ativado residencial e a análise de sólidos suspensos realizada no laboratório. Determinaram que os flocos grandes e redondos indicavam uma boa colonização, enquanto que os flocos pequenos e irregulares, com uma grande quantidade de filamentos indicavam uma diminuição da colonização. Já Moretti *et al.* (2016) estudaram um tanque de aeração de tratamento de efluente industrial por lodo ativado na Itália, por técnicas de análise de imagem, para obter o perfil fisiológico dos microorganismos, e pela técnica de eletroforese para traçar o material genético deles.

Burguer *et al.* (2017) utilizaram um procedimento automatizado de análise de imagem desenvolvido para identificar os filamentos e flocos e calcular o comprimento das bactérias filamentosas, tendo confirmado que as bactérias filamentosas são necessárias para aumentar a estabilidade do floco do lodo, mas em excesso afetam a separação sólido-líquido. Também Tomperi *et al.* (2017) desenvolveram um modelo preditivo para análise de lodo ativado através de um dispositivo de monitoramento ótico capaz de fazer uma previsão da qualidade do efluente, horas antes das análises tradicionais. Para este

efeito utilizaram parâmetros determinantes da eficiência da estação de tratamento como sólidos suspensos, DBO₅, DQO, nitrogênio total e fósforo total.

Numa extensão dos trabalhos anteriores de Amaral *et al.* (2013) e Leal *et al.* (2016) estudaram a formação de espumas nos sistemas de lodo ativado causando uma elevação do lodo e afetando o desempenho da estação de tratamento. Os parâmetros usados para esclarecer as relações internas englobaram a contagem de protozoários, metazoários e bactérias filamentosas ao microscópio e a análise das características morfológicas do lodo, por análise quantitativa de imagem, em dois sistemas diferentes: lodo ativado convencional, com maiores valores de sólidos suspensos e de remoção de DQO e DBO₅, e vala de oxidação, por um período de 2 a 3 meses. Esses dados foram posteriormente processados, com sucesso, por técnicas de estatística multivariada, para avaliar a ocorrência de espumas e esclarecer o relacionamento entre os parâmetros.

Os protozoários e metazoários são os micro-organismos eucariotas mais frequentes em sistemas de tratamento de efluente por lodo ativado, e a sua sobrevivência depende das condições de operação da estação. A análise de imagem juntamente com técnicas de análise estatística multivariada já mostrou ser uma ferramenta promissora para avaliar e monitorar as populações de protozoários e metazoários (AMARAL *et al.*, 1999; 2004; 2008; AMARAL, 2003; DA MOTTA *et al.*, 2001a; DA MOTTA, 2001d; GINORIS *et al.*, 2007a; 2007b; 2007c). De fato, estes autores usaram já um procedimento baseado no processamento de imagem dos micro-organismos presentes no lodo ativado, e em métodos estatísticos multivariados, para o reconhecimento de protozoários. Para o efeito usaram técnicas de análise de imagens para a análise morfológica e técnicas de análise discriminante (AD) e de redes neurais artificiais (RNA) para o tratamento dos dados. A análise de imagem foi realizada com o auxílio do desenvolvimento de um programa em ambiente *Matlab*, o qual mostrou ser adequado em termos de reconhecimento dos principais protozoários e metazoários, bem como para avaliar as condições de funcionamento da estação.

Na continuação do trabalho anterior, Amaral *et al.* (2008) utilizaram a análise semiautomática de imagens para determinar dados geométricos,

morfológicos e de assinatura dos protozoários sésseis presentes nos sistemas de tratamento por lodo ativado. Posteriormente foi ainda realizado o processamento destes dados utilizando técnicas de AD e RNA.

3.5 Técnicas de estatísticas de análise multivariadas

A análise de componentes principais (ACP) tem como objetivo fundamental a obtenção de um pequeno número de combinações lineares (componentes principais – CPs) de um conjunto de variáveis que retenham o máximo possível de informações das variáveis originais (SEAG, 2007). Esta técnica pode também ser usada para avaliar a importância das próprias variáveis escolhidas, ou seja, as variáveis originais (*loadings*) com maior peso na combinação linear dos primeiros componentes principais são as mais importantes do ponto de vista estatístico (MOITA NETO e MOITA, 1998).

Como referido anteriormente, da Motta *et al.* (2001b, 2001c; 2003); da Motta (2001d); Amaral (2003); Amaral e Ferreira (2005); Amaral *et al.* (2013) e Mesquita *et al.* (2009a; 2009b; 2010a; 2010b; 2011) e Mesquita *et al.* (2011a; 2011b; 2016) utilizaram a análise de imagem para determinar os parâmetros morfológicos da biomassa presente nas estações de tratamento por lodo ativado. Os dados morfológicos obtidos foram, em seguida, tratados pela técnica de regressão de mínimos quadrados parciais (PLS do inglês *Partial Least Squares*), apresentando uma melhor compreensão do comportamento do lodo ativado e prevendo o IVL. Nestes estudos foi revelada uma forte relação entre o SST e a área total dos agregados, e entre as propriedades de sedimentação do lodo (medida pelo IVL) e as bactérias filamentosas protuberantes (por SST), e estabelecidas relações relevantes entre o tamanho e morfologia dos agregados e as propriedades macroscópicas e microscópicas do sistema.

Em outros trabalhos Mesquita *et al.* (2011b) e Amaral *et al.* (2013) utilizaram técnicas quimiométricas como ACP, reduzindo e relacionando as variáveis originais a partir de combinações lineares, e análise de correlações (AC) para identificar anormalidades nos processos de tratamento por lodo ativado. Estes métodos, combinados com a análise de imagem, podem

melhorar o monitoramento dos sistemas de lodo ativado e minimizar a necessidade de medições analíticas. Deste modo estes autores puderam identificar anormalidades de lodos ativados, permitindo a identificação de problemas no sistema.

Também Ibarbalz *et al.* (2013) utilizaram técnicas de estatística multivariada para determinar que a população dos micro-organismos presente no lodo ativado de estações de efluentes domésticos era maior que a dos efluentes industriais. Neste estudo, a influência dos parâmetros de processo sobre a estrutura da comunidade bacteriana foi avaliada utilizando a técnica ACP. Em seu trabalho Moretti *et al.* (2016) utilizaram a técnica de ACP para relacionar o perfil fisiológico dos micro-organismos presentes num tanque de aeração de tratamento de efluente industrial por lodo ativado, e o seu material genético, referindo ser esta técnica mais previsível e mais útil para controlar e monitorar a estação e tratamento.

O estudo dos protozoários e metazoários por técnicas de estatística multivariada tem sido reportado na literatura por diversos autores. Madoni *et al.* (1993) começaram por utilizar técnicas de ACP um estudo com 17 estações de tratamento de efluente por lodo ativado durante o período de 1 ano, tendo elaborado uma relação de 19 espécies de protozoários com 7 parâmetros físico-químicos para avaliar as condições de operação das estações. Foi verificado que a presença, nas estações de tratamento, das espécies de amebas como *Arcella* sp. e *Eughypha* sp. e do ciliado sésil *Vaginicola crystallina* estava relacionada com a nitrificação. Por outro lado, a presença de *Vorticella microstoma* e *Opercularia* sp. estavam relacionadas com o baixo teor de oxigênio dissolvido no tanque de aeração e elevados valores de DBO₅ no efluente final.

Amaral *et al.* (1999) desenvolveram um programa semi-automático *ProtoRec*, inicialmente em ambiente *Visilog* e posteriormente em *Matlab*, para o tratamento de imagens e identificação de protozoários e metazoários presentes no lodo ativado, cujos dados foram posteriormente tratados por ACP. Este procedimento teve por base a sua utilização para diagnosticar anomalias no funcionamento das estações. No seguimento destes estudos, da Motta *et al.* (2001a); da Motta (2001d); Amaral (2003) e Amaral *et al.* (2004; 2008) empregaram técnicas de análise discriminante (AD) e de redes neurais

artificiais (RNA) para efetuar o reconhecimento dos protozoários e metazoários a partir dos parâmetros morfológicos correspondentes a cada espécie. Ainda na sequência destes estudos, Ginoris *et al.* (2007a; 2007b; 2007c) utilizaram o mesmo tipo de técnica, assim como de árvores de decisão (DT) para identificar e classificar estes micro-organismos. No decorrer destes trabalhos, as técnicas de análise de imagem e de estatística multivariada utilizadas se mostraram promissoras para o reconhecimento e o monitoramento da população de protozoários e metazoários típicos das estações de tratamento de efluentes.

Lee *et al.* (2005) realizaram uma combinação entre a ACP com a análise multi-resolução (MRA do inglês *Multi-Resolution Analysis*) considerada eficiente para diagnosticar e analisar diferentes tipos de problemas nos processos químicos e bioquímicos. Neste estudo a ACP foi utilizada para observar falhas e diagnosticar o processo em batelada, enquanto a MRA foi utilizada para fazer uma decomposição dos dados medidos aproximando-os em escalas diferentes. Foram ainda desenvolvidos modelos de ACP multilinear adaptativa (MPCA) para atualizar a estrutura de covariância em cada escala nas mudanças das condições do processo. O monitoramento por MPCA envolveu apenas a combinação das escalas onde foram detetados problemas significativos, facilitando o diagnóstico e solução antes mesmo de afetarem o processo. Este método foi utilizado em uma escala piloto de um reator em batelada para tratamento biológico de efluente.

Como referido anteriormente, Leal *et al.* (2016) estudaram a formação de espumas num sistema de lodo convencional e vala de oxidação, por monitorização ao microscópio e por análise de imagem. Esses dados foram processados utilizando as técnicas ACP, AC e DT para avaliar a ocorrência de espumas e esclarecer o relacionamento entre os parâmetros. A ACP permitiu relacionar a espuma suave ocasional com a *Microthrix parvicella*, e estabelecer uma correlação entre as espumas persistentes e os nocardioformes, confirmada também pela AC. Por outro lado, a análise DT usada na avaliação da formação de espumas, permitiu identificar outros parâmetros correlacionados como a quantidade de ciliados livres nadadores, amebas e de bactérias filamentosas totais.

Finalmente, Mesquita *et al.* (2017) relatam que a utilização da espectroscopia pode ser considerada uma tecnologia rápida e efetiva para o

monitoramento de processos biológicos em tempo real, mas a sua utilização ainda não é comum em estações reais, sendo usada apenas em escala piloto. Estes autores abordaram o uso das técnicas de espectroscopia de UV-Vis, infravermelho e de fluorescência, além de técnicas de estatística multivariada, com o objetivo de obter dados relevantes sobre os processos biológicos, assim como a influência do material em suspensão, temperatura e fatores ambientais.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os locais das coletas realizadas, a metodologia utilizada para caracterização dos efluentes, os reatores utilizados para preservação dos micro-organismos, o sistema para aquisição das imagens e os procedimentos de aquisição das imagens.

4.1 Estações de tratamento estudadas

As amostras de efluentes foram coletadas em 6 estações de tratamento de efluentes por lodo ativado no estado de Pernambuco dentre elas estavam 2 estações de efluentes doméstico, uma de pequeno porte (PEQUENA) com capacidade para tratar o efluente de uma população de aproximadamente 12.000 habitantes, e outra de grande porte (GRANDE) com capacidade para tratar efluente de uma população de aproximadamente 451.000 habitantes, uma indústria de peças automotivas (PEÇA), uma indústria de produtos de higiene pessoal (HIGIENE), uma indústria de processamento de amido (AMIDO) e um abatedouro de aves (ABATE) localizado no interior do estado.

4.2 Coletas e análises

As amostras foram coletadas na entrada da caixa de areia, na saída do decantador secundário e no tanque de aeração, e foram acondicionadas em recipientes limpos e adequados (frasco de polietileno). O transporte das amostras até o laboratório foi realizado em ambiente refrigerado (isopor com gelo) com a finalidade de retardar a decomposição do conteúdo orgânico pelos micro-organismos, preservando assim ao máximo as características originais das amostras.

A análise de DQO foi realizada através do método colorimétrico, a DBO_5 foi analisada pelo método manométrico através da variação de pressão. As demais análises foram realizadas de acordo com os procedimentos do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 1995).

O índice volumétrico de lodo (IVL) representa o volume em mL ocupado por um grama de sólido em suspensão, estimando a decantabilidade do lodo ativado. A Equação 1 representa o IVL que é expresso em mL.g⁻¹.

$$IVL = \frac{SS_{dec30} \cdot 1000}{SST_{lodo}} \quad (1)$$

Sendo que SS_{dec30} representa o volume do lodo (sólido em suspensão) decantado em 30 minutos e SST_{lodo} (g.mL⁻¹) os sólidos suspensos totais do lodo.

Na Tabela 2 estão contidos o local e data em que as coletas foram realizadas. Todas as amostras foram coletadas em período de estiagem. Foram realizadas coletas na entrada e saída das ETEs para verificar sua eficiência, e amostras do lodo ativado para observar a população de micro-organismos presente no tanque de aeração. Todas as estações de tratamento de efluentes estudadas eram compostas por sistema de lodo ativado com aeração prolongada.

TABELA 2 - Descrição das coletas realizadas.

Data da coleta	ETEs	Sigla do Experimento
13/01/14	Efluente Doméstico de Pequeno Porte (PEQUENA)	PEQUENA
03/02/14	Efluente Doméstico de Grande Porte (GRANDE)	GRANDE
24/10/14		PEÇA 1
06/11/14	Peças Automotivas (PEÇA)	PEÇA 2
22/07/15		PEÇA 3
13/03/15		ABATE 1
17/08/15	Abatedouro (ABATE)	ABATE 2
03/08/15	Produtos de Higiene Pessoal (HIGIENE)	HIGIENE 1
19/10/15		HIGIENE 2
16/02/16	Processamento de Amido (AMIDO)	AMIDO

Fonte: Autor (2018).

4.3 Análises das estações de tratamento de efluente

As análises das ETEs foram realizadas de acordo com a Resolução CONAMA 430/2011 para lançamentos de efluentes domésticos, também foi

utilizada para os efluentes industriais (BRASIL, 2011). Para as ETEs industriais +também foi utilizada a Norma Técnica para Controle de Carga Orgânica em Efluentes Líquidos Industriais da Companhia Pernambucana de Recursos Hídricos (CPRH). Para a Norma do CPRH as fontes poluidoras com a carga orgânica igual ou superior a 100 kg.dia^{-1} , deverão remover no mínimo 90% de DBO_5 e com carga orgânica inferior a 100 kg.dia^{-1} , deverão remover no mínimo 70% de DBO_5 . Na Tabela 3 estão contidos os tipos de indústrias e o valor da remoção de DQO de acordo com a Norma da CPRH (CPRH, 2003).

TABELA 3 - Descrição tipo de indústria e valor da remoção da DQO exigido pelo CPRH.

Tipo de Indústria	Redução da DQO (%)
Laticínios	60
Matadouros	60
Alimentos / Conservas	60
Indústrias de Bebidas	80
Agroindústria	80
Indústrias de Processamento de Peles - Curtume e Acabamento	80
Indústrias de Processamento de Carne	60
Indústrias de Processamento de Peixes	60
Indústrias de Processamento de Cereais (milho, trigo)	60
Indústria Têxtil	80
Indústria Siderúrgica	80
Termoelétrica	80
Refinaria de Petróleo	90
Indústria de Acabamento de Superfície Metálica	90
Indústria de Cloro - Soda	60
Indústria Química Orgânica	80
Papel e Polpa de Celulose	80
Indústria de Reciclagem de Vidro	60

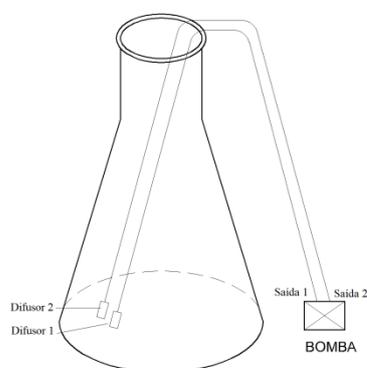
Fonte: adaptada da Norma Técnica, CPRH (2003).

4.4 Reatores utilizados para conservação dos micro-organismos

Para conservar os micro-organismos presentes no lodo ativado foram utilizados reatores descontínuos com capacidade de 3L (Figura 3). Foram colocados 1,5L de amostra de lodo ativado e mantidos aerados por difusores com uma bomba de aquário (marca: Jebo e modelo: 660), com uma vazão de ar de $171,07 \text{ L.h}^{-1}$, para manter o sistema aerado como o tanque de aeração de uma estação de tratamento, durante todo o período de monitoramento.

O reator foi alimentado com um efluente sintético para que os micro-organismos permanecessem vivos. Esse efluente foi preparado a partir de 240g de caldo de carne (de uso alimentício), 50g de sacarose ($\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$), 28g de cloreto de amônio (NH_4Cl) e 4 mL de ácido fosfórico (H_3PO_4) em 1L de água destilada (DA MOTTA, 2001c). O efluente sintético foi utilizado com uma diluição de 1:250 mL, mantendo assim uma DQO de aproximadamente $760 \text{ mg O}_2\text{.L}^{-1}$ na alimentação do reator. Para o reator descontínuo foi utilizado 1 mL.dia^{-1} do efluente sintético.

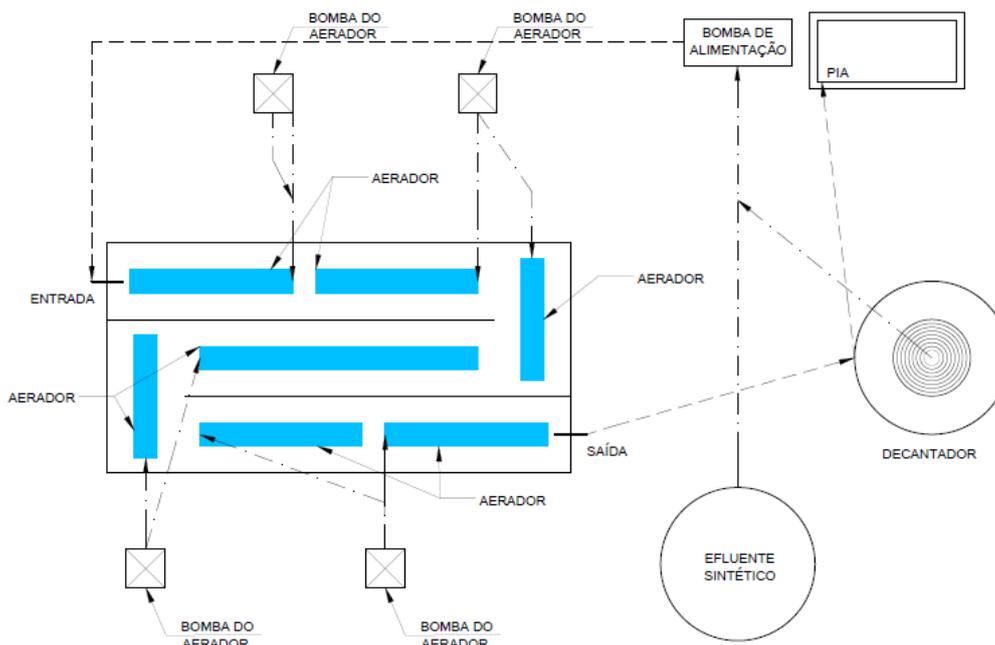
FIGURA 3 - Reator descontínuo.



Fonte: Autor (2018).

Na Figura 4 tem-se o esquema do sistema utilizado com o reator canal contínuo, que foi utilizado apenas com o lodo ativado da indústria de processamento de amido com uma capacidade de 46,8L. O volume de lodo ativado utilizado foi de 20L. Neste reator foram usadas 4 bombas para aerar de modo que o sistema atingisse 684 L.h^{-1} . Com o tempo de detenção hidráulico teórico de 11,11 h.

FIGURA 4 - Esquema do sistema utilizando o reator canal.

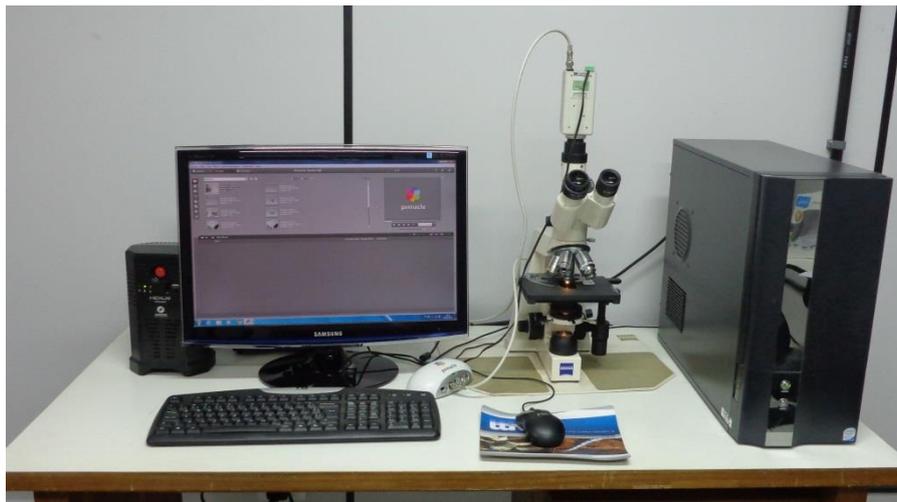


Fonte: Autor (2018).

A alimentação do reator canal foi efetuada por uma bomba dosadora (Modelo: EMD 10005 D3130LY – METO) com uma vazão de aproximadamente $1,8 \text{ L.h}^{-1}$ para alimentação do efluente sintético junto com todo o reciclo de lodo no reator contínuo.

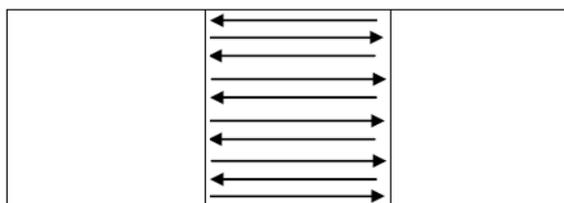
4.5 Aquisição das imagens

Para o sistema de aquisição de imagem (Figura 5) foi utilizado um microscópio óptico *Axiostar Plus* (Zeiss, Göttingen, Germany), sobre o qual foi conectada uma câmara modelo SDC-312 (Samsung, Korea). Em seguida a imagem foi digitalizada para o computador através de uma placa de aquisição *Pinnacle Studio Movie Box HD*.

FIGURA 5 - Sistema de aquisição de imagens.

Fonte: Autor (2018).

A identificação dos micro-organismos foi realizada com recurso de um microscópio óptico de campo claro e com ampliações de 10, 20 e 40 vezes. Uma gota da amostra de lodo ativado foi colocada em uma lâmina. A gota foi coberta com uma lamínula de dimensões 24x24 mm e o monitoramento foi efetuado em toda a área da lamínula, como demonstrado na Figura 6.

FIGURA 6 - Representação do conjunto lâmina e lamínula para aquisição das imagens.

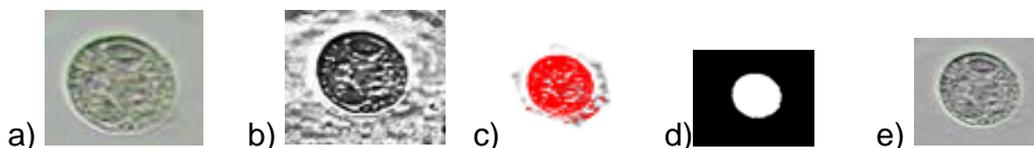
Fonte: Autor (2018).

4.6 Tratamento das imagens

As imagens foram tratadas no programa *Matlab* para obtenção dos parâmetros morfológicos dos protozoários e metazoários. Primeiro a imagem foi aberta pelo programa, depois o próprio usuário isolou a área de interesse, ou seja, o micro-organismo. Após realizadas essas etapas, o programa forneceu uma imagem com a área isolada, onde o usuário confirmou se a área isolada está correta, podendo fazer alguns ajustes para melhorar a área de

interesse de estudo. Por último o programa forneceu uma imagem binária. Na Figura 7 pode-se observar as etapas do tratamento de dados.

FIGURA 7 - Os passos principais do programa: imagem original (a), imagem pré-tratada (b), região de interesse (c), a imagem binária após a segmentação (d), imagem final (e).



Fonte: Autor (2018).

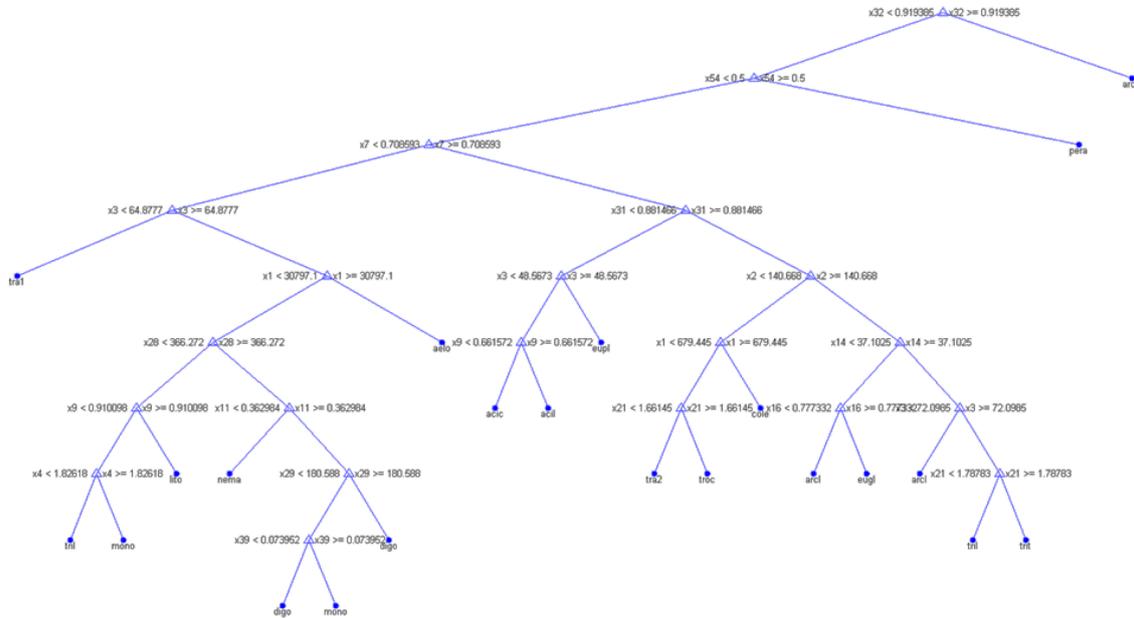
A imagem binária foi inserida no programa *Matlab* para determinação dos seguintes parâmetros: área, perímetro, comprimento, fator de forma, convexidade, compacidade, esfericidade, solidez, excentricidade, forma de *Feret*, robustez, maior concavidade, razão de concavidade, largura, largura média, razão da largura, dimensão fractal mássica, dimensão fractal superficial, dimensão fractal área vs. perímetro, razão da dimensão fractal mássica, dimensão fractal do mapeamento da distância euclidiana, existência de cílios, existência de pedúnculo, largura do pedúnculo, razão largura do pedúnculo e corpo, existência de tentáculos e existência de flagelos. Estes parâmetros foram descritos nos trabalhos de Amaral (2003) e da Motta (2001d).

4.7 Linguagens utilizadas para tratamento dos dados

Foram utilizadas ferramentas estatísticas de Árvore de Decisões (DT) e Análise de Componentes Principais (ACP), ambas realizadas na linguagem *Matlab*, versão R2016b. A Árvore de Decisões constituem uma das técnicas mais utilizadas para a divisão de amostras em conjuntos de regras de decisão, sendo formada por nodo e ramos. Cada nodo representa um simples teste ou decisão. O nodo inicial é comumente referido como nodo raiz. Dependendo do resultado do teste, a árvore poderá se ramificar em direção a outro nodo, até se atingir um nodo terminal, ou seja, o nodo resposta. Esta foi utilizada a partir com os parâmetros obtidos das imagens dos micro-organismos para identificação dos mesmos. Em seguida, empregou-se a ferramenta de Análise de Correlação (AC) fazendo uso do *Microsoft Excel* 2010. Tanto a ACP quanto a AC foram realizadas com base nos parâmetros físico-químicos das

caracterizações dos efluentes. Na Figura 8 pode-se observar a árvore de decisões utilizada, onde cada nó representa um parâmetro morfológico do micro-organismo.

FIGURA 8 - Árvore de decisões.



Fonte: Autor (2018).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo contém os resultados das caracterizações dos efluentes domésticos e industriais estudados, a Análise de Componente Principal (ACP) e Análise de Correlação (AC) com os dados das caracterizações das estações, os micro-organismos encontrados no lodo ativado, o Índice Volumétrico do Lodo (IVL) e o monitoramento do reator canal desta tese de doutorado.

5.1 Caracterizações das amostras de efluentes brutos e tratados

As caracterizações dos efluentes foram realizadas a partir das seguintes análises para determinação da matéria orgânica: DQO, DBO₅, série dos sólidos, série de nitrogênio, condutividade, cor, pH, oxigênio dissolvido (OD), turbidez, alcalinidade, NaCl e o índice volumétrico de lodo (IVL). Convém lembrar que as amostras de efluente tratado foram coletadas no mesmo momento das amostras de efluente bruto, e nesse caso, não foi considerado o tempo de retenção hidráulico do processo, uma vez que as estações trabalhavam em fluxo contínuo recebendo o mesmo volume de efluente.

5.1.1 Caracterizações dos efluentes domésticos (PEQUENA e GRANDE)

Na Tabela 4 estão contidos os resultados das caracterizações das amostras da entrada e saída das estações PEQUENA e GRANDE. Mesmo sendo uma estação de pequeno porte a estação PEQUENA recebe uma carga orgânica em termos de DQO, aproximadamente 5 vezes maior que a estação GRANDE, que é de grande porte. A estação PEQUENA atende praticamente um conjunto residencial onde a distância percorrida do efluente das casas para a estação é pequena, enquanto que a estação GRANDE trata efluente de vários bairros, tratando-se de uma rede coletora e levando assim mais tempo para o efluente chegar à estação, podendo nesse percurso até mesmo reduzir alguns parâmetros antes de chegar à estação.

TABELA 4 - Caracterização físico-química dos efluentes das estações de tratamento doméstico.

Parâmetros analisados	PEQUENA		GRANDE	
	Entrada	Saída	Entrada	Saída
DQO (mg O ₂ .L ⁻¹)	1006	340	195	96
DBO ₅ (mg O ₂ .L ⁻¹)	600	70	118	38
ST (mg.L ⁻¹)	888,0	659,0	462,5	563,0
SF (mg.L ⁻¹)	504	422	322	417
SV (mg.L ⁻¹)	384	237	140,5	146
SST (mg.L ⁻¹)	530	472	140	218
SSF (mg.L ⁻¹)	34	94	108	198
SSV (mg.L ⁻¹)	496	378	32	20
NTK (mg.L ⁻¹)	303,60	293,50	89,26	96,70
N-NH ₃ (mg.L ⁻¹)	0,65	2,42	0,83	3,19
N-NO ₃ (mg.L ⁻¹)	20,0	0,9	0,9	0,8
Condutividade (µS.cm ⁻¹)	884	794	561	706
Cor (mg Pt Co.L ⁻¹)	340	249	241	95
pH	7,6	7,4	6,5	6,6
OD (mg O ₂ .L ⁻¹)	11,50	7,50	17,10	16,97
Turbidez (NTU)	345,00	203,00	102,00	38,40
Alcalinidade (mg Ca.L ⁻¹)	298,34	282,36	197,12	250,39

Fonte: Autor (2018).

De acordo com os parâmetros recomendados pela Resolução CONAMA 430/2011 para lançamento de efluentes, a faixa para o pH recomendada é de 5 a 9, para o nitrogênio amoniacal é de 20,0 mg.L⁻¹; enquanto que a remoção de DBO₅ deve ser superior a 60% (BRASIL, 2011). As análises de alcalinidade para as duas estações estudadas apresentaram valores acima da faixa típica para efluente doméstico (entre 110 e 170 mgCaCO₃.L⁻¹). As duas estações de efluentes domésticos estavam de acordo com as exigências para lançamento de efluente doméstico. A remoção de DQO para a estação PEQUENA foi de 66% e para a GRANDE foi de 51%. A estação PEQUENA apresentou uma alta concentração de material particulado, com uma remoção de ST de 26% e de SST de 11%. Para a estação GRANDE as séries dos sólidos na saída foram maiores que na entrada, o que pode estar relacionado com o decantador não estar funcionando corretamente. Essas estações não foram projetadas para remoção de compostos nitrogenados, mas para atender à norma de lançamento para efluentes domésticos, o que explica o teor de nitrogênio total de Kjeldahl (NTK) para as amostras da estação PEQUENA foi extremamente

elevado. A diminuição no $N-NO_3$ e o pequeno aumento do $N-NH_3$ na saída da estação PEQUENA, tendo em atenção a diminuição observada no NTK, pode indiciar um processo de desnitrificação realizado através de bactérias heterotróficas, as quais transformam os nitritos e nitratos em nitrogênio amoniacal, nitrogênio molecular e óxidos de nitrogênio. A cor e a turbidez estão diretamente relacionadas com os sólidos suspensos. A estação PEQUENA apresentou maiores valores para esses dois parâmetros que a estação GRANDE o que está relacionado com os valores superiores da série dos sólidos suspensos para a estação PEQUENA. A remoção de cor foi de 27% e da turbidez de 41% para a estação PEQUENA, enquanto que para a estação GRANDE foi de 61% para a cor e 62% para a turbidez.

5.1.2 Caracterização dos efluentes industriais

Nesta seção serão apresentados os resultados das caracterizações dos efluentes industriais estudados na presente tese.

5.1.2.1 Indústria de Peças Automotivas (PEÇA)

Na Tabela 5 estão contidos os resultados das caracterizações das amostras da entrada e saída da estação de tratamento de efluentes da indústria de peças automotivas.

TABELA 5 - Caracterização físico-química do efluente da estação de tratamento da indústria de peças automotivas.

Parâmetros analisados	PEÇA 1		PEÇA 2		PEÇA 3	
	Entrada	Saída	Entrada	Saída	Entrada	Saída
DQO (mg O ₂ .L ⁻¹)	1393	61	1362	105	10692	130
DBO ₅ (mg O ₂ .L ⁻¹)	475	19	225	43	2500	5
ST (mg.L ⁻¹)	52336	2232	70024	3078	6289	2469
SF (mg.L ⁻¹)	5893	1503	7876	2109	3217	1823
SV (mg.L ⁻¹)	46444	729	62148	969	3072	646
SST (mg.L ⁻¹)	41632	103	55782	89	3350	118
SSF (mg.L ⁻¹)	4580	13	6136	22	450	31
SSV (mg.L ⁻¹)	37052	90	49646	67	2900	87
N-NH ₃ (mg.L ⁻¹)	0,92	3,63	0,53	0,19	66,00	0,82
N-NO ₃ (mg.L ⁻¹)	3,00	42,10	3,70	42,90	340,00	28,10
Condutividade (µS.cm ⁻¹)	0,21	4,31	0,26	3,26	6581,00	4818,00
Cor (mg Pt Co.L ⁻¹)	466	33	634	52	7200	88
pH	5,5	6,8	5,5	5,5	7,0	7,5
Turbidez (NTU)	487,00	9,13	613,00	9,35	546,00	47,60

Fonte: Autor (2018).

Para os parâmetros de pH, remoção de DBO₅ e nitrogênio amoniacal as três coletas da indústria de peças automotivas estavam de acordo com as exigências para lançamento de efluente recomendada pela Resolução CONAMA 430/2011. A remoção em termos de DQO para as coletas foi de 96% para a coleta PEÇA 1, de 92% para a PEÇA 2 e de 99% para a PEÇA 3. As três coletas apresentaram altas concentrações de material particulado apresentando remoções de ST de 96% para as PEÇAS 1 e 2, e de 61% para a PEÇA 3, e remoções de SST de 99,75% para a PEÇA 1, 99,84% de a PEÇA 2 e de 96,48% para a PEÇA 3. Para os compostos nitrogenados da coleta PEÇA 1 foi observado, essencialmente, um aumento do nitrato devido à ocorrência de nitrificação. Para a coleta da PEÇA 2 também foi observado apenas o processo de nitrificação com aumento do nitrato. Para a coleta PEÇA 3 foi observada a redução do nitrogênio amoniacal e do nitrato, podendo implicar processos de nitrificação parcial e desnitrificação (possivelmente em zonas distintas da estação), ou mesmo mineralização e *Anammox* (oxidação anaeróbia da amônia). Uma possível relação entre cor e turbidez com os sólidos suspensos para esta estação não foi verificada, isto porque, as coletas que apresentaram maiores valores para cor e turbidez não foram as que apresentaram maiores valores para a série dos sólidos suspensos. As remoções de cor e turbidez

para as três coletas, seguindo a ordem PEÇA 1, PEÇA 2 e PEÇA 3; foram de 92,92%, 91,80% e 98,78% para a cor e 98,13%, 98,47% e 91,28% para a turbidez, respectivamente. Pelo fato de ser uma indústria de peças automotivas existem grandes chances de possuir óleos e graxas no efluente.

5.1.2.2 Abatedouro de aves (ABATE)

Na Tabela 6 estão contidos os resultados das caracterizações das amostras da entrada e saída da estação de tratamento de efluentes de um abatedouro de aves.

TABELA 6 - Caracterização físico-química do efluente da estação de tratamento do abatedouro de aves.

Parâmetros analisados	ABATE 1		ABATE 2	
	Entrada	Saída	Entrada	Saída
DQO (mg O ₂ .L ⁻¹)	5779	223	5100	250
DBO ₅ (mg O ₂ .L ⁻¹)	200	40	1250	40
ST (mg.L ⁻¹)	2010	889	1861	961
SF (mg.L ⁻¹)	872	852	686	831
SV (mg.L ⁻¹)	1138	37	1175	130
SST (mg.L ⁻¹)	1371	112	1252	120
SSF (mg.L ⁻¹)	590	13	463	35
SSV (mg.L ⁻¹)	776	99	789	85
N-NH ₃ (mg.L ⁻¹)	0,71	0,19	1,42	0,36
N-NO ₃ (mg.L ⁻¹)	4,70	1,90	5,00	2,64
Condutividade (µS.cm ⁻¹)	2,10	1,85	1,86	2,07
Cor (mg Pt Co.L ⁻¹)	250	204	4700	341
pH	6,7	9,7	7,0	7,0
Turbidez (NTU)	1000,00	53,20	1072,00	65,40

Fonte: Autor (2018).

Apenas a análise de pH para a coleta ABATE 1 não estava dentro da faixa recomendada para o lançamento de efluentes. As demais análises estavam de acordo com a Resolução CONAMA 430/2011 para remoção de DBO₅ e nitrogênio amoniacal. As remoções em termos de DQO foram de 96% para a ABATE 1 e 95% para a ABATE 2. Já as remoções dos ST foram de 56% para a ABATE 1 e 48% para a ABATE 2 e para os SST foram de 92% para a ABATE 1 e 90% para a ABATE 2.

A variação do nitrogênio amoniacal e do nitrato não foi significativa, o que é um indicativo de uma possível nitrificação e/ou desnitrificação. Para as análises de cor e turbidez a coleta ABATE 2 apresentou maiores valores à saída em relação a ABATE1, em concordância com os valores dos sólidos suspensos para essa coleta. As remoções da turbidez para as coletas foram acima de 90%, e a remoção de cor foi de 18% para ABATE 1 e de 93% para ABATE 2.

5.1.2.3 Produtos de Higiene Pessoal (HIGIENE)

Na Tabela 7 estão contidos os resultados das caracterizações da entrada e saída para o efluente da estação da indústria de produtos de higiene pessoal (HIGIENE).

TABELA 7 - Caracterização físico-química do efluente da estação de tratamento da indústria de produtos de higiene pessoal.

Parâmetros analisados	HIGIENE 1		HIGIENE 2	
	Entrada	Saída	Entrada	Saída
DQO (mg O ₂ .L ⁻¹)	249	15	1402	207
DBO ₅ (mg O ₂ .L ⁻¹)	210	2	950	160
ST (mg.L ⁻¹)	305	293	965	427
SF (mg.L ⁻¹)	110	82	466	259
SV (mg.L ⁻¹)	195	157	499	168
SST (mg.L ⁻¹)	143	46	346	106
SSF (mg.L ⁻¹)	29	22	74	12
SSV (mg.L ⁻¹)	114	24	272	94
N-NH ₃ (mg.L ⁻¹)	1,07	0,83	0,76	0,95
N-NO ₃ (mg.L ⁻¹)	2,50	22,00	3,60	5,90
Condutividade (µS.cm ⁻¹)	393,30	410,30	1294,00	810,60
Cor (mg Pt Co.L ⁻¹)	206	56	577	179
pH	7,4	4,8	8,1	8,2
Turbidez (NTU)	56,00	16,20	302,00	68,30

Fonte: Autor (2018).

Para ambas coletas os valores de pH, de remoção de DBO₅ e nitrogênio amoniacal se apresentaram de acordo com o recomendado pela Resolução CONAMA 430/2011. As remoções para DQO foram de 94% para a coleta HIGIENE 1 e de 85% para a HIGIENE 2. Para a série dos sólidos a remoção de ST para a coleta HIGIENE 1 foi de apenas 4%, enquanto que a coleta HIGIENE

2 foi de 56%. A remoção dos SST apresentou valores próximos para as duas coletas de 68% para a HIGIENE 1 e de 69% para a HIGIENE 2. Para os compostos nitrogenados pôde-se observar o processo de nitrificação na coleta HIGIENE 1, realizada pelas bactérias nitrificantes, caracterizada pelo aumento do nitrato. Para as análises de cor e turbidez a coleta HIGIENE 2 apresentou maiores valores em relação à HIGIENE 1, confirmando os valores superiores dos sólidos suspensos. A remoção para ambas as coletas para turbidez foram acima de 70% e para a cor acima de 68%, em linha com a remoção dos SST.

5.1.2.4 Processamento de Amido (AMIDO)

Na Tabela 8 estão contidos os resultados das caracterizações da entrada e saída para o efluente da indústria de processamento de amido (AMIDO).

TABELA 8 - Caracterização físico-química do efluente da estação de tratamento da indústria de processamento de amido.

Parâmetros analisados	AMIDO	
	Entrada	Saída
DQO (mg O ₂ .L ⁻¹)	847	74
DBO ₅ (mg O ₂ .L ⁻¹)	600	7
ST (mg.L ⁻¹)	1140	1650
SF (mg.L ⁻¹)	890	1440
SV (mg.L ⁻¹)	250	210
SST (mg.L ⁻¹)	110	90
SSF (mg.L ⁻¹)	80	60
SSV (mg.L ⁻¹)	30	30
N-NH ₃ (mg.L ⁻¹)	2,20	0,04
N-NO ₃ (mg.L ⁻¹)	46,00	59,80
Condutividade (µS.cm ⁻¹)	2,45	3,32
Cor (mgPt Co.L ⁻¹)	920	71
pH	11,3	7,3
Turbidez (NTU)	60,10	7,82
NaCl (mg.L ⁻¹)	1156	1612
Resistência (Ω)	444,60	328,10

Fonte: Autor (2018).

As análises de pH, nitrogênio amoniacal e a remoção de DBO₅ estão de acordo com a Resolução CONAMA 430/2011. As remoções foram de 91% para DQO e de 18% para SST. Para os compostos nitrogenados poderá ter ocorrido

a nitrificação caracterizada pelo aumento do nitrato, apesar dos valores iniciais já serem elevados. As análises da série dos ST, condutividade e NaCl apresentaram valores maiores na saída do que na entrada da estação. Para as análises de cor a redução foi de 92% e da turbidez de 87%, estando esses parâmetros relacionados diretamente com a série dos sólidos suspensos.

5.2 Análise de componentes principais para os dados das caracterizações das estações de tratamento de efluentes

Os dados obtidos na caracterização dos efluentes nas entradas e saídas das ETEs que foram utilizados para a análise de componente principal (ACP) estão apresentados no Apêndice A. A matriz total dos dados é constituída pela representação no espaço nas dimensões: 20 amostras e 14 variáveis. A variância total foi de 81,14% das variáveis originais, com a PC1 e a PC2 explicando, respectivamente, 44,68% e 36,46% dessa variância. Na Tabela 9 estão apresentados os valores dos pesos dos parâmetros em PC1 e PC2.

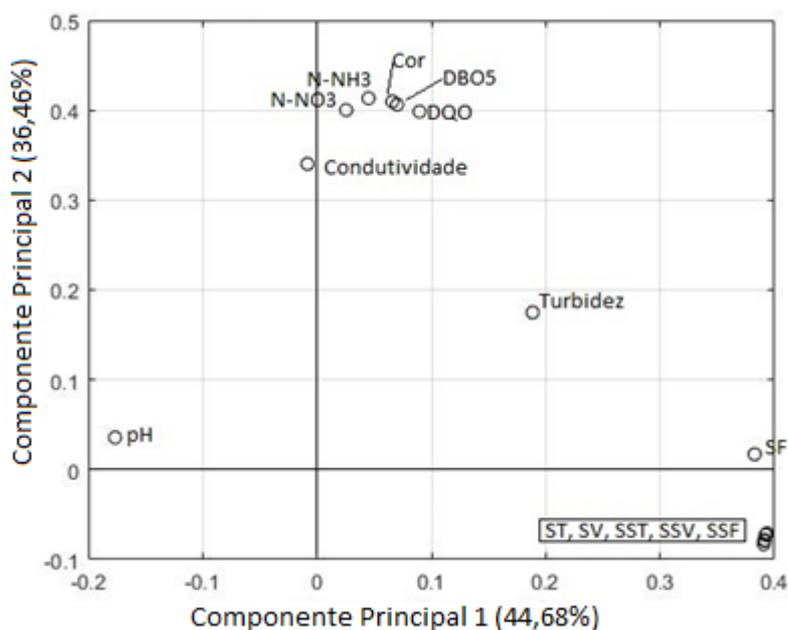
TABELA 9 - Valores dos pesos dos parâmetros físico-químicos estudados em PC1 e PC2.

	PC1 (44,68%)	PC2 (36,46%)
DQO	0,090	0,398
DBO ₅	0,070	0,406
ST	0,392	-0,073
SF	0,383	0,017
SV	0,391	-0,083
SST	0,391	-0,078
SSF	0,393	-0,071
SSV	0,391	-0,079
N-NH ₃	0,045	0,413
N-NO ₃	0,026	0,400
Condutividade	-0,008	0,340
Cor	0,066	0,410
pH	-0,177	0,036
Turbidez	0,189	0,175

Fonte: Autor (2018).

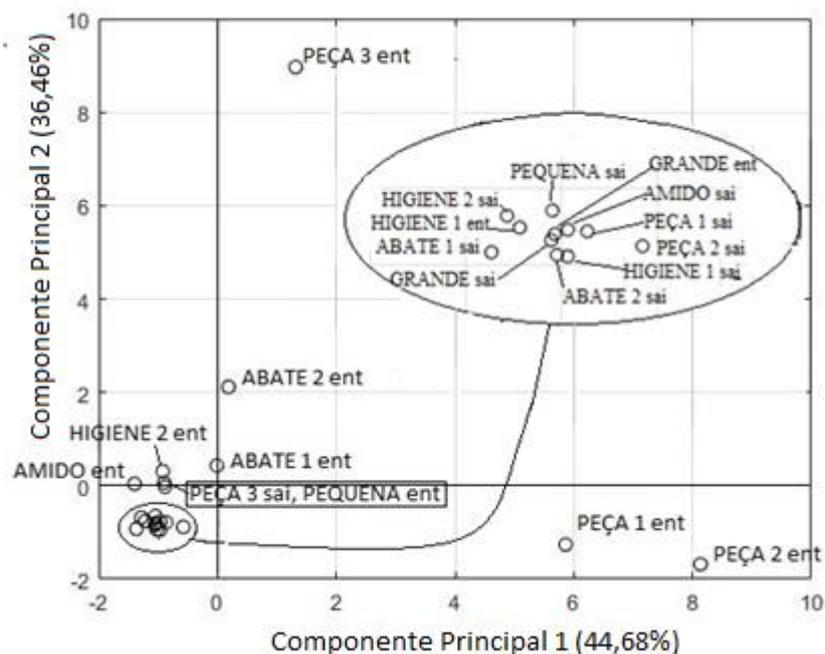
Na Figura 9 estão dispostos os resultados dos parâmetros físico-químicos (*loadings*) das caracterizações das entradas e saídas das estações estudadas em PC1 vs. PC2, caracterizando 81,14% da variância.

FIGURA 9 - Valores dos *loadings* (parâmetros analisados) em PC1 e PC2. (Onde: pH: potencial hidrogeniônico, N-NO₃: nitrato, N-NH₃: nitrogênio amoniacal, DBO₅: demanda biológica de oxigênio, ST: sólidos totais, SF: sólidos fixos, SV: sólidos voláteis, SST: sólidos suspensos totais, SSF: sólidos suspensos fixos, SSV: sólidos suspensos voláteis).



Na Figura 10 tem-se os resultados das amostras das estações estudadas (*scores*) em PC1 vs. PC2.

FIGURA 10 - Valores dos scores (amostras estudadas) em PC1 e PC2. (Onde: ent: entrada, sai: saída, AMIDO: ETE processamento de amido, HIGIENE: ETE indústria de produtos de higiene pessoal, ABATE: ETE do abatedouro de aves, PEÇA: ETE indústria de peças automotivas, PEQUENA: ETE doméstica pequeno porte e GRANDE: ETE doméstica de grande porte).



Na Figura 9 o grupo que apresentou a maior influência positiva para o hemisfério direito inferior foi a série de sólidos, que se encontrou agrupada e formada por ST, SV, SST, SSF e SSV apenas a análise SF não estava agrupada às demais análises da série dos sólidos. Na Figura 10 as amostras das entradas para a indústria de peças automotivas das coletas PEÇA 1 e PEÇA 2 se apresentaram agrupadas no mesmo hemisfério que a série dos sólidos, uma vez que essas coletas tiveram maiores valores da série dos sólidos de entrada. Contudo, a coleta PEÇA 3 de entrada não apresentou a mesma tendência quando comparada com as outras coletas da mesma indústria, uma vez que apresentou valores não tão elevados da série de sólidos, e estando no hemisfério direito superior.

Por outro lado na Figura 9 as análises que apresentaram maiores valores para o quadrante superior direito foram a DQO, DBO₅, N-NH₃ e N-NO₃ representando a carga orgânica e em termos de nitrogênio, assim como a cor. Estas análises apareceram ainda no mesmo quadrante que a coleta PEÇA 3 de entrada na Figura 10, tendo esta coleta apresentado valores mais elevados à entrada para a maior parte dessas análises.

Na Figura 9 a análise de condutividade encontra-se no quadrante superior esquerdo, mas relativamente próxima dos parâmetros representando a carga orgânica, em termos de nitrogênio e cor. Deste modo pode ser concluindo que estes parâmetros poderão possuir uma influência relevante ao nível da condutividade. Já o pH encontra-se próximo ao eixo de origem horizontal, mas distante dos restantes parâmetros estudados, o que pode indicar que o seu valor não é predominantemente afetado pelos mesmos. Também a turbidez se encontra relativamente isolada em relação aos outros parâmetros, e também em relação à série dos sólidos. Deste modo, e tal como evidenciado na análise anterior aos parâmetros físico-químicos, a turbidez nestes sistemas não pode ser diretamente relacionada apenas à série dos sólidos.

Na Figura 10 as coletas ABATE 1 e ABATE 2 de entrada se apresentaram próximas entre si, mas distantes das demais, o que indicia que os efluentes de entrada nestas duas coletas são relativamente similares entre si e distinto das outras coletas. Já para as coletas HIGIENE 1 e HIGIENE 2, a diferença dos parâmetros químicos do efluente à entrada foi suficiente para que estas aparecessem relativamente isoladas entre si. Um fato relevante que pode ser extraído da Figura 10 é o de que todas as coletas de saída se encontraram perto umas das outras no quadrante inferior esquerdo, e longe da série dos sólidos e dos parâmetros representando a carga orgânica e em termos de nitrogênio. Este fato demonstra que os sistemas analisados foram capazes de reduzir significativamente o conteúdo do efluente de entrada na maior parte destes parâmetros, tal como se havia determinado na análise anterior aos parâmetros físico-químicos.

O uso de técnicas de ACP para inferir das características e funcionamento de estações de tratamento não é completamente novo. Amaral *et al.* (1999) identificaram os micro-organismos a partir dos parâmetros morfológicos área, excentricidade e forma de *Feret*, entre outros. Com estes parâmetros, foram inseridos na ACP onde foram identificados a partir dos micro-organismos indicadores de problemas no tratamento de efluente. Esta mesma técnica foi utilizada por Jenné *et al.* (2006) com os parâmetros morfológicos para o floco do lodo ativado. Já Lee *et al.* (2005) utilizaram ACP para observar falhas e diagnosticar o processo em batelada. Leal *et al.* (2016)

realizaram ACP com os parâmetros de ocorrência de espumas e bactérias filamentosas, características do lodo e com os protozoários e metazoários. Enquanto que na presente tese apenas foi realizado ACP com a caracterização dos efluentes estudados.

Em outros trabalhos foi utilizada a ACP para monitorar a qualidade da água. De Souza *et al.* (2014) monitoraram a água de um rio que recebia efluente doméstico, utilizando os parâmetros turbidez, coliformes fecais, pH, OD, temperatura e condutividade. Na ACP as amostras de pH e condutividade estavam na PC1 em lados opostos e na PC2 no mesmo lado. Apenas a análise de pH da presente tese estava no mesmo lado na PC1 comparando com o trabalho de de Souza. Enquanto que Sabino *et al.* (2008) estudaram a Bacia do Rio Paraopeba no Estado de Minas Gerais, contaminado por esgotos sanitários e efluentes industriais, utilizando a ACP para reduzir os dados. Na ACP os parâmetros de DBO₅, pH e compostos nitrogenados estavam no mesmo lado da PC2. Na ACP realizada neste trabalho essas mesmas análises estavam no mesmo lado da PC2. Um dos motivos de tal semelhança na ACP é o fato desses rios receberem esgotos domésticos e industriais.

Avella *et al.* (2011) combinaram a análise estatística multivariada com as características físico-químicas para um sistema de tratamento de efluente por lodo ativado. No estudo da ACP eles relacionaram as entradas e saídas separadamente. Para entrada a DQO estava no lado positivo na PC1 e na PC2; a saída da DQO estava no lado positivo na PC1 e praticamente na origem em PC2. A presente tese a ACP foi realizada em conjunto entrada e saída gerando somente uma variável DQO onde tanto na PC1 como na PC2 está no lado positivo. Já em seus estudos Lourenço *et al.* (2010) com efluente doméstico realizaram ACP, onde a análise de DQO ficou no lado positivo tanto na PC1 como na PC2, e a análise de SST na PC1 ficou no lado positivo e na PC2 no lado negativo. Essas duas análises se apresentaram localizadas nos mesmos lados das PC's que a presente tese.

5.3 Análise de correlação para os dados das caracterizações das estações de tratamento de efluentes

Foi realizada uma Análise de Correlação (AC) com base nos dados das caracterizações das estações estudadas, empregando o *Microsoft Excel*, valores da AC os quais foram obtidos encontram-se tabelados no Apêndice B.

Verificou-se que os parâmetros da série dos sólidos (ST, SF, SV, SST, SSF e SSV) estavam relacionados entre si, apresentando um fator de correlação maior que 0,9, corroborando a sua proximidade na análise ACP no quadrante inferior direito de PC1 vs. PC2 (à exceção dos SF ligeiramente afastados). De facto, os SF que apresentam os menores valores de correlação na série dos sólidos foram os que se distanciaram mais desta série na análise ACP. Tal como no corrente estudo, em que se verificou que os ST se encontravam próximos dos SST, também Sabino *et al.* (2008) verificaram, na AC efetuada, que os sólidos totais estavam correlacionados com os sólidos em suspensão (num rio contaminado com esgoto).

Tal como esperado, os parâmetros de DQO e DBO_5 tiveram um fator de correlação elevado (0,859), corroborando a sua proximidade no quadrante superior direito de PC1 vs. PC2 na análise ACP. Por sua vez, os parâmetros referentes ao nitrogênio, nas formas N-NH_3 e N-NO_3 , apresentaram um fator de correlação entre si de 0,967, corroborando a proximidade na ACP no quadrante superior direito de PC1 vs. PC2. Verificou-se ainda que a cor correlacionou bem com a DBO_5 , DQO, N-NH_3 e N-NO_3 , apresentando fatores de correlação de 0,930, 0,878, 0,828 e 0,780, respetivamente. De fato, todos estes parâmetros encontraram-se, na análise ACP, próximos no quadrante superior direito de PC1 vs. PC2.

Na Tabela 10 estão contidos as interrelações que tiveram um fator de correlação acima de 0,9.

TABELA 10 - Análise de correlação dos parâmetros das estações.

Relações	Fator de Correlação (FC)
DBO₅ e Cor	0,930
ST e SF	0,948
ST e SV	0,999
ST e SST	0,999
ST e SSF	0,996
ST e SSV	0,999
SF e SV	0,935
SF e SST	0,934
SF e SSF	0,929
SF e SSV	0,934
SV e SST	1,000
SV e SSF	0,997
SV e SSV	1,000
SST e SSF	0,998
SST e SSV	1,000
SSF e SSV	0,997
N-NH₃ e N-NO₃	0,967

Fonte: Autor (2018).

De Andrade *et al.* (2007) determinaram a qualidade das águas superficiais na Bacia do Baixo Acaraú localizada no estado do Ceará que recebia esgoto sanitário, através do emprego de técnicas de AC e ACP utilizando parâmetros físico-químicos e bacteriológicos. A Tabela 11 estão contidos os parâmetros físico-químicos e o fator de correlação entre eles para o trabalho de de Andrade *et al.* (2007) e a presente tese.

TABELA 11 - Comparação AC de de Andrade et al. (2007) com a presente tese.

de Andrade et al. (2007)	Presente tese
cor e turbidez (r = 0,969)	turbidez e cor (r = 0,534)
cor e sólidos suspensos (r = 0,876)	cor e sólidos suspensos totais (r = -0,007)
sólidos suspensos e DBO ₅ (r = 0,868)	sólidos suspensos totais e DBO ₅ (r = 0,019)
sólidos suspensos e turbidez (r = 0,821)	turbidez e sólidos suspensos totais (r = 0,346)
cor e amônia (r = 0,812)	cor e amônia (r = 0,828)
magnésio e dureza (r = 0,877)	
pH e OD (r = 0,869)	
condutividade elétrica e sódio (r = 0,847)	
sulfato e nitrato (r = 0,818)	

Fonte: Autor (2018).

Apenas as análises cor e turbidez apresentaram o fator de correlação acima de 0,969 no trabalho de de Andrade *et al.* (2007). De fato, pela ACP, os parâmetros turbidez e cor apresentou um fator de correlação de 0,534 estando no mesmo quadrante, porém distantes entre si. Já para a cor e os sólidos suspensos totais apresentou um fator de correlação de -0,007, um valor muito baixo para uma correlação e de acordo com a ACP esses dois parâmetros estão em quadrantes diferentes e distantes entre si. Para os sólidos suspensos totais e DBO₅ apresentou um fator de correlação de 0,019, considerado baixo e de acordo com a ACP esses dois parâmetros estão distantes entre si e em quadrantes diferentes. Para a turbidez com os sólidos suspensos totais apresentou um fator de correlação de 0,346 e pela ACP esses dois parâmetros estão distantes entre si e em quadrantes diferentes. E para cor e amônia apresentou um fator de correlação de 0,828 e pela ACP estão no mesmo quadrante e relativamente próximos.

5.4 Índice volumétrico do lodo (IVL)

Jenkins *et al.* (2003) determinaram que um valor do IVL abaixo de 120 mL.g⁻¹ é considerado satisfatório, e superior a 150 mL.g⁻¹ pode caracterizar um excesso de bactérias filamentosas ou a presença do flocos com baixa sedimentabilidade. A Tabela 12 estão contidos os resultados obtidos das análises para determinação do IVL.

TABELA 12 - Análises do lodo ativado.

	SST (mg.L ⁻¹)	SSF (mg.L ⁻¹)	SSV (mg.L ⁻¹)	IVL (mg.L ⁻¹)
PEQUENA	530	92	438	18,87
GRANDE	194	146	48	79,38
PEÇA 1	7800	1400	6400	74,36
PEÇA 2	15900	1700	14200	29,87
PEÇA 3	3450	250	3200	23,19
ABATE 1	18800	2900	15900	1,06
ABATE 2	4900	350	4550	2,04
HIGIENE 1	220	40	182	45,45
HIGIENE 2	1704	262	1442	70,42
AMIDO	1220	380	840	750,00

Fonte: Autor (2018).

Apenas a coleta da indústria de processamento de amido apresentou um IVL superior a 150 mL.g⁻¹ (750 mL.g⁻¹) indicador de um possível fenômeno de *bulking*. As demais amostras apresentavam valores satisfatórios de acordo com o trabalho de Jenkins, Richard e Daigger (2003). As coletas ABATE 1 e ABATE 2 apresentaram valores muito baixos para o IVL o que poderá corresponder a uma deficiente formação da estrutura do floco, levando a um problema de equilíbrio entre as espécies de bactérias que se pode refletir no rendimento do sistema e *washout* da biomassa. A coleta AMIDO teve um IVL muito alto, indiciando uma presença elevada de bactérias filamentosas (*bulking* filamentoso) ou de flocos de elevada dimensão e não sedimentáveis (*bulking* viscoso), o que pode ter sido causado por várias razões como um choque hidráulico, orgânico, tóxico, condições de sub-aeração ou uma variação da tensão superficial do licor misto.

5.5 Identificações dos micro-organismos

Os micro-organismos foram identificados através de árvore de decisões, confirmados com validação visual e as suas influências nas ETEs foram analisados de acordo com os trabalhos de Madoni (1994, 2011), Madoni *et al.* (1993), Madoni *et al.* (1996), Nicolau *et al.* (1997), Canler *et al.* (1999) e Ginoris *et al.* (2007c). Na Tabela 13 estão contidos os principais grupos de

protozoários e metazoários presentes no lodo ativado de acordo com Madoni (1994).

TABELA 13 - Grupos de micro-organismos.

Abreviatura	Grupo	Micro-organismo
AMB	Amebas nuas	<i>Amoeba</i> sp.
		<i>Entamoeba</i> sp.
		<i>Chaos</i> sp.
ATC	Amebas com teca	<i>Euglypha</i> sp.
		<i>Arcella</i> sp.
SES	Ciliados sésseis	<i>Epistylis</i> sp.
		<i>Opercularia</i> sp.
		<i>Vorticella aquadulcis</i>
		<i>Vorticella</i> sp.
		<i>Vorticella microstoma</i>
CMF	Ciliado móvel de fundo	<i>Zoothamnium</i> sp.
		<i>Aspidisca cicada</i>
		<i>Trithigmotoma</i> sp.
		<i>Stylonychia</i> sp.
		<i>Euplotes</i> sp.
CND	Ciliado nadador	<i>Trochilia</i> sp.
		<i>Thrachelophyllum</i> sp.
		<i>Drepanomonas revoluta</i>
		<i>Paramecium</i> sp.
		<i>Colpidium</i> sp.
		<i>Colpoda</i> sp.
FLG	Grandes flagelados	<i>Uronema nigricans</i>
		<i>Glaucoma scintilans</i>
MET	Metazoários	<i>Peranema</i> sp.
		Digononta
		Monogononta
		Nematoda

Fonte: Autor (2018).

Na Tabela 14 estão contidos os micro-organismos das ETEs estudadas, cada um deles representa uma característica específica do funcionamento das estações.

TABELA 14 - Micro-organismos presentes nas ETEs.

Grupo	Micro-organismo
Amebas nuas	Ameba nua (AMB)
Amebas com teca	<i>Arcella</i> sp. (ARC); <i>Euglypha</i> sp. (EUG)
Ciliados sésseis	<i>Epistylis</i> sp. (EPI); <i>Opercularia</i> sp. (OPE); <i>Vorticella aquadulcis</i> (VAQ); <i>Vorticella</i> sp. (VCT); <i>Vorticella microstoma</i> (VMC); <i>Zoothamnium</i> sp. (ZOO)
Ciliados móveis de fundo	<i>Aspidisca cicada</i> (ASP); <i>Euplotes</i> sp. (EUP); <i>Trithigmotoma</i> sp. (TRI); <i>Trochilia</i> sp. (TRO); <i>Stylonychia</i> sp. (STY)
Ciliados nadadores	<i>Colpidium</i> sp. (COL); <i>Colpoda</i> sp. (CLP); <i>Drepanomonas</i> sp. (DRP); <i>Glaucoma</i> sp. (GLA); <i>Paramecium</i> sp. (PAR); <i>Trachelophyllum</i> sp. (TRA)
Grandes flagelados	<i>Peranema</i> sp. (PER)
Metazoários	Digononta (DIG); Monogononta (MON); Nematoda (NEM)

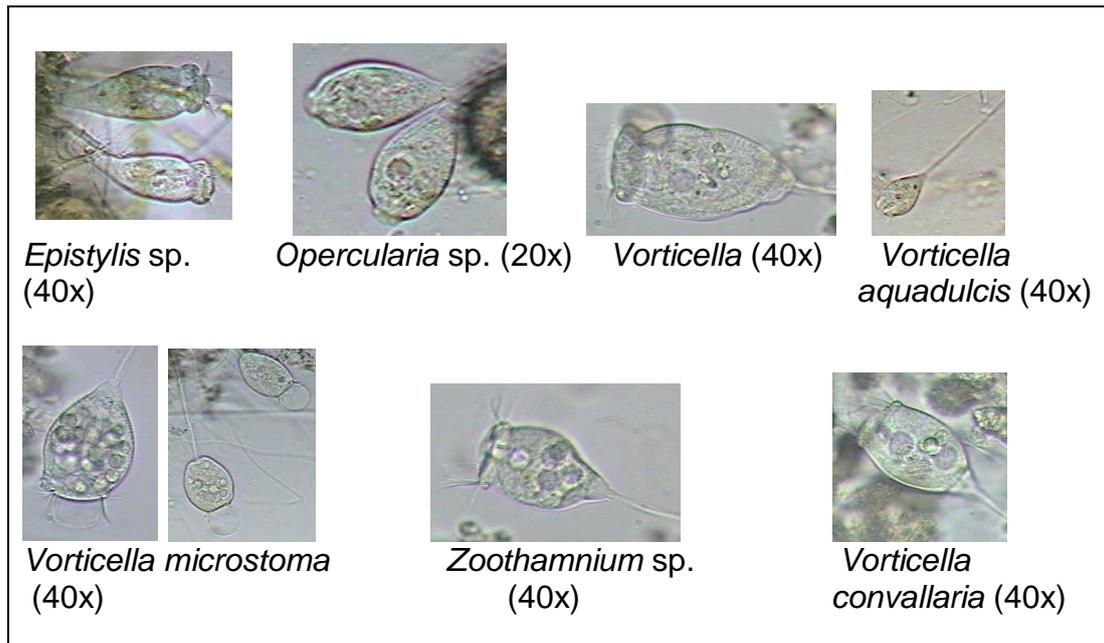
Fonte: Autor (2018).

Na Figura 11 estão contidas as imagens das amebas nuas, amebas com teca e os grandes flagelos encontrados e as ampliações que foram utilizadas na captura.

FIGURA 11 – Imagens de amebas nuas, amebas com teca e grandes flagelados.

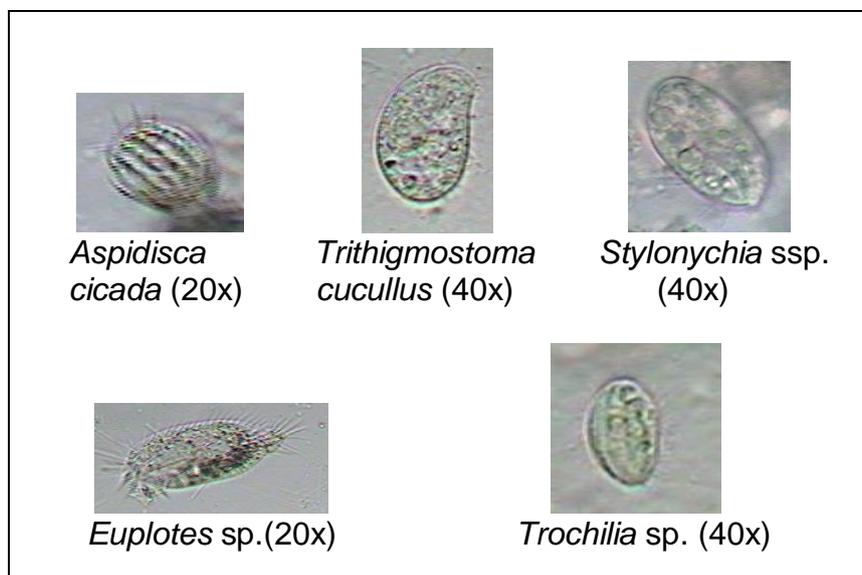
Fonte: Autor (2018).

Na Figura 12 estão contidas as imagens dos ciliados sésseis encontrados e suas ampliações que foram utilizadas na captura.

FIGURA 12 – Imagens de ciliados sésseis.

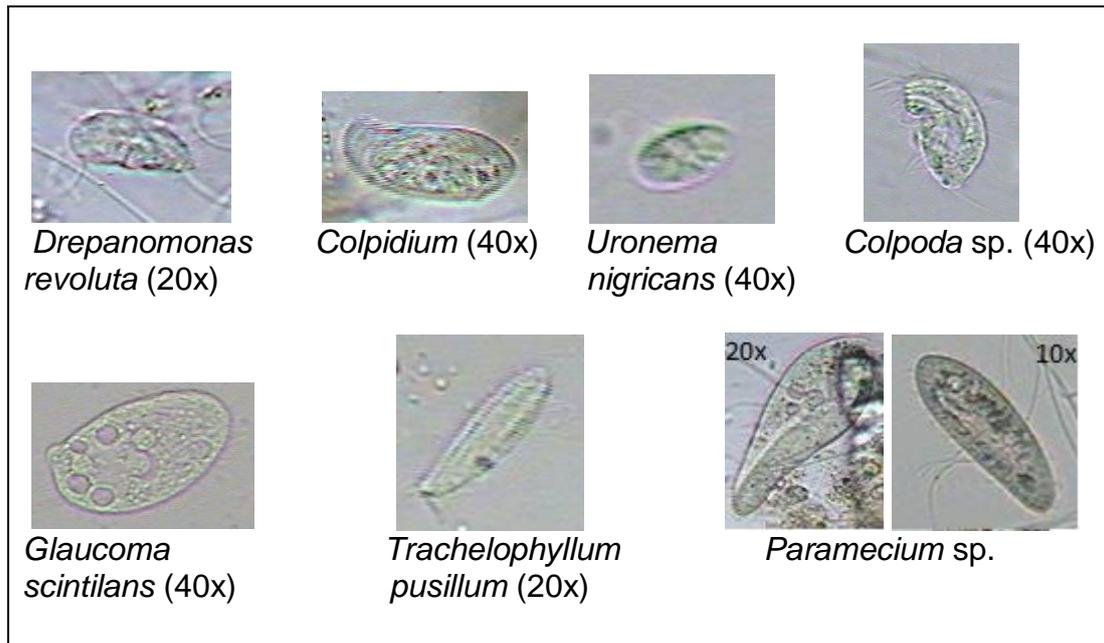
Fonte: Autor (2018).

Na Figura 13 estão contidas as imagens dos ciliados móveis de fundo encontrados e suas ampliações que foram utilizadas na captura.

FIGURA 13 – Imagens de ciliados móveis de fundo.

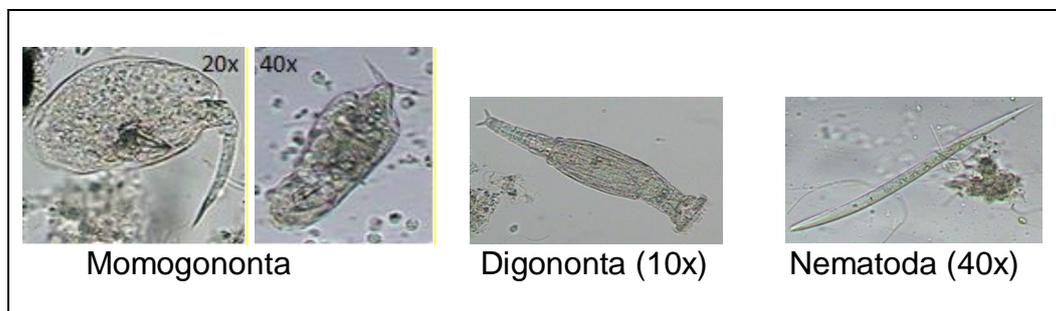
Fonte: Autor (2018).

Na Figura 14 estão apresentadas as imagens dos ciliados nadadores encontrados e as ampliações das imagens que foram utilizadas na captura.

FIGURA 14 – Imagens de ciliados nadadores.

Fonte: Autor (2018).

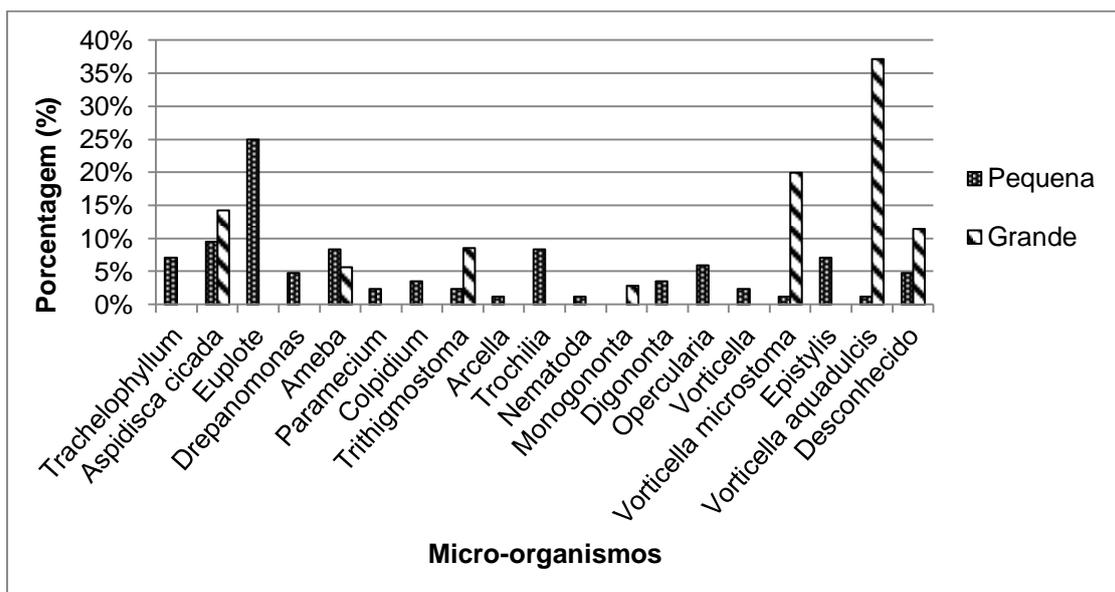
Na Figura 15 estão contidos os metazoários encontrados nas imagens dos micro-organismos e suas ampliações que foram utilizadas na captura.

FIGURA 15 – Imagens de metazoários.

Fonte: Autor (2018).

Na Figura 16 estão contidos os percentuais dos micro-organismos identificados nas estações de efluentes domésticos de pequeno e grande porte.

FIGURA 16 - Micro-organismos identificados para as estações pequena e grande.



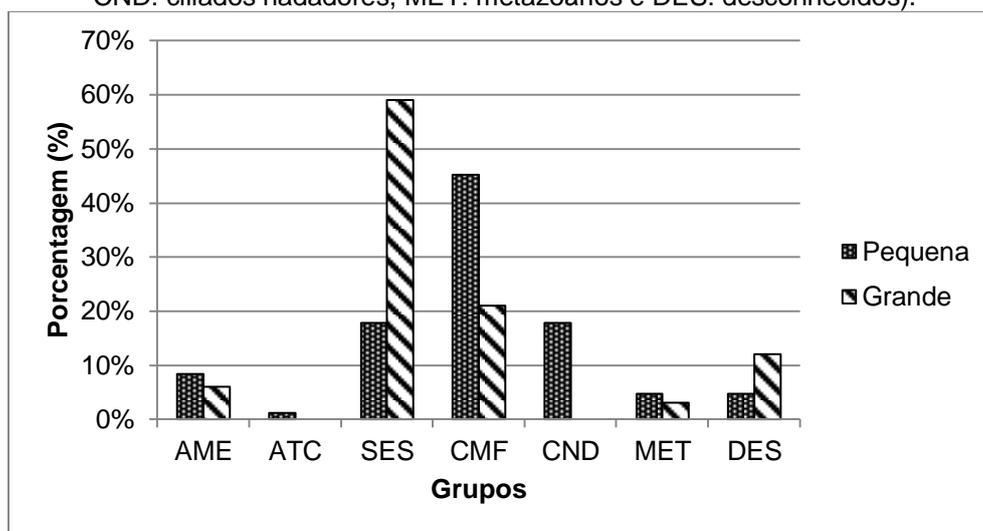
Através da análise da Figura 16, pode-se verificar que para a indústria PEQUENA foram identificadas 17 espécies de micro-organismos diferentes, salientando-se os *Euplotes*, *Aspidisca cicada*, amebas nuas, *Trochilia*, *Trachelophyllum* e *Epistylis*, embora nenhum destes fosse claramente predominante. De acordo com Nicolau *et al.* (1997) e Ginoris *et al.* (2007c) a presença de *Euplotes*, *Trochilia* e *Epitylis*, indica uma carga orgânica adequada no sistema, processos de nitrificação e boa qualidade do efluente final, o que não foi inteiramente comprovado pelas análises efetuadas. Já a presença de *Aspidisca cicada* é bastante comum em sistemas de tratamento de esgotos e, segundo, Soares *et al.* (2014) e Canler *et al.* (1999), a presença deste micro-organismo é um indicador de um desempenho satisfatório. Por outro lado, a presença de amebas nuas e *Trachelophyllum* indicam a possibilidade de instabilidade do sistema, ou em determinadas zonas do sistema, a carga orgânica ser superior ao desejado e a qualidade do efluente mediana.

Já para a indústria GRANDE, foram identificados apenas 7 micro-organismos diferentes, tendo-se destacado a *Vorticella aquadulcis*, *Vorticella microstoma*, *Aspidisca cicada* e *Trithigmostoma*. Segundo Madoni (1994) e Ginoris *et al.* (2007c) a presença do micro-organismo *Vorticella aquadulcis* indica uma boa qualidade do efluente tratado e uma boa aeração do sistema. Por outro lado, segundo Madoni (1994), Madoni *et al.* (1993) e Ginoris *et al.* (2007c), a presença do micro-organismo *Vorticella microstoma* indica a

possibilidade de instabilidade do sistema, ou ainda que em determinadas zonas do sistema, pode-se ter um efluente de baixa qualidade e elevado valor de DBO_5 .

Na Figura 17 estão dispostos os percentuais dos grupos de micro-organismos presentes nas estações de efluentes domésticos de pequeno e grande porte.

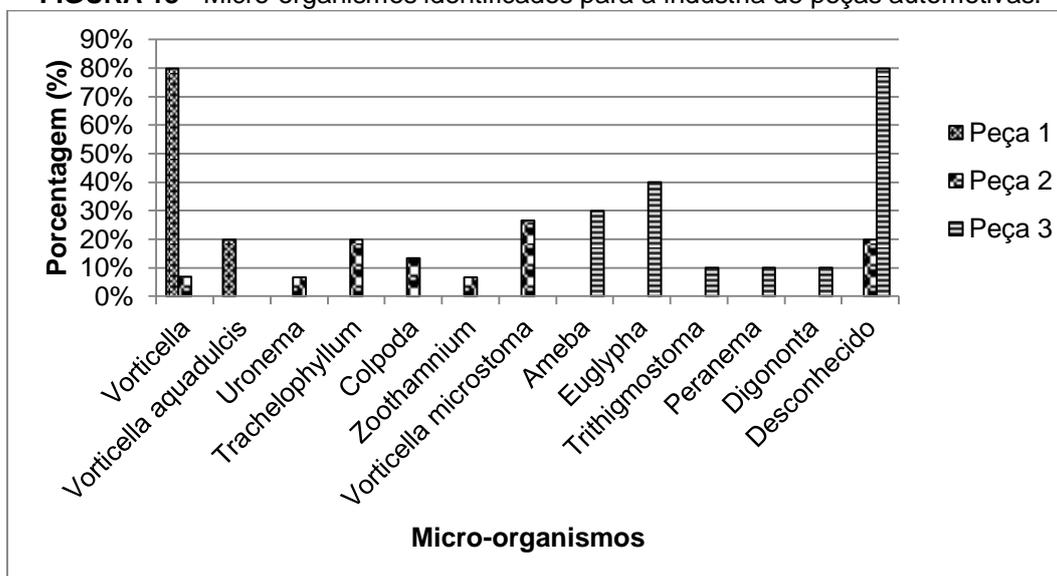
FIGURA 17 - Grupos de micro-organismos nas estações pequena e grande. (Onde: AME: amebas nuas, ATC: amebas com teca, SES: ciliados sésseis, CMF: ciliados móveis de fundo, CND: ciliados nadadores, MET: metazoários e DES: desconhecidos).



Através da Figura 17, pode-se verificar que para a estação PEQUENA o grupo de micro-organismos predominante foram os ciliados móveis de fundo. Segundo Nicolau et al. (1997) a presença deste grupo indica que o sistema apresenta uma eficiência de razoável a boa. Também foram relevantes os ciliados sésseis e os nadadores. Segundo Hu et al. (2013) a presença de ciliados sésseis está relacionada com remoções razoáveis de DBO_5 e DQO, tendo-se em atenção, contudo que deverão estar acompanhados pelo grupo dos ciliados móveis de fundo. Por outro lado os ciliados nadadores, segundo Nicolau et al. (1997) e Ginoris et al. (2007c), indicam condições de sub-aeração e uma baixa eficiência do sistema. O conjunto destes micro-organismos, tendo ainda em atenção a presença de amebas nuas, pode ser relacionados com as remoções obtidas de DBO_5 de 88% e de DQO de 66%. A estação GRANDE apresentou predominantemente ciliados sésseis e alguns móveis de fundo, e uma menor diversidade de micro-organismos, espelhando remoções mais baixas de DBO_5 de 68% e de DQO de 51%.

Na Figura 18 estão dispostos os percentuais dos micro-organismos que foram identificados na estação de efluente da indústria de peças automotivas.

FIGURA 18 - Micro-organismos identificados para a indústria de peças automotivas.



Na coleta PEÇA 1, o micro-organismo predominante foi a *Vorticella*, tendo-se também verificado a presença de *Vorticella aquadulcis*. Mas, para esta coleta uma baixa diversidade de micro-organismos foi identificada. Segundo Canler *et al.* (1999), as *Vorticella* são razoavelmente sensíveis a substâncias tóxicas e a falta de oxigênio e quanto maior o pedúnculo melhor será o tratamento. Por outro lado, a presença das *Vorticella*, por si só, não providenciam uma correta aferição do sistema, embora a presença de *Vorticella aquadulcis* esteja ligada a baixas cargas orgânicas, bom arejamento e um efluente final de boa qualidade. De acordo com a caracterização físico-química, esta estação apresentou uma boa remoção de DQO e DBO₅, assim como um processo de nitrificação (aeróbio).

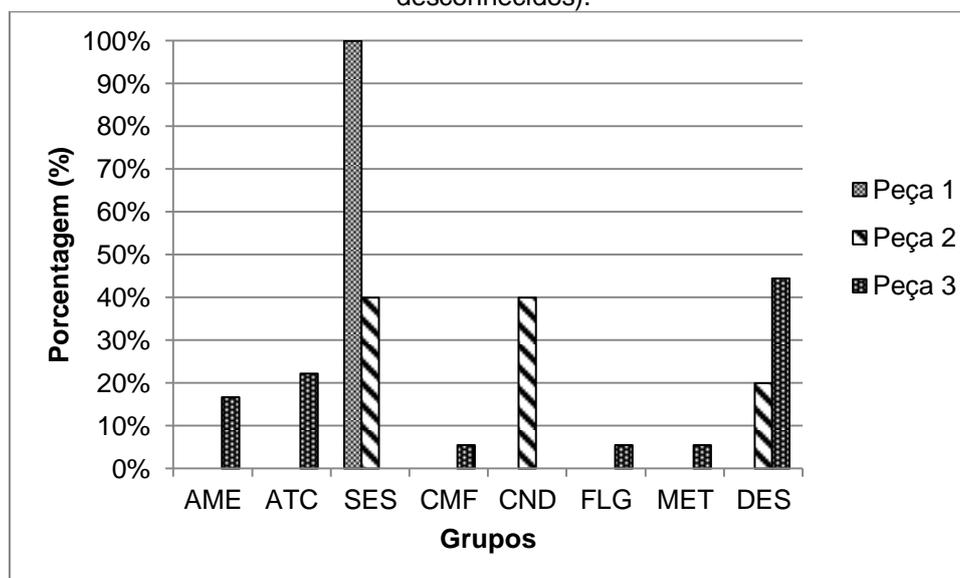
Para a coleta PEÇA 2 foram identificadas 6 espécies de micro-organismos diferentes, predominando a *Vorticella microstoma*, *Trachelophyllum* e *Colpoda*. Segundo Madoni (1994), Madoni *et al.* (1993) e Ginoris *et al.* (2007c) a presença de *Vorticella microstoma* está relacionada com um efluente de baixa qualidade, condições de sub-aeração e elevado valor de DQO e DBO₅ no efluente tratado. Segundo Ginoris *et al.* (2007c) a presença de *Trachelophyllum* indica também uma elevada carga orgânica e um efluente de baixa qualidade. Contudo, esta indicação não pode ser inteiramente

comprovada pela caracterização desta coleta, embora tenha apresentado valores relevantes de DBO₅ e DQO na saída.

Na coleta PEÇA 3 foram identificadas 5 espécies de micro-organismos diferentes, predominando a *Euglypha* (ameba com teca), amebas nuas, *Trithigmostoma* e *Peranema*. Segundo Nicolau *et al.* (1997) e Ginoris *et al.* (2007c) as amebas nuas representam uma baixa eficiência do tratamento, mas a *Euglypha*, *Trithigmostoma* e *Peranema* são indicadores de uma baixa carga orgânica e boa qualidade do efluente tratado. Deste modo, o sistema pode ser considerado como funcionando adequadamente, o que é confirmado pela alta remoção de DQO e DBO₅.

Na Figura 19 estão dispostos os percentuais dos grupos de micro-organismos presentes na estação de efluente da indústria de peças automotivas.

FIGURA 19 - Grupos de micro-organismos na estação da indústria de peças automotivas. (Onde: AME: amebas nuas, ATC: amebas com teca, SES: ciliados sésseis, CMF: ciliados móveis de fundo, CND: ciliados nadadores, FLA: flagelados, MET: metazoários e DES: desconhecidos).



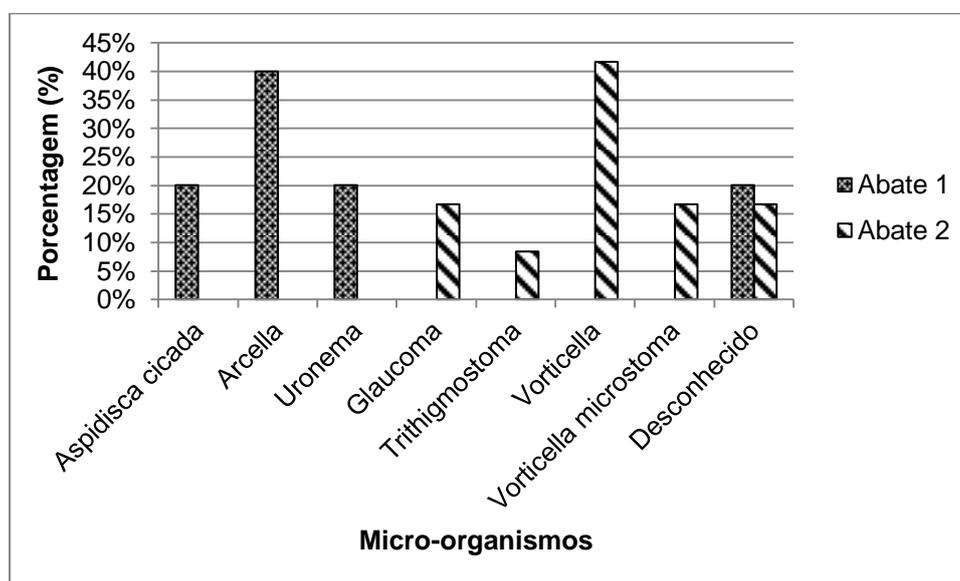
Para a coleta PEÇA 1 apenas se verificou a presença de ciliados sésseis que, segundo Hu *et al.* (2013) estão relacionados com as remoções razoáveis de DBO₅ e DQO. De fato, de acordo com a caracterização efetuada, observa-se uma remoção de DBO₅ de 96% e de DQO de 95,63% e valores de saída baixos.

Já para a para PEÇA 2 predominaram os ciliados sésseis e os ciliados nadadores. Estes últimos, segundo Nicolau *et al.* (1997) e Ginoris *et al.* (2007c), indicam condições de sub-aeração e uma baixa eficiência do sistema. Para mais, os ciliados sésseis encontrados reportaram-se a *Vorticella microstoma*, o que reforça essa indicação. De fato, embora tendo sido verificadas remoções elevadas de DBO₅ de 81% e de DQO de 92%, os valores de saída destes parâmetros ainda foram relativamente elevados.

Para a coleta PEÇA 3 os protozoários mais frequentes foram as amebas nuas e as amebas com teca, que segundo Nicolau *et al.* (1997) e Ginoris *et al.* (2007c) as amebas nuas representam uma baixa eficiência do tratamento, enquanto que as amebas com teca representam uma boa eficiência do tratamento. Esta indicação pode ser confirmada com a caracterização desta coleta que, apesar de apresentar elevadas remoções de DBO₅ e de DQO, os valores de saída destes parâmetros ainda foram relativamente elevados.

Na Figura 20 estão dispostos os percentuais dos micro-organismos que foram identificados na estação do abatedouro de aves.

FIGURA 20 - Micro-organismos identificados para estação do abatedouro de aves.



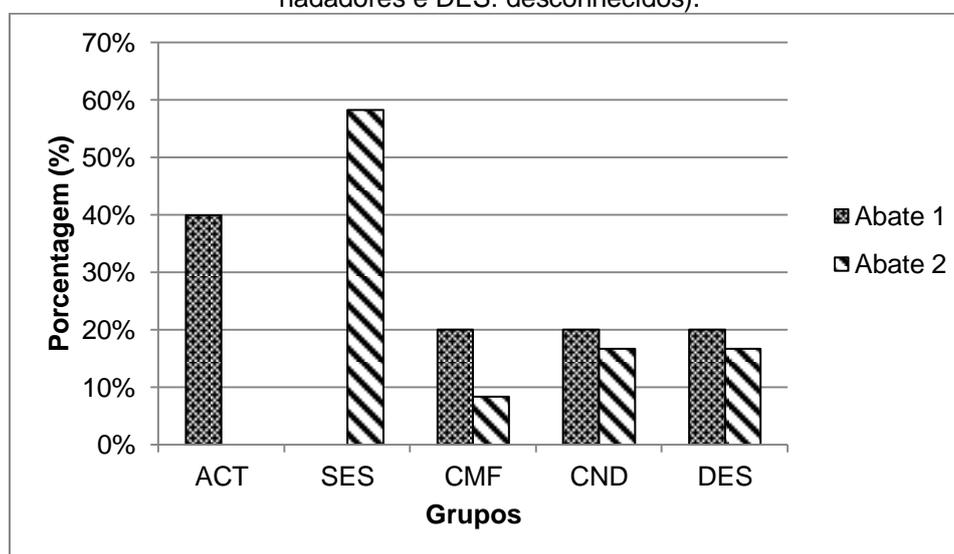
Para a coleta ABATE 1 o micro-organismo mais frequente foi a *Arcella*, seguida pela *Aspidisca cicada* e *Uronema*, num total de apenas 3 espécies de micro-organismos diferentes identificadas, além de uns desconhecidos. Enquanto, que estes dois últimos protozoários não são usados, por si só, como referência para se ter uma avaliação do desempenho da estação, segundo

Zhou *et al.* (2006) e Ginoris *et al.* (2007c) a presença de *Arcella* na estação representa uma baixa carga orgânica e um bom desempenho do tratamento. Madoni *et al.* (1993) e dos Santos *et al.* (2014) relacionaram ainda a sua presença com a nitrificação, tendo dos Santos associado a uma boa oxigenação e aeração prolongada.

Para a coleta ABATE 2 o micro-organismo predominante foi o gênero *Vorticella*, seguido pela *Vorticella microstoma* e *Glaucoma*, com um total de apenas 4 espécies diferentes identificadas. Segundo Canler *et al.* (1999), as *Vorticella* são relativamente sensíveis às substâncias tóxicas e a falta de oxigênio. Já a *V. microstoma* está relacionada com um efluente de baixa qualidade, condições de sub-aeração e elevado valor de DQO e DBO₅ no efluente tratado. De fato de acordo com a caracterização efetuada foi possível observar que o valor de DQO de saída ainda se encontra relativamente elevado.

Na Figura 21 estão dispostos os percentuais dos grupos de micro-organismos presentes na estação de efluente do abatedouro de aves.

FIGURA 21 - Grupos de micro-organismos na estação do abatedouro de aves. (Onde: ACT: amebas com teca, SES: ciliados sésseis, CMF: ciliados móveis de fundo, CND: ciliados nadadores e DES: desconhecidos).



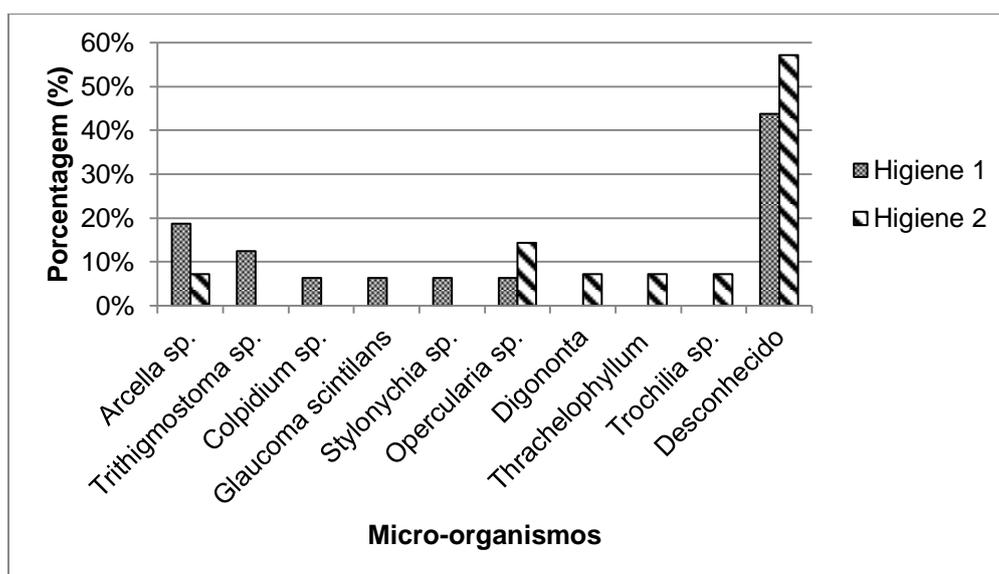
Para a coleta ABATE 1 o grupo das amebas com teca foi o predominante o que, segundo Nicolau *et al.* (1997), representa uma boa aeração e eficiência do tratamento. De fato, a estação ABATE é formada por um sistema de aeração prolongada. Contudo, realce-se ainda que esta estação

apresentou uma diversidade reduzida de micro-organismos, o que pode estar relacionado com os valores ainda elevados na saída de DQO.

Para a coleta ABATE 2 o grupo dominante foi o dos ciliados sésseis. Como referido anteriormente, segundo Hu *et al.* (2013), a presença de ciliados sésseis está relacionada com remoções razoáveis de DBO₅ e DQO, contudo deverão estar acompanhados pelo grupo dos ciliados móveis de fundo, o que não sucedeu neste caso. De acordo com a caracterização efetuada as remoções foram de 97% para DBO₅ e de 95% para DQO. Mais uma vez se verificou uma diversidade reduzida de micro-organismos e o efluente de saída ainda possuía valores relativamente elevados para estes parâmetros.

Na Figura 22 estão dispostos os percentuais dos micro-organismos que foram identificados na estação da indústria de produtos de higiene pessoal.

FIGURA 22 - Micro-organismos identificados para indústria de produtos de higiene pessoal.

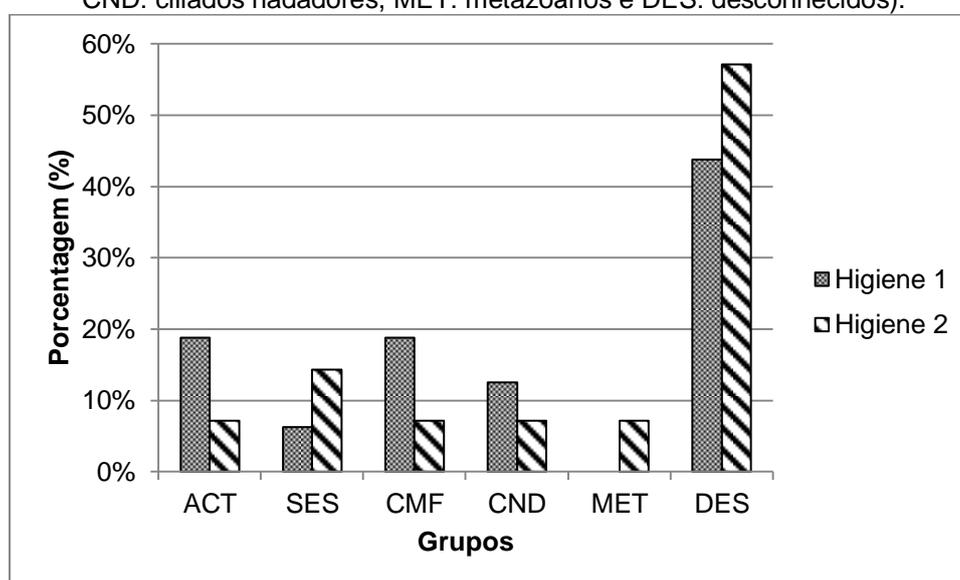


Para a coleta HIGIENE 1 foram identificadas 6 espécies diferentes de micro-organismos, predominando a *Arcella* e o *Trithigmostoma*. Segundo Zhou *et al.* (2006), Ginoris *et al.* (2007c) e Dubber e Gray (2011), a sua presença na estação representa um bom desempenho de tratamento. Madoni *et al.* (1993) e dos Santos *et al.* (2014) relacionaram ainda a presença de *Arcella* com a nitrificação e uma aeração prolongada. De acordo com a caracterização físico-química efetuada foi determinada que a coleta HIGIENE 1 tinha características de um sistema com uma boa eficiência e ocorrendo a nitrificação com aeração prolongada.

Para a coleta HIGIENE 2 foram identificadas 5 espécies diferentes com uma pequena predominância da *Opercularia* sp. Segundo Ginoris *et al.* (2007c) e Canler *et al.* (1999), a sua presença indica sub-aeração, carga orgânica elevada e um tratamento de baixa qualidade. Contudo, também se verificou que o efluente na saída ainda possuía elevada matéria orgânica, tanto em termos de DQO quanto de DBO₅.

Na Figura 23 estão dispostos os percentuais dos grupos de micro-organismos presentes na estação da indústria de produtos de higiene pessoal.

FIGURA 23 - Grupos de micro-organismos na estação da indústria de produtos de higiene pessoal. (Onde: ACT: amebas com teca, SES: ciliados sésseis, CMF: ciliados móveis de fundo, CND: ciliados nadadores, MET: metazoários e DES: desconhecidos).



Para a coleta HIGIENE 1, os grupos mais frequentes foram a ameba com teca e os ciliados móveis de fundo. Segundo Nicolau *et al.* (1997), estes grupos indicam uma boa eficiência do tratamento e possibilidade de nitrificação. De fato foi possível de verificar uma eficiência de remoção de DQO de 94%, e em certa medida, indícios da presença de nitrificação pelo aumento do teor em N-NO₃.

Para a coleta HIGIENE 2 o grupo mais frequente foi o dos ciliados sésseis, mas com apenas uma pequena predominância sobre os demais micro-organismos identificados. Segundo Nicolau *et al.* (1997) a presença deste grupo indica que o sistema apresenta uma razoável eficiência de remoção de DQO. De acordo com a caracterização a remoção de DQO foi de 85%, apesar

da caracterização do efluente na saída indicar ainda um elevado conteúdo em matéria orgânica.

5.6 Monitoramento do Reator Canal

No reator canal foi utilizado lodo ativado da indústria de processamento de amido e esta foi alimentado com um efluente sintético cuja DQO era de aproximadamente $761 \text{ mg O}_2\cdot\text{L}^{-1}$. Na Tabela 15 contém os valores médios e seus respectivos desvios padrão para o monitoramento do reator canal. A tabela com os dados do monitoramento do reator canal se encontra no Apêndice C.

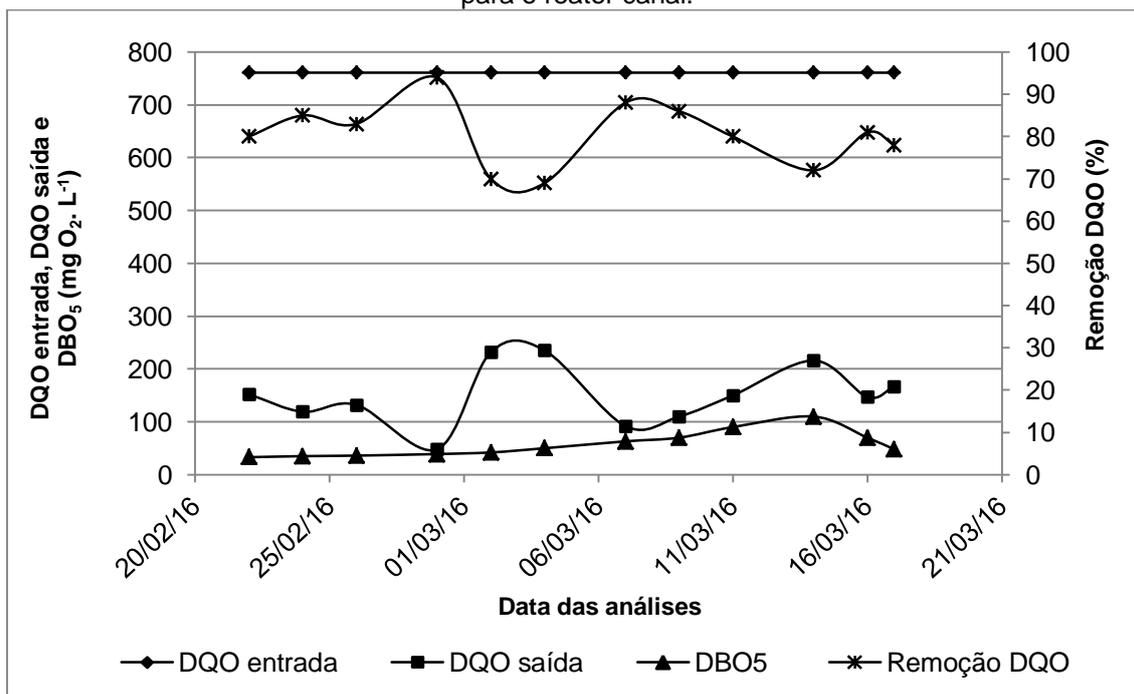
TABELA 15 - Valores médios e desvios padrões para o monitoramento do reator canal.

Análises	Média com desvios padrão
DQO ($\text{mg O}_2\cdot\text{L}^{-1}$)	150 ± 56
Remoção DQO (%)	80 ± 7
DBO₅ ($\text{mg O}_2\cdot\text{L}^{-1}$)	$58,30 \pm 31,01$
pH	$6,97 \pm 0,01$
Condutividade ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	$2,00 \pm 0,32$
NaCl ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	$900,91 \pm 99,68$
OD ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	$3,20 \pm 0,92$

Fonte: Autor (2018).

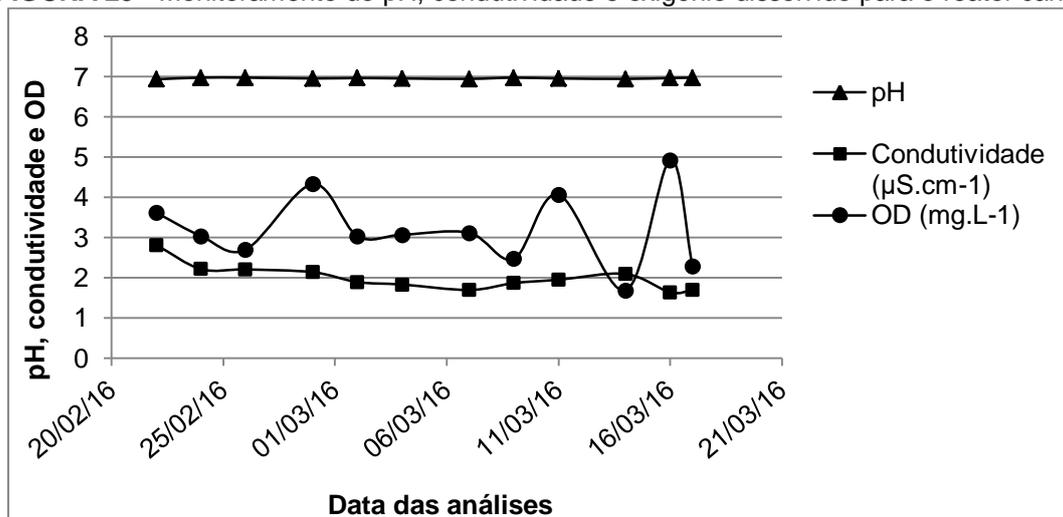
Nas Figuras 24, 25 e 26 estão dispostos os gráficos do comportamento de alguns parâmetros analisados no reator canal durante o seu monitoramento. Na Figura 24 estão dispostos os gráficos do monitoramento das análises DQO da entrada e saída, DBO₅ de saída e a remoção de DQO em termos percentuais para o reator canal ao longo do monitoramento.

FIGURA 24 - Monitoramento da DQO da entrada e saída, DBO₅ da saída e a remoção da DQO para o reator canal.

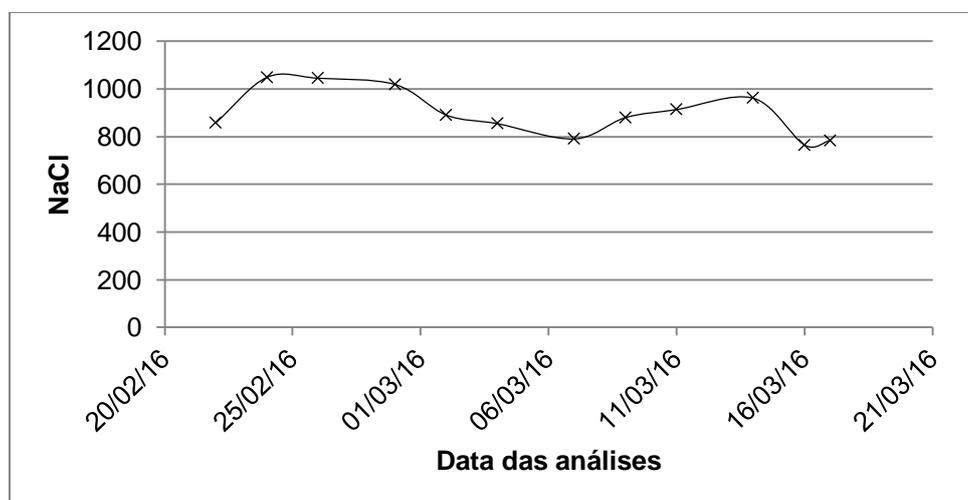


O reator canal foi alimentado com um efluente sintético com uma DQO de 761 mg O₂.L⁻¹. O valor da DQO de saída máximo foi de 235 mg O₂.L⁻¹ e o mínimo de 48 mg O₂.L⁻¹, apresentando um valor médio de aproximadamente 150 mg O₂.L⁻¹. A remoção de DQO média foi de 80%, apresentando remoções máxima de 94% e mínima de 69%. Pelo fato da DBO₅ ser uma análise que requer um longo tempo para se obter um resultado não foi analisada na mesma quantidade que as análises da DQO, tendo o valor médio sido de 58,30 mg O₂.L⁻¹.

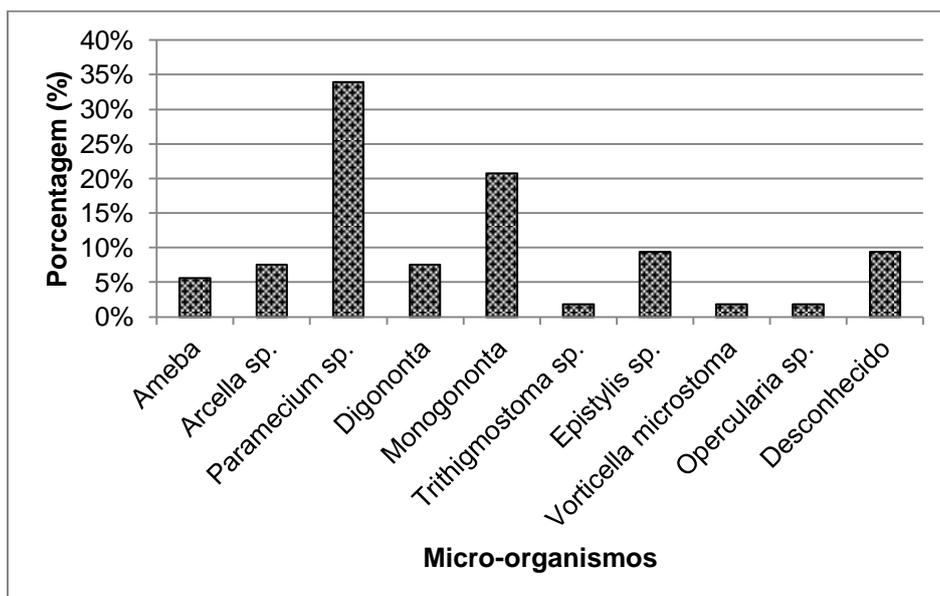
Na Figura 25 estão dispostos os gráficos do pH, a condutividade e o oxigênio dissolvido para o monitoramento do reator canal ao longo do tempo de monitoramento. O pH permaneceu praticamente constante durante todo o monitoramento do reator canal, com um valor médio de 6,97. Atendendo aos parâmetros recomendados pelo CONAMA, a estação estaria de acordo em termos de pH. O oxigênio dissolvido apresentou um valor médio de 3,20 mg O₂.L⁻¹, com valor máximo de 4,33 mg O₂.L⁻¹ e mínimo de 1,68 mg O₂.L⁻¹. A condutividade apresentou valor médio de 2,03 μS.cm⁻¹, com valor máximo de 2,82 μS.cm⁻¹ e mínimo de 1,70 μS.cm⁻¹.

FIGURA 25 - Monitoramento do pH, condutividade e oxigênio dissolvido para o reator canal.

Na Figura 26 está disposto o gráfico do monitoramento da análise de NaCl para o reator canal ao longo do tempo de monitoramento. A análise NaCl apresentou um valor médio de $900,91 \text{ mg.L}^{-1}$, com valores máximo de 1049 mg.L^{-1} e mínimo de $764,7 \text{ mg.L}^{-1}$.

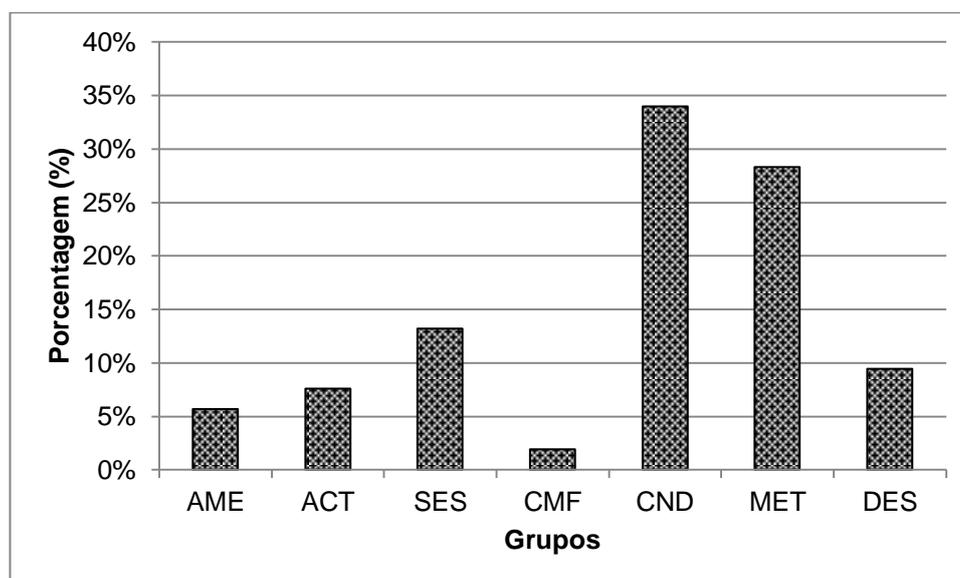
FIGURA 26 - Monitoramento do cloreto de sódio para o reator canal.

Na Figura 27 estão dispostos os percentuais dos micro-organismos que foram identificados no reator canal durante o monitoramento.

FIGURA 27 - Micro-organismos identificados no reator canal.

Verificou-se a identificação de 9 espécies diferentes, com predomínio para a *Paramecium* e Monogononta. Segundo Canler *et al.* (1999) o predomínio de *Paramecium* sp. pode indicar um efluente de boa qualidade, enquanto que a Monogononta indica um tratamento estável e possível ocorrência de nitrificação.

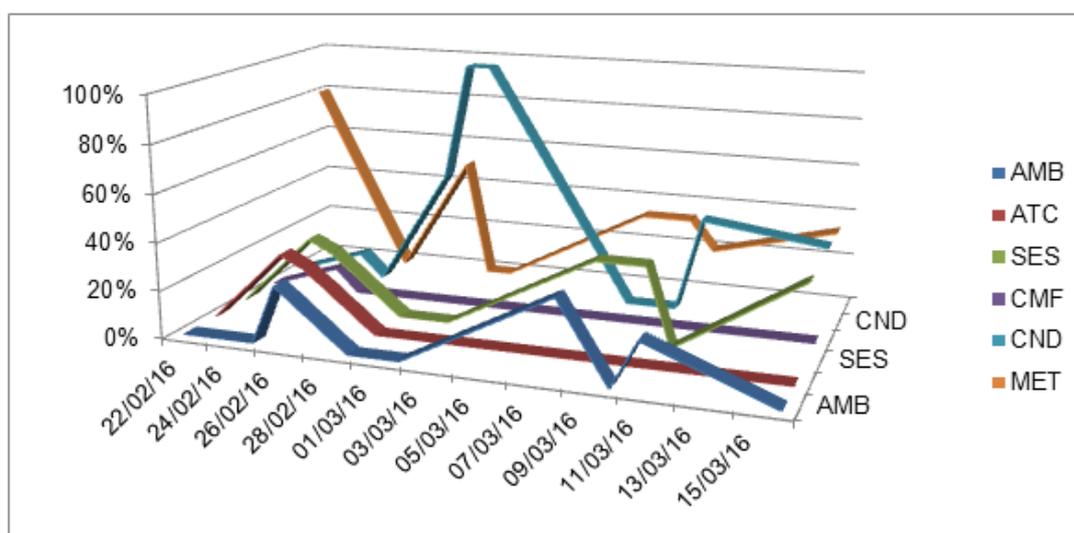
Na Figura 28 estão dispostos os percentuais dos grupos de micro-organismos que foram identificados no reator canal durante o monitoramento.

FIGURA 28 - Grupos de micro-organismos no reator canal. (Onde: AME: amebas nuas, ACT: amebas com teca, SES: ciliados sésseis, CMF: ciliados móveis de fundo, CND: ciliados nadadores, MET: metazoários e DES: desconhecidos).

Os grupos mais frequentes incluíram os ciliados nadadores, embora não tenha sido observado o seu claro predomínio face aos demais micro-organismos. De fato, segundo Soares *et al.* (2014) o predomínio desse grupo indicaria uma baixa eficiência do sistema e condições transientes. Contudo, tendo em atenção que o seu domínio foi apenas relativo e se tratou essencialmente do gênero *Paramecium*, a relação enunciada não é tão forte. Outro grupo encontrado em abundância foram os metazoários, especialmente Monogononta, que segundo Hu *et al.* (2013) estão relacionados com um sistema com boa aeração, possível nitrificação, de razoável a boa qualidade de efluente final e idade de lamas elevada. Contudo, foi também notório o valor baixo do grupo dos ciliados móveis de fundo o que pressupõe uma qualidade do efluente final que pode não ser muito elevada. De fato, pese embora a razoável percentagem de remoção da DQO, saliente-se também os valores ainda relativamente elevados da DQO à saída.

Na Figura 29 estão dispostos os percentuais dos grupos de micro-organismos que apareceram com mais frequência durante o monitoramento do reator canal.

FIGURA 29 - Grupos de micro-organismos identificados durante o monitoramento do reator canal. (Onde: AME: amebas nuas, ATC: amebas com teca, SES: ciliados sésseis, CMF: ciliados móveis de fundo, CND: ciliados nadadores e MET: metazoários).



Nesta análise destaca-se o grupo dos metazoários, seguido dos ciliados nadadores, aparecendo praticamente durante todo o tempo do monitoramento. Realce-se o fato de os ciliados nadadores, a meio do período do monitoramento (e por dois dias da análise), prevalecerem a 100%, tendo

substituído em termos relevantes até ao final do monitoramento. Analisando a evolução da remoção de DQO verifica-se que o período com maior preponderância de ciliados nadadores correspondeu ao período com menor remoção e DQO e maior DQO à saída. Tal fato já seria esperado uma vez que, segundo Nicolau *et al.* (1997) e Ginoris *et al.* (2007c), indicam condições de sub-aeração e uma baixa eficiência do sistema. Por outro lado, as amebas com teca e os ciliados móveis de fundo apareceram apenas no início do monitoramento e em percentagens relativamente baixas. De fato, o conjunto destes micro-organismos, segundo Nicolau *et al.* (1997) indicam um sistema apresentando uma boa eficiência de tratamento e boa aeração, e a sua ausência durante o restante período de monitoramento corresponde a uma qualidade do efluente final não muito elevada. Já os metazoários predominaram a 80% no primeiro dia do monitoramento e voltaram a aparecer significativamente nos quatro últimos dias. A presença destes micro-organismos, segundo Hu *et al.* (2013) pode indicar que, durante o período de monitoramento, a idade de lamas poderá ter sido elevada.

6 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Neste capítulo serão apresentadas as conclusões da presente tese e as perspectivas para trabalhos futuros.

6.1 CONCLUSÕES

Para a caracterização das estações as análises de pH, nitrogênio amoniacal e a remoção de DBO_5 são os parâmetros recomendados pela Resolução CONAMA 430/2011 para lançamento dos efluentes. Das estações analisadas apenas a coleta 1 do abatedouro de aves apresentou um valor do pH acima do recomendado.

Através da Análise de Componentes Principais (ACP) efetuada (para entrada e saída juntas) foi possível observar que as coletas que apresentaram maiores valores de um parâmetro, por norma se apresentaram no mesmo quadrante de componentes principais (PC1 vs. PC2) e próximas a esse parâmetro. As coletas 1 e 2 das entradas das estações de tratamento de efluentes da indústria de peças automotivas apresentaram valores próximos nas caracterizações, e na ACP estavam próximas entre si no quadrante inferior direito de PC1 vs. PC2, próximo da série dos sólidos uma vez que tiveram maiores valores nestes parâmetros à entrada. Já a coleta 3 da entrada da mesma indústria apresentou comportamento inverso às outras duas coletas ficando no lado oposto da PC2, próxima dos parâmetros representando a carga orgânica e em termos de nitrogênio, assim como a cor. De fato, esta coleta apresentou os valores mais elevados à entrada para a maior parte dessas análises. A título de exemplo, em termos de DQO de entrada da coleta 1 da indústria de peças automotivas foi de 1393 mg.L^{-1} , a PEÇA 2 foi de 1362 mg.L^{-1} (semelhante à coleta 1) e a PEÇA 3 foi de 10692 mg.L^{-1} (aproximadamente 7 vezes maior que as coletas 1 e 2). Já as coletas de entrada do abatedouro se apresentaram próximas entre si e separadas das restantes, uma vez que os efluentes de entrada nestas duas coletas é relativamente similar entre si mas não com os demais. Por outro lado, a diferença dos parâmetros químicos do

efluente à entrada para as coletas da indústria de higiene pessoal foi suficiente para que estas aparecessem relativamente isoladas entre si.

Por outro lado, todas as coletas de saída se encontraram agrupadas no quadrante inferior esquerdo, longe da série dos sólidos e dos parâmetros representando a carga orgânica e em termos de nitrogênio, demonstrando que os sistemas analisados foram capazes de reduzir significativamente o conteúdo do efluente de entrada na maior parte destes parâmetros.

Pela Análise de Correlação (AC) efetuada o mais uma vez se verificou que os parâmetros da série dos sólidos (ST, SF, SV, SST, SSF e SSV) estavam relacionados entre si, apresentando um fator de correlação maior que 0,9 (à exceção dos SF ligeiramente afastados na PC1). Adicionalmente, e em acordo com os resultados da análise ACP, os parâmetros de DQO e DBO₅ tiveram um fator de correlação elevado (0,859) entre si, tal como os parâmetros referentes ao nitrogênio, nas formas N-NH₃ e N-NO₃ (0,968).

No estudo do Índice Volumétrico do Lodo (IVL) a indústria de processamento de amido foi a única que apresentou excesso de lodo com um IVL de 750 mg.L⁻¹, indiciando a presença excessiva de bactérias filamentosas (*bulking* filamentoso) ou de flocos de elevada dimensão e não sedimentáveis (*bulking* viscoso). Por outro lado, as coletas do abatedouro de aves apresentaram valores muito baixos para o IVL o que pode corresponder a uma má formação da estrutura do floco, e possível *washout* da biomassa, levando um problema de equilíbrio entre as espécies de bactérias que podem refletir num mau rendimento do sistema.

Os micro-organismos foram identificados através de árvores de decisão (AD) com validação visual. Os micro-organismos mais frequentes para a estação de pequeno porte englobamos ciliados móveis de fundo, mas também foi relevante a presença de ciliados sésseis, nadadores e amebas nuas, que puderam ser relacionados com a remoção não muito elevada de DBO₅ e de DQO desta estação. Já para a estação de grande porte a predominância de ciliados sésseis, assim como a menor diversidade de micro-organismos, espelhou remoções mais baixas. A coleta 1 da indústria de peças automotivas apresentou um predomínio de ciliados sésseis relacionados com as remoções de DBO₅ e DQO apresentadas e valores de saída baixos. Por outro lado, para as coletas 2 e 3, a presença de ciliados sésseis e nadadores,

no primeiro caso, e de amebas nuas e amebas com teca, no segundo, espelharam valores de saída de DBO₅ e de DQO mais elevados, pese embora as altas percentagens de remoção obtidas. Relativamente ao abatedouro de aves, a baixa diversidade de micro-organismos obtida para ambas as coletas pôde ser relacionada com os valores ainda elevados de DBO₅ e de DQO, apesar das elevadas percentagens de remoção. Por outro lado, o predomínio das amebas com teca na coleta 1 da indústria de produtos de higiene pessoal relacionou-se com a eficiência de remoção de DQO e os indícios da presença de nitrificação neste sistema. Já no caso da coleta 2 desta estação, o ligeiro predomínio dos ciliados sésseis representou um valor mais baixo para a remoção da DQO e valores mais elevados à saída.

O monitoramento do reator canal verificou que a remoção média de DQO foi de 80%. O pH estava de acordo com a Resolução CONAMA 430/2011 para lançamento de efluentes. Os micro-organismos mais frequentes identificados foram os ciliados nadadores *Paramecium* sp. e os metazoários Monogononta, indiciando uma qualidade do efluente final não muito elevada, tal como demonstrado pelos valores ainda relativamente elevados da DQO de saída, e uma idade de lamas possivelmente elevada. Foi ainda verificado que o período com menor remoção e DQO e maior DQO de saída sucedeu quando os ciliados nadadores predominaram a 100%.

Finalmente conclui-se que as correlações entre micro-organismos e funcionamento da ETEs existentes na literatura para Europa e América do Norte são válidas para as ETEs estudadas e que a maioria dos parâmetros das ETEs estudadas atendem à legislação para descarte de efluentes. A ferramenta de identificação das espécies presentes mostrou-se eficiente, fornecendo informações sobre problemas e eficiências nas ETEs.

6.2 PERSPECTIVAS

Saliente-se ainda algumas perspectivas para trabalhos futuros.

- Realizar um estudo quantitativo mais abrangente dos micro-organismos, englobando a identificação das principais bactérias filamentosas presentes;

- Tentar fazer uma parceria com alguma indústria para monitorar os micro-organismos fazendo em paralelo uma comparação com os dados analisados nos seus laboratórios;
- Realizar um estudo da estrutura do floco do lodo, através da utilização de técnicas de análise de imagem.

REFERÊNCIAS

AMARAL, A. L. **Image Analysis in Biotechnological Processes: Applications to Wastewater Treatment**, Tese de Doutoramento. Braga, Portugal: UMINHO, 2003.

AMARAL, A. L. P. **Curso de Monitorização Microbiológica de Estações de Tratamento de Águas Residuais**. Departamento de Engenharia Química e Biológica, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra (ISEC), 2013.

AMARAL, A. L.; BAPTISTE, C.; PONS, M. N.; NICOLAU, A.; LIMA, N.; FERREIRA, E.; MOTA, M.; VIVIER, H. Semi-automated recognition of protozoa by image analysis. **Biotechnology Techniques**, v. 13, p. 111-118, 1999.

AMARAL, A. L.; DA MOTTA, M.; PONS, M. N.; VIVIER, H.; ROCHE, N.; MOTA, M.; FERREIRA, E. C. Survey of Protozoa and Metazoa populations in wastewater treatment plants by image analysis and discriminant analysis. **Environmetrics**, v.15, p. 381-390, 2004.

AMARAL, A. L.; FERREIRA, E. C. Activated sludge monitoring of a wastewater treatment plant using image analysis and partial least squares regression. **Analytica Chimica Acta**, v. 544, p. 246–253, 2005.

AMARAL, A. L.; GINORIS, Y. P.; NICOLAU, A.; COELHO, M. A. Z.; FERREIRA, E. C. Stalked protozoa identification by image analysis and multivariable statistical techniques. **Anal Bioanal Chem**, v. 391, p. 1321–1325, 2008.

AMARAL, A. L.; MESQUITA, D. P.; FERREIRA, E. C. Automatic identification of activated sludge disturbances and assessment of operational parameters. **Chemosphere**, v. 91, p. 705-710, 2013.

AMMAN, R.; GLÖCKNER, F. O.; NEEF, A. Modern methods in subsurface microbiology: in situ identification of microorganisms with nucleic acid probes. **FEMS Microbiology Reviews**, v. 20, n. 3-4, p. 191-200, 1997.

ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias: **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**, v. 6, 2ª edição, Editora UFMG, Belo Horizonte, 2014.

APHA. Standard methods. 19th Edition. **American Public Health Association**, Washington, DC, 1995.

ARÉVALO, J.; MORENO, B.; PÉREZ, J.; GÓMEZ, M. A. Applicability of the Sludge Biotic Index (SBI) for MBR activated sludge control. **Journal of Hazardous Materials**, v. 167, p. 784-789, 2009.

AVELLA A. C.; GÖRNER T.; YVON, J.; CHAPPE, P.; GUINOT-THOMAS, P.; DE DONATO, Ph. A combined approach for a better understanding of wastewater treatment plants operation: Statistical analysis of monitoring database and sludge physico-chemical characterization. **Water Research**, v. 45, p. 981-992, 2011.

BENTO, A. P.; SEZERINO, P. H.; PHILIPPI, L. S.; REGINATTO, V.; LAPOLLI, F. R. Caracterização da microfauna em estação de tratamento de esgotos do tipo lodos ativados: um instrumento de avaliação e controle do processo. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 10, n. 4, p. 329-338, 2005.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução nº 430, de 16 de maio de 2011. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), Brasília, DF, 2011.

BURGER, W.; KRYSIAK-BALTYN, K.; SCALES, P. J.; MARTIN, G. J. O.; STICKLAND, A. D.; GRAS, S. L.; The influence of protruding filamentous bacteria on floc stability and solid-liquid separation in the activated sludge process. **Water Research**, v.123, p. 578-585, 2017

CANLER, J. P.; PERRET, J. M.; DUCHENE, F.; COTTEAUX, E. Aide au Diagnostic des Stations d'Épuration par l'Observation Microscopique des Boues Activées, **Cemagref Editions**, Lyon, 1999.

COSTA, J. C.; MESQUITA, D. P.; AMARAL, A. L.; ALVES, M. M.; FERREIRA, E. C. Quantitative image analysis for the characterization of microbial aggregates in biological wastewater treatment: a review. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 20, p. 5887–5912, 2013.

CPRH; Norma Técnica – Controle de Carga Orgânica em Efluentes Líquidos Industriais, 2003.

DA MOTTA, M. ; **Applications de l'analyse d'image à la caractérisation de la Microfaune de stations d'épuration des eaux usées**. Tese de doutorado do Insitut National Politechnique de Lorraine, Nancy, França, 2001d.

DA MOTTA, M., PONS, M. N., VIVIER, H., AMARAL, A. L., FERREIRA, E. C., MOTA, M. Study of Protozoa Population in Wastewater Treatment Plants by Image Analysis. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 18, n. 1, p. 103-111, 2001a.

DA MOTTA, M.; AMARAI, L. P.; CASELLAS, M.; PONS, M. N.; DAGOT, C.; ROCHE, N.; FERREIRA, E. C.; VIVIER, H. Characterisation of activated sludge by automated image analysis: validation on full-scale plants. **Computer Applications in Biotechnology**, Quebec City, Canada, p. 427-431, 2001c.

DA MOTTA, M.; PONS, M. N.; ROCHE, N.; VIVIER, H.; AMARAL, A. L.; FERREIRA, E. C.; MOTA, M. Estudo do funcionamento de estações de tratamento de esgotos por análise de imagem: validações e estudo de caso. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 8, n.3, p. 170-181, 2003.

DA MOTTA, M.; PONS, M. N.; ROCHE, N.; VIVIER, H. Characterisation of activated sludge by automated image analysis. **Biochemical Engineering Journal**, v. 9, p. 165-173, 2001b.

DA SILVA, M. C. L. **Effet de la variabilité du fractionnement de la pollution carbonée sur le comportement des systèmes de traitement des eaux usées par boues activées.** Tese de doutorado do Insitut National Politechnique de Lorraine, Nancy, França. 206p. 2008.

DAVIES, P.S. **The biological basis of wastewater treatment.** Glasgow, UK: Strathkelvin Instrument Ltd., 2005.

DE ANDRADE, E. M.; ARAÚJO, L. DE F. P.; ROSA, M. F.; DISNEY, W.; ALVES, A. B. Seleção dos indicadores da qualidade das águas superficiais pelo emprego da análise multivariada. **Engenharia Agrícola**, v. 27, n. 3, p. 683-690, Jaboticabal, 2007.

DE SOUZA, J. R.; DE MORAES, M. E. B.; SONODA, S. L.; SANTOS, H. C. R. G. A Importância da Qualidade da Água e os seus Múltiplos Usos: Caso Rio Almada, Sul da Bahia, Brasil. **REDE - Revista Eletrônica do Prodemá**, v. 8, n. 1, p. 26-45, Fortaleza, Brasil, 2014.

DOS SANTOS, L. A.; FERREIRA, V.; PERREIRA, M. O.; NICOLAU, A. Relationship between protozoan and metazoan communities and operation and performance parameters in a textile sewage activated sludge system. **European Journal of Protistology**, 2014.

DRZEWICKI, A.; KULIKOWSKA, D. Limitation of Sludge Biotic Index application for control of a wastewater treatment plant working with shock organic and ammonium loadings. **European Journal of Protistology**, v. 47, p. 287–294, 2011.

DUBBER, D.; GRAY, N. F. The influence of fundamental design parameters on ciliates community structure in Irish activated sludge systems. **European Journal of Protistology**, v. 47, p. 274–286, 2011.

FIAŁKOWSKA, E.; PAJDAK-STÓS, A. The role of Lecane rotifers in activated sludge bulking control. **Water Research**, v. 42, p. 2483 – 2490, 2008.

GINORIS, Y. P.; AMARAL, A. L.; NICOLAU, A.; COELHO, M. A. Z.; FERREIRA, E. C. Development of an image analysis procedure for identifying protozoa and metazoa typical of activated sludge system. **Water Research**, v.41, p.2581–2589, 2007a.

GINORIS, Y. P.; AMARAL, A. L.; NICOLAU, A.; COELHO, M. A. Z.; FERREIRA, E. C. Raw data pre-processing in the protozoa and metazoa identification by image analysis and multivariate statistical techniques. **Journal of Chemometrics**, v. 21, p. 156-164, 2007b.

GINORIS, Y. P.; AMARAL, A. L.; NICOLAU, A.; COELHO, M. A. Z.; FERREIRA, E. C. Recognition of protozoa and metazoa using image analysis tools, discriminant analysis, neural networks and decision trees. *Analytica Chimica Acta*, v. 595, p. 160–169, 2007c

GOMES, K. **Wastewater Management**. Índia: Oxford Book Company, p. 301, 2009.

HAMMER, M. J.; HAMMER, JR. M. J. **Water and Wastewater Technology**, 5. ed. Prentice Hall of India, New Delhi, 540p. 2006.

HE, H.; CHEN, Y.; LI, X.; CHENG, Y.; YANG, C.; ZENG, G.; Influence of salinity on microorganisms in activated sludge processes: A review. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v.119, p. 520-527, 2017.

HU, B.; QI, R.; YANG, M. Systematic analysis of microfauna indicator values for treatment performance in a full-scale municipal wastewater treatment plant. **Journal of Environmental Sciences**, v. 25, n. 7, p. 1379–1385, 2013.

IBARBALZ, F. M.; FIGUEROLA, E. L. M.; ERIJMAN, L. Industrial activated sludge exhibit unique bacterial community composition at high taxonomic ranks. **Water Research**, v. 47, p. 3854-3864, 2013.

JENKINS, D.; RICHARD, M. G.; DAIGGER, G. Manual on the Causes and Control of Activated Sludge Bulking, Foaming and Other Solids Separation Problems. **Lewis publishing**, Boca Raton, FL, 2003.

JENNÉ, R.; BANADDA, E. N.; GINS, G.; DEURINCK, J.; SMETS, I. Y.; GEERAERD, A. H.; VAN IMPE, J. F. Use of image analysis for sludge characterisation: studying the relation between floc shape and sludge settleability. **Water Science & Technology**, v. 54, n. 1, p. 167–174, 2006.

JORDÃO, E. P.; PÊSSOA, C. A. **Tratamento de Esgotos Domésticos**. 4. ed., Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária – ABES, p. 932, 2005.

KOIVURANTA, E.; STOOR, T.; HATTUNIEMI, J.; NIINIMÄKI, J.; On-line optical monitoring of activated sludge floc morphology. **Journal of Water Process Engineering**, v. 5, p. 28–34, 2015.

LEAL, A. L.; DALZUCHIO, M. S.; FLORES, T. S.; ALVES, A. S.; MACEDO, J. C.; VALIATI, V. H. Implementation of the sludge biotic index in a petrochemical WWTP in Brazil: improving operational control with traditional methods. **J Ind Microbiol Biotechnol**, v. 40, p. 1415–1422, 2013.

LEAL, C.; AMARAL, A. L.; COSTA, M. L. Microbial-based evaluation of foaming events in full-scale wastewater treatment plants by microscopy survey and quantitative image analysis. **Environ Sci Pollut Res**, v. 23, p. 15638–15650, 2016.

LEE, D. S.; PARK, J. M.; VANROLLEGHEM, P. A. Adaptive multiscale principal component analysis for on-line monitoring of a sequencing batch reactor. **Journal of Biotechnology**, v. 116, p. 195–210, 2005.

LEE, S.; BASU, S.; TYLER, C. W.; WEI, I. W. Ciliate populations as bio-indicators at Deer Island Treatment Plant. **Advances in Environmental Research**, v. 8, p. 371-378, 2004.

LIU, X.; ZHANG, Y.; YANG, M.; WANG, Z.; WEN-ZHOU, LV. Analysis of bacterial community structures in two sewage treatment plants with different sludge properties and treatment performance by nested PCR-DGGE method. **Journal of Environmental Sciences**, v. 19, p. 60-66, 2007.

LIWARSKA-BIZUKOJC, E. Application of image analysis techniques in activated sludge wastewater treatment processes. **Biotechnology Letters**, v. 27, p. 1427–1433, 2005.

LOURENÇO, N. D.; PAIXÃO, F.; PINHEIRO, H. M.; SOUSA, A. Use of Spectra in the Visible and Near-Mid-Ultraviolet Range with Principal Component Analysis and Partial Least Squares Processing for Monitoring of Suspended Solids in Municipal Wastewater Treatment Plants. **Applied Spectroscopy**, v. 64, n. 9, p. 1061-1067, 2010.

MADONI, P. A sludge biotic index (SBI) for the evaluation of the biological performance of activated sludge plants based on the microfauna analysis. **Water Research**, v. 28, n. 1, p.67-75, 1994.

MADONI, P. Protozoa in wastewater treatment processes: A minireview. **Italian Journal of Zoology**, v. 78(1), p. 3–11, 2011.

MADONI, P.; DAVOLI, D.; CHIERICI, E. Comparative analysis of the activated sludge microfauna in several sewage treatment works. **Water Research**, v. 27, n. 9, p. 1485-1491, 1993

MADONI, P.; DAVOLI, D.; GORBI, G.; VESCOVI, L. Toxic effect of heavy metals on the activated sludge protozoan community. **Water Research**, v. 30, n. 1, p. 135-141, 1996.

MESQUITA, D. P.; AMARAL, A. L.; FERREIRA, E. C. Activated sludge characterization through microscopy: A review on quantitative image analysis and chemometric techniques. **Analytica Chimica Acta**, v. 802, p. 14-28, 2013.

MESQUITA, D. P.; AMARAL, A. L.; FERREIRA, E. C. Characterization of activated sludge abnormalities by image analysis and chemometric techniques. **Analytica Chimica Acta**, v.705, p. 235-242, 2011b.

MESQUITA, D. P.; AMARAL, A. L.; FERREIRA, E. C. Estimation of effluent quality parameters from an activated sludge system using quantitative image analysis. **Chemical Engineering Journal**, v. 285, p. 349–357, 2016.

MESQUITA, D. P.; AMARAL, A. L.; FERREIRA, E. C. Identifying different types of bulking in an activated sludge system through quantitative image analysis. **Chemosphere**, v. 85, p. 643–652, 2011a.

MESQUITA, D. P.; DIAS, O.; AMARAL, A. L.; FERREIRA, E. C. Monitoring of activated sludge settling ability through image analysis: validation on full-scale wastewater treatment plants. **Bioprocess and Biosystems Engineering**, v. 32, p. 361–367, 2009a.

MESQUITA, D. P.; DIAS, O.; AMARAL, A. L.; FERREIRA, E.C. A Comparison between Bright Field and Phase-Contrast Image Analysis Techniques in Activated Sludge Morphological Characterization. **Microscopy and Microanalysis**, v. 16, p. 166–174, 2010b.

MESQUITA, D. P.; DIAS, O.; DIAS, A. M. A.; AMARAL, A. L.; FERREIRA, E. C. Correlation between sludge settling ability and image analysis information using partial least squares. **Analytica Chimica Acta**, v. 642, p. 94–101, 2009b.

MESQUITA, D. P.; DIAS, O.; ELIAS, R. A. V.; AMARAL, A. L.; FERREIRA, E. C. Dilution and Magnification Effects on Image Analysis Applications in Activated Sludge Characterization. **Microscopy and Microanalysis**, v. 16, p. 561-568, 2010a.

MESQUITA, D. P.; QUINTELAS, C.; AMARAL, A. L.; FERREIRA, E. C. Monitoring biological wastewater treatment processes: recent advances in

spectroscopy applications. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**, v. 16, p. 395–424, 2017.

MESQUITA, D. P.; RIBEIRO, R. R.; AMARAL, A. L.; FERREIRA, E. C.; COELHO, M. A. Z. Image analysis application for the study of activated sludge floc size during the treatment of synthetic and real fishery wastewaters. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 18, p. 1390–1397, 2011.

METCALF; EDDY **Inc. Wastewater Engineering treatment Disposal Reuse**. 4. ed. New York, McGraw - Hill Book, p. 1815. 2003.

MOITA NETO, J. M.; MOITA, G. C. Uma introdução à análise exploratória de dados multivariados. **Revista Química Nova**. SBQ. v. 21. n. 4. jul.-ago. 1998.

MORETTI, G.; MATTEUCCI, F.; ERCOLE, C.; VEGLIÒ, F.; DEL GALLO, M. Microbial community distribution and genetic analysis in a sludge active treatment for a complex industrial wastewater: a study using microbiological and molecular analysis and principal component analysis. **Ann Microbiol**, v. 66, p. 397–405, 2016.

NI, B., SHENG, G. P., YU, H.; Model-based characterization of endogenous maintenance, cell death and predation processes of activated sludge in sequencing batch reactors. **Chemical Engineering Science**, v-66, p. 747–754, 2011.

NICOLAU, A. P. M. R. C. **Monitorização Microbiológica da Poluição: uso das respostas fisiológica e ecológica de protistas**. Tese de Doutoramento. Braga, Portugal: UMINHO, 2002.

NICOLAU, A.; DIAS, N.; MOTA, M.; LIMA, N. Trends in the use of protozoa in the assessment of wastewater treatment. **Research Microbiology**, v. 152, p.621-630, 2001.

NICOLAU, A.; LIMA, N.; MOTA, M.; MADONI, P. Os Protozoários como Indicadores da Qualidade Biológica das Lamas Activadas, **Boletim de Biotecnologia**, 1997.

NICOLAU, A.; MARTINS, M. J.; MOTA, M.; LIMA, N. **Estudo da Comunidade de Protozoários Exposta à Tóxicos em Estações de Tratamento de Águas Residuais**. 6ª Conferência Nacional sobre a Qualidade do Ambiente, v. 2, p. 659-668, 1999.

NUVOLARI, A.; MARTINELLI, A.; TELLES, D. D.; RIBEIRO, J. T.; MIYASHITA, N. J.; RODRIGUES, R. B.; DE ARAUJO, R. **Esgoto sanitário: coleta, transporte, tratamento e reuso agrícola**. 2ª edição revista, atualizada e ampliada. São Paulo, Editora Edgard Blucher LTDA, 2011.

OLIVEIRA, G. S. S.; ARAÚJO, C. V. M.; FERNANDES, J. G. S. Microbiologia de sistema de lodos ativados e sua relação com o tratamento de efluentes industriais: a experiência da Cetrel. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 14, n. 2, p. 183-192, 2009.

PAPADIMITRIOU, C. A.; PAPTHEODOULOU, A.; TAKAVAKOGLU, V.; ZDRAGAS, A.; SAMARAS, P.; SAKELLAROPOULOS, G. P.; LAZARIDOU, M.; ZALIDIS, G. Investigation of protozoa as indicators of wastewater treatment efficiency in constructed wetlands. **Desalination**, v. 250, p. 378-382, 2010.

PAPADIMITRIOU, CH.; PALASKA, G.; LAZARIDOU, M.; P. SAMARAS, P.; SAKELLAROPOULOS, G. P. The effects of toxic substances on the activated sludge microfauna. **Desalination**, v. 211, p. 177–191, 2007.

PEDRAZZANI, R.; MENONI, L.; NEMBRINI, S.; MANILI, L.; BERTANZA, G. Suitability of Sludge Biotic Index (SBI), Sludge Index (SI) and filamentous bacteria analysis for assessing activated sludge process performance: the case of piggery slaughterhouse wastewater. **Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology**, v. 43, p. 953–964, 2016.

SABINO, C. DE V. S.; DE ABREU, J. F.; LOBATO, W.; SABINO, G. S.; KNUP, E. A. N. Análise de alguns aspectos da qualidade da água da Bacia do Rio Paraopeba utilizando estatística multivariada. **Revista de Biologia e Ciência da Terra**, v. 8, n. 2, p. 6-18, Paraíba, Brasil, 2008.

SAEG. Sistemas para análises estatísticas. 7.0. Viçosa: Fundação Arthur Bernardes. UFV/DBG. 2007. Homepage: <http://www.ufv.br/saeg/>. Acesso em: 15/03/2018.

SOARES, J. F.; ILHA, R.; DE VASCONCELLOS, N. J. S.; SANTIAGO, M. R. Caracterização do Floco Biológico e da Microfauna em Sistema de Lodos Ativados. **Ciência e Natura, Santa Maria**, v. 36, n. 1, p.001-010, 2014.

TOMPERI, J.; KOIVURANTA, E.; LEIVISKÄ, K.; Predicting the effluent quality of an industrial wastewater treatment plant by way of optical monitoring. **Journal of Water Process Engineering**, v. 16, p. 283–289, 2017.

TYAGI, V. K.; SUBRAMANIYAN, S.; KAZMI, A. A.; CHOPRA, A. K. Microbial community in conventional and extended aeration activated sludge plants in India. **Ecological Indicators**, v. 8, p. 550-554, 2008.

VAN DEN BROECK, R. M. R.; VAN IMPE, J. F. M.; SMETS, I. Y. M. Assessment of activated sludge stability in lab-scale experiments. **Journal of Biotechnology**, v.141, n. 3-4, p. 147–154, 2009.

WIESMANN, U.; CHOI, I. S.; DOMBROWSKI, E. M. **Fundamentals of biological wastewater treatment**. Willey-VCH, 355p, 2007.

ZHOU, K.; XU, M.; DAI, J.; CAO, H. The microfauna communities and operational monitoring of an activated sludge plant in China. **European Journal of Protistology**, v. 42, p. 291–295, 2006.

ZHOU, K.; XU, M.; LIU, B.; CAO, H. Characteristics of microfauna and their relationships with the performance of an activated sludge plant in China. **Journal of Environmental Sciences**, v. 20, p.482-486, 2008.

ZOBY JÚNIOR, L. C.; **Aplicação do modelo ASM1 na simulação das condições operacionais de uma estação de tratamento de efluentes por lodo ativado**. Dissertação de Mestrado da Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, UFPE, 2011.

APÊNDICE A - Caracterização dos efluentes das estações.

	DQO	DBO₅	ST	SF	SV	SST	SSF	SSV	N-NH₃	N-NO₃	Condutividade	Cor	pH	Turbidez
Pequena E	1006	600	888	504	384	530	34	496	0,65	20,00	884,00	340	7,60	345,00
Grande E	195	118	463	322	141	140	108	32	0,83	0,90	561,00	241	6,48	102,00
Peça 1 E	1393	475	52336	5893	46444	41632	4580	37052	0,92	3,00	0,21	466	5,50	487,00
Peça 2 E	1362	225	70024	7876	62148	55782	6136	49646	0,53	3,70	0,26	634	5,52	613,00
Peça 3 E	10692	2500	6289	3217	3072	3350	450	2900	66,00	340,00	6581,00	7200	7,00	546,00
Abate 1 E	5779	200	2010	872	1138	1371	590	776	0,71	4,70	2,10	250	6,66	1000,00
Abate 2 E	5100	1250	1861	686	1175	1252	463	789	1,42	5,00	1,86	4700	6,98	1072,00
Higiene 1E	249	210	305	110	195	143	29	114	1,07	2,50	393,30	206	7,41	56,00
Higiene 2E	1402	950	965	466	499	346	74	272	0,76	3,60	1294,00	577	8,14	302,00
Amido E	847	600	1140	890	250	110	80	30	2,20	46,00	2,45	920	11,30	60,10
Pequena S	340	70	659	422	237	472	94	378	2,42	0,90	794,00	249	7,44	203,00
Grande S	96	38	563	417	146	218	198	20	3,19	0,80	706,00	95	6,60	38,40
Peça 1 S	61	19	2232	1503	729	103	13	90	3,63	42,10	4,31	33	6,75	9,13
Peça 2 S	105	43	3078	2109	969	89	22	67	0,19	42,90	3,26	52	5,47	9,35
Peça 3 S	130	5	2469	1823	646	118	31	87	0,82	28,10	4818,00	88	7,50	47,60
Abate 1 S	223	40	889	852	37	112	13	99	0,19	1,90	1,85	204	9,66	53,20
Abate 2 S	250	40	961	831	130	120	35	85	0,36	2,64	2,07	341	6,95	65,40
Higiene 1S	15	2	293	82	157	46	22	24	0,83	22,00	410,30	56	4,75	16,20
Higiene 2S	207	160	427	259	168	106	12	94	0,95	5,90	810,60	179	8,15	68,30
Amido S	74	7	1650	1440	210	90	60	30	0,04	59,80	3,32	71	7,33	7,82

APÊNDICE B - Matriz de correlação para a caracterização dos efluentes das estações.

	DQO	DBO ₅	ST	SF	SV	SST	SSF	SSV	N-NH ₃	N-NO ₃	Condutividade	Cor	pH	Turbidez
DQO	1,000													
DBO₅	0,859	1,000												
ST	0,043	0,025	1,000											
SF	0,194	0,161	0,948	1,000										
SV	0,025	0,008	0,999	0,935	1,000									
SST	0,038	0,019	0,999	0,934	1,000	1,000								
SSF	0,076	0,033	0,996	0,929	0,997	0,998	1,000							
SSV	0,033	0,017	0,999	0,934	1,000	1,000	0,997	1,000						
N-NH₃	0,800	0,821	-0,026	0,185	-0,051	-0,041	-0,039	-0,041	1,000					
N-NO₃	0,741	0,773	-0,064	0,184	-0,094	-0,087	-0,090	-0,086	0,967	1,000				
Condutividade	0,554	0,608	-0,118	0,087	-0,142	-0,137	-0,144	-0,136	0,778	0,760	1,000			
Cor	0,878	0,930	0,001	0,158	-0,018	-0,007	0,014	-0,010	0,828	0,780	0,590	1,000		
pH	-0,056	0,114	-0,386	-0,372	-0,384	-0,382	-0,389	-0,380	-0,017	0,010	0,033	0,018	1,000	
Turbidez	0,717	0,512	0,335	0,321	0,335	0,346	0,400	0,339	0,201	0,111	0,042	0,534	-0,193	1,000

APÊNDICE C - Monitoramento reator canal.

	22/02/16	24/02/16	26/02/16	29/02/16	02/03/16	04/03/16	07/03/16	09/03/16	11/03/16	14/03/16	16/03/16	17/03/16
DQO (mg O₂,L⁻¹)	152	119	132	48	232	235	92	110	150	216	147	167
Remoção DQO (%)	99,64	99,72	99,69	99,89	99,45	99,45	99,78	99,74	99,65	99,49	99,65	99,65
DBO₅ (mg O₂,L⁻¹)	33	n,a,	n,a,	39	n,a,	n,a,	63	n,a,	n,a,	110	n,a,	48
pH	6,94	6,98	6,98	6,96	6,97	6,96	6,95	6,98	6,96	6,95	6,97	6,98
Condutividade (µS,cm⁻¹)	2,82	2,22	2,23	2,14	1,89	1,83	1,70	1,87	1,95	2,10	1,64	1,70
NaCl (mg,L⁻¹)	858,00	1049,00	1045,00	1019,00	890,80	854,50	790,60	880,00	913,70	961,30	764,70	784,30
OD (mg O₂,L⁻¹)	3,62	3,04	2,70	4,33	3,04	3,07	3,12	2,47	4,07	1,68	4,93	2,28

n,a, (não analisada)