





## UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL ESCOLA DE ENGENHARIA E INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

# Márcio Sgarbi

# ESTUDO DE TECNOLOGIA DE TRATAMENTO DE EFLUENTES DE UMA MICROCERVEJARIA: ALTERNATIVA ON-SITE VERSUS OFF-SITE

Porto Alegre

dezembro de 2014

### MÁRCIO SGARBI

# ESTUDO DE TECNOLOGIA DE TRATAMENTO DE EFLUENTES DE UMA MICROCERVEJARIA:

#### ALTERNATIVA ON-SITE VERSUS OFF-SITE

TRABALHO DE CONCLUSÃO APRESENTADO AO CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE ENGENHEIRO AMBIENTAL.

Orientador: Luiz Olinto Monteggia

Porto Alegre

dezembro de 2014

#### **MÁRCIO SGARBI**

# ESTUDO DE TECNOLOGIA DE TRATAMENTO DE EFLUENTES DE UMA MICROCERVEJARIA: ALTERNATIVA ON-SITE VERSUS OFF-SITE

Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul defendido e aprovado em 12/12/2014 pela Banca Examinadora

#### Banca Examinadora

Prof. Dr. Luiz Olinto Monteggia – Orientador (UFRGS)

Dr. pela *University of Newcastle* 

Eng. José Carlos Alves Barroso Júnior (UFRGS)

Eng. pela Universidade Estadual de Santa Cruz

**Eng. MSc. Luiz Carlos Klusener (CORSAN)** 

MSc. pela Universidade Estadual de Campinas

Dedico este trabalho a meu pai, Lino, cujos braços me permitiram crescer, a minha mãe Zélide, cuja sabedoria me propicia evoluir, aos meus irmãos, Carla e Mateus, por terem sido minhas referências ao longo destes anos, e a minha namorada Gisele, por me contagiar com amor e paz em momentos decisivos.

#### **AGRADECIMENTOS**

Agradeço o meu Orientador Professor Luiz Olinto Monteggia, por compartilhar seus conhecimentos de forma didática e precisa, além de sua disposição em atender as demandas de seus orientados.

Aos amigos da Microcervejaria pela oportunidade, atenção dispensada e disponibilização das informações necessárias para a realização deste Estudo.

Aos colegas de laboratório: Beatriz, Eddie, Felipe, Júnior, Nestor, e Patrícia, por terem me acolhido em seus ambientes de pesquisa e terem me permitido aprender e desenvolver parte fundamental deste trabalho.

Aos meus Pais, Lino e Zélide, e meus irmãos, Carla e Mateus, por serem meus alicerces, me apoiarem financeira e emocionalmente durante todo o curso de graduação, e estarem sempre dispostos a ajudar, não importando a dimensão da tarefa. E aos meus cunhados, Thaís e Vinissius, pelo companheirismo e apoio em inúmeras situações, inclusive as rotinas logísticas.

À minha namorada Gisele, por todo o apoio, paciência, companheirismo, positividade e amor dispensados, principalmente em momentos decisivos.

Aos meus amigos e colegas de graduação, em especial, aos queridos amigos Carlos Henrique, Ricardo e Tadeu, os quais tiveram forte influência em diferentes momentos ao longo destes anos.

Aos meus queridos amigos e colegas de estágio, pelo crescimento profissional proporcionado pela equipe coesa e qualificada, e também, pessoal, consequência de inúmeras discussões pertinentes e convivência agradável.

E, por fim, à sociedade brasileira, que ao pagar seus impostos, me permitiu ter ensino de qualidade e de fundamental importância para enfrentar com segurança e ética os desafios que virão.



#### **RESUMO**

A cerveja é uma das bebidas mais consumidas no mundo, e sua produção permeia os seguintes passos: mostura, fervura, resfriamento, fermentação e envase. Em todos estes processos, a indústria de cervejas costuma consumir grandes quantidades de água, de 4 a 12,6 L de água consumidos para cada L de cerveja produzida. Os efluentes gerados a partir disto, são caracterizados, majoritariamente, como alta carga de poluentes orgânicos solúveis e sólidos suspensos (XIANGWEN et al. 2008). A execução deste Trabalho foi motivada pela oportunidade de se estudar um caso real de tratamento de efluentes de uma microcervejaria. Assim, o objetivo deste Estudo é propor uma opção de tratamento on-site para o efluente desta Microcervejaria e confrontá-la, economicamente, a uma opção off-site de tratamento em empresa terceirizada. Análises físicas e químicas realizadas para o efluente conforme APHA (1999), indicaram também a necessidade de remoção de nutrientes, nitrogênio e fósforo, a fim de se atender os padrões da Resolução CONSEMA N°128/2006. Foi realizado o dimensionamento, espelhado em estudos passados, de uma Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) composta por um Reator Anaeróbio Compartimentado (RAC) e sistema híbrido de Banhados Construídos (BC). A remoção teórica de poluentes foi satisfatória, com 99,90%; 99,90%; 72,71%; 97,76%; e, 99,81% de remoção de DQO, DBO, Ptotal, NTK e SST, respectivamente. A avaliação econômica por valor presente identificou diferença significativa entre as duas opções de tratamento, sendo que o tratamento off-site tem custo de R\$272.047,19, o que representa aproximadamente três vezes o custo do tratamento *on-site*, de R\$93.246,21, considerando investimento para cinco anos de operação.

Palavras-chave: Efluente de Microcervejaria. Análises físicas e químicas. Padrões de emissão de efluentes. Reator Anaeróbio Compartimentado. Banhados Construídos. Tratamento em empresa terceirizada. Valor Presente.

#### **ABSTRACT**

Beer is one of the most consumed beverages in the world, and its production permeates the fallowing steps: mashing, boiling, cooling, fermentation and botling. In all these processes, the beer industry usually consume high quantities of water, from 4 to 12,6 L of water consumed for each litter beer produced. The effluents generated from it, are characterized mostly as high load of soluble organic polluntants and suspended solids (XIANGWEN et al. 2008). The achievement of this work was motivated by the opportunity to study a real case of wastewater treatment of a microbrewery. The objective of this study is to propose an on-site treatment option for the effluent from this microbrewery and confront it, economically, to an off-site third party treatment company. Physical and chemical analyzes performed for the effluent as APHA (1999) also indicated the need for removing nutrients, nitrogen and phosphurus, in order to meet the standards of Resolution CONSEMA N°128/2006. The sizing was performed, based in past studies, of an Wastewater Treatment Plant (WWTP), it consists of an Anaerobic Baffled Reactor (ABR) and a hybrid Constructed Wetland system (CW). The theoretical pollutant removal was satisfactory, with 99.90%; 99.90%; 72.71%; 97.76%; and 99.81% removal of COD, BOD, Ptotal, TKN and TSS, respectively. Economic evaluation of present value identified a significant difference between the two treatment options, and the off-site treatment has cost R\$272.047,19, which represents about three times the cost of on-site treatment of R\$93.246,21, considering five years of operation investment.

Keywords: Microbrewery's Wastewater. Physical and chemical analysis. Effluent emission standards. Anaerobic Baffled Reactor. Constructed wetlands. Third party Treatment. Present Value.

### LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de Reatores Anaeróbios de Fluxo Invertido com Material Suporte
(IFBR) tratando efluente de cervejaria
Figura 2 - Esquema simplificado de um reator UASB com material suporte24
Figura 3 - Reator de Fluxo Ascensional por Biogás (BLR)
Figura 4 – Esquema simplificado de um RAC
Figura 5 – Representação simplificada de um sistema híbrido de BC-FV seguido de BC-
FSH
Figura 6 - Carga de Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK) relativa à concentração final de
NTK, considerando alimentação intermitente ou por pulsos, a partir da operação de 29
sistemas de BC-FV
Figura 7 – Carga de fósforo total (P <sub>total</sub> ) em função das concentrações, inicial (C <sub>i</sub> ) e final
(C <sub>out</sub> ), de operação de 86 sistemas de BC-FHS
Figura 8 – Carga de DBO afluente relacionada à concentração de entrada (C <sub>i</sub> ) e de saída
(C <sub>out</sub> ) de 62 BC-FV em operação
Figura 9 - Carga de SST afluente relacionada à concentração de entrada (C <sub>i</sub> ) e de saída
(C <sub>out</sub> ) de 31 BC-FV em operação com fluxo intermitente
Figura 10 – Curvas de ajuste da concentração de DBO (mg de O <sub>2</sub> /L) do efluente da cerveja
tipo "Especial I", e as respectivas curvas polinomiais de tendência
Figura 11 – Esquema simplificado da Estação de Tratamento de Efluentes da
Microcervejaria59
Figura 12 - Carga de Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK) relativa à Concentração inicial (C <sub>i</sub> )
e final (C <sub>out</sub> ) de NTK, considerando a operação de 135 sistemas de BC-FSL76
Figura 13 - Carga de fósforo total (P <sub>total</sub> ) em função das concentrações, inicial (C <sub>i</sub> ) e final
(C <sub>out</sub> ), de operação de 282 sistemas de BC-FSL

Figura 14 - Carga de DBO afluente relacionada à concentração de entrada	(C <sub>i</sub> ) e de saída
(C <sub>out</sub> ) de 136 BC-FSL em operação.	77
Figura 15 - Carga de SST afluente relacionada à concentração de entrada	(C <sub>i</sub> ) e de saída
(C <sub>out</sub> ) de 136 BC-FSL em operação.	77

# LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Relação de quantidade de água consumida por cerveja produzida, em L,
apresentada por diversos autores
Tabela 2 - Parâmetros analisados
Tabela 3 – Autores e tipos de tratamento biológicos anaeróbicos consultados e as
respectivas remoções de DQO, COV e TDH de estudo
Tabela 4 – Estudos realizados para tratamento de efluentes da indústria de bebidas
alcoólicas e as respectivas tecnologias empregadas
Tabela 5 – Quantidade de cada tipo de cerveja produzida por mês, em litros (L)
Tabela 6 - Perfil mensal de Carga Orgânica efluente (kg de DQO/mês) por tipo de cerveja
produzida
Tabela 7 – Carga Orgânica (CO) máxima por tipo de cerveja para um dia de produção 40
Tabela 8 – Dados de dimensionamento do RAC para tratar aproximadamente 810 L de
efluente gerados em um dia de produção da cerveja "Especial III"41
Tabela 9 – COV resultante para o efluente de menor CO, a partir da produção da cerveja
"Ale III"42
Tabela 10 – Parâmetros de projeto do sistema híbrido BC-FV-FSL, considerando
aproximadamente 810 L de efluente de um dia de produção da cerveja tipo "Especial
III"
Tabela 11 – Orçamento de materiais de interesse para implantação da ETE
Tabela 12 – Custos de transporte e tratamento <i>off-site</i> em empresas terceirizadas
Tabela 13 – Características físicas e químicas do efluente da produção da cerveja tipo
"Especial I"56
Tabela 14- Caracterização das etapas do processo de produção da cerveja tipo "Especial I"
em relação à DQO (mg/L)58

Tabela 15 – Medidas físicas, de maior relevância, dos componentes da Estação de
Tratamento de Efluentes
Tabela 16 – Concentração e remoção dos poluentes em cada etapa da Estação de
Tratamento de Efluentes, e os padrões de emissão segundo CONSEMA N° 128/2006.
61
Tabela 17 – Custos estimados para a implantação da Estação de Tratamento de Efluentes.
63
Tabela 18 – Custo final do tratamento <i>on-site</i> em Estação de Tratamento de Efluentes,
considerando 5 anos de operação e juros de 7,08% ao ano
Tabela 19 – Despesas de implantação do tanque de armazenamento temporário do efluente.
66
Tabela 20 – Custos mensais de transporte e tratamento off-site do efluente da
Microcervejaria67
Tabela 21 – Custo final do tratamento off-site do efluente da Microcervejaria, considerando
5 anos de operação e juros de 7,08% ao ano

#### LISTA DE SIGLAS

ART –	- Anotação	de Res	ponsabilidade	Técnica
-------	------------	--------	---------------	---------

BC – Banhados Construídos

BC-FSH – Banhados Construídos de Fluxo Sub-superficial Horizontal

BC-FSL – Banhados Construídos de Fluxo Superficial Livre

BC-FV – Banhados Construídos de Fluxo Sub-superficial Vertical

BC-FV-FSL - Banhados Construídos Híbrido de Fluxo Sub-superficial Vertical Seguido de

Fluxo Superficial Livre

BLR - Reatores de Fluxo Ascensional por Biogás

C – Concentração de Matéria Orgânica

CI – Carbono Inorgânico

C<sub>i</sub> – Concentração de Entrada

CO – Carga Orgânica

CO<sub>2</sub> – Gás carbônico

CONSEMA - Conselho Estadual de Meio Ambiente

COT – Carbono Orgânico Total

Cout - Concentração de Saída

COV – Carga Orgânica Volumétrica

CS – Carga Superficial

CT – Carbono Total

DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio

DN – Diâmetro Nominal

DQO - Demanda Química de Oxigênio

E1 – Cerveja Especial 1

EC-1 – Efluente de Cervejaria 1

ETE – Estação de Tratamento de Efluentes

EUA – Estado Unidos da América

GRABBR - Reator Anaeróbio de Compartimentado com Manto de Lodo Granular

IFBR – Reator Anaeróbio de Fluxo Invertido com Material Suporte

LF – Lavagem Final

LI – Lavagem Inicial

N-amoniacal – Nitrogênio Amoniacal

NT – Nitrogênio Total

NTK – Nitrogênio Total Kjeldahl

O<sub>2</sub> – Gás oxigênio

PE – População Equivalente

pH – potencial hidrogeniônico

 $P_{total}-F\acute{o}sforo\ Total$ 

PVC – Policloreto de Vinil

RAC – Reator Anaeróbio Compartimentado

RL – Reprodução de Levedura

SMPA – Digestor Anaeróbico de Multifase

SS – Sólidos Suspensos

SST – Sólidos Suspensos Totais

ST – Sólidos Totais

TDH – Tempo de Detenção Hidráulica

UASB – Reator Anaeróbio de Manta de Lodo com Fluxo Ascendente

V - Volume

# SUMÁRIO

1	IN	TRO	ODUÇÃO	17
2	O	BJE'	TIVOS	19
	2.1	Ot	ojetivo primário	19
	2.2	Oł	ojetivos secundários	19
3	C	IRC	UNSTÂNCIA DA TEMÁTICA	20
	3.1	Ef	luentes gerados em cervejarias	20
	3.2	Te	cnologias de tratamento	22
4	C	ONE	DICIONANTES E DIMENSIONAMENTO	28
	4.1	Ca	racterização do efluente	28
	4	.1.1	Amostragem	28
	4	.1.2	Análises de parâmetros	29
	4.2	De	efinição da(s) tecnologia(s) de tratamento	30
	4.3	Pa	râmetros de dimensionamento	34
	4.4	Di	mensionamento da estação de tratamento de efluentes - ETE	34
	4	.4.1	Condições de contorno	34
	4	.4.2	Dimensionamento do tratamento secundário	40
	4	.4.3	Dimensionamento do tratamento terciário	43
	4	.4.4	Influência da temperatura	49
	4.5	Es	pecificações técnicas da ETE	50
	4.6	So	ndagem de custos do sistema de tratamento on-site	51
	4.7	So	ndagem de custo do tratamento de efluentes off-site	54
5	R	ESU	LTADOS	55
	5.1	Re	esultados das análises	55
	5.2	La	yout da estação de tratamento de efluentes - ETE	58
	5.3	Re	emoção esperada na ETE	60

	5.4	Custos do tratamento on-site em estação de tratamento de efluentes	62
	5.5	Custos do tratamento off-site em empresa terceirizada	66
6	CC	ONCLUSÕES	67
7	CC	ONSIDERAÇÕES FINAIS	68
8	RF	EFERÊNCIAS	70
A	NEX	XO I – GRÁFICOS DE CARGA PARA DIMENSIONAMENTO DO BO	C-FSL <b>75</b>

17

1 INTRODUÇÃO

A cerveja é a quinta bebida mais consumida no mundo, segundo FILLAUDEAU et al.

(2006), tendo média anual de consumo de 23 litros por pessoa, sendo superada apenas pelo

consumo de chás, bebidas gaseificadas, leite e café.

Os dez maiores grupos da indústria de cerveja, em 2002, foram responsáveis pela produção

de 50% da produção mundial, sendo que a capacidade de algumas é superior a 100 milhões

de hectolitros (hL) por ano. Enquanto isso, uma microcervejaria tende a ingressar no

mercado com produção anual de aproximadamente 1000 hL. (VERSTL, 1999)

Segundo dados da BREWERS ASSOCIATION (2014) as 1.412 microcervejarias,

existentes nos Estados Unidos, foram responsáveis pela produção de pouco mais de

2.800.000 hL de cerveja para o ano de 2013, o que representa 15,5% da produção do País

para o mesmo ano. Enquanto que as 119 grandes indústrias de cerveja detiveram 77% da

produção norte americana em 2013.

O processo de produção da cerveja consiste, genericamente, em cinco etapas, as quais são

indicadas a seguir:

I. Mostura: consiste no processo de extração dos açúcares do amido dos cereais

maltados em água quente, cuja temperatura varia conforme o objetivo da produção,

catalisado pelas enzimas Beta amilase e a Alfa amilase, presentes no próprio malte;

II. Fervura do mosto: etapa em que ocorre a dissolução do lúpulo e esterilização do

mosto;

III. Resfriamento: etapa que visa a diminuição da temperatura do mosto fervido para a

inoculação da levedura (fermento), a qual deve ser realizada no menor tempo

possível para que seja evitada qualquer contaminação com o meio.

IV. Fermentação: faz-se a adição da levedura para ocorrer o processo de transformação

dos açúcares do mosto em álcool e gás carbônico.

V. Envase: etapa final em que se condiciona a cerveja em seu recipiente comercial,
 seja em garrafas ou barris.

Durante todo o processo mencionado, são utilizadas grandes quantidades de água tanto para a produção, quanto para serviços gerais como lavagem de pisos, das dependências de produção, armazenamento e envase, sendo que as lavagens ocorrem a cada ciclo de produção (PARAWIRA *et al.* 2004).

Grande parte desta água utilizada se torna efluente, o qual deve ser tratado por processos físico-químicos e/ou biológicos, a fim de não causar interferências no corpo hídrico receptor. Para tal, busca-se atender aos padrões estabelecidos em legislação, os quais constam na Resolução do Conselho Estadual de Meio Ambiente CONSEMA N° 128/2006, já que este Estudo trata de efluentes a serem despejados em águas superficiais do Estado do Rio Grande do Sul.

Sistemas anaeróbicos e aeróbicos, tais como o Reator Anaeróbio Compartimentado (RAC) e os Banhados Construídos (BC), respectivamente, tem sido projetados e efetivamente utilizados para tratamento de efluentes industriais de diversas origens em todos continentes (BARBER e STUCKEY, 1999; VYMAZAL, 2014).

Todavia, os custos intrínsecos a implantação, operação e manutenção de um tratamento *on-site* (dentro da área da unidade fabril) por uma Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) para uma microcervejaria, pode inviabilizar esta opção tecnológica. Assim como, os custos, a longo prazo, relacionados ao tratamento *off-site* (fora da área da unidade fabril) em empresas de terceiros, tanto do tratamento em si, quanto do transporte, podem justificar a implantação de uma ETE.

Portanto, o objetivo deste Trabalho é estudar uma opção de tratamento de efluentes *on-site*, a qual atenda aos padrões de emissão de efluentes estabelecidos pela legislação, e a comparação com uma opção *off-site* terceirizada de tratamento de efluentes.

19

A motivação deste Estudo está relacionada à oportunidade de aplicar e reproduzir o

conhecimento acumulado, durante o curso de Engenharia Ambiental, em um caso real

retratado por uma microcervejaria.

Serão apresentados, assim, as condições de contorno, os meios e as justificativas da

proposta de tratamento do efluente da microcervejaria, além dos custos relacionados as

opções on-site e off-site.

**OBJETIVOS** 

Para o presente estudo foram estabelecidos objetivos gerais e específicos a fim de

delimitar, clarear e definir a pesquisa e suas etapas.

2.1 **OBJETIVO GERAL** 

Comparar a viabilidade econômica de instalação de uma estação de tratamento de efluentes

(ETE) para uma microcervejaria (tratamento *on-site*), garantindo os padrões de emissão de

efluentes conforme legislação, em relação à destinação do efluente a uma central de

tratamento de efluentes industriais de terceiros (tratamento *off-site*).

2.2 **OBJETIVOS ESPECÍFICOS** 

Como objetivos secundários derivados do constante no item anterior, tem-se o seguinte:

I. Realizar amostragem e caracterização física e química do efluente da

microcervejaria;

II. Definir a(s) tecnologia(s) mais adequada(s) ao tratamento do efluente da

microcervejaria em questão, visando ao atendimento dos padrões de emissão

estabelecidos pela legislação;

III. Dimensionar a ETE com base na(s) tecnologia(s) selecionada(s);

IV. Estudar os custos de instalação e operação da ETE, tratamento on-site,

considerando investimento em horizonte de 5 anos de operação;

V. Estudar os custos de tratamento *off-site*, destinação do efluente a uma central de tratamento de terceiros, considerando investimento em horizonte de 5 anos de operação.

#### 3 CIRCUNSTÂNCIA DA TEMÁTICA

#### 3.1 EFLUENTES GERADOS EM CERVEJARIAS

Segundo STRONG e BURGESS (2008), a indústria de bebidas alcoólicas pode ser dividida em três setores principais, cervejarias, vinícolas e uisquerias, as quais geram efluentes com características parecidas, como baixo pH e alta concentração de poluentes orgânicos, devido à similaridade de seus processos produtivos.

Os efluentes de cervejarias podem interferir na qualidade das águas dos corpos hídricos de formas diversas, como aumento da matéria orgânica disponível, a qual resulta em alta Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e também Demanda Química de Oxigênio (DQO). Isto se deve aos carboidratos dissolvidos, ao álcool presente no efluente e ao alto teor de Sólidos Suspensos (SS), como resíduos de milho, malte e fermento. (PARAWIRA et al. 2004)

FILLAUDEAU *et al.* (2006), consideram a gestão de água e efluentes de cervejarias como um problema prático e crítico, tal que esta indústria mostra ampla diversidade nesta gestão, uma vez que pode existir considerável diferença entre as capacidades de produção de cada unidade fabril.

Para o atendimento aos padrões de emissão de efluente impostos pela legislação, faz-se necessária a otimização dos processos de tratamento dos efluentes de microcervejarias, devido a estes apresentarem alta Carga Orgânica (CO) e sólidos em suspensão. (NAVARINI, 2013)

Conforme DRIESSEN e YSPEERT (1999), os componentes orgânicos, presentes nos efluentes de produção de cerveja, são geralmente facilmente biodegradáveis já que consistem basicamente de açúcares, etanol, ácidos graxos voláteis, amido solúvel, etc.. Estes componentes também são tipicamente responsáveis pela alta DQO dos efluentes de cervejarias, segundo GOLDAMMER (2008).

Os efluentes da produção de cervejas são gerados em grandes quantidades contendo alta concentração de poluentes orgânicos degradáveis, tornando-os passíveis de tratamento por processos anaeróbios, sendo que existem vários meios convencionais de se obter um tratamento efetivo, segundo citado por ZUPANCIC *et al.* (2007). Análogo a isso, XU *et al.* (2013) consideram estes efluentes facilmente biodegradáveis, e por isso, cabíveis de tratamento anaeróbio.

Em termos de quantidades de efluente gerado, pode-se mencionar a relação indireta de consumo de água, citada por diversos autores, à produção de cerveja. Na Tabela 1 são indicados os valores apresentados por diversos autores para o consumo específico de água por litro de cerveja produzida.

Tabela 1 – Relação de quantidade de água consumida por cerveja produzida, em L, apresentada por diversos autores.

Autor(es)	Lágua consumida Lcerveja produzida
FILHO et al. 2013	4,2
NETO, 2013	5 - 10
FILLAUDEAU et al. 2006	4-11
JANHOM et al. 2009	7
ENVIRONMENT CANADA, 1997, apud DOS SANTOS, 2005	4,75- 11,1
WORLD BANK, 1999, apud DOS SANTOS, 2005	4,9- 12,6
EUROPEAN COMMISION, 2004, apud DOS SANTOS, 2005	4,03- 6,80
BREWERS ASSOCIATION, 2014	7
	Easta, Elaborado nala autor

Fonte: Elaborado pelo autor

FILLAUDEAU *et al.* 2006, ainda apresentam uma relação de geração de efluentes por quantidade de cerveja produzida conforme a equação a seguir,

$$\frac{Geração\ de\ efluente}{Produção\ de\ cerveja} = 2,21 + \frac{545.892}{Produção\ de\ cerveja}$$

em que, 300.000 < *Produção de cerveja (hL/mês)* < 600.000.

Segundo relatado por BREWERS ASSOCIATION (2014) a geração e disposição de efluentes de cervejaria são uma oportunidade de melhoria para os produtores de cerveja, pois cerca de 70% da água consumida acaba como efluente para a maioria das indústrias.

#### 3.2 TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO

Dentre os fatores citados por METCALF e EDDY (2003), que devem ser considerados quando da escolha de tecnologias de tratamento, citam-se a aplicabilidade do processo, a qual é medida por experiências passadas (estudos e trabalhos publicados); análise econômica, realizada com base nos custos iniciais de implantação e nos de operação e manutenção; e ainda, disponibilidade de área, tanto para implantação do sistema, como para possível expansão.

Segundo o que foi discutido por SIMATE *et al.* (2011), tecnologias de tratamento biológico são amplamente aplicadas no tratamento de efluentes de cervejarias sendo que usualmente se optava por sistemas aeróbicos, porém recentemente, processos anaeróbicos também se tornaram opções atrativas devido a alta remoção de DQO, entre outras vantagens.

Tanto em escala piloto ou escala real, uma variedade de configurações diferentes de reatores anaeróbicos tem obtido sucesso no tratamento de efluentes de cervejaria, conforme RAO *et al.* (2007).

LASSMAN *et al.* (2008) realizaram estudo de dois Reatores Anaeróbios de Fluxo Invertido com Material Suporte (IFBR) tratando efluente de cervejaria, os quais tiveram diferentes materiais suporte implementados e ambos obtiveram remoção de DQO maiores que 90%. NA Figura 1, é apresentado um esquema dos IFBR construídos por LASSMAN *et al.* (2008)

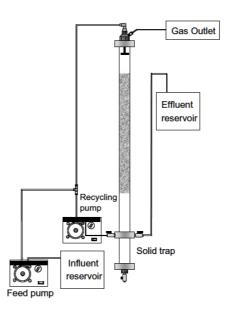


Figura 1 - Esquema de Reatores Anaeróbios de Fluxo Invertido com Material Suporte (IFBR) tratando efluente de cervejaria.

Fonte: LASSMAN et al. (2008)

Um UASB (Reator Anaeróbio de Manta de Lodo com Fluxo Ascendente), tratando efluente da produção de cerveja opaca, foi estudado por PARAWIRA *et al.* (2004) em que se constatou remoção média de 57% de DQO e 50% de Sólidos Totais (ST). Um esquema simplificado de um UASB é representado na Figura 2.

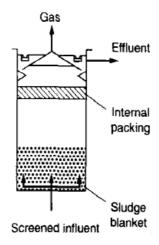


Figura 2 - Esquema simplificado de um reator UASB com material suporte.

Fonte: METCALF e EDDY (2003)

XU *et al.* (2013) avaliaram dois Reatores de Fluxo Ascensional por Biogás (BLR), Figura 3, tratando efluente de cervejaria. Foram registradas remoções de DQO, no primeiro reator, de 80% com Carga Orgânica Volumétrica (COV) de 7,4 kg de DQO/m³·d, enquanto no segundo reator, de 90% com COV de 7,4 kg de DQO/m³·d.

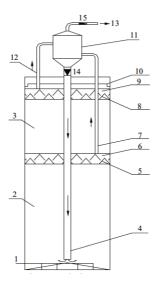


Figura 3 - Reator de Fluxo Ascensional por Biogás (BLR).

Notas: (1) Distribuidor de afluente; (2) e (3) câmaras do reator; (4) tubulação de retorno para mistura; (5) e (8) separador trifásico; (6) e (9) câmara de reação de biogás; (7) e (12) tubulação de condução de biogás; (10) saída de efluente; (11) caixa de separação; (13) saída do biogás; (14) e (15) medidor de vazão.

Fonte: XU et al. (2013)

NACHAIYASIT e STUCKEY (1997a), examinaram o efeito de cargas de choque em um Reator Anaeróbio Compartimentado (RAC) com oito compartimentos totalizando 10 L de volume e tratando efluente sintético completamente biodegradável. Foi constatado que houve 98% de remoção de DQO para COV de até 9,6 kg de DQO/m³•d, entretanto, houve uma redução para 90% de remoção quando aplicada uma COV de 18 kg/m³•d. Um esquema simplificado do RAC é apresentado na Figura 4.

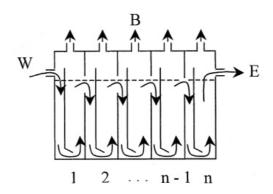


Figura 4 – Esquema simplificado de um RAC.

Nota: W (Afluente); E (Efluente); B (Biogás); n (número de câmaras).

Fonte: BARBER e STUCKEY (1999)

O Reator Anaeróbio Compartimentado (RAC), segundo GROBICKI e STUCKEY (1992) foi descrito primeiramente por Bachmann *et al.*, em 1983, e permite elevadas taxas de aplicação hidráulica com baixa perda de biomassa na saída do reator, com estrutura simples e barata, pois não apresenta partes móveis ou misturadores mecânicos.

NYQUIST e NYQUIST (2009) caracterizam o RAC como uma união de dois reatores diferentes: o UASB e o SMPA (Digestor Anaeróbico de Multifase). Sendo que o RAC apresenta alternação de microrganismos ao longo do fluxo pelas diferentes câmaras. Sua configuração visa a segregação entre as bactérias acidogênicas e as metanogênicas e a transformação de uma operação de fase única em duas e múltiplas fases.

As principais vantagens relacionadas ao RAC foram apontadas por BOOPHATY *et al.* (1988), como sendo: configuração simples; sem necessidade de estruturas de separação de gases e lodo; redução de carreamento de biomassa por seu fluxo alternado ascendente e descendente; retenção da biomassa sem necessidade de estruturas custosas de contenção ou câmaras de sedimentação; e finalmente, manutenção (retirada de lodo) após longos períodos de operação.

Foi reportado por NACHAIYASIT e STUCKEY (1997), que o RAC se mostra promissor em situações de fluxo intermitente, com poucos cuidados relativos a operação e manutenção.

Além do Reator Anaeróbio Compartimentado, outras tecnologias devem ser consideradas. Os Banhados Construídos (BC), os quais tem sido usados por mais de 50 anos como tecnologia de tratamento de águas residuárias, vem sendo utilizados também para o tratamento de efluentes industriais, como a indústria têxtil, vinícolas, cervejarias, curtumes e engenhos de azeite, conforme reportado por VYMAZAL (2014) em todos continentes. Os BC podem apresentar diferentes configurações: Banhados Construídos de Fluxo Superficial Livre (BC-FSL) e Banhados Construídos de Fluxo Sub-superficial, divididos em Fluxo Sub-superficial Horizontal (BC-FSH) e de Fluxo Sub-superficial Vertical (BC-FV). Na Figura 5 é apresentado um esquema simplificado de BC.

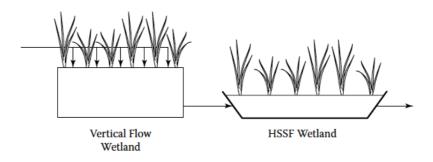


Figura 5 – Representação simplificada de um sistema híbrido de BC-FV seguido de BC-FSH.

Fonte: KADLEC e WALLACE (2009)

27

Segundo MASI (2008), bancos de dados sobre BC mostram que existem centenas de BC

tratando efluentes secundários ou terciários nos EUA e Inglaterra.

Estudados por BIDONE (2007), banhados construídos de fluxo sub-superficial consistem

em tecnologia viável para remoção de N-amoniacal, de lixiviado de aterro sanitário,

podendo remover até 90% deste, uma vez que o efluente seja primeiramente submetido a

processo de tratamento anaeróbico seguido de aeróbico, para que ocorra a nitrificação.

Os BC ainda podem ter configuração híbrida, como os mencionados por VYMAZAL

(2014), para tratamento de efluentes industriais.

Esta configuração de sistemas híbridos, segundo LEAL (2009), visa combinar as

qualidades de cada sistema isolado e, concomitantemente, reduzir os pontos críticos destes

sistemas.

DE SOUSA et al. (2000), verificaram a eficiência de 79 a 84% de remoção de matéria

orgânica, medida em DQO, em um BC-FSH tratando o efluente de um reator UASB, que

por sua vez, tratava águas residuárias. Enquanto nitrogênio e fósforo obtiveram de 76 a

87% e de 78 a 100% de remoção, respectivamente.

O tratamento de efluente de alta carga orgânica gerado a partir da produção de vinho foi

monitorado por um ano, na Itália, por MASI et al. (2002). Estes autores apresentaram o

monitoramento de três diferentes sistemas de tratamento com características variadas,

dentre as quais: Cargas de matéria orgânica, cargas hidráulicas, dimensões e layout. Destes

três sistemas em operação, um deles, em especial, com a configuração de BC-FHS seguido

por BC-FSL foi monitorado inclusive para remoção de nitrogênio e fósforo, coerente com

a demanda deste Estudo. Casualmente, foi o sistema que apresentou maior porcentagem de

remoção de poluentes, dentre os três monitorados, com 99, 98, 89, 81 e 72% de remoção

de DBO, DQO, SST, NT e P<sub>total</sub>, respectivamente.

#### 4 CONDICIONANTES E DIMENSIONAMENTO

#### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE DA MICROCERVEJARIA

A caracterização do efluente da Microcervejaria estudada se deu a partir do acompanhamento de uma brassagem (um ciclo completo do processo produtivo) da cerveja do tipo "Especial I", cujo volume produzido foi de 230 L, utilizando-se aproximadamente 70 kg de matéria-prima (maltes, lúpulo, açúcar e outros) e gerando aproximadamente 404 L de efluente, o qual foi coletado e analisado conforme os itens a seguir.

#### 4.1.1 Amostragem

A amostragem do efluente foi realizada ao longo do processo produtivo da cerveja "Especial I", bem como ao final do processo. Para tal, o processo foi analisado e separado em etapas, as quais ocorrem de maneira contínua na produção de cerveja. São elas:

- Lavagem inicial de panelas, utensílios e tanques de fermentação (LI): etapa em que ocorreu a produção de 110 L de efluente contendo 16 L de solução de NaOH (1,5%) visando a simulação de concentração desse resíduo no efluente, uma vez que 100 L desta solução são utilizados para a lavagem dos fermentadores (volume de 500 L) e são descartados a cada três lavagens. Cada lavagem caracteriza duas brassagem de 230 L de cerveja produzida.
- Produção da cerveja "Especial I" (E1): etapa responsável pelo produto final na indústria em que, pelos processos produtivos mencionados anteriormente, se gerou 230 L de cerveja e 140 L de efluente.
- Lavagem final (LF): etapa pós produção que consiste na lavagem novamente das panelas, utensílios e piso, sendo que foram gerados 100 L de efluente nessa etapa.
- Envase: não houve envase de cerveja nesta brassagem, então, uma quantidade significativa de efluente com pouca carga orgânica, que possivelmente faria uma diluição do efluente final, não foi contemplado nessa amostragem. Todavia, cabe

29

ressaltar que o envase da cerveja produzida pela empresa de estudo é feito

exclusivamente com garrafas novas, gerando, portanto, menos efluente que o

envase tradicional nos processos de cervejarias de grande porte.

> Reprodução de levedura (RL): processo em que se produz uma cerveja fraca (pouca

matéria-prima) em volume de 25 L para que ocorra a reprodução das leveduras

responsáveis pela fermentação da cerveja. Essa cerveja fraca tem frequência de

descarte de seis brassagens de 230 L e não foi misturada ao efluente final.

O procedimento de amostragem ocorreu da seguinte forma: o efluente de cada etapa

mencionada foi previamente armazenada em tonel de 100 L; ao final de cada etapa, o

efluente foi homogeneizado; ocorreu a medição de temperatura com termômetro de álcool;

a amostragem feita em recipientes de polipropileno com volume de 0,5 L à meia altura do

tonel; e, finalmente, houve a transferência do efluente para o armazenamento final em uma

caixa d'água de 500 L.

O mesmo procedimento ocorreu para o efluente final armazenado, porém foram

amostrados 4 L de efluente divididos em dois recipientes de polipropileno com volume de

2 L cada. Tal amostra foi identificada como EC-1 (Efluente de Cervejaria − 1).

Todos frascos de amostragem foram devidamente identificados e acondicionados a

temperatura abaixo de 4°C, conforme determinado por APHA (1999), em caixa de isopor

com gelo.

4.1.2 Análises de parâmetros

O critério para a definição dos parâmetros a serem analisados foi a relevância de cada

parâmetro em relação ao conhecimento de características de tratabilidade do efluente por

sistemas de tratamento biológicos e/ou físico-químicos. Na Tabela 2 são apresentados estes

parâmetros.

Tabela 2 - Parâmetros analisados.

#### Parâmetros físicos e químicos

Alcalinidade Total

Carbono Orgânico Total (COT)

 $DBO_{5,20}$ 

DQO

P<sub>total</sub> (Fósforo Total)

NH<sub>3</sub>-N (N-amoniacal)

NTK (Nitrogênio Total Kjeldahl)

pН

Sólidos Dissolvidos

Sólidos Sedimentáveis

Sólidos Suspensos

Sólidos Totais

Temperatura

Fonte: Elaborado pelo autor

As análises foram realizadas conforme os procedimentos estabelecidos pela *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 1999), em um período de 18 dias no Laboratório Experimental da Estação de Tratamento de Esgotos - ETE São João/Navegantes.

#### 4.2 DEFINIÇÃO DA(S) TECNOLOGIA(S) DE TRATAMENTO

Com o objetivo de definir qual ou quais as tecnologias a serem empregadas no tratamento do efluente da Microcervejaria, foram considerados os seguintes critérios em ordem de importância:

- I. Atendimento aos padrões de emissão de efluentes, no corpo hídrico receptor, estabelecidos pela CONSEMA Nº 128/2006;
- II. Custos de implantação e operação da estação de tratamento de efluentes (ETE), pois altos investimentos, para empresas de pequeno porte, podem inviabilizar a implantação da ETE;

- III. Baixa geração ou geração nula de resíduos, sólidos ou líquidos, provenientes do tratamento, pois aumentam os custos operacionais;
- IV. Simplicidade operacional, já que, por se tratar de uma microcervejaria, não se justifica a contratação de um operador exclusivo para a ETE;
- V. Resiliência do sistema, uma vez que podem ocorrer descargas de choque no sistema de tratamento em função de mudanças no processo produtivo ou alta demanda de mercado;
- VI. Possibilidade de fácil ampliação, pelas mesmas razões apontadas no item anterior. Diversos Autores foram consultados visando atender a esses critérios. Na Tabela 3 são apresentados os Autores, consultados para definição de um sistema secundário, os tipos de tratamento biológicos anaeróbicos estudados e dois parâmetros de dimensionamento: Carga Orgânica Volumétrica (COV) e Tempo de Detenção Hidráulica (TDH), os quais podem auxiliar na tomada de decisão. Para definição de um sistema terciário, foi utilizado principalmente o conteúdo de KADLEC e WALLACE (2009).

Tabela 3 – Autores e tipos de tratamento biológicos anaeróbicos consultados e as respectivas remoções de DQO, COV e TDH de estudo.

Autor(es)	Tipo de tratamento	Porcentagem de remoção de DQO (%)	Carga Orgânica Volumétrica (kg de DQO/m³•dia)	Tempo de Detenção Hidráulica (h)
LASSMAN et al. (2008)	Filtro Biológico Anaeróbio de Fluxo Invertido	90	70	240
BALOCH et al. (2007)	Reator Anaeróbio Compartimentado com Manto de Lodo Granular	93-96	2,16-13,38	55,5-19,23
DÍAZ et al. (2006)	$UASB^1$	80	11	8
DÍAZ et al. (2010)	UASB <sup>1</sup>	81-92	-	-
FILHO et al. 2013	Reator Anaeróbio de Circulação Interna	81-85	-	2,56
GIL et al. (2001)	Reator Anaeróbio com Manto de Lodo Granular Expandido	70-75	20	2
PARAWIRA et al. (2004)	UASB <sup>1</sup>	57	6	24
LI et al. (2010)	Filtro Biológico Anaeróbio de Fluxo Ascendente	93,2	-	8
RAO et al. (2007)	UASB <sup>1</sup>	96	23,1	2
VISVANATHAN e				
POKHREL (2003) apud	Digestor Anaeróbio - Ultrafiltração	97	17	19,2
SIMATE <i>et al.</i> (2011)				
XIANGWEN et al. (2008)	Reator Anaeróbio de Bateladas	90	1,5 - 5,0	24
XU et al. (2013)	Reator de Fluxo Ascensional de Biogás	90	8,3	17
YAN e TAY (1993)	UASB <sup>1</sup>	91,3	12,2	4
ZUPANCIC et al. (2007)	Reator Anaeróbio de Bateladas Termofílico	88,9	3,23 - 8,57	624

Notas: 1. Reator Anaeróbio de Manta de Lodo com Fluxo Ascendente.

Fonte: Elaborado pelo autor

33

Sendo assim, para a ETE da Microcervejaria, foi estabelecido um sistema biológico

combinado, composto por um Reator Anaeróbio Compartimentado (RAC), do inglês,

Anaerobic Baffled Reactor (ABR); seguido de Banhados Construídos de Fluxo Vertical

(BC-FV) e de Fluxo de Superfície Livre (BC-FSL), referidos na literatura internacional

como Vertical Flow Constructed Wetland (FV-CW) e Free Water Surface Flow

Constructed Wetland (FWS-CW).

BARBER e STUCKEY, (1999), realizaram uma revisão da utilização do RAC quanto ao

tratamento de efluentes de diversas origens, como esgotos domésticos, abatedouros,

melaço e destilaria de uísques. O RAC se mostra promissor para tratamento de efluentes

industriais devido ao fato de poder resistir a severos choques de cargas orgânicas e

hidráulicas, alimentação intermitente, mudanças de temperatura, e ainda tolerar algum

material tóxico em virtude de seu comportamento bifásico (segregação das bactérias

acidogênicas e metanogênicas em diferentes câmaras).

Segundo COOPER et al. (1996) um BC-FV consiste em leito raso de cascalhos de

tamanhos graduais coberto por areia plantada com macrófitas, os quais são alimentados

intermitentemente de forma a provocar inundação na superfície. Assim, o efluente percola

pelo leito sendo coletado por tubos perfurados posicionados na base do BC-FV. Este

percolado, ao deixar o leito, acaba preenchendo os vazios novamente com ar, o que

acarreta em boa oxigenação do meio, permitindo a nitrificação.

Os BC-FSL têm a maior eficiência de remoção de nitrogênio, conforme VYMAZAL,

2014, devido ao processo de nitrificação/desnitrificação que ocorre neste tipo de banhado

construído. O processo consiste na oxidação da amônia pelas bactérias nitrificadoras na

zona aeróbicas do reator (próximo a superfície), seguido pela conversão do nitrato em

nitrogênio livre pelas bactérias desnitrificadoras. O mesmo Autor, ainda, evidencia a

remoção de fósforo que ocorre nos BC-FSL por processos de adsorção, absorção, complexação e precipitação.

#### 4.3 PARÂMETROS DE DIMENSIONAMENTO

Considerando tecnologias de tratamento biológico, o parâmetro de maior relevância em relação ao dimensionamento pode variar conforme o sistema empregado. No caso de sistemas anaeróbios, cuja maior utilização está para efluentes de elevada carga orgânica, a Demanda Química de Oxigênio (DQO) é o parâmetro usualmente analisado, pois contempla tanto a matéria orgânica facilmente biodegradável, quanto a matéria orgânica menos acessível aos microrganismos, garantindo o correto dimensionamento, principalmente para efluentes em que a relação DBO/DQO é menor que 0,5. Enquanto que, para o caso dos sistemas aeróbios, a DBO é o parâmetro mais utilizado, pois representa a matéria orgânica facilmente biodegradável, isto é, mais disponível aos microrganismos.

Por esta razão, a DQO foi escolhida como único parâmetro a ser analisado para todas as amostras. Assim sendo, as amostras intermediárias, ou seja, aquelas coletadas ao longo do processo produtivo da cerveja "Especial I", apenas foram analisadas em termos de DQO, sendo reservadas as demais análises para a amostragem final (EC-1). Além disso, a pouca disponibilidade de tempo para execução das análises e espaço físico no Laboratório também foram determinantes para esta decisão.

#### 4.4 DIMENSIONAMENTO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE EFLUENTES - ETE

#### 4.4.1 Características do efluente

Considerando que foram gerados 404 L de efluente para a produção de 230 L de cerveja do tipo "Especial I", tem-se a relação de 1,76 : 1 (1,76 litros de efluente gerado por cada litro de cerveja produzida).

Sabendo que os parâmetros de dimensionamento ideais, tais como Tempo de Detenção Hidráulica (TDH), Carga Orgânica Volumétrica (COV), entre outros, deveriam ser obtidos a partir de um ensaio de tratabilidade do efluente deste Estudo, buscou-se uma aproximação destes parâmetros a partir de estudos realizados para efluentes com origem similar ao efluente em questão. Na Tabela 4 são indicados exemplos de estudos que visaram o tratamento de efluentes da indústria de bebidas alcoólicas e as tecnologias empregadas.

Tabela 4 – Estudos realizados para tratamento de efluentes da indústria de bebidas alcoólicas e as respectivas tecnologias empregadas.

Autor	Origem do efluente	Tecnologia empregada
BALOCH et al. (2007)	Cervejaria	GRABBR <sup>1</sup>
BILLORE et al. (2001)	Destilaria de melaço de cana	BC-FH <sup>2</sup>
BOOPATHY et al. (1988)	Destilaria de uísque	RAC <sup>3</sup>
MASI et al. (2002)	Vinícola	BC-FH-FS <sup>4</sup>

Notas: 1. GRABBR (Reator Anaeróbio Compartimentado com Manto de Lodo Granular). 2. BC-FH (Banhado Construído de Fluxo Horizontal. 3. RAC (Reator Anaeróbio de Compartimentado). 4. BC-FH-FS (Banhado Construído de Fluxo Horizontal Sub-superficial combinado com Banhado Construído Fluxo Horizontal Superficial).

Fonte: Elaborado pelo autor

Tem-se o conhecimento das características determinadas por análises, conforme mencionado no item 4.1.2, da cerveja "Especial I". Todavia, outros tipos de cerveja são produzidos, pela indústria de pequeno porte em questão, com matérias-primas variadas e em diversas proporções a fim de se obter aromas, sabores e teores alcoólicos específicos. Isto acarreta em efluentes de características diferentes, principalmente em relação à Concentração de Matéria Orgânica (C). Portanto, buscou-se uma estimativa de produção mensal para o período de um ano considerando a mudança sazonal de produção, assim como, uma relação de quantidade de insumos utilizados por litro de cada tipo de cerveja produzida. A partir destes dados, e assumindo que a concentração C do efluente é diretamente proporcional à quantidade de insumos utilizados no processo, foi possível

relacionar a C analisada para o tipo "Especial I" com as sete outras cervejas produzidas pela indústria visando conhecer a Carga Orgânica (CO) de cada um de seus efluentes e sua variação mensal. Na Tabela 5 estão indicadas as variações mensais de produção dos oito tipos de cerveja da Microcervejaria, enquanto que na Tabela 6 são apresentados os oito tipos de cervejas produzidas e as respectivas CO de seus efluentes.

Tabela 5 – Quantidade de cada tipo de cerveja produzida por mês, em litros (L).

Mês	Lager	Ale I	Ale II	Ale III	Especial I	Especial II	Especial III	Especial IV	Total
Dezembro	4.800	1.800	1.800	1.000	600				10.000
Janeiro	4.800	1.800	1.800	1.000	600				10.000
Fevereiro	4.400	1.800	1.800	1.000	600				9.600
Março	3.800	1.800	1.800	1.000	600				9.000
Abril	3.200	1.800	1.800	1.000	600	600			9.000
Maio	2.800	1.600	1.600	800	600	600	600	600	9.200
Junho	2.800	1.600	1.600	800	600	600	600	600	9.200
Julho	3.200	1.800	1.800	1.000	1.000				8.800
Agosto	3.800	1.800	1.800	1.000	600				9.000
Setembro	4.400	1.800	1.800	1.000	600				9.600
Outubro	4.800	1.800	1.800	1.000	600				10.000
Novembro	4.600	1.600	1.600	1.000	1.200				10.000

Nota: 1. Considerando vinte e dois (22) dias úteis em um mês. 2. Todos valores são dados em L (litros).

Fonte: Microcervejaria de Estudo.

Tabela 6 - Perfil mensal de Carga Orgânica efluente (kg de DQO/mês) por tipo de cerveja produzida.

Mês	Lager	Ale I	Ale II	Ale III	Especial I	Especial II	<b>Especial III</b>	<b>Especial IV</b>	Total	Total/dia útil¹
Fevereiro	137,56	67,02	60,35	27,32	25,12	0,00	0,00	0,00	317,37	14,43
Março	137,56	67,02	60,35	27,32	25,12	0,00	0,00	0,00	317,37	14,43
Abril	126,10	67,02	60,35	27,32	25,12	0,00	0,00	0,00	305,90	13,90
Maio	108,90	67,02	60,35	27,32	25,12	0,00	0,00	0,00	288,71	13,12
Junho	91,71	67,02	60,35	27,32	25,12	26,67	0,00	0,00	298,18	13,55
Julho	80,24	59,57	53,64	21,86	25,12	26,67	35,53	35,17	337,80	15,35
Agosto	80,24	59,57	53,64	21,86	25,12	26,67	35,53	35,17	337,80	15,35
Setembro	91,71	67,02	60,35	27,32	41,86	0,00	0,00	0,00	288,26	13,10
Outubro	108,90	67,02	60,35	27,32	25,12	0,00	0,00	0,00	288,71	13,12
Novembro	126,10	67,02	60,35	27,32	25,12	0,00	0,00	0,00	305,90	13,90
Dezembro	137,56	67,02	60,35	27,32	25,12	0,00	0,00	0,00	317,37	14,43
Janeiro	131,83	59,57	53,64	27,32	50,23	0,00	0,00	0,00	322,60	14,66

Nota: 1. Considerando vinte e dois (22) dias úteis em um mês.

Fonte: Microcervejaria de Estudo.

39

Como se pode observar na Tabela 5, algumas cervejas são produzidas o ano todo, enquanto

outras têm sua produção concentrada nos meses de inverno. Além disso, na Tabela 6 os

meses em que se observa maior CO no efluente, são os meses de julho e agosto com

aproximadamente 340 kg de DQO/mês. Já que a ETE apenas receberá efluente nos dias em

que houver produção, foi apresentada também a CO por dia útil, com valor de 15,35 kg de

DQO/dia útil para os dois meses mencionados. A maior carga orgânica dos efluentes de

julho e agosto se deve à produção de dois tipos de cerveja, "Especial III" e "Especial IV",

as quais têm a característica incomum de serem mais "encorpadas".

A maior carga orgânica mensal poderia ser utilizada como valor chave para o

dimensionamento, contudo, a variação ao longo do mês é considerável, já que, para estes

dois meses, ocorre a produção dos oito tipos de cervejas da indústria. Soma-se a isso, o

fato de que existe variação considerável entre as CO dos efluentes resultantes da produção

destas cervejas. Assim, o valor chave utilizado para o dimensionamento foi o pior cenário

em termos da CO efluente, que corresponde a um dia de produção (460 L) da cerveja que

demanda a maior quantidade de matéria-prima. Esta CO máxima se refere à produção da

cerveja "Especial III", como indicado na Tabela 7.

Tabela 7 – Carga Orgânica (CO) máxima por tipo de cerveja para um dia de produção.

Tipo de cerveja	Insumos (g/L)	Insumos para duas brassagens¹ -460 L- (kg)	C² (g de DQO/L)	CO (kg de DQO/d)
Lager	208,99	96,14	16,28	13,18
Ale I	271,52	124,90	21,16	17,13
Ale II	244,48	112,46	19,05	15,42
Ale III	199,26	91,66	15,53	12,57
Especial I	376,78	173,32	23,78	19,26
Especial II	324,10	149,09	25,25	20,44
Especial III	431,81	198,63	33,64	27,24
Especial IV	427,45	196,63	33,30	26,96

Notas: 1. Dois ciclos completos por dia. 2. Concentrações estimadas a partir da analisada para o tipo "Especial I".

Fonte: Microcervejaria deste Estudo

O tipo de cerveja "Especial III", conforme a Tabela 7, resulta no efluente de maior CO, com valor de 27,24 kg de DQO/dia. Então, a partir deste valor foi dimensionado o sistema RAC, descrito a seguir.

#### 4.4.2 Dimensionamento do tratamento secundário

O Reator Anaeróbico Compartimentado (RAC) foi descrito por BOOPHATY *et al.* (1988) como sendo essencialmente um UASB que, devido a suas características únicas, não requer o desenvolvimento de lodo granular, o qual pode ser de difícil obtenção.

BALOCH *et al.* (2007), desenvolveu um experimento para analisar a performance de um Reator Anaeróbio Compartimentado com Manto de Lodo Granular (GRABBR). Este reator foi configurado com cinco câmaras separadas de igual volume e foi mantido a 35°C. Ainda, teve aplicação de diferentes Cargas Orgânicas Volumétricas (COV), variando de 2,16 a 13,38 kg de DQO/m³·d, com Tempos de Detenção Hidráulica (TDH), respectivamente, de 55,5 a 19,23 h, obtendo remoção de 94% a 96% da DQO nas COV de 2,16 até 5 kg/m³·d nos primeiros três compartimentos.

Para a definição da COV do RAC deste Estudo, buscou-se atender à CO no pior cenário de geração de efluentes, de 27,24 kg de DQO/dia, com um volume resultante de reator que facilitasse as condições reais de projeto, tais como volumes padronizados de tanques disponíveis no mercado. Além disso, outro critério estabelecido foi a utilização de três compartimentos, restringindo, portanto, a COV para a faixa de 2,16 a 5 kg/m³·d visando a remoção média de 95% de DQO, conforme BALOCH *et al.* (2007).

Na prática, o processo de dimensionamento se resume em, a partir de uma COV de projeto entre 2,16 a 5 kg/m³·d, verificar o volume (V) do reator de forma a mantê-lo o menor possível visando a minimização de custos e remoção da CO. Na Tabela 8, são apresentados os dados de dimensionamento do RAC para que tal reator atenda a demanda de CO de um dia de produção da cerveja com maior quantidade de matéria-prima utilizada, "Especial III".

Tabela 8 – Dados de dimensionamento do RAC para tratar aproximadamente 810 L de efluente gerados em um dia de produção da cerveja "Especial III".

Dados	Pior caso
CO afluente (kg de DQO/d)	27,24
COV de projeto (kg de DQO/m³•d)	4,6
V do reator (m³)	5,92
N° de câmaras	3
V <sup>1</sup> por câmara (m³)	1,97
TDH (d)	7,31

Nota 1: V (Volume).

Fonte: Elaborado pelo autor

Como se pode observar na Tabela 8, a COV de projeto foi de 4,6 kg de DQO/m³•d, o que ocasionou em um volume de reator de aproximadamente 6.000 L e TDH de pouco mais de sete dias.

A partir deste volume de reator fixado, foi analisado, também, a COV resultante da aplicação da menor CO possível do efluente, que diz respeito a um dia de produção da cerveja com menor utilização de insumos, cerveja "Ale III" (12,57 kg de DQO/m³·d), apresentada anteriormente na Tabela 7. A COV resultante, assim como o TDH são indicados na Tabela 9, a seguir.

Tabela 9 – COV resultante para o efluente de menor CO, a partir da produção da cerveja "Ale III".

Dados	Condição de menor CO
CO afluente (kg de DQO/d)	12,57
COV (kg de DQO/m³•d)	2,12
V de projeto do reator (m³)	5,92
N° de câmaras	3
V por câmara (m <sup>3</sup> )	1,97
TDH (d)	7,31

Fonte: Elaborado pelo autor

Pode-se notar que a COV resultante, de 2,12 kg de DQO/m³•d, está próximo o suficiente da faixa de operação estudada por BALOCH *et al.* (2007), de 2,16 a 5 kg de DQO/m³•d, garantindo a eficiência de remoção de DQO obtida por estes autores.

Apesar de o RAC ter sido dimensionado para diminuição da Carga Orgânica do Efluente, espera-se alguma remoção de nutrientes, já que ocorre significante retenção de sólidos e por estudos como BOOPHATY *et al.* (1988), o qual registrou remoção de nutrientes de aproximadamente 37%, tanto para Nitrogênio Total quanto para P<sub>total</sub>, quando da aplicação de COV de 3,5 kg de DQO/m<sup>3</sup>·d.

A produção de biogás pelo RAC pode ser estimada como 0,35 L de CH<sub>4</sub>/g de DQO removida, segundo METCALF e EDDY (2003) o que resulta em 6.325,88 L de CH<sub>4</sub>/d, considerando condições padrões de temperatura e pressão (0°C e 1 atm), e a média de CO resultante dos tipos de cervejas apresentados na Tabela 7.

43

Ainda, fundamentado nestes dados, o lodo produzido no RAC pode ser estimado pela

geração correspondente de 10 a 15% da massa de DQO removida, isto é, a cada 10 kg de

DQO removida no Reator, ocorre a geração de 1 a 1,5 kg de lodo. Aplicando esta taxa a

situação do Estudo, tem-se a produção de 0,35 a 0,53 kg de lodo por dia.

4.4.3 Dimensionamento do tratamento terciário

Usualmente, os sistemas de tratamento por banhados construídos são dimensionados

visando remoção de matéria orgânica, de forma direta (concentração de DBO) ou de forma

indireta (População Equivalente – PE). Esta ocorre principalmente quando os efluentes a

serem tratados são águas residuárias.

No presente Estudo, o objetivo do sistema biológico de banhados construídos é,

primeiramente, a remoção de nutrientes (nitrogênio e fósforo), assim como um residual de

matéria orgânica, os quais não são suficientemente removidos no RAC para atender aos

padrões de lançamento de efluentes, conforme a legislação vigente.

Considerando a concentração de NTK, Ptotal e DBO remanescentes ao Reator Anaeróbio

Compartimentado, foram estudadas e dimensionadas diversas configurações de banhados

construídos conforme a metodologia proposta por KADLEC e WALLACE (2009), dentre

as quais: BC-FHS (Banhado Construído de Fluxo Horizontal Sub-superficial), os

mencionados anteriormente, BC-FV e BC-FSL, assim como algumas combinações entre

eles.

Segundo KADLEC e WALLACE (2009), a forma ideal de se dimensionar um determinado

banhado construído ocorre a partir de um experimento em escala piloto em que as

características do efluente, dos microrganismos e do processo são estudados e afim de

reproduzir a situação de escala real. Porém, na impossibilidade de se realizar tal estudo,

pode-se dimensionar um sistema a partir de "Loading Charts" (do inglês, Gráficos de

Carga), os quais podem ser definidos como: banco de dados de banhados construídos,

elaborado pelos Autores, que reúne informações de BC em operação por longos períodos de tempo. Na prática, a utilização dos Gráficos de Carga permite que, a partir de uma carga pré-dimensionada de determinado poluente, obtenha-se a concentração esperada deste na saída do sistema.

Como citado anteriormente, espera-se remoção de 95% da concentração de DQO a montante do RAC, porém a remoção de nutrientes não fora analisada por BALOCH *et al.* (2007), então não se pode garantir que haja alguma remoção de nitrogênio e fósforo pela atividade microbiana do RAC. Entretanto, a retenção física dos sólidos suspensos neste reator anaeróbio é de 95%, segundo BALOCH *et al.* (2007), e conforme KADLEC e WALLACE (2009), cerca de 45% de fósforo particulado é removido, em média, em BC-FSL por sedimentação. Sendo assim, o processo de sedimentação dos sólidos suspensos, que ocorre no Sistema, faz-se relevante no tocante a remoção de nutrientes. A partir disto, assume-se remoção de 30% de NTK e P<sub>total</sub> em termos de concentração. Em relação à DBO, foi admitida a mesma porcentagem de remoção de matéria orgânica, medida em DQO, de 95% (BALOCH *et al.* 2007).

Tanto para NTK, quanto para P<sub>total</sub> e matéria orgânica (medida em DBO), as concentrações destes poluentes, adotadas para o dimensionamento, representam o caso mais crítico de cargas poluentes no efluente da microcervejaria, como mencionado no item anterior, caracterizado por um dia de produção da cerveja do tipo "Especial III".

Aplicou-se, então, a metodologia de dimensionamento por Gráficos de Carga, aos banhados construídos e combinações deste, citados anteriormente, sendo que a configuração de menor área possível, para atendimento aos padrões de emissão de efluentes da Resolução CONSEMA N° 128/2006, foi identificada na combinação, em série, de BC-FV (alimentação intermitente), seguido de BC-FSL. Na Figura 6 é apresentado o Gráfico de Carga elaborado por KADLEC e WALLACE (2009), que

relaciona carga de NTK (g/m²•a) e concentração de NTK efluente ao sistema de BC-FV, em mg/L.

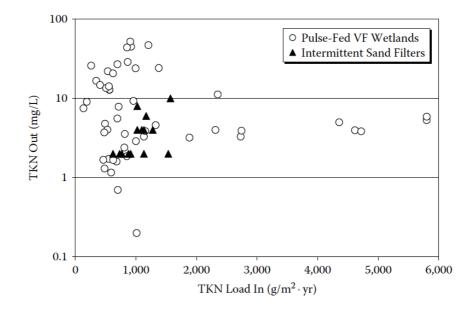


Figura 6 - Carga de Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK) relativa à concentração final de NTK, considerando alimentação intermitente ou por pulsos, a partir da operação de 29 sistemas de BC-FV.

Fonte: KADLEC e WALLACE (2009)

Segundo KADLEC e WALLACE (2009), há poucos dados para representação da remoção de fósforo em BC-FV, por isso, é recomendado o uso do Gráfico de Carga a seguir, na Figura 7, cuja amostra provém da operação de BC-FHS, para Carga de  $P_{total}$  ( $g/m^2 \cdot a$ ) em relação a concentração de entrada e de saída de  $P_{total}$ .

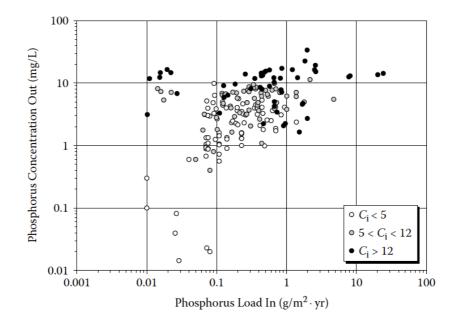


Figura 7 — Carga de fósforo total  $(P_{total})$  em função das concentrações, inicial  $(C_i)$  e final  $(C_{out})$ , de operação de 86 sistemas de BC-FHS.

Fonte: KADLEC e WALLACE (2009)

Em termos de Carga de DBO, KADLEC e WALLACE (2009) elaboraram o Gráfico de Carga, explicitado na Figura 8, a partir de dados de 62 BC-FV em operação, o qual permite identificar a concentração de DBO a jusante (mg/L) do BC-FV, a partir da Concentração Inicial (C<sub>i</sub>), em mg/L, e da Carga de DBO entrante, em g/m²·a.

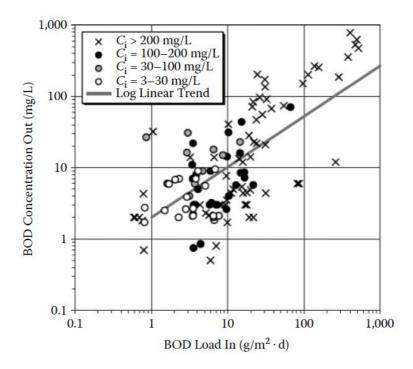


Figura 8 – Carga de DBO afluente relacionada à concentração de entrada  $(C_i)$  e de saída  $(C_{out})$  de 62 BC-FV em operação.

Fonte: KADLEC e WALLACE (2009)

E, finalmente, para o parâmetro SST, KADLEC e WALLACE (2009), apresentaram o Gráfico de Carga de SST (Figura 9) elaborado a partir de 31 BC-FV operando com fluxo intermitente.

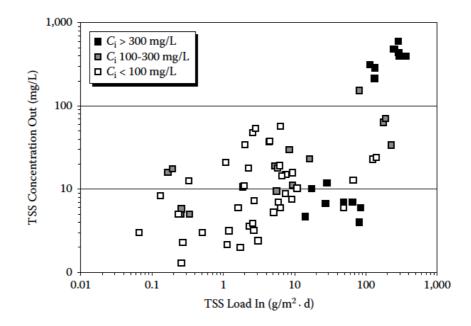


Figura 9 - Carga de SST afluente relacionada à concentração de entrada  $(C_i)$  e de saída  $(C_{out})$  de 31 BC-FV em operação com fluxo intermitente.

Fonte: KADLEC e WALLACE (2009)

Considerando que para o Banhado Construído de Fluxo Superficial Livre (BC-FSL), módulo seguinte do sistema de tratamento de efluentes, aplica-se idêntica metodologia, os Gráficos de Carga, de NTK, P<sub>total</sub>, DBO e SST, do BC-FSL são apresentados no ANEXO I – GRÁFICOS DE CARGA PARA DIMENSIONAMENTO DO BC-FSL.

Seguindo esta metodologia, apresentada por KADLEC e WALLACE (2009), de forma iterativa, ou seja, faz-se a análise da carga aplicada, para cada poluente, a partir de uma área de projeto, e se verifica a concentração de saída conforme os Gráficos de Carga. Repete-se o procedimento até que as condições de projeto sejam satisfatórias, isto é, concentração de poluentes a jusante da ETE atendendo aos padrões da legislação, considerando a menor área possível. Na Tabela 10, são apresentados os parâmetros de projeto obtidos para o sistema híbrido BC-FV-FSL.

Tabela 10 – Parâmetros de projeto do sistema híbrido BC-FV-FSL, considerando aproximadamente 810 L de efluente de um dia de produção da cerveja tipo "Especial III".

Parâmetro	<b>BC-FV</b>	<b>BC-FSL</b>	Unidade
Q	809,6	809,6	L/d
A	15	15	$m^2$
$CS_{NTK}^{1}$	4915,79	157,60	g/m²•a
$CS_{Ptotal}^{1}$	202,12	202,12	g/m²•a
${\rm CS_{DBO}}^1$	27,49	11,32	g/m²•a (FV) kg/ha•d (FSL)
$CS_{SST}^{-1}$	6,95	0,59	g/m²•d
СН	0,054	0,054	$m^3/m^2 \cdot d$

Nota: 1. CS (Carga Superficial), CH (Carga Hidráulica)

Fonte: Elaborado pelo autor

Considerando que banhados construídos de fluxo vertical tem significativa remoção de nitrogênio e praticamente zero remoção de fósforo, assim como, os de fluxo superficial livre tem relevante remoção de fósforo e melhoram a remoção de nitrogênio, cabe ressaltar que a área (A) do BC-FV foi dimensionada a partir do parâmetro NTK, enquanto a área do BC-FSL teve o P<sub>total</sub> como parâmetro chave para o dimensionamento.

Salienta-se que a metodologia de Gráficos de Carga pode envolver um erro em função das faixas de concentração de saída observadas nos Gráficos. Buscou-se minimizar este erro, definindo o valor médio da faixa observada para todos os poluentes.

### 4.4.4 Influência da temperatura

A temperatura é considerada parâmetro fundamental operacional de sistemas biológicos de tratamento de efluentes, por afetar a atividade dos microrganismos e, por conseguinte, a eficiência dos sistemas empregados.

No estudo realizado por BALOCH *et al.* (2007), o sistema foi mantido a temperatura constante de 35°C por recirculação de água quente em uma cinta presa ao reator. Todavia, a temperatura do efluente EC-1, apresentada na Tabela 13, foi de 23°C, o que pode acarretar em decréscimo da eficiência do processo.

Entretanto, BARBER e STUCKEY (1999) concluem que uma redução de temperatura do efluente de 35°C para 25°C não influencia na remoção de poluentes para efluentes facilmente biodegradáveis, mas maiores decréscimos podem afetar a eficiência do RAC. O estudo realizado por NACHAIYASIT e STUCKEY (1997), avaliou o efeito na performance de dois reatores RAC operados em baixas temperaturas, dos quais apenas um teve remoção de DQO reduzida de 96% para 93%, quando a temperatura foi diminuída de 35°C para 25°C. Enquanto que, para uma redução na temperatura de 25°C para 15°C, houve significativo decréscimo na eficiência dos reatores, sendo que um deles teve remoção de DQO alterada de 93% para 83%, e o outro, de 96% para75%.

Para o caso dos banhados construídos, KADLEC e WALLACE (2009) citam para a metodologia de Gráficos de Carga, aplicada neste Trabalho, que estres gráficos reúnem informações, basicamente, de BC localizados na Europa, América do Norte e Nova Zelândia, sendo assim, a grande maioria dos dados provém de clima temperado frio.

### 4.5 ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DA ETE

A partir do dimensionamento descrito nos itens anteriores, em que foram definidos as principais variáveis técnicas de projeto, como o volume e o número de câmaras do Reator Anaeróbio Compartimentado, além da área superficial e da carga hidráulica dos banhados construídos (BC), pode-se obter e/ou definir as demais medidas e características construtivas: materiais a serem utilizados na construção do RAC e dos BC, assim como as dimensões da ETE. Os materiais de interesse para a implantação do sistema são apresentados na Tabela 11 – Orçamento de materiais de interesse para implantação da ETE., no próximo capitulo, enquanto que as dimensões são indicadas na Tabela 15 – Medidas físicas, de maior relevância, dos componentes da Estação de Tratamento de Efluentes.

51

4.6 SONDAGEM DE CUSTOS DO SISTEMA DE TRATAMENTO ON-SITE

O horizonte de 5 anos de operação, para análise econômica, foi definido em função do

contrato estabelecido entre a Microcervejaria e o proprietário do imóvel em que aquela está

alocada, pois o sistema pode ser inviabilizado em novas instalações por diversos fatores,

como falta de área disponível.

Para a consecução dos custos relacionados à implementação da ETE, deve-se considerar os

custos relacionados a materiais, mão-de-obra e aluguel de máquinas para construção da

ETE, assim como, os custos operacionais e de manutenção, tais como: gasto energético de

bombas, análises do efluente solicitadas pelo órgão ambiental e limpeza periódica.

Em relação aos materiais, foram consultadas três unidades do comércio de materiais de

construção da cidade sede da microcervejaria. Tal metodologia fora adotada para evitar

erros de estimativas de custos, baseadas em médias regionais, elaboradas por Sindicatos e

afins, as quais muitas vezes são imprecisas, tanto em termos de valores, quanto em termos

de ano de referência, principalmente para localidades interioranas, como é o caso do

Estudo em questão.

É apresentado, na Tabela 11, os valores dos materiais de interesse orçados em três

empresas diferentes, assim como a média destes valores, utilizada nos cálculos de custos

para a implantação da ETE.

Tabela 11 - Orçamento de materiais de interesse para implantação da ETE.

<b>Material</b>	Loja A	Loja B	Loja C	Média	Unidade
Areia grossa (regular)	120	100	120	113,33	$R\$/m^3$
Argila	-	-	-	-	$R\$/m^3$
Brita	60	56	70	62,00	$R\$/m^3$
Caixa d'água 2000L	593	630	670	631,00	R\$/unidade
Caixa d'água 500L	199	215	195	203,00	R\$/unidade
Calha	-	-	-	-	R\$/m
Cap PVC 20mm	-	-	-	-	R\$/unidade
Cap PVC 50mm	6,8	2,5	3	4,10	R\$/unidade
Cascalho (Brita n°1)	60	56	70	62,00	$R\$/m^3$
Cascalho grosso (Brita n° 4)	75	56	70	67,00	$R\$/m^3$
Cola soldagem	4,3	9,9	4,5	6,23	R\$/unidade
Conexão formato "+" PVC 50mm	-	-	-	-	R\$/unidade
Conexão formato "T" PVC 50mm	9,9	4,8	4,8	6,50	R\$/unidade
Emenda PVC 20mm	-	-	-	-	R\$/unidade
Emenda PVC 50mm	4,4	3,3	3	3,57	R\$/unidade
Fita veda-rosca	5,8	9,5	6,8	7,37	R\$/unidade
Joelho PVC 20mm	0,8	0,4	0,5	0,57	R\$/unidade
Joelho PVC 50mm	5,3	3,8	3	4,03	R\$/unidade
Tubo PVC 20mm	2,3	2,05	1,95	2,10	R\$/m
Tubo PVC 50mm	11,5	9,7	7,95	9,72	R\$/m

Nota: (-) preço do item não foi informado.

Fonte: Elaborado pelo autor

Ainda, considerou-se, para mensurar os custos da construção do Sistema:

- ➤ Aluguel de uma retroescavadeira: aproximadamente dois dias (16 h) de trabalho, não consecutivos, para a escavação referente ao RAC e ao BC-FV-FSL, e posterior recobrimento e/ou preenchimento com material de interesse;
- ➤ Mão-de-obra: estimou-se a contratação de dois pedreiros para auxiliar na execução da construção, aproximadamente 4 dias (32 h), assim como um encanador para realizar as ligações pertinentes dos tubos e conexões (16 h de serviço). Foram consultados profissionais da área para esta estimativa.
- ➤ Aquisição de um queimador de biogás (*flare*): contatou-se fornecedor de queimador para atender a demanda média de 4.179,24 L de CH₄/d. O equipamento

53

consultado não consome energia elétrica uma vez que é alimentado por painéis

solares.

Em relação aos custos de operação, citam-se:

Consumo energético de bombas: considerou-se o uso de uma bomba KSB KRT F

com diâmetro nominal DN40 e potência de 2 hp gerando aproximadamente 1500

Watts de potência, para a qual se estima uso de 2 h por dia, 30 dias por mês;

Análises requeridas pelo órgão ambiental: licenças de operação de outras

microcervejarias da região foram consultadas no banco de dados do órgão

ambiental. A partir do número de análises e frequência exigidas nestas licenças de

operação, expedidas pelo órgão ambiental, estimou-se a necessidade de realização

de 4 análises anuais, sendo três físicas e químicas (duas do efluente tratado e uma

do efluente bruto), e uma análise de toxicidade;

Responsabilidade Técnica: a operação da ETE deve ser acompanhada por

profissional qualificado, o qual deve ser contratado para avaliar a operação da ETE

com frequência determinada.

Considerando os custos de manutenção, estimou-se a retirada de lodo produzido no RAC,

conforme item 4.4.2, com periodicidade trimestral, o que acarreta em geração de 32 kg a

48 kg de lodo a cada três meses de operação. Considerando que as empresas, que realizam

o serviço de limpeza desse tipo de reator, cobram o serviço por metro cúbico, foi

sistematizada a limpeza de 2 m<sup>3</sup>/trimestre de forma a ser feita sempre na terceira câmara,

garantindo a permanência de biomassa suficiente para o correto funcionamento do reator.

As estimativas de custos, propriamente ditas, conforme os itens mencionados

anteriormente, e ainda, a previsão de custos para cinco anos de operação, atendendo aos

objetivos deste Trabalho, são apresentados no Capitulo 5.4.

### 4.7 SONDAGEM DE CUSTO DO TRATAMENTO DE EFLUENTES OFF-SITE

O horizonte de 5 anos foi estabelecido conforme mencionado no item 4.6.

A obtenção dos custos intrínsecos ao tratamento de efluentes *off-site* por empresas terceiras ocorreu de forma direta, ou seja, foram contatadas algumas empresas no Estado que dispões deste serviço de tratamento de resíduos industriais, solicitando orçamentos embasados nas características do efluente, as quais foram determinadas pelas análises realizadas neste Trabalho. Além disso, foram consultadas empresas as quais executam o serviço de transporte de efluentes, já que grande parte das empresas que prestam este serviço de tratamento, não contam com frota própria de veículos para o transporte.

São apresentados, na Tabela 12, os custos do tratamento e do transporte obtidos a partir das propostas encaminhas pelas empresas.

Tabela 12 – Custos de transporte e tratamento off-site em empresas terceirizadas.

Empresa	Serviço	Custo <sup>1</sup> (R\$/m <sup>3</sup> )
Empresa 1	Tratamento	140
Empresa 2	Tratamento	250
Empresa 3	Transporte	73,3
Empresa 4	Transporte	233,3
Empresa 5	Transporte	92,1
Empresa 6	Transporte	66,7
Empresa 7	Transporte	53,3
Empresa 8	Transporte	91,7

Nota: 1. O custo relacionado as empresas de transporte corresponde à média obtida a partir do custos informados para o transporte de uma carga máxima (varia conforme a empresa) do endereço da Microcervejaria até as Empresas 1 e 2.

Fonte: Elaborado pelo autor

Ainda, para que o tratamento *off-site* seja possível, é preciso a instalação de um tanque de armazenamento do efluente a ser periodicamente transportado à central de tratamento terceirizada. Portanto, soma-se o custo de aquisição de um tanque de fibra de vidro de 15.000 L, dimensionado em função das capacidades máximas de transporte das empresas citadas na Tabela anterior. E sua respectiva instalação, estimada da seguinte forma:

55

Aluguel de uma retroescavadeira: aproximadamente 3 h de serviço, para a

escavação e posterior recobrimento do tanque de armazenamento;

Mão-de-obra: estimou-se a contratação de dois pedreiros para auxiliar na execução

da instalação do tanque, aproximadamente meio dia (4 h), assim como um

encanador para realizar as ligações pertinentes dos tubos e conexões (4 h de

serviço).

As estimativas dos custos especificados são apresentados no Capitulo 5.5. O qual

considera, também, a previsão de custos para cinco anos de operação, atendendo aos

objetivos deste Estudo.

5 RESULTADOS

5.1 RESULTADOS DAS ANÁLISES

As análises dos parâmetros citados na Tabela 2, foram realizadas para a amostra EC-1, que

ocorreu no dia 04 de Outubro de 2014, em que se produziu a cerveja tipo "Especial I" na

Microcervejaria. Na Tabela 13, são apresentados os resultados das análises físicas e

químicas.

Tabela 13 - Características físicas e químicas do efluente da produção da cerveja tipo "Especial I".

Parâmetro	Valor	Unidade
Alcalinidade Total	38,02	mg CaCO3/L
P <sub>total</sub>	15,78	mg/L
$NH_3$	3,93	mg/L
NTK	252	mg/L
pН	7,48	-
Sólidos Dissolvidos	11.308	mg/L
Sólidos Sedimentáveis	24	ml/L
Sólidos Suspensos	1.821	mg/L
Sólidos Totais	13.129	mg/L
Temperatura	23	$^{\circ}\mathrm{C}$
COT	9.950	mg de C/L
DBO <sub>5,20</sub>	7.200	mg de O <sub>2</sub> /L
DQO	23.784	mg de O <sub>2</sub> /L

Fonte: Elaborado pelo autor

Cabe ressaltar que todas análises foram conduzidas seguindo a metodologia do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 1999). Todavia, a concentração de DBO<sub>5,20</sub>, indicada na tabela anterior, foi estimada pela equação de uma curva elaborada a partir dos dados coletados nos primeiros 4 dias de medição da DBO, conforme a Figura 10. Isso ocorreu, devido ao fato de que houveram problemas técnicos no quinto dia de medição da DBO os quais impediram a observação da Concentração para o quinto dia.

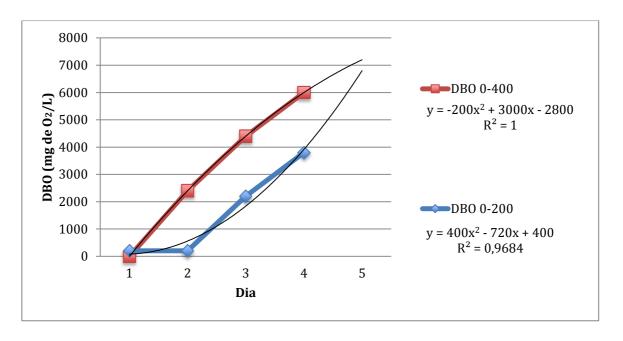


Figura 10 – Curvas de ajuste da concentração de DBO (mg de  $O_2/L$ ) do efluente da cerveja tipo "Especial I", e as respectivas curvas polinomiais de tendência.

Fonte: Elaborado pelo autor

Como observado nessa figura, foram feitas duas análises para a determinação da DBO a partir da mesma amostra, com diluição de 40 vezes em duas faixas esperadas de concentração: 0 a 200 mg/L e 0 a 400 mg/L. A curva que representa a faixa de 0 a 200 mg/L é escrita como: DBO (mg de  $O_2/L$ ) =  $400(dia)^2$  - 720(dia) + 400 com  $R^2$  = 0.968. Enquanto que para a faixa de 0 a 400 mg/L, a curva é expressa como: DBO (mg de  $O_2/L$ ) =  $-200(dia)^2$  + 3000(dia) - 2800 com  $R^2$  = 1. O ajuste da curva de concentração de DBO, para faixa de 0.400 mg/L, foi satisfatória, já que seu  $R^2$  = 1.

Além disso, para as amostras das diferentes etapas do processo produtivo, mencionadas no item 4.1.1, foi analisada a Demanda Química de Oxigênio visando a caracterização do processo. Os resultados da DQO para cada etapa é indicado na Tabela 14.

Tabela 14- Caracterização das etapas do processo de produção da cerveja tipo "Especial I" em relação à DQO (mg/L).

Etapa do processo produtivo	DQO (mg de O <sub>2</sub> /L)
LI (Lavagem Inicial)	124
E1 (Produção da cerveja tipo Especial I)	48.649
LF (Lavagem Final)	1.924
RL (Reprodução de Leveduras)	68.108
EC-1 <sup>1</sup> (Efluente de Cervejaria - 1)	23.784

Nota: 1. Efluente final da cervejaria gerado a partir do armazenamento dos efluentes de todas etapas em um mesmo tanque, exceto a RL.

Fonte: Elaborado pelo autor

Percebe-se uma diferença significativa entre as concentrações de DQO de cada etapa do processo, o que condiz com a operação e presença ou ausência de insumos, em cada etapa do processo.

### 5.2 LAYOUT DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE EFLUENTES - ETE

Considerando os resultados obtidos por BALOCH *et al.* (2007), para um Reator Anaeróbio de Câmaras Sequenciais com Manto de Lodo Granular, foi possível o dimensionamento do Reator Anaeróbio Compartimentado (RAC). Enquanto o dimensionamento do BC-FV-FSL foi desenvolvido segundo metodologia de KADLEC e WALLACE (2009). Portanto, a configuração final da ETE da Microcervejaria é apresentada, de forma esquemática, na Figura 11.

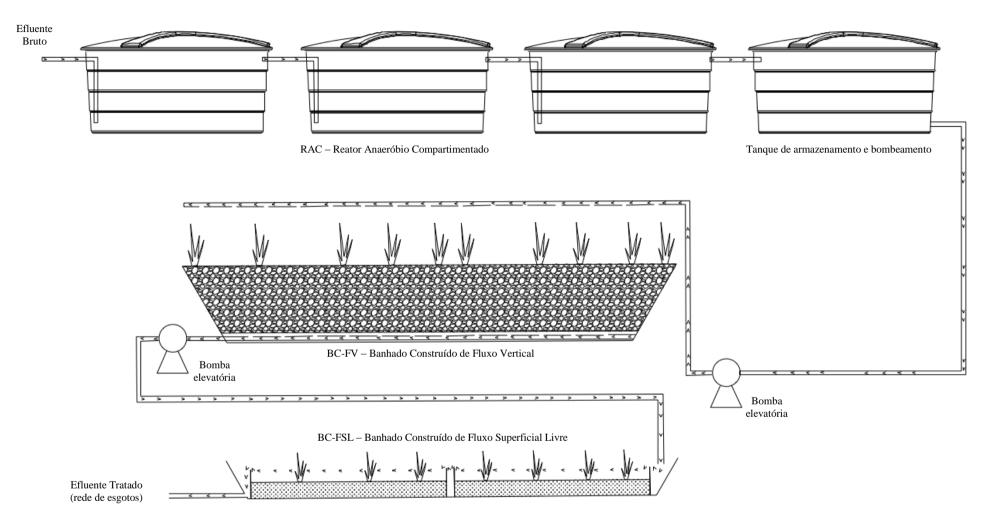


Figura 11 – Esquema simplificado da Estação de Tratamento de Efluentes da Microcervejaria.

Complementando a Figura 11, segue a Tabela 15 na qual são indicadas as medidas físicas relevantes a cada componente da ETE.

Tabela 15 — Medidas físicas, de maior relevância, dos componentes da Estação de Tratamento de Efluentes.

Medida	RAC	BC-FV	<b>BC-FSL</b>	Unidade
Volume	5,92	-	-	$m^3$
Área superficial	-	15	15	$m^2$
Relação comprimento:largura	-	-	5:1	-
Comprimento	-	5	5	m
Largura	-	3	3	m
Profundidade	-	0,6	0,3	m
Camada areia (0,25-0,4mm de Ø)	-	0,4	-	m
Camada de cascalho (3-10mm de Ø)	-	0,1	-	m
Camada de cascalho grosso (20-40mm de Ø)	-	0,1	-	m

Nota: Ø (diâmetro).

Fonte: Elaborado pelo autor

No caso do RAC, as dimensões não são de suma importância, com tanto que seja mantido o volume especificado para cada câmara de aproximadamente 2 m<sup>3</sup>. Já para os BC, as medidas influenciam no resultado final de remoção de poluentes.

### 5.3 REMOÇÃO ESPERADA NA ETE

A partir das considerações mencionadas no item anterior, e do constante na Resolução do Conselho Estadual de Meio Ambiente CONSEMA N° 128/2006, que dispões sobre padrões de emissão de efluentes, são apresentadas, na Tabela 16, as concentrações dos poluentes, inicial e final, assim como os percentuais de remoção destes, e os respectivos padrões de emissão conforme a legislação citada. Cabe ressaltar que estes dados apresentados representam a situação de maiores cargas possíveis de poluentes ao considerar o efluente de um dia de produção da cerveja tipo "Especial III".

Tabela 16 – Concentração e remoção dos poluentes em cada etapa da Estação de Tratamento de Efluentes, e os padrões de emissão segundo CONSEMA Nº 128/2006.

Dowêrn otwo	R	AC	ВС	C-FV		BC-FSL		Remoção total da	Limites conforme	
Parâmetro	$\mathbf{C}_{ ext{afluente}}$	Remoção	$C_{afluente}$	Remoção	Cafluente	Remoção	$C_{efluente}$	ETE	<b>CONSEMA N° 128/2006</b>	
DBO <sub>5,20</sub>	10184,87	95%	509,24	96%	20,98	52%	10,00	99,90%	180,00	
DQO	33644,01	95%	1682,20	96%	69,23	52%	33,00	99,90%	400,00	
$P_{total}$	14,66	30%	10,26	0%	10,26	61%	4,00	72,71%	4,0 ou 75% remoção	
NTK	356,47	30%	249,53	97%	8,00	0%	8,00	97,76%	20,0 ou 75% remoção	
SST	2576,37	95%	128,82	91%	11,00	55%	5,00	99,81%	180,00	

Notas: 1. C<sub>afluente</sub> (concentração afluente) e C<sub>efluente</sub> (concentração efluente); 2. Todos valores, sem unidade especificada, estão em mg/L; 3. Os valores de C<sub>afluente</sub> ao RAC representam o efluente de um dia de produção da cerveja tipo "Especial III", de maior carga poluente.

Fonte: Elaborado pelo autor

# 5.4 CUSTOS DO TRATAMENTO ON-SITE EM ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE EFLUENTES

O custo total a ser explicitado neste item corresponde a todos custos que envolvem a ETE: implantação, operação e manutenção. São indicados os custos de implantação da ETE, na Tabela 17, considerando o preço dos materiais e serviços indicados no item 4.4.2.

Tabela 17 – Custos estimados para a implantação da Estação de Tratamento de Efluentes.

Sistema	Material ou serviço	Quantidade	Unidade	Valor unitário estimado (R\$/unidade)	Total estimado (R\$)
	Caixa d'água 2000L	3	unidades	631,00	1893,00
	Caixa d'água 500L	1	unidades	203,00	203,00
	Tubo PVC 50mm	11	m	9,72	106,88
	Joelho PVC 50mm	5	unidades	4,03	20,17
	Emenda PVC 50mm	3	unidades	3,57	10,70
	Tubo PVC 20mm	1	m	2,10	2,10
abla	Cola soldagem	1	unidades	6,23	6,23
RAC	Fita veda-rosca	2	unidades	7,37	14,73
( )	Brita	1	$m^3$	62,00	62,00
	Flare	1	Unidade	5.000,00	5.000,00
	Aluguel retroescavadeira	4	h	140,00	560,00
	Mão-de-obra (2 pedreiros)	4	h	25,00	200,00
	Mão-de-obra (1 encanador)	4	h	30,00	120,00
	Custo total de implantação do RAC			8198,82	
	Bomba	2	unidades	1400,00	2800,00
-	Tubo PVC 50mm	44	m	8,90	391,60
BC-FV-FSL	Joelho PVC 50mm	2	unidades	3,07	6,13
	Conexão T PVC 50mm	10	unidades	6,50	65,00
	Conexão + PVC 50mm	4	unidades		
H	Cap PVC 50mm	4	unidades	4,10	16,40
	Tubo PVC 20mm	31	m	2,10	65,10
	Joelho PVC 20mm	4	unidades	0,57	2,27

Márcio Sgarbi. Porto Alegre: EE/IPH/UFRGS, 2014

Cola soldagem	5	unidades	6,23	31,17	
Fita veda-rosca	5	unidades	7,37	36,83	
Calha	9	m			
Areia grossa (regular)	6	$m^3$	113,33	680,00	
Cascalho (Brita n°1)	1,5	$m^3$	62,00	93,00	
Cascalho grosso (Brita n° 4)	1,5	$m^3$	67,00	100,50	
Argila	4,5	$m^3$			
Aluguel retroescavadeira	12	h	140,00	1680,00	
Mão-de-obra (2 pedreiros)	28	h	25,00	1400,00	
Mão-de-obra (1 encanador)	12	h	30,00	360,00	
Custo total de implantação	7728,00				
Custo total de implantação da Estação do	15926,82				
Custo total de implantação da Estação	19112,18				
Note: 1. Impracição derivada da dois fatores: ausância da praco da calha a arcilla: a arra intrínsaco à actimativa					

Nota: 1. Imprecisão derivada de dois fatores: ausência de preço da calha e argila; e erro intrínseco à estimativa.

Fonte: Elaborado pelo autor

65

No que concerne aos custos de operação, o consumo de energia das bombas foi estimado

individualmente, segundo o constante no item 4.6 e a tarifa de cobrança de 0,35069

R\$/kw.h (ANEEL, 2014), em R\$ 31,60/mês.

No tocante aos custos das análises requeridas pelo órgão ambiental, conforme mencionado

no item 4.6, soma-se um total de 4 análises anuais, 3 das quais são realizadas para 14

parâmetros da Resolução CONSEMA Nº 128/2006, com custo de R\$205,00 por amostra,

segundo orçamento obtido por laboratório da região. E ainda, estima-se a despesa de

R\$1.000,00 para uma análise de toxicidade.

A despesa de contratação de profissional qualificado, para avaliar a operação da ETE e

emitir Anotação de Responsabilidade Técnica (ART) ao órgão ambiental, foi estimada em

R\$1000,00 por mês, considerando que um profissional cobre R\$100,00 por hora de

trabalho sendo dispensadas 10 horas por mês para esta atividade, incluindo ART.

Considerando os custos de manutenção do RAC, a cerca da retirada do lodo com

periodicidade trimestral, foram orçados os valores por contato direto com empresas que

dispõe deste serviço, sendo que a média das propostas fornecidas foi de R\$180,00 por m<sup>3</sup>

de lodo. Sendo que serão retirados 2 m<sup>3</sup>/trimestre, tem-se a despesa anual de .R\$1440,00.

Estima-se ainda, custo anual de manutenção de 10% do valor de implantação da ETE, em

relação a peças móveis e dispositivos mecânicos, de R\$1.911,22.

Enfim, o custo total previsto para 5 anos de operação, assim como o valor presente são

apresentados na Tabela 18, considerando taxa de juros média anual de poupança 7,08% ao

ano (BC, 2014).

Tabela 18 – Custo final do tratamento *on-site* em Estação de Tratamento de Efluentes, considerando 5 anos de operação e juros de 7,08% ao ano.

	Custo			
	imediato	Custo anual	Valor Presente	<b>Custo Final</b>
Implantação	R\$19.112,18			R\$19.112,18
Operação	R\$1.615,00	R\$14.373,40	R\$58.807,76	R\$60.422,76
Manutenção		R\$3.351,22	R\$13.711,27	R\$13.711,27
Total da ET	R\$93.246,21			

Nota: (-) Não se aplica.

Fonte: Elaborado pelo autor

#### 5.5 CUSTOS DO TRATAMENTO OFF-SITE EM EMPRESA TERCEIRIZADA

Considerando o constante no item 4.7 acerca dos custos envolvidos na instalação de um tanque para armazenagem do efluente e posterior tratamento *off-site* em empresa prestadora de serviço de tratamento de efluentes, pode-se verificar, na Tabela 19, a especificação dos custos de instalação do tanque, enquanto, na Tabela 20, são apresentadas as despesas com o transporte e tratamento *off-site*.

Tabela 19 – Despesas de implantação do tanque de armazenamento temporário do efluente.

Material ou serviço	Quantidade	Unidade	Valor unitário estimado (R\$/unidade)	Total estimado (R\$)
Caixa d'água 15.000 L	1	unidades	5.000,00	5.000,00
Aluguel retroescavadeira	3	h	140,00	420,00
Mão-de-obra (2 pedreiros)	4	h	25,00	100,00
Mão-de-obra (1 encanador)	4	h	30,00	120,00
Custo total de implantação	5.640,00			

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 20 – Custos mensais de transporte e tratamento off-site do efluente da Microcervejaria.

Dado	Valor	Unidade
V <sub>efluente</sub> <sup>1</sup>	17,81	m³/mês
Custo tratamento	3473,18	R\$/mês
Custo transporte	1812,06	R\$/mês
Custo total	5285,24	R\$/mês

Nota: 1. Aproximadamente 810 L/d de efluente gerados em 22 dias úteis por mês.

Fonte: Elaborado pelo autor

E, finalmente, as despesas totais do tratamento *off-site*, em relação à operação de cinco anos, conforme citado, na Tabela 21, considerando taxa de juros média anual de poupança 7,08% ao ano (BC, 2014).

Tabela 21 – Custo final do tratamento *off-site* do efluente da Microcervejaria, considerando 5 anos de operação e juros de 7,08% ao ano.

			Valor		
	Custo imediato	Custo mensal	Presente	<b>Custo Final</b>	
Implantação	R\$5.640,00			R\$5.640,00	
Operação		R\$5.285,24	R\$266.407,19	R\$266.407,19	
Total do tratamento <i>off-site</i> para 5 anos de operação R\$272.047,					

Fonte: Elaborado pelo autor

## 6 CONCLUSÕES

A partir da amostragem e das análises realizadas para o efluente da Microcervejaria, foi possível observar a alta carga de matéria orgânica e sólidos decorrente da produção de cerveja, sendo que estes poluentes resultaram em concentrações de 23.783,78 mg de O<sub>2</sub>/L de DQO, relação DBO/DQO de 0,303, 13.129 mg/L de ST, 252 mg/L de NTK, e por fim, 15,78 mg/L de P<sub>total</sub>.

Os padrões de emissão de efluentes constantes na Resolução CONSEMA N° 128/2006 são atendidos pela ETE, com significativa folga em relação à concentração de matéria orgânica, sólidos suspensos e nitrogênio.

Dentre as opções apresentadas de tratamento de efluentes de indústrias de bebidas alcóolicas e, especialmente, cervejaria, o sistema definido para dimensionamento foi RAC seguido do sistema híbrido de BC-FV-FSL, os quais atenderam aos requisitos estabelecidos no item 4.2.

As metodologias de dimensionamento do RAC e do BC-FV-FSL, ambas fundamentadas em estudos passados, resultaram em uma ETE teoricamente robusta, apta a suportar sobrecargas de DQO, especialmente pelas características do RAC, e remover nutrientes, sem perda significativa de eficiência no tocante às temperaturas médias do ar na região da Serra Gaúcha, em torno de 15°C. O volume do RAC resultou em aproximadamente 6 m³ divididos em 3 câmaras de 2 m³ cada e TDH de 7,31 d. Enquanto a área superficial do BC-FV-FSL resultou em 30 m², sendo de 15 m² cada BC individual, e CH de 5,4 cm em ambos os casos. Ainda, esta configuração de ETE permite a ampliação do sistema de tratamento em caso de aumento da produção média mensal.

A análise dos custos permite observar que a opção de tratamento *off-site* do efluente, com custo final de R\$272.047,19, é economicamente inviável, por resultar em valor presente 2,92 vezes maior que a opção *on-site*, com custo final de R\$93.246,21, para operação ao longo de 5 anos.

# 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apesar de os estudos consultados apresentarem relação de consumo de água por cerveja produzida significativamente superiores ao identificado em campo por este Trabalho, devese avaliar que por se tratar de uma microcervejaria, os processos são controlados de forma mais precisa, minimizando o consumo inadequado de recursos como água. Além disso, não foi considerada a etapa de envase, a qual tem significativo consumo de água nas indústrias cervejeiras, mas que, mais uma vez, para este caso, não influenciaria demasiadamente, pois

69

o envaze realizado por esta Microcervejaria se dá a partir de garrafas novas, as que exigem

processo simplificado de higienização.

As análises físicas e químicas realizadas para o efluente deste Estudo foram fundamentais

para realizar o dimensionamento do Sistema. Todavia, para minimizar erros de

considerações, idealiza-se obter amostras da produção dos demais tipos de cerveja durante

o período de um ano, ao menos, para se garantir a variação da concentração dos poluentes

conforme o produto e a sazonalidade de produção.

Acerca da concentração de emissão do fósforo, cabe considerar a continuidade das análises

do efluente conforme mencionado anteriormente, visando verificar a necessidade de

aumentar a área do BC-FSL para garantir concentração inferior à permitida na legislação

ou 75% de remoção.

O ideal, em termos de dimensionamento, seria a construção de um experimento piloto para

estudar detalhadamente o comportamento da biomassa em relação a configuração física

dos reatores da ETE, assim como a tratabilidade do efluente.

Atenta-se para a possibilidade de realização de um estudo específico de estimativa de

geração de biogás, apresentada de forma simples neste Trabalho, pois o aproveitamento do

biogás em caldeira seria adequado para o aquecimento da água para a mostura. Tal

tecnologia teria um custo de implantação, mas também acarretaria em minimização de

custos para esta etapa do processo na Microcervejaria.

Em relação aos custos, ainda, cabe ressaltar que o órgão ambiental poderia solicitar, no

caso da opção off-site, o monitoramento da área da Microcervejaria para garantir que

qualquer vazamento no tanque de armazenamento fosse rapidamente remediado, sem

grandes prejuízos ao manancial subterrâneo e ao solo. Isto acarretaria em custos adicionais

em função de análises periódicas de amostras de água e solo do local.

### 8 REFERÊNCIAS

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA), AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (AWWA), and WATER ENVIRONMENT FEDERATION (WEF). **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 20th Edition**. United Book Press, Inc., Baltimore, Maryland, 1999.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Resolução Homologatória N° 1.739. Homologa as Tarifas de Energia – TEs e as Tarifas de Uso dos Sistemas de Distribuição – TUSDs referentes à Rio Grande Energia S.A. – RGE e dá outras providências. Publicada no D.O. de 17 de junho de 2014.

BALOCH M. I.; AKUNNA J. C.; COLLIER P. J. The performance of a phase separated granular bed bioreactor treating brewery wastewater. **Bioresource Technology**, v. 98, p. 1849-1855, 2007.

BC - BANCO CENTRAL DO BRASIL. SGS - Sistema Gerenciador de Séries Temporais. Consulta à série de dados de juros de poupança para o período de 04/12/2013 a 04/12/2014. Disponível em: <a href="https://www3.bcb.gov.br/sgspub/consultarvalores/consultarValoresSeries.do?method=get">https://www3.bcb.gov.br/sgspub/consultarvalores/consultarValoresSeries.do?method=get</a> Pagina> Acesso em: 04 dez. 2014.

BARBER W. P.; STUCKEY D. C. The use of the anaerobic baffled reactor (ABR) for wastewater treatment: a review. **Water Research**, v. 33, n. 7, p. 1559-1578, 1999.

BIDONE R. F. Tratamento de lixiviado de aterro sanitário por um sistema composto por filtros anaeróbios seguidos de banhados construídos: estudo de caso – central de resíduos do recreio, em Minas do Leão/RS. 2007. 142 p. Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-graduação e Área de Concentração em Hidráulica e Saneamento). Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

BILLORE S. K.; SINGH N.; RAM H. K.; SHARMA J. K.; SINGH V. P.; NELSON R. M.; DAS P. Treatment of a molasses based distillery effluent in a constructed wetland in central India. **Water Science and Technology**, v. 44 n. 11/12, p. 441–448. 2001.

BOOPHATY R.; LARSEN V. F.; SENIOR E. Performance of anaerobic baffled reactor (abr) in treating distillery waste water from a scotch whisky factory. **Biomass**, v. 16, p. 133-143, 1988.

BREWERS ASSOCIATION. Water and Wastewater: Treatment/Volume Reduction Manual. 47 p. Disponível em: <a href="http://www.brewersassociation.org/educational-publications/water-wastewater-sustainability-manual/">http://www.brewersassociation.org/educational-publications/water-wastewater-sustainability-manual/</a> Acesso em: 11 nov. 2014.

- CONSEMA CONSELHO ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE. Resolução n° 128/2006. Dispõe sobre a fixação de Padrões de Emissão de Efluentes Líquidos para fontes de emissão que lancem seus efluentes em águas superficiais no Estado do Rio Grande do Sul. DOE, 07 de dezembro de 2006.
- COOPER P. F.; JOB G. D.; GREEN M .B.; SHUTES R. B. E. **Reed Beds and Constructed Wetlands for Wastewater Treatment**. Marlow: WRc Publications, 195 p. 1996.
- DE SOUSA J. T.; VAN HAANDEL A. C.; COSENTINO P. R. S.; GUIMARÃES A. V. A. Pós-tratamento de efluente de reator UASB utilizando sistemas "wetlands" construídos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 4, n. 1, p. 87-91, 2000.
- DÍAZ C.; BAENA S.; PATEL B. K. C. FARDEAU M. L. Peptidolytic microbial community of methanogenic reactors from two modified uasbs of brewery industries. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 41, p. 707-717, 2010.
- DÍAZ E. E.; STAMS A. J. M.; AMILS R.; SANZ J. L. Phenotypic properties and microbial diversity of methanogenic granules from a full-scale upflow anaerobic sludge bed reactor treating brewery wastewater. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 72, n. 7, p. 4942–4949, 2006.
- DOS SANTOS, M. S.; RIBEIRO F. DE M. Cervejas e refrigerantes. São Paulo: CETESB, 2005. 58 p. 1 CD : il. ; 30 cm. Série P + L. Disponível em: <a href="http://www.cetesb.sp.gov.br">http://www.cetesb.sp.gov.br</a> Acesso em: 25 out. 2014.
- DRIESSEN W.; YSPEERT P. Anaerobic treatment of low, medium and high strength effluent in the agro-industry. **Water Science and Technology**, v. 40, p. 221–228, 1999.
- FILHO J. A. S.; SANTOS A. F. M. S.; BAHÉ J. M. C. F.; GOBBI C. N.; LINS G. A.; DE ALMEIDA J. R. Tratamento de efluentes da indústria de Bebidas em reator anaeróbio de circulação Interna (IC). **Revista Internacional de Ciências**, v. 3, n. 1, p. 1-20, jan./jun. 2013.
- FILLAUDEAU L.; BLANPAIN-AVET P.; DAUFIN G. Water, wastewater and waste management in brewing industries. **Journal of Cleaner Production,** v. 14, n. 5 p. 463–471, 2006.
- GIL G. G.; LENS P. N. L.; AELST A. V.; VAN AS H.; VERSPRILLE A. I.; LETTINGA G. Cluster structure of anaerobic aggregates of an expanded granular sludge bed reactor. **Applied And Environmental Microbiology**, v. 67, n. 8, p. 3683–3692, 2001.
- GOLDAMMER T.; **The Brewers' Handbook**. 2. ed. Clifton: Apex Publishers, 2008. 496 p. Disponível em: <a href="http://www.beer-brewing.com/">http://www.beer-brewing.com/</a>> Acesso em: 25 out. 2014.

GROBICKI A.; STUCKEY D. C. Hydrodynamic characteristics of the Anaerobic baffled reactor. **Water Research**, v. 26, n. 3, p. 371-378, 1992.

JANHOM T.; WATTANACHIRA S.; PAVASANT P. Characterization of brewery wastewater with spectrofluorometry analysis. **Journal of Environmental Management**, v. 90, n. 2, p. 1184-1190, feb. 2009.

KADLEC R. H.; WALLACE S. **Treatment wetlands**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press – Taylor & Francis Group, 1016 p. 2008.

LASSMAN A. A.; RUSTRIÁN E.; ALVARADO M. A. G.; JIMÉNEZ G. C. R.; HOUBRON E. Brewery wastewater treatment using anaerobic inverse fluidized bed reactors. **Bioresource Technology**, v. 99, p. 3009–3015, 2008.

LEAL F. K. Estudo comparativo de leitos percoladores e banhados construídos de fluxo vertical aplicados a remoção de fósforo em esgoto sanitário. 2009. 102 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) — Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

LI S.; CUI J.; ZHANG O.; FU J.; LIAN J.; LI C. Performance of blast furnace dust clay sodium silicate ceramic particles (BCSCP) for brewery wastewater treatment in a biological aerated filter. **Desalination**, v. 258, n. 1-3, p. 12-18, 2010.

MASI F. Enhanced Denitrification by a Hybrid HF-FWS Constructed Wetland in a Large Scale Wastewater Treatment Plant. c. 23 p. 267-275. in: Vymazal J. (ed.) Wastewater Treatment, Plant Dynamics and Management in Constructed and Natural Wetlands. Dordrecht: Springer Science – Business Media B.V. 2008.

MASI F.; CONTE G.; MARTINUZZI N.; PUCCI B. Winery high organic contente wastewaters treated by constructed wetlands in mediterranean climate. in: **The International Water Association – 8° International Conference of Wetland Systems for Water Pollution Control**. Arusha, Tanzania, 16-19 Sep. 2002.

METCALF & EDDY. Inc. Wastewater engineering: treatment and reuse. 4. ed. New York: McGraw - Hill Book, 1815 p. 2003.

NACHAIYASIT S.; STUCKEY D. C. Effect of Low Temperatures on the Performance of an Anaerobic Baffled Reactor (ABR). **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**, v. 69, n. 2, p. 276-284, 1997.

NACHAIYASIT S.; STUCKEY D. C. The effect of shock loads on the performance of an anaerobic baffled reactor (ABR). 1. step changes in feed concentration at constant Retention time. **Water Research**, v. 31, n. 11, p. 2737-2746, 1997a.

NACHAIYASIT S.; STUCKEY D. C. The effect of shock loads on the performance of an anaerobic baffled reactor (ABR). 2. step and transient hydraulic shocks at constant feed strength. **Water Research**, v. 31, n. 11, p. 2747 2754, 1997b.

NAVARINI B. **Pós-tratamento de efluente de cervejaria por ultrafiltração.** 2013. 52 p. Trabalho de Diplomação. Curso de Engenharia Ambiental. Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2013. Disponível em: <a href="http://usuarios.upf.br/~engeamb/TCCs/2013-2/Bruno%20Navarini.pdf">http://usuarios.upf.br/~engeamb/TCCs/2013-2/Bruno%20Navarini.pdf</a>> Acesso em: 03 ago. 2014.

NETO, H. N. Tratamento de efluentes na fabricação de bebidas. **Revista TAE**, v. 16, p. 38-41, 2013.

NYQUIST, J.; NYQUIST, M. A field study of constructed wetlands for preventing and treating acid mine drainage. **Ecological Engineering**, v. 35, p. 630–642, 2009.

PARAWIRA W.; KUDITA I.; NYANDOROH M.G.; ZVAUYA R. A study of industrial anaerobic treatment of opaque beer brewery wastewater in a tropical climate using a full scale UASB reactor seeded with activated sludge. **Process Biochemistry**, v. 40 p. 593–599, 2004.

RAO A. G.; REDDY T. S. K.; PRAKASH S. S.; VANAJAKSHI J.; JOSEPH J.; SARMA P. N. pH regulation of alkaline wastewater with carbon dioxide: a case study of treatment of brewery wastewater in UASB reactor coupled with absorber. **Bioresource Technology**, v. 98, p. 2131–2136, 2007.

SIMATE G. S.; CLUETT J.; IYUKE S. E.; MUSAPATIKA E. T.; NDLOVU S.; WALUBITA L. F.; ALVAREZ A. E. The treatment of brewery wastewater for reuse: state of the art. **Desalination**, v. 273, n. 2–3, p. 235–247, 2011.

STRONG, P.J.; BURGESS, J.E. Fungal and enzymatic remediation of a wine lees and five wine-related distillery wastewaters. **Bioresources Technology**, v. 99, p. 6134–6142, 2008.

VERSTL I. An open marriage – The brewing industry and international relations. **Brauwelt International**, v. 17, n. 6, p.464-467, 1999.

VYMAZAL J. Constructed wetlands for treatment of industrial wastewaters: a review. **Ecological Engineering**, v. 73, p. 724-751. 2014.

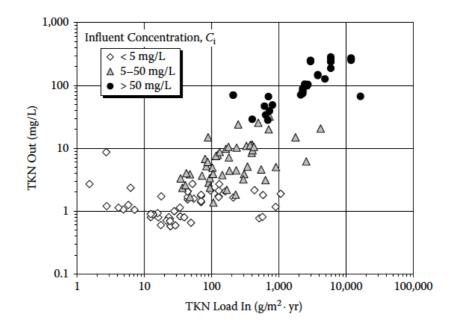
XIANGWEN S.; DANGCONG P.; ZHAOHUA T.; XINGHUA J. Treatment of brewery wastewater using anaerobic sequencing batch reactor (ASBR). **Bioresource Technology**, v. 99, n. 8, p. 3182–3186, 2008.

XU F.; HUANG Z.; MIAO H.; REN H.; ZHAO M.; RUAN W. Identical full-scale biogás lift reactors (BLRs) with anaerobic granular sludge and residual activated sludge for brewery wastewater treatment and kinetic modeling. **Journal of Environmental Sciences**, v. 25, n.10, p. 2031–2040, 2013.

YAN Y. G.; TAY J. H. Brewery wastewater treatment in UASB reactor at ambient temperature. **Journal of Environmental Engineering**, v. 122, p. 550-553, 1996.

ZUPANCIC G. D.; STRAZISCAR M.; ROS M. Treatment of brewery slurry in thermophilic anaerobic sequencing batch reactor. **Bioresource Technology.** v. 98, p. 2714–2722, 2007.

ANEXO I – GRÁFICOS DE CARGA PARA DIMENSIONAMENTO DO BC-FSL



 $\label{eq:continuous} \begin{tabular}{ll} Figura~12 - Carga de Nitrogênio Total Kjeldahl~(NTK)~relativa~à~Concentração~inicial~(C_i)~e~final~(C_{out}) \\ \\ de NTK, considerando~a~operação~de~135~sistemas~de~BC-FSL. \\ \end{tabular}$ 

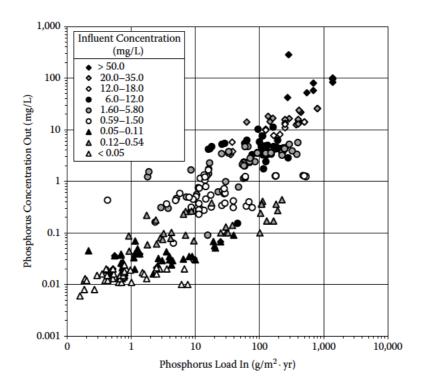


Figura 13 - Carga de fósforo total  $(P_{total})$  em função das concentrações, inicial  $(C_i)$  e final  $(C_{out})$ , de operação de 282 sistemas de BC-FSL

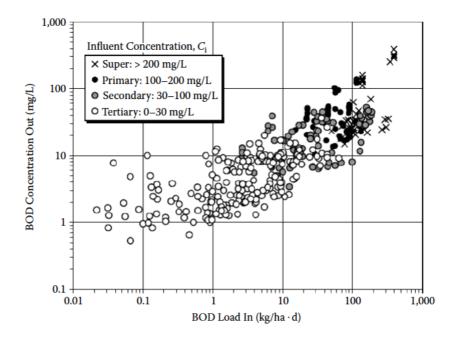


Figura 14 - Carga de DBO afluente relacionada à concentração de entrada  $(C_i)$  e de saída  $(C_{out})$  de 136  $BC\text{-}FSL \ em \ operação.$ 

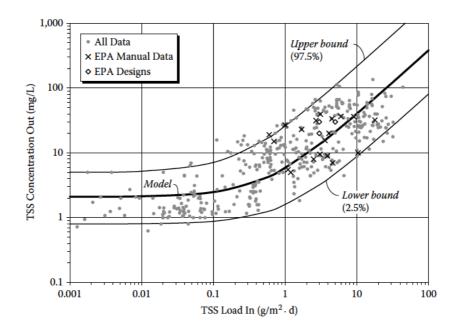


Figura 15 - Carga de SST afluente relacionada à concentração de entrada  $(C_i)$  e de saída  $(C_{out})$  de 136  $BC\text{-}FSL \ em \ operação}.$