



FACULDADE DE TECNOLOGIA E CIÊNCIAS SOCIAIS APLICADAS - FATECS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Kelly Cristina Nascimento Amancio

ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA E AMBIENTAL DO SISTEMA DE
WETLANDS CONSTRUÍDOS NO TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS

Brasília

2016

Kelly Cristina Nascimento Amancio

(21450374)

**ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA E AMBIENTAL DO SISTEMA DE
WETLANDS CONSTRUÍDOS NO TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado a Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas do Centro Universitário de Brasília (UNICEUB) como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof^ª. Cristiane Fernanda da Silva

Brasília

2016

Kelly Cristina Nascimento Amancio

(21450374)

**ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA E AMBIENTAL DO SISTEMA DE
WETLANDS CONSTRUÍDOS NO TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado a Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais do Centro Universitário de Brasília como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em: ____ de _____ de _____.

BANCA EXAMINADORA

MSc. Cristiane Fernanda da Silva - UNICEUB (orientadora)

MSc. Glenda Feitosa da Silva - Avaliador externo

MSc. Júlio César Sebastiani Kunzler – UNICEUB (Avaliador interno)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, por ter me dado força para superar todas as dificuldades até aqui.

A minha orientadora Cristiane Fernanda Silva, por todo empenho e tempo dedicado a elaboração deste trabalho, pelas suas correções e incentivos.

Aos meus pais e irmãos, por todo amor, incentivo e apoio incondicional.

A Victor Fernandes Uriarte, por sempre estar ao meu lado ajudando e motivando para realizar meus objetivos.

A todos os professores que passaram ao longo da minha vida acadêmica, que me proporcionaram todo este conhecimento, não apenas por terem me ensinado, mas por terem me feito aprender, se não fosse por eles não teria chegado até este momento.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

RESUMO

O crescimento populacional desordenado tem como consequência a produção de um elevado volume de águas residuárias, o que acabou por obrigar buscas de novas tecnologias para o reaproveitamento das mesmas. Tecnologias que são eficientes, autônomas e economicamente viáveis. A partir disso surgiu os *Wetlands* construídos, que são ecossistemas criados artificialmente para reproduzir os meios de purificação de águas existentes em pantanais (alagados), visando o tratamento de águas residuárias. Sendo assim, o presente trabalho representa um estudo realizado sobre a viabilidade técnica e ambiental do uso de *wetlands* construídos (WC) no tratamento de águas residuárias. Para a comprovação dessas viabilidades, o estudo baseou-se na análise dos resultados de eficiência de remoção dos principais parâmetros de qualidade de seis sistemas WC implantados no país. Os resultados obtidos nas saídas desses sistemas foram comparados aos limites de lançamentos de efluentes tratados, determinados pelas resoluções nº 357/05 e nº 430/11 do CONAMA. Apesar de alguns parâmetros não terem passado nas limitações das legislações, foi comprovada a alta eficiência de remoção de matéria orgânica, nutrientes e coliformes por sistemas WC. Observou-se então que os sistemas *wetlands* são eficientes no tratamento de águas residuárias mas há necessidade de um maior controle da qualidade do efluente tratado para o lançamento nos corpos receptores de modo a não causar danos ambientais. Além disso, é necessário que haja maior incentivo em novas pesquisas para o desenvolvimento dessa tecnologia no país, de modo a determinar melhor os parâmetros de projeto para torná-los mais exatos e eficazes.

Palavras-chaves: *Wetlands*, Zona de raízes, Ecotecnologia, Saneamento ambiental.

ABSTRACT

The disorderly growth of population causes the production of an elevated volume of wastewater, which forces the search for new technologies that allows the reuse of those waters. Efficient, autonomous and economically viable technologies. With that in mind, the constructed Wetlands were invented, artificially created ecosystems that replicates the water purification methods used by natural wetlands, aiming the wastewater treatment. In that sense, the present coursework is a study of technical and environmental viability of the constructed wetlands use for wastewater treatment. For these viability proofing, the coursework is based on an analysis of removal efficiency of the main quality parameters of six constructed wetlands deployed in the country. The results gathered on the final stage of these systems were compared with the limits of treated effluents launching, determined by CONAMA resolutions n° 357/05 and n°430/11. Although some parameters failed to pass in the limits imposed by the legislation, the high organic matter, nutrients and coliforms removal efficiency by constructed wetland systems was indeed proved. It was then observed that the constructed wetland systems are efficient methods of wastewater treatment, but there is need of a higher treated effluents quality control for launching in the receiving water without causing environmental damage. Besides that, it is needed a higher encouraging in new researches for further development of this technology in the country, making project parameters determination better, more exact and more effective.

Keywords: Wetlands, ecotechnology, environmental sanitation.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - ESQUEMÁTICO DAS ETAPAS DE TRATAMENTO (SISTEMA DE LODOS ATIVADOS COM TRATAMENTO TERCIÁRIO) -----	10
FIGURA 2 - WETLAND NATURAL -----	12
FIGURA 3 - FORMAS BIOLÓGICAS DAS MACRÓFITAS AQUÁTICAS -----	16
FIGURA 4 - CLASSIFICAÇÃO DOS WETLANDS CONSTRUÍDOS -----	17
FIGURA 5 - ESQUEMÁTICO DE UM SISTEMA WETLAND COM MACRÓFITAS EMERGENTES COM FLUXO SUPERFICIAL -----	18
FIGURA 6 - ESQUEMÁTICO DE UM SISTEMA WETLAND SUPERFICIAL COM PLANTAS SUBMERSAS -----	18
FIGURA 7 - ESQUEMÁTICO DE UM SISTEMA WETLAND SUPERFICIAL COM PLANTAS FLUTUANTES -----	19
FIGURA 8 – ESQUEMÁTICO DE UM SISTEMA WETLAND HORIZONTAL SUBSUPERFICIAL -----	19
FIGURA 9 - ESQUEMÁTICO DE UM SISTEMA WETLAND VERTICAL COM FLUXO ASCENDENTE. -----	20
FIGURA 10 – ESQUEMA DE UM SISTEMA DE WC DE FLUXO VERTICAL -----	22

LISTA DE ABREVIATURAS

AEC- Centro de Ecotecnologias de Algas da Universidade de Maryland

CAERN - Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte

C - Coliformes Fecais

CM - Centímetros

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente

DBO - Demanda Bioquímica de Oxigênio

DQO - Demanda Química de Oxigênio

EPA - Environmental Protection Agency

ETE - Estação de Tratamento de Esgoto

FS - Fluxo Superficial

FSS - Fluxo Subsuperficial

IEA - Instituto de Ecologia Aplicada

M - Metros

NFSC - Natural Science Foundation of China

SABESP - Companhia de saneamento básico do estado de São Paulo

SANASA - Sociedade de abastecimento de água e saneamento

SANEAGO - Companhia de Saneamento do Goiás

WC - Wetlands construídos

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - ESTUDOS DE CASOS ANALISADOS	24
TABELA 2 - RESULTADOS DAS ANÁLISES DE DOS PARÂMETROS DE ENTRADA E SAÍDA NA ETE ILHA RASA	25
TABELA 3 - RESULTADOS DAS ANÁLISES DE DOS PARÂMETROS DE ENTRADA E SAÍDA NOS SISTEMAS A E B	27
TABELA 4 - ANÁLISE DOS PARÂMETROS NA ENTRADA E SAÍDA DO SISTEMA WETLAND EM ILHA GRANDE	28
TABELA 5 - RESULTADOS DAS ANÁLISES DE DOS PARÂMETROS DE ENTRADA E SAÍDA NOS SISTEMAS DE LEITO DE BRITA E LEITO DE ISOPOR	30
TABELA 6 - RELAÇÃO DBO/DQO	32
TABELA 7 - VANTAGENS DOS SISTEMAS WETLANDS CONSTRUÍDOS	36
TABELA 8 - DESVANTAGENS DOS SISTEMAS DE WETLANDS CONSTRUÍDOS	37
TABELA 9 - COMPARAÇÃO DE EFICIÊNCIAS, REQUISITOS E CUSTOS ENTRE DIVERSOS TIPOS DE TRATAMENTO	38

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DE DBO COM A RESOLUÇÃO Nº 430/11	31
GRÁFICO 2 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DE PH COM A RESOLUÇÃO Nº 357/05.....	32
GRÁFICO 3 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DE NITROGÊNIO AMONIAICAL COM A RESOLUÇÃO Nº 430/11	33
GRÁFICO 4 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DE FÓSFORO TOTAL COM A RESOLUÇÃO Nº 357/05	34
GRÁFICO 5 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DE COLIFORMES FECAIS COM A RESOLUÇÃO Nº 430/11	35

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
2.	OBJETIVOS	3
2.1	Objetivo geral	3
2.2	Objetivos específicos	3
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1	Escassez de água	4
3.2	Principais parâmetros da qualidade das águas residuárias	4
3.3	Sistemas de tratamento de águas residuárias	9
3.4	Ecotecnologia	11
3.5	<i>Wetlands</i> construídos	11
3.5.1	Histórico sobre a utilização de <i>Wetlands</i>	14
3.5.2	Plantas (Macrófitas)	15
3.5.3	Classificação dos <i>wetlands</i> construídos	16
3.5.4	Princípios de funcionamento dos <i>Wetlands</i>	20
3.5.5	Aplicações dos sistemas WC	22
4.	METODOLOGIA	23
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	24
5.1	Estudos de casos de sistemas <i>wetlands</i>	24
5.2	Caso 1: Estação de Tratamento de esgotos em Ilha Rasa (Paraná)	24
5.3	Caso 2: Condomínios residenciais de alto padrão em Londrina (Paraná)	26
5.4	Caso 3: Centro de Estudos Ambientais e Desenvolvimento Sustentável (CEADS)	

5.5	Caso 4: Estação de Tratamento de Esgoto por alagados construídos em Bauru (São Paulo)	28
5.6	Análise dos estudos de caso	30
5.6.1	Comparação das remoções de poluentes dos sistemas com a legislação	31
5.7	Vantagens e desvantagens do sistema	35
5.8	Dados econômicos	37
5.9	Viabilidade técnica ambiental (riscos e impactos ambientais)	39
6.	CONCLUSÕES	41
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43

1. INTRODUÇÃO

O crescimento populacional dos grandes centros urbanos gera uma demanda por recursos hídricos que é desproporcional a disponibilidade dos mesmos nessas localidades. Além disso, as grandes construtoras não levam em consideração tal disponibilidade ao construir seus empreendimentos, agravando ainda mais essa situação. Tendo em vista tal panorama, o tratamento de águas provenientes do sistema de esgotamento sanitário é cada vez mais necessário para suprir o déficit hídrico apresentado por essas regiões.

Outro problema encontrado no Brasil, é a falta de saneamento básico, como demonstrado pelos dados da Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (2008), onde apenas 55,2% dos municípios são atendidos por sistemas de esgotamentos sanitários e apenas um terço deles tem seu esgoto tratado. Isso quer dizer que a grande maioria, além de não ter seu esgoto tratado, acaba por poluir as reservas de águas que são utilizadas no sistema de abastecimento de água para consumo humano, ao lançar seus esgotos direto nas mesmas. Percebe-se que grande parte dos municípios não atendidos pelos serviços de esgotamento sanitário se encontram em áreas rurais, onde o tratamento convencional não se demonstra economicamente viável.

Por definição, os esgotos não tratados, também chamados de águas residuárias, consistem em toda e qualquer água proveniente do uso humano (municipal, industrial, doméstico, agrícolas, entre outros). Suas características, tanto pela composição quanto por seu volume variam de acordo com o tipo de local de onde provêm, da renda per capita, dos costumes locais, entre outros fatores. Os processos de tratamento dessas águas residuárias podem ser físicos, químicos e biológicos. Dentro dessa última categoria, pode-se enquadrar os *Wetlands* Construídos (WC).

Os WC, também chamados de alagados construídos, zonas de raízes ou leitos cultivados, são definidos como sistemas que simulam a zona de transição entre o ambiente terrestre e aquático, mas que são especificamente construídos para o tratamento de águas residuárias em locais que tenham o dimensionamento e capacidade de tratamento controlados (Gerba et al., 1999).

A utilização de *wetlands* naturais como locais de despejo de esgoto tem origem desde quando se começou a coleta de águas residuárias, enquanto os sistemas de *wetlands* construídos tem uma história muito mais recente. Na Europa, teve início há aproximadamente 25 anos visando a recuperação dos recursos hídricos, desde então seguem operando com êxito. A partir daí o

emprego de WC para o tratamento de águas residuárias cresceu ao redor do mundo, principalmente em instalações menores de tratamento de água. Já no Brasil, há um crescente interesse nos estudos sobre o assunto, porém estes ainda são muito recentes, então há uma carência de dados a longo prazo sobre as instalações aqui construídas (SEZERINO, 2015). Apesar de haver muitos estudos sobre esse tipo de tecnologia, principalmente na Europa, sua grande maioria foi elaborada visando situações diferentes das encontradas no Brasil. Sendo assim, há uma falta de dados em relação as regiões de clima tropical.

Os sistemas WC são promissores no Brasil por possibilitarem o tratamento eficiente de águas, serem sistemas tecnologicamente simples e de fácil operação, além de terem um baixo custo de construção e manutenção. Essa técnica vem sendo utilizada no país principalmente no tratamento de água para abastecimento, como tratamento complementar (secundário e terciário) de esgotos e para regeneração de efluentes degradados.

Nesse contexto, este trabalho é uma análise, baseada em estudos de casos, que busca comprovar a viabilidade técnica e ambiental dos sistemas *wetlands* no tratamento de águas residuárias.

Serão relacionadas a seguir as vantagens e desvantagens do sistema, além de ser feita uma comparação de eficiência de remoção do sistema com as legislações vigentes sobre os padrões de lançamento dos efluentes em corpos hídricos.

Para comprovar ou não essa viabilidade, buscou-se dados em trabalhos já publicados com a finalidade de habituar-se com o estudo sobre os sistemas *wetlands* já implantados e em operação no Brasil, além de reunir dados sobre seus funcionamentos.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo estudar a viabilidade técnica e ambiental do uso de *wetlands* construídos no tratamento de águas residuárias e contribuir para a discussão a respeito dos mesmos de forma a aprimorar o conhecimento sobre o assunto.

2.2 Objetivos específicos

- Apresentar vantagens e desvantagens dos sistemas WCs;
- Analisar as eficiências de remoção dos casos estudados;
- Comparar os resultados dos estudos de caso com os padrões definidos pelas resoluções nº 357/2005 e nº 430/2011 do CONAMA para lançamentos de efluentes tratados.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Escassez de água

Apesar da maior parte do nosso planeta ser composto de água, esta encontra-se majoritariamente nos oceanos, que são compostos de águas salgadas e impróprias para o consumo. Para que elas possam ser utilizadas, são necessários processos de dessalinização os quais tem um custo muito elevado, o que resulta em uma grande preocupação em preservar a parcela de água doce restante no mundo.

Um fator que intensifica a escassez de água é a distribuição da mesma. No Brasil, um país que é considerado um dos mais ricos em reservas hídricas, a distribuição das águas ocorre de forma desproporcional. Ao mesmo tempo que a região Nordeste sofre com secas rigorosas e pouca disponibilidade de água, na região Norte, muito menos populosa, há uma abundante oferta de água doce.

O seu consumo desenfreado e sem responsabilidade, além da poluição dos recursos hídricos por efluentes têm sido as maiores causas da redução de água potável no mundo. Com isso, vem se tendo uma maior preocupação com o tratamento e destino final dos esgotos de modo a melhorar ou manter a qualidade da água para consumo humano.

3.2 Principais parâmetros da qualidade das águas residuárias

Segundo SANASA (2008), são definidas por águas residuárias (efluentes) todas as águas que são provenientes do uso humano em seus hábitos higiênicos e atividades fisiológicas, por causa disso há uma grande quantidade de matéria orgânica nessas águas, bem como organismos patogênicos que são uma ameaça para a saúde humana. A caracterização das águas residuárias depende dos usos em que a água foi submetida e eles podem variar de acordo com o setor em que a água é empregada (setor residencial, setor de serviços, setor industrial), de acordo com o clima, situação econômica da região e hábitos da população.

Segundo o PROSAB (2009), esses efluentes têm mais de 98% de água em sua composição, mas há também outros contaminantes onde pode-se destacar: sólidos suspensos, compostos orgânicos (40% – 60% de proteínas, 25% - 50% de carboidratos e 10% de óleos e graxas), nutrientes (fósforo e nitrogênio), metais, vários tipos de sólidos (dissolvidos inorgânicos, inertes,

grosseiros), compostos não biodegradáveis (detergentes), organismos patogênicos, coliformes fecais e, algumas vezes, poluentes tóxicos provenientes das atividades industriais ou de algum incidente.

3.2.1 Sólidos

Em saneamento, sólidos nas águas correspondem a toda matéria que permanece como resíduo após evaporação, secagem ou calcinação da amostra a uma temperatura pré-estabelecida durante um tempo fixado (PIVELI, 2006).

Von Sperling (2014) classifica os sólidos por:

- Tamanho e estado: Sólidos em suspensão (SS) e Sólidos Dissolvidos (SD);
- Características químicas: Sólidos Voláteis (SV) e Sólidos Fixos (SF);
- Sedimentabilidade: Sólidos em suspensão sedimentáveis e sólidos em suspensão não sedimentáveis.

A quantidade de sólidos encontradas em efluentes tratados é limitada de acordo com a resolução nº 357/2005 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), que dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. (CONAMA, 2005). De acordo com a resolução, para o lançamento dos efluentes em corpos hídricos só é permitido quantidades de sólidos totais menores ou iguais a 500 mg/L.

3.2.2 Indicadores de matéria orgânica

3.2.2.1 Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)

Segundo Von Sperling (2014), a DBO representa a quantidade de oxigênio dissolvido na amostra que foi usado, através de processos bioquímicos, durante a decomposição da matéria orgânica carbonácea (biodegradável) dentro do período de 5 dias a uma temperatura controlada de 20°C para evitar a interferência da temperatura no metabolismo dos microrganismos. Sendo assim a DBO é o oxigênio que os microrganismos aeróbios usam durante a decomposição completa da matéria orgânica.

O uso da DBO é uma medida indireta para a determinação da quantidade de matéria orgânica e tem como principais vantagens citadas por Von Sperling (2014): a determinação da quantidade de matéria orgânica biodegradável, a previsão da taxa de degradação do esgoto e a criação de um gráfico que mostra a taxa de consumo de oxigênio em função do tempo.

Como limitações de seu uso, Piveli (2006) se refere a problemas de tempo, pois leva 5 dias para se ter o resultado e de imprecisão, principalmente no estudo de efluentes industriais que contem poucos microrganismos. Outro problema citado é que, ao calcular a matéria orgânica pela DBO, só estará sendo calculado a quantidade de matéria biodegradável, o que acaba por incentivar o uso de outros métodos para chegar ao valor total de matéria orgânica.

A quantidade de DBO, presente nos efluentes tratados, tem seu limite determinado pela resolução nº 430/2011, já que a resolução nº 357/2005 teve seu capítulo referente a lançamento de efluentes revogado e complementado em 2011, sendo assim a limitação de DBO passou a ser de até 120mg/L para lançamento de efluentes tratados.

3.2.2.2 Demanda Química de Oxigênio (DQO)

A realização da DQO é feita através de uma reação química catalisada entre um oxidante forte (Dicromato de potássio) em meio ácido que acaba por oxidar um número maior de compostos do que a reação bioquímica (PIVELI, 2006).

Da mesma forma que a DBO, a quantidade de matéria orgânica é medida indiretamente por meio do consumo de oxigênio durante a reação. É considerado um método mais rápido, pois leva apenas duas horas para se ter os resultados, além disso com seus resultados os quais podem ser utilizados para se ter uma indicação do consumo de oxigênio necessário para estabilizar a matéria orgânica, o que torna o método indispensável para caracterização das águas residuárias.

Segundo Von Sperling (2014), as principais limitações desse teste são que durante a reação são oxidados também compostos inertes (não-biodegradáveis), o que acaba por superestimar a quantidade de matéria orgânica, e que também ao realizar o teste ele não disponibiliza dados sobre a taxa de consumo de oxigênio em função do tempo.

Sendo assim, é recomendado realizar os dois testes (DBO e DQO), onde a relação entre DBO₅ (no quinto dia) e DQO é bastante usada para observar as condições de biodegradabilidade

dos efluentes: onde quanto mais próxima o valor de DBO chegar da DQO, mais facilmente degradável será o sistema (PIVELI, 2006).

A limitação de valores de DQO não é regulamentada pelas resoluções n° 357/2005 e n° 430/2011 do CONAMA para o lançamento de efluentes.

3.2.3 pH

Quimicamente falando, o pH representa a atividade do íon hidrogênio na água de forma logaritimizada, resultante inicialmente da própria molécula de água e posteriormente acrescida pelo hidrogênio proveniente de outras fontes (PIVELI, 2006). Sendo assim o pH é muito importante para o equilíbrio químico das reações, podendo acelerar ou retardar as mesmas.

Nos tratamentos biológicos de águas residuárias, Piveli (2006) diz que a condição de pH influi decisivamente na formação de um biofilme (microrganismos) mais diversificado e que quanto mais neutro (pH=7) o efluente, mais estável vai ser o tratamento.

O valor de pH dos efluentes é limitado por várias normas, na resolução n° 357/2005 do CONAMA o pH deve estar dentro da faixa de 5 – 9. De acordo com os critérios de proteção a vida aquática fixam o pH entre 6 e 9.

3.2.4 Nutrientes

3.2.4.1 Nitrogênio

O nitrogênio pode ser encontrado em águas residuárias nas formas reduzidas, como nitrogênio orgânico e amoniacal ou nas formas oxidadas, como nitrito e nitrato. Pode-se associar a forma de nitrogênio encontrada com o grau de poluição do efluente: a presença de nitrogênio orgânico é associada a zona de degradação (mais poluída), o nitrogênio amoniacal está associado a zona de decomposição ativa (menor quantidade de oxigênio dissolvido), o nitrito na zona de recuperação e o nitrato na zona de águas limpas (PIVELI, 2006).

Ele serve como nutriente para os processos biológicos dos microrganismo e plantas, o que causa um enriquecimento do meio que pode ocasionar eutrofização. No tratamento de efluentes é necessária uma preocupação maior com a remoção do nitrogênio para evitar a degradação do meio.

De acordo com a resolução nº 357/2005 do CONAMA, o nitrogênio amoniacal pode ser usado como padrão de classificação de águas naturais e padrão de emissão de esgotos, onde para emissão o limite é igual a 20 mg/L. Em relação a quantidade de nitrogênio amoniacal, não houve modificação quanto a limitação pela resolução nº 430/2011.

Pelo nitrato ser considerado tóxico para crianças, podendo causar a chamada doença do bebê azul, ele é limitado pela Portaria nº 518/2000 do Ministério da Saúde a 10 mg N-NO₃/L.

Já em relação a quantidade de nitrogênio amoniacal no efluente, é considerado que a amônia é bastante tóxica aos peixes. Segundo Piveli (2006) muitas espécies não conseguem viver a concentrações acima de 5 mg/L.

3.2.4.2 Fósforo

O fósforo é encontrado nos esgotos na forma de fosfatos, podendo ser: inorgânico (polifosfatos e ortofosfatos) e orgânico (origem fisiológica) (IAWQ, 1995). Tem como fontes principais o despejo de detergentes, produtos de limpeza doméstica e efluentes de indústrias de fertilizantes e pesticidas.

Como o nitrogênio, o fósforo é um dos principais nutrientes para os processos biológicos (microrganismos e plantas) que ocorrem no tratamento de efluentes, sendo assim, seu excesso em esgotos pode levar a eutrofização das águas.

A resolução nº 357/2005 do CONAMA determina limites de fósforo total diferentes de acordo com a velocidade do escoamento, pois quanto mais lento, maior a chance de ocorrer eutrofização. Sendo assim, para águas de classe 2 em ambientes lênticos, o valor de fósforo total deve ser até 0,03 mg/L e para ambientes lóticos 0,1 mg/L. A resolução nº 430/2011 do CONAMA não limita quantidades emitidas de fósforo, então segue-se a resolução anterior.

3.2.5 Organismos patogênicos e coliformes fecais

Os microrganismos representam um papel fundamental no tratamento dos esgotos, principalmente na decomposição da matéria orgânica presente. Eles podem ser classificados em 4

categorias: saprófitas, comensais, simbiontes e parasitas, essa última categoria é patogênica e pode causar danos à saúde dos seres vivos (VON SPERLING, 2014).

Dentre a categoria dos organismos patogênicos, encontram-se os vírus, bactérias, protozoários e helmintos. Suas origens são predominantemente humanas, sendo assim, é preciso ter controle desses organismos para evitar a proliferação de doenças transmitidas por efluentes contaminados.

Já os Coliformes Fecais (CF) são definidos por Who (1993) como um grupo de bactérias que indicam organismos originários predominantemente do trato intestinal dos seres vivos.

Os testes para a detecção de CF são feitos em elevada temperatura para suprimir as bactérias de origem não fecal, por isso prefere-se a denominação de coliformes termotolerantes (VON SPERLING, 2014).

Segundo a resolução nº 357/2005 do CONAMA, os valores de coliformes termotolerantes não devem passar dos 1000/100mL.

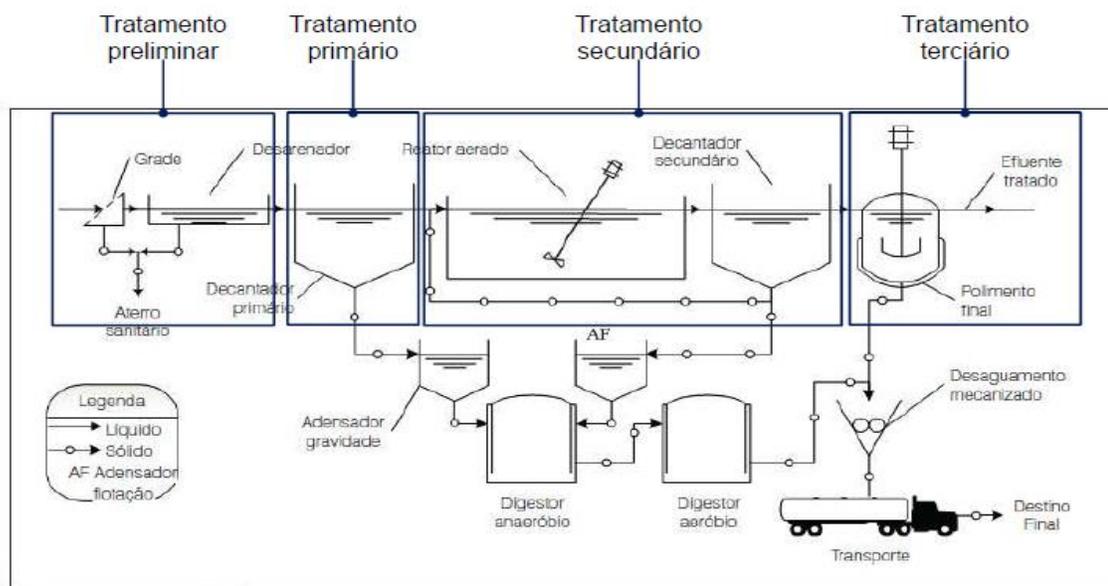
3.3 Sistemas de tratamento de águas residuárias

O processo de tratamento dos esgotos consiste na remoção física, química e/ou biológica dos poluentes e microrganismos de forma a atender aos padrões de saúde e qualidade ambiental definidos na Resolução CONAMA nº 357/2005 (CAERN, 2014).

O tipo de tratamento adotado depende principalmente das características (cor, turbidez, pH, sólidos totais, matéria orgânicas, etc.) das águas residuárias a serem tratadas e dos pressupostos de qualidade necessários ao destino final. Segundo Von Sperling (2014), os fatores mais importantes para a escolha do sistema de tratamento ideal para cada tipo de esgoto são: requisitos de área, confiabilidade, eficiência, disposição de lodo, impactos ambientais, custos de operação, custos de implantação, sustentabilidade e simplicidade. É preciso analisar cada sistema individualmente para poder adotar a melhor alternativa técnica e econômica.

Segundo Von Sperling (2014), os sistemas de tratamento são divididos em etapas de acordo com o grau de remoção de impurezas que se quer adquirir, podendo alternar desde uma simples filtração até um processo mais complexo, como é representado na Figura 1. Essas etapas podem ser descritas da seguinte maneira:

FIGURA 1- Esquemático das etapas de tratamento (sistema de lodos ativados com tratamento terciário)



FONTE: Modificado de NAKAZATO (2005)

Tratamento preliminar: essa etapa é destinada a remoção de sólidos grosseiros e areia (material em suspensão) por meio de processo físicos. Ela é composta por grades, desarenador e medidor de vazão e tem por objetivo proteger os equipamentos que serão utilizados nas etapas seguintes do tratamento, evitando o entupimento das canalizações do sistema, além de proteger os corpos receptores. Desta forma, essa etapa é obrigatória em todos os sistemas de tratamento.

Tratamento primário: é nessa etapa que começa o sistema de tratamento propriamente dito, visando a remoção dos sólidos sedimentáveis e uma parcela da matéria orgânica através do decantador primário. É considerado um processo físico-químico pois, para a realização de uma melhor sedimentação, muitas vezes são usados produtos químicos para ajudar a floculação das partículas, entretanto essa etapa é predominantemente realizada por mecanismos físicos, podendo ou não anteceder o tratamento secundário, não sendo considerada uma etapa obrigatória.

Tratamento secundário: é composto basicamente por processos biológicos e tem como objetivo a remoção da matéria orgânica (dissolvida e em suspensão) e uma parcela dos nutrientes. Para a realização dessa etapa existem vários métodos de tratamento como por exemplo, lodos ativados, reatores anaeróbios, processos de disposição no solo, entre outros. Essa etapa pode ser feita imediatamente após o tratamento preliminar, sem a necessidade do tratamento primário.

Tratamento terciário: normalmente essa etapa é implementada quando se deseja remover poluentes específicos da água ou para remover a parcela de matéria orgânica que não foi removida no tratamento secundário.

Segundo Von Sperling (2014), o sistema de tratamento mais utilizado no mundo é o de lodos ativados, principalmente quando é preciso uma elevada qualidade do efluente com baixos requisitos de área. Esse tipo de sistema de tratamento apresenta nível secundário e pode ter variações de processos.

3.4 Ecotecnologia

As tecnologias hoje em dia são desenvolvidas com o intuito de resolver problemas, para isso há uma fase de experimentação desenvolvida ao longo do tempo afim de atingir seus objetivos. É preciso entender que a tecnologia é feita para o homem e pelo homem, de modo a proporcionar uma melhor condição e simplificação da vida através de seu desenvolvimento. (AEC, 2016)

Assim sendo, a ecotecnologia pode ser considerada uma área da tecnologia que está associada a ecologia, cujo objetivo é diminuir os impactos ambientais causados pelos seres humanos. Seriam todas as técnicas que reproduzem processos naturais, que além de reduzir esses impactos aos ecossistemas, promovem um desenvolvimento mais sustentável. (MARQUES, 1999)

Segundo definição do Centro de Ecotecnologias de Algas da Universidade de Maryland (AEC, 2016), uma ecotecnologia é um sistema híbrido, com uma parte não-viva que é projetada por humanos e uma parte viva (o ecossistema) que se auto projeta. Dentre essas ecotecnologias destacam-se os *wetlands* construídos.

O desenvolvimento de sistemas construídos em associação com o estudo de sistemas naturais fornece a base para o entendimento da estrutura, funções e funcionamento tanto dos sistemas naturais quanto dos construídos. (COLLISCHONN, 2010)

3.5 *Wetlands* construídos

Wetland é um termo em inglês para designar ambientes como pântanos e mangues. Os *wetlands* podem ser naturais, como mostrado na Figura 2, ou podem ser sistemas construídos

artificialmente que, através de mecanismos naturais, servem para melhorar a qualidade das águas, podendo ser definidos como a transição entre o meio aquático e o meio terrestre.

Figura 2 - Wetland natural



Fonte: Departamento of Natural Resources

Os *wetlands* construídos são sistemas que consistem em lagoas rasas que são preenchidas por um material poroso inerte que serve de meio suporte para plantas aquáticas que auxiliam no tratamento dos esgotos. Devem possuir uma camada impermeável de argila ou membrana sintética, além de estruturas que permitam o controle de importantes parâmetros do sistema como a direção do fluxo, o tempo de detenção hidráulica e o nível de água (VON SPERLING, 2005).

Salati (2006) diz que estes sistemas têm funções importantes dentro de seus ecossistemas dentre as quais se destacam:

- a) Regularização dos fluxos de água, atenuando assim os picos de enchentes;
- b) Modificação e controle da qualidade das águas;
- c) Proteção da biodiversidade, por ser uma área de refúgio da fauna;
- d) Importante como área de reprodução e alimentação de vários animais aquáticos;
- e) Controle de erosão evitando assim assoreamento de rios.

Independente das várias denominações que esse tipo de sistema tem no Brasil, como alagados construídos, leitos cultivados, banhados construídos ou zonas de raízes; a sua principal característica é que são meios saturados de água capazes de purificá-la de modo barato e eficaz.

De acordo com Vyzmal (2010), os WC são sistemas que foram desenvolvidos e construídos utilizando processos naturais que envolvem vegetação de zonas alagadas (úmidas), solo e uma associação de colônias microbianas para auxiliar no tratamento de águas residuais. Eles imitam os processos dos *wetlands* naturais, mas em um ambiente controlado, onde é possível potencializar sua eficiência de remoção de DBO, DQO e nutrientes (Fosforo e nitrogênio), além de evitar danos aos ecossistemas naturais.

Para que os WC funcionem corretamente, segundo Lautenschlager (2001), dependem de vários fatores externos que devem ser devidamente controlados. Os principais são:

a) Clima: A variação de temperatura altera as reações químicas dentro do sistema, a taxa de radiação solar afeta o crescimento das plantas, a precipitação e os ventos afetam o balanço hídrico do sistema. Áreas predominantemente tropicais, como o Brasil, acabam por favorecer a implantação desses sistemas, pois uma elevada temperatura acaba por aumentar a atividade microbológica, e a maior incidência solar faz com que as plantas cresçam mais rapidamente, o que acaba por potencializar os sistemas de WCs.

b) Evapotranspiração: é o conjunto de processos físicos e fisiológicos que provocam a transformação da água em vapor. As taxas de evaporação em um sistema *wetland* podem variar de acordo com a radiação solar, com o tipo de macrófita utilizada no sistema e principalmente com a área superficial do sistema, o que influencia diretamente o processo de evapotranspiração. Por ser uma relação direta, quanto maior a área exposta, maior a ação do clima sobre a evapotranspiração, além disso a perda por evapotranspiração deve ser considerada no dimensionamento de um sistema *wetlands* construído (BURMAN et al., 1983).

Segundo Trotter (1994), a perda por evapotranspiração é provocada pelo crescimento e metabolismo da vegetação usada nos sistemas WC. Nos climas mais quentes a tendência é que a evaporação aumente o que acaba por permitir, na teoria, que a área de construção de *wetlands* seja menor.

c) Solo: é devido a interação do solo com os poluentes contidos nos efluentes que parte dos mesmos são retirados, de modo que é necessário analisar o tipo de solo que deve ser usado

para retirar cada tipo de poluente, sendo preciso que o solo torne difícil a percolação dos efluentes não tratados para o lençol freático.

d) Atividade biológica: as plantas ajudam no tratamento dos efluentes porque absorvem os poluentes por suas raízes, sem falar que é preciso ter o controle dos microrganismos decompositores que degradam a matéria orgânica de modo a ter oxigênio suficiente para todos.

Estes sistemas podem ser usados nos tratamentos de diversos tipos de águas, desde águas para abastecimento até o tratamento de águas residuárias. No Brasil, as principais utilizações e recomendações para os WCs, de acordo com Salati (2006), tem sido para pré-tratamento de água, para etapas de tratamento secundárias e terciárias dos efluentes, para abastecimento de água industrial/urbana ou para enquadramento de rios em classe 2 (RESOLUÇÃO CONAMA), considerando que uma grande quantidade de águas se encontram nas classes 3 ou 4.

3.5.1 Histórico sobre a utilização de Wetlands

A tecnologia de tratamento de águas residuárias, conhecida como sistemas *wetlands* construídos, foi inicialmente empregada na Alemanha por Käthe Seidel do Instituto Max Planck em meados de 1950, para a remoção de fenol e na redução da carga orgânica de efluente de laticínio. Mas apenas em 1977 que foi construído um sistema em escala real para o tratamento de águas residuárias (KADLEC & KNIGHT, 1996). Já nos Estados Unidos, onde são conhecidos como “*Vegetated submerged bed*”, segundo Environmental Protection Agency (EPA, 1999), iniciou-se na década de 60 e teve um considerável aumento das pesquisas entre 1970 e 1980.

A partir disso, o uso dessa tecnologia só foi aumentando e passou a ser usada em diversos locais do mundo como Austrália, Nova Zelândia, países da Ásia, Europa e da América do Sul. Oliveira *et al* (2004) afirma que existem alguns sistemas de larga escala em funcionamento no sudeste da Ásia, China e América do Sul.

Segundo Rodrigues (1999), na década de 80 utilizou-se sistemas de *wetlands* construídos para a despoluição do rio Tâmsa na Inglaterra e, no Canadá, do rio Don. O rio Mississipi, nos Estados Unidos também passou por um processo de despoluição onde foi feito o uso macrófitas flutuantes, que é um tipo de sistema WC.

No Brasil, de acordo com Salati (2003), a primeira experiência com a utilização de WCs para o tratamento de águas aconteceu em 1982, onde foi realizado o primeiro projeto de *wetlands* feito por SALATI & RODRIGUES (1982), com a construção de um lago artificial próximo ao rio Piracicamirim que era extremamente poluído na Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ) em Piracicabana, SP.

Hoje, no país, existem vários trabalhos baseados no tratamento de água por meio de *wetlands* construídos, onde é destacado por Salati (2003): Roquete Pinto et al. (1998) do Instituto Nacional de Tecnologia, VALENTIN & ROSTON (1998) da UNICAMP, GIOVANNI & MOATTA MARQUES (1998) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul e PHILIPPI et al. (1998) da Universidade Federal de Santa Catarina.

3.5.2 Plantas (Macrófitas)

As macrófitas são plantas que possuem adaptações que permitem a sobrevivência das mesmas em ambientes saturados de água, como os encontrados em *wetlands*. Esse tipo de planta se desenvolve no suporte e absorvem os nutrientes da mesma forma em que mantêm a permeabilidade do solo. (IEA,2004)

Segundo Barreto (2016), além de sobreviverem a ambientes alagados, elas devem ter um conjunto de características como um ciclo de vida mais duradouro, raízes volumosas e extensas, ter uma elevada taxa de crescimento e disseminação por rizomas, fácil manuseio, manutenção e colheita.

Para os sistemas de *wetlands*, além das macrófitas a serem usadas necessitarem das características acima, elas devem ter uma maior resistência contra pragas e doenças, bem como ser espécies esteticamente bonitas ou que apresentem reuso de biomassa como geração de flores e fibras ou alimentos para animais.

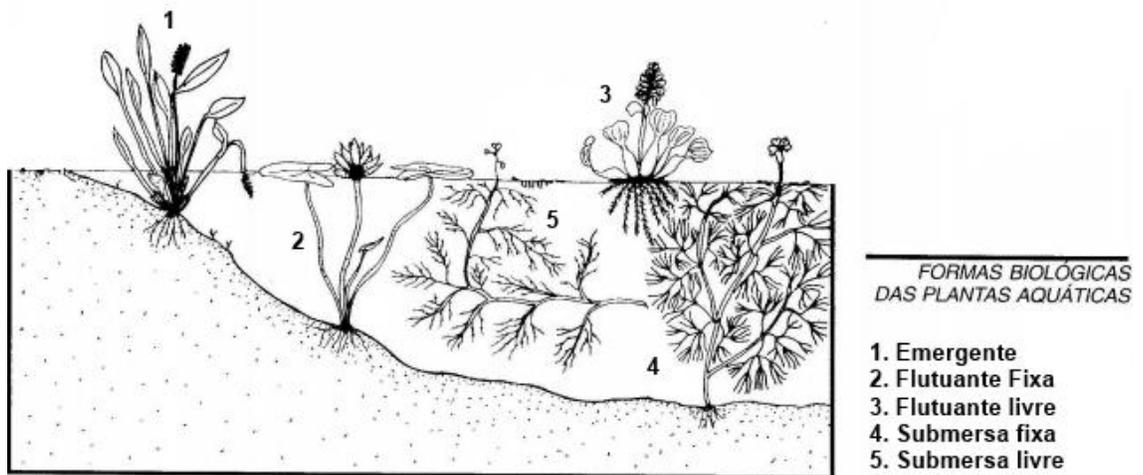
Os tipos de macrófitas, de acordo com Silva (2007), mais usadas são:

Emergentes: taboa (*Typha angustifolia* L. ou *Typha latifolia*), junco (*Juncus spp* e *junco ingens*), caniço (*Phragmites spp*), *Schoenoplectus validus*, bunho (*Carex spp*), *Scirpus lacustris* L., *Eleocharis spp* e lírios-do-charco ou lírio-dos-pantanos (*Íris pseudocorus* L.).

Flutuantes: jacinto d'água (*Eichhornia crassipes*), lentilha d'água (*Lemna*), rede de água (*Hydrodictyon*), *Reticulatum L.*, *Scenedesmus acuminatus* (Lagerh) (Duarte, 2002), *Spirodela sp*, *Wolffia arrhiza*, *Azolla caroliniana* (Mazzola *et al.*, 2003).

Submersas: *Elodea canadensis*, *Elodea nutalli*, *Egéria densa* (Elodea), *Ceratophyllum demersum*, *Hydrilla verticillata*, *Cabomba caroliniana*, *Miriophyllum heterophyllum*, *Paramogeton spp* (Soares e Ferreira, 2001).

Figura 3 - Formas biológicas das macrófitas aquáticas



Fonte: Adaptada de Pott & Pott (2000)

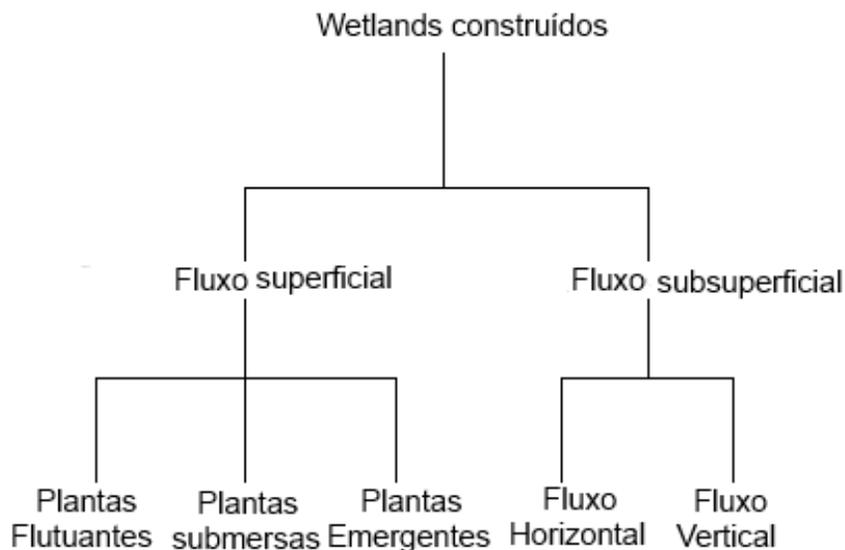
O uso de macrófitas tem como benefícios o controle do odor (funcionam como biofiltro de odor), o tratamento de efluentes (as raízes absorvem nutrientes e elementos químicos) e o controle de insetos devido as limitações da massa superficial que permitem o desenvolvimento de nichos para outros artrópodes que se alimentam dos insetos (VALENTIM, 2003). Além disso, aumentam a área de filtragem, estabilizam o meio de suporte, durante a fotossíntese liberam oxigênio para os microrganismos, provocam uma diversidade na atividade biológica, reduzem a ocorrência da colmatação e aumentam a condutividade hidráulica do meio de suporte.

3.5.3 Classificação dos *wetlands* construídos

Com o passar dos anos, foram desenvolvidas várias técnicas para a implantação de *wetlands* construídos e estas podem variar dependendo da característica do efluente, da eficiência de remoção desejada, do interesse paisagístico, entre outras características. A partir disso, podem ser

classificados segundo KADLEC & KNIGHT (2008), em dois grandes grupos, como apresentado na Figura 4:

Figura 4 - Classificação dos Wetlands Construídos



Fonte: Modificado de KADLEC & KNIGHT (2008)

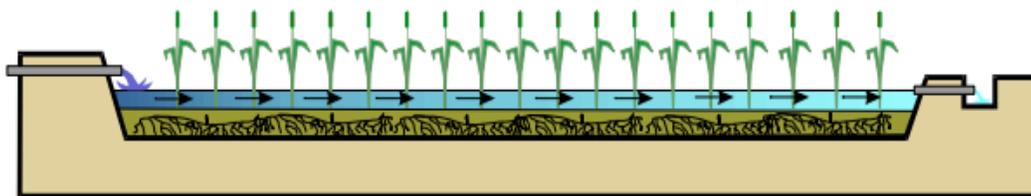
Independentemente do tipo de configuração, é imprescindível a utilização de sistemas de tratamento preliminar e primário para a proteção do sistema contra o processo de colmatação, ao retirar sólidos grosseiros, flutuantes e sedimentáveis (MONTEIRO, 2009).

3.5.3.1. Wetlands de Fluxo Superficial (FS)

Plantas emergentes: é definido por Salati (2006) como sistema que possui plantas que desenvolvem suas raízes presas ao sedimento e seu caule e parte das folhas ficam parcialmente submersos. As plantas mais comuns de serem usadas são *Phragmites australis*, *Typha latifolia* e *Scirpus lacustris*. A exploração de sedimentos pelas raízes tem um aumento de volume a medida que elas se tornam mais profundas. O sistema baseia-se na construção de um canal que tem uma largura entre 3 a 5 metros e um comprimento de 100 metros há uma camada de argila ou manta geossintética para proteger de contaminação. É mantido uma lâmina de água entre 10 a 40 cm nesse canal e a partir daí começa-se o processo de purificação dessa água por meio dos microrganismos,

das plantas e do solo. Geralmente são construídos canais longos cuja a lâmina de água é variável. Esse sistema pode ser visualizado na figura 5.

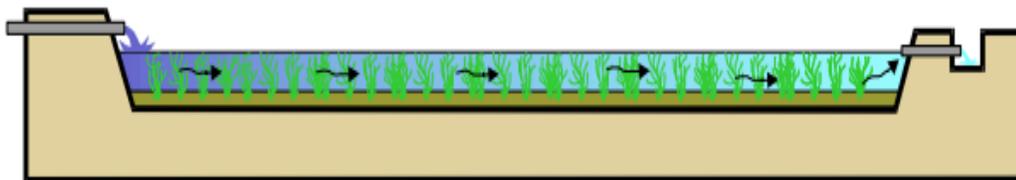
FIGURA 5 - Esquemático de um sistema *wetland* com macrófitas emergentes com fluxo superficial



FONTE: SALATI, E. (2006)

Plantas submersas: conforme pode ser observado na Figura 6, as plantas ficam completamente submersas, são cultivadas em solo com substrato especial e se expostas ao sol tem seus tecidos fotossinteticamente ativos destruídos. Suas espécies mais produtivas, como a *Eldoea Canadensis*, crescem quase que unicamente em águas eutrofizadas, onde há uma enorme quantidade de nutrientes que causam um excesso de proliferação dessas plantas. Sendo assim, apresentam grande potencial para o polimento de águas de esgoto após o tratamento secundário. (Salati, 2006)

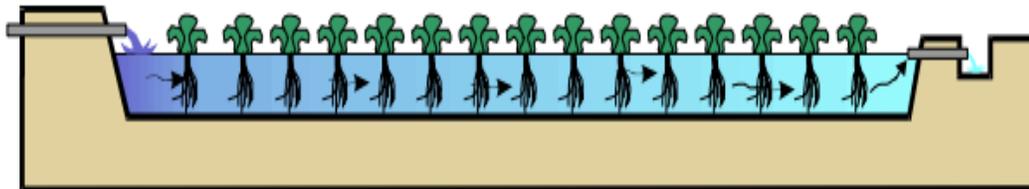
FIGURA 6 - Esquemático de um sistema *wetland* superficial com plantas submersas



FONTE: SALATI, E. (2006)

Plantas flutuantes: as plantas nesse tipo de sistema não têm suas raízes aderidas ao substrato por isso denominadas como flutuantes e são geralmente usadas em canais rasos. A espécie mais utilizada é *Eicchornia crassipes*, também conhecida no Brasil como água-pe, justamente por causa da sua capacidade de resistir a ambientes muito poluídos (Salati, 2006). Esse sistema pode ser visualizado na Figura 7.

FIGURA 7 - Esquemático de um sistema *wetland* superficial com plantas flutuantes



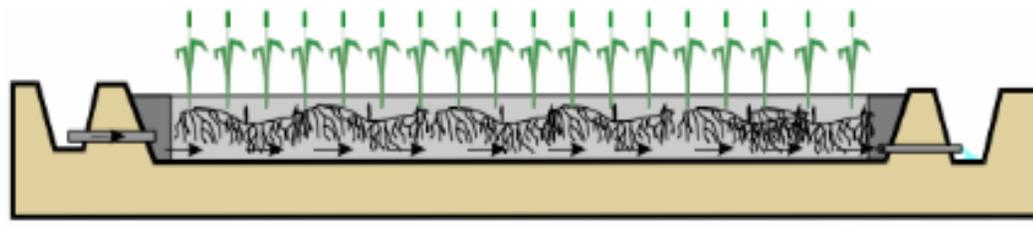
FONTE: SALATI, E. (2006)

3.5.3.2. *Wetlands* de fluxo subsuperficial (FSS)

Segundo Silva (2007) são os sistemas mais utilizados no mundo devido a capacidade de remover altas concentrações de nutrientes (nitrogênio e fósforo) e metais pesados através de mecanismos que ocorrem no solo como adsorção e filtração.

- Horizontal: como mostrado na Figura 8, nos sistemas de fluxo subsuperficial o fluxo de água não corre na superfície, sendo assim ele não pode passar do meio filtrante e devem receber efluentes mais clarificados que apresentam menor teor de sólidos. São sistemas alimentados continuamente o que acaba por limitar a oxigenação do meio filtrante. As águas residuárias passam em contato com as raízes das macrófitas na direção horizontal. Seu meio filtrante pode ser composto por materiais como pedras, cascalhos, areia ou solo (MOTA e VON SPERLING, 2009).

FIGURA 8 – Esquemático de um sistema *wetland* horizontal subsuperficial

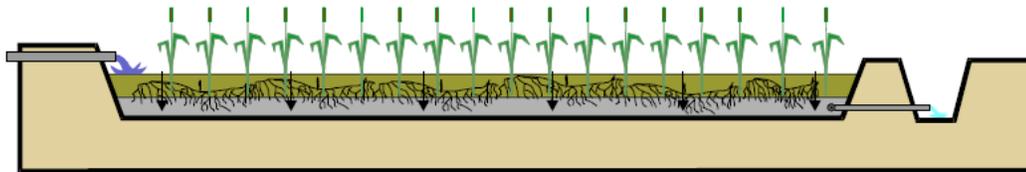


FONTE: SALATI, E. (2006)

- Vertical: Segundo PLATZER *et al.* (2007) os sistemas que tem fluxo vertical podem receber esgotos brutos sobre sua superfície e normalmente apresentam uma alimentação intervalada, formado por um filtro típico com leito que serve de suporte da vegetação e

que a retirada do efluente já tratado é feita pelo fundo do sistema. Esse tipo de sistema, por ter uma superfície de entrada maior, um uso mais eficiente do volume do filtro e também por ter uma alimentação intervalada que favorece a oxigenação do sistema, tem como vantagem a necessidade de uma menor área. Salati (2006) diz que o efluente a ser tratado deve ter fluxo vertical em uma camada de solo sobre a brita onde são plantadas as macrófitas emergentes. O sistema normalmente é composto de canais longos e pouco profundos (esquema apresentado na Figura 9).

FIGURA 9 - Esquemático de um sistema *wetland* vertical com fluxo ascendente.



FONTE: SALATI, E. (2006)

3.5.4 Princípios de funcionamento dos *Wetlands*

O tratamento de águas residuárias por WC se baseia nos princípios de funcionamento dos sistemas naturais e depende de três componentes fundamentais: macrófitas (plantas), o substrato (meio filtrante) e os microrganismos.

As plantas, como já descrito anteriormente, servem para absorver os nutrientes provenientes dos efluentes, além de produzirem o oxigênio do qual os microrganismos dependem para realizar a filtração (Brix *et al.* 2001).

O substrato é o meio de suporte da vegetação que acaba por funcionar como filtro por onde o efluente percola no sistema e é onde a grande parte das reações bioquímicas acontecem, além de atuar como suporte para o crescimento dos microrganismos. É geralmente composto de material filtrante como britas e areia. De acordo com Leitão *et al.* (2002) o material de suporte deve ter ao mesmo tempo alta permeabilidade, alta capacidade de troca catiônica e alta atividade microbiológica.

Já os microrganismos são os componentes fundamentais para o bom funcionamento dos sistemas *wetlands*, são eles que degradam a matéria orgânica proveniente dos efluentes e removem

os poluentes, além de transformarem nutrientes como fósforo e nitrogênio em compostos mais simples, o que facilita a retirada dos mesmos.

Segundo Marques (1999), o processo de remoção dos poluentes por meio de *wetlands* se dá por mecanismos físicos, químicos e biológicos. Os mecanismos físicos consistem em filtração, sedimentação e adsorção. Dentre os mecanismos químicos estão a precipitação e co-precipitação de compostos insolúveis e decomposição de compostos pouco estáveis. Já os mecanismos biológicos podem ser caracterizados como remoção de partículas solúveis pelos microrganismos, como o metabolismo das plantas para assimilar os contaminantes, e como o decaimento dos organismos em meio desfavorável.

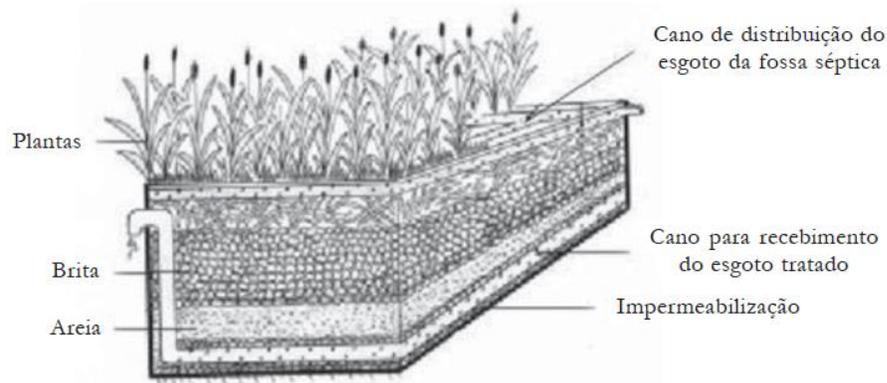
Por ser uma tecnologia consideravelmente recente no país ainda não há normas brasileiras para o dimensionamento de sistemas *wetlands*. É possível, contudo, se basear em modelos e critérios internacionais para projetá-los (Rousseau et al., 2004).

Na figura 10 é apresentado o esquemático de um sistema WC, onde é possível notar claramente os componentes fundamentais para o funcionamento do sistema: Plantas (macrófitas), material filtrante (nesse caso, brita e areia), o cano de distribuição do efluente e o de recebimento do esgoto tratado e a impermeabilização que deve ser feita no fundo para evitar contaminação.

Geralmente os sistemas WC são usados em paralelo, enquanto um recebe a batelada os outros estão em repouso para que o lodo passe pela digestão e secagem, permitindo assim a manutenção das condições aeróbias do sistema. (PROSAB,2009)

É necessário haver uma manutenção do sistema para evitar processos de colmatção, para isso deve ser feito a poda adequada das macrófitas e a manutenção do sistema de tratamento preliminar. Ainda há poucas informações sobre os processos de manutenção de sistemas WC, pois como já foi dito, são tecnologias novas no país e existem poucos dados para se trabalhar.

FIGURA 10 – Esquema de um sistema de WC de fluxo vertical



FONTE: Adaptado de VAN KAICK, 2002.

3.5.5 Aplicações dos sistemas WC

As primeiras aplicações dos sistemas *wetlands* foram para tratamento doméstico e de águas residuárias municipais. No entanto, de acordo com Kadlec e Knight (2009), há um número crescente de aplicações do sistema como:

- Tratamento integral de águas residuárias;
- Tratamento secundário e terciário de esgoto;
- Tratamento de águas residuárias agrícola (plantações, fazendas animais e tanques de peixes);
- Tratamento de “*runoff*” urbano (escoamento superficial urbano);
- Barreiras de retenção (“*buffer*”) para o controle da poluição difusa;
- Tratamento de grandes volumes de água de rios classificados como Classe 3 ou 4 para enquadramento em rios de Classe 2 (Classificação CONAMA);
- Tratamento de água de rios Classe 2 para abastecimento industrial e urbano (Classificação CONAMA).

4. METODOLOGIA

No presente trabalho foram analisadas pesquisas experimentais com sistemas *wetlands* construídos, nesta análise foram levadas em consideração dados como o tipo de sistema WC adotado, tipo de pré-tratamento usado, o dimensionamento do sistema, o tipo de impermeabilização, as macrófitas usadas no sistema, material de suporte, o destino final do efluente tratado, o pH e suas eficiências em relação a remoção dos resíduos (DBO, DQO, Fósforo, Nitrogênio, Coliformes).

A revisão bibliográfica do estudo foi baseada em uma pesquisa de caráter exploratório cujo objetivo é habituar-se com o estudo sobre os sistemas *wetlands*, que é um assunto ainda pouco explorado no país. Ela foi desenvolvida através de informações obtidas de sites como *Web of Science*, *Scielo (Scientific Electronic Library Online)* e Google acadêmico. A partir disso, formulou-se hipóteses para analisar a viabilidade técnica e ambiental do sistema de *wetlands* construídos no tratamento de águas residuárias.

Os dados para a análise foram retirados de estudos realizados na Estação de Tratamento de Esgoto em Ilha Rasa no Paraná, em um condomínio de alto padrão em Londrina também no Paraná, no Centro de estudos ambientais e desenvolvimento sustentável (CEADS) em Ilha Grande no Rio de Janeiro e na Estação de Tratamento de Esgoto por Alagados construídos em Bauru, São Paulo.

Os resultados foram comparados com as legislações vigentes no país que tratam sobre o lançamento de efluentes: Resoluções nº 357/2005 e nº 430/2011 do CONAMA. Baseando-se nelas foi possível reconhecer as características mais relevantes de um sistema *wetland* construídos e como ele funciona, de modo a contribuir para futuras melhorias de otimização do sistema.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Estudos de casos de sistemas *wetlands*

Os estudos foram selecionados por representarem tipos de sistemas *wetlands* de semelhante aplicação no tratamento de efluentes de forma a tornar possível a caracterização desses sistemas e analisar se eles se enquadram nas normas vigentes referentes a lançamento de efluentes tratados.

Além da semelhança na aplicação, os estudos de caso especificados na Tabela 1, foram escolhidos pois continham todos os dados necessários para a análise desejada, principalmente os dados de remoção de DBO, DQO, pH, Fósforo, Nitrogênio e Coliformes Fecais.

Tabela 1 - Estudos de casos analisados

Autor	Local do sistema	Tipo de sistema WC	Macrófitas usadas
VAN KAICK (2002)	Estação de Tratamento de Esgoto em Ilha Rasa – ETE Ilha Rasa (Paraná)	<i>Wetland</i> de fluxo subsuperficial vertical descendente	Capim serra (<i>Claudium mariscus</i>)
UWAI et al. (2008)	Condomínios residenciais de alto padrão em Londrina - PR	<i>Wetland</i> de fluxo subsuperficial horizontal	<i>zizianopsis bonariensis</i>
TONIATO (2005)	Centro de Estudos Ambientais e Desenvolvimento Sustentável (CEADS) em Ilha Grande - RJ	<i>Wetlands</i> construídos de fluxo subsuperficial horizontal	<i>Commelinacea</i> e <i>Asteracea</i>
VON DREIFUS (2012)	Estação de tratamento de esgoto por Alagados Construídos em Bauru - SP	<i>Wetland</i> construído de fluxo subsuperficial horizontal	Capim Vetiver (<i>Chrysopogon zizanioides</i> L.)

FONTE: Autor (a)

5.2 Caso 1: Estação de Tratamento de esgotos em Ilha Rasa (Paraná)

No estudo, Van Kaick (2002) descreve o desenvolvimento e a implantação de um sistema WC realizada em Ilha Rasa, localizada no litoral do Paraná. A população é formada por sua maioria de pescadores que sofriam com altos índices de verminoses e com a contaminação ambiental

devido ao lançamento de esgotos bruto nos corpos receptores ao redor. O sistema primeiramente foi dimensionado como uma caixa de 2,5 x2,5 m usando placas e pilares de concreto armado, estrutura que não resistiu ao efeito da maré alta, sendo assim decidiu-se construir a ETE com laje e toda armada, como esse segundo projeto foi feito em cima do primeiro houve uma redução da área da caixa em comparação ao projeto inicial, passando a ter 4,7 m².

- **Utilização do Sistema WC:** tratamento de esgotos domésticos.
- **Tipo de sistema adotado:** *Wetland* de fluxo subsuperficial vertical descendente
- **Comunidade atendida:** Família que vive na linha da maré da ilha, onde não tem nenhum sistema de esgotamento sanitário.
- **Tipo de impermeabilização:** caixa de concreto toda armada que evita qualquer movimentação do piso.
- **Material de suporte:** conchas de ostra e areia grossa. As conchas foram usadas em substituição a brita por ser um material abundante na ilha, em seguida foi usado uma cama fina de brita nº 0 para evitar acúmulo de água nas conchas.
- **Pré-tratamento usado:** Bombonas de plásticos de 210 L que substituem a fossa séptica e caixa de passagem.
- **Macrófitas utilizadas:** Capim serra (*Claudium mariscus*), planta nativa e facilmente encontrada na ilha.
- **Destino final do efluente tratado:** não informado.
- **Eficiências de remoção:** Tabela 2

Tabela 2 - Resultados das análises de dos parâmetros de entrada e saída na ETE Ilha Rasa

Parâmetro	Entrada do sistema WC	Saída do sistema WC	Remoção (%)
DBO	361,9 mg.O ₂ /L	58,3 mg.O ₂ /L	83,90
DQO	590,25 mg.O ₂ /L	108,50 mg.O ₂ /L	81,60
pH	-	7,84	-
Nitrogênio	128,22 mg.N/L	106,80 mg.N/L	16,70
Fósforo	10,35 mg.P/L	10,63 mg.P/L	0
Coliformes termotolerantes	1,6 x 10 ⁷ NMP/100ml	5,00 x 10 ⁶ NMP/100ml	68,75
Coliformes Totais	1,6 x 10 ⁷ NMP/100ml	5,00 x 10 ⁶ NMP/100ml	68,75

Fonte: Adaptada de VAN KAICK (2002)

5.3 Caso 2: Condomínios residenciais de alto padrão em Londrina – PR

No trabalho de UWAI et al. (2008), foram estudados sistemas *wetlands* construídos (sistema A e sistema B) localizados em dois condomínios residências de alto padrão em Londrina. O maior sistema é o A e foi construído para atender 406 lotes (160 no condomínio 1 e 246 no condomínio 2), já o sistema B foi dimensionado para atender 61 lotes (condomínio 1).

O sistema A é composto por um tanque séptico (250 m³) e quatro *wetlands* cujas as dimensões são 27,1 m de comprimento e 13,6 m de largura que operam simultaneamente. O sistema B Composto por 1 tanque séptico (65 m³) e um *wetland* cujas as dimensões são 25 m de comprimento por 12 m de largura.

- **Tipo de sistema WC adotado:** *Wetland* de fluxo subsuperficial horizontal
- **Comunidade atendida:** 467 lotes
- **Tipo de impermeabilização:** manta de geomembrana de polietileno de alta densidade com espessura de 0,8mm
- **Material de suporte:** camadas alternadas de saibro e palha de arroz com altura de 60cm,
- **Pré-tratamento usado:** Caixa de passagem com grade (tratamento preliminar) para retenção dos sólidos grosseiros e depois tanque séptico (tratamento primário).
- **Macrófitas utilizadas:** *zizianopsis bonariensis*, da família das Gramíneas
- **Destino final do efluente tratado:** Ribeirão da esperança (ambiente lótico)
- **Eficiências de remoção:** Tabela 3

Tabela 3 - Resultados das análises de dos parâmetros de entrada e saída nos sistemas A e B

Parâmetro	Sistema A			Sistema B		
	Entrada do sistema WC	Saída do sistema WC	Remoção (%)	Entrada do sistema WC	Saída do sistema WC	Remoção (%)
DBO	95 mg.O ₂ /L	10 mg.O ₂ /L	89,47	107 mg.O ₂ /L	12 mg.O ₂ /L	88,79
DQO	298 mg.O ₂ /L	10 mg.O ₂ /L	96,64	241 mg.O ₂ /L	27 mg.O ₂ /L	88,80
pH	7,2	7	-	6,8	7,2	-
Nitrogênio (Amoniacal)	48 mg.N/L	11 mg.N/L	77,08	45 mg.N/L	20 mg.N/L	55,56
Fósforo	5,8 mg.P/L	1,2 mg.P/L	79,31	2,3 mg.P/L	0 mg.P/L	100
Coliformes termotolerantes	1,98 x 10 ⁷ NMP/100ml	1,98 x 10 ⁴ NMP/100ml	99,9	1,20 x 10 ⁶ NMP/100ml	205 NMP/100ml	99,98
Coliformes Totais	4,88 x 10 ⁵ NMP/100ml	528 NMP/100ml	99,89	1,10 x 10 ⁷ NMP/100ml	2,31 x 10 ³ NMP/100ml	99,98

Fonte: Adaptado de UWAI *et al.* (2008)

5.4 Caso 3: Centro de Estudos Ambientais e Desenvolvimento Sustentável (CEADS)

Toniato (2005) estudou a eficiência de remoção de um sistema *wetland* de fluxo horizontal subsuperficial localizado em Ilha Grande, Angra dos Reis no Rio de Janeiro. Esse sistema de tratamento é composto por uma fossa séptica e um *wetland* cujas as dimensões são 15m de comprimento, 5,5m de largura e 0,5m de profundidade, por conseguinte o tratamento efetivo só ocorre do nível de água para baixo.

- **Utilização do Sistema WC:** tratamento de esgotos domésticos
- **Tipo de sistema adotado:** *wetlands* construídos de fluxo horizontal subsuperficial com plantas emergentes
- **Comunidade atendida:** População da Vila Dois Rios em Ilha Grande.
- **Tipo de impermeabilização:** não informado

- **Material de suporte:** brita nº 2 cuja o diâmetro varia entre 1,9 cm e 2,5 cm.
- **Pré-tratamento usado:** Fossa séptica
- **Macrófitas utilizadas:** Foram plantadas diversas espécies de macrófitas emergentes, mas as mais predominantes são as *Commelinacea* e a *Asteracea* que só podem ser identificadas por suas famílias pois não houve floração específica para determinar os tipos de plantas.
- **Destino final do efluente tratado:** Rio Barra Grande (ambiente lótico)
- **Eficiências de remoção:** Tabela 4

Tabela 4 - Análise dos parâmetros na entrada e saída do sistema *Wetland* em Ilha Grande

Parâmetro	Entrada do sistema WC	Saída do sistema WC	Porcentagem de Remoção (%)
DBO	136 mg.O ₂ /L	9 mg.O ₂ /L	93,39
DQO	344,5 mg.O ₂ /L	16,5 mg.O ₂ /L	95,22
pH	6,5	6,6	-
Nitrogênio (Amoniacal)	7,4 NO ₃ /L	1,2 mg.NO ₃ /L	83,35
Fósforo	3,8 mg.P/L	0,7 mg.P/L	82,53
Coliformes termotolerantes	1,00 x 10 ⁷ NMP/100ml	1,00 x 10 ⁶ NMP/100ml	90,00
Coliformes Totais	1 x 10 ^{6,5} NMP/100ml	1,00 x 10 ^{5,8} NMP/100ml	80,04

Fonte: Adaptado de TONIATO (2005)

5.5 Caso 4: Estação de Tratamento de Esgoto por alagados construídos em Bauru (São Paulo)

Von Dreifus (2012), realizou esse estudo com o intuito de verificar o desempenho do sistema *wetland* construído localizado na ETE por alagados construídos na UNESP no estado de São Paulo. O sistema é composto por 3 *wetlands* de 9m de comprimento, 4,5m de largura e 0,9m de profundidade; cada um deles foi preenchido com um tipo de leito diferente. Nesse estudo de caso só serão avaliados dois dos três leitos de tratamento, o leito de brita e o leito de isopor. A

intenção de comparar com um sistema que usa isopor como leito é provar que o sistema pode ainda ser mais econômico e sustentável, sem perder sua qualidade final de remoção.

- **Utilização do sistema WC:** tratamento de esgoto universitário, o que difere em algumas características do esgoto doméstico devido a diferença de atividades exercidas no local.
- **Tipo de sistema adotado:** *wetland* construído de fluxo subsuperficial horizontal
- **Comunidade atendida:** residentes da Moradia Estudantil (64 alunos) e alunos e funcionários do Campus do Departamento de Educação Física da Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho” – UNESP (277 alunos, 43 professores e 3 funcionários).
- **Tipo de impermeabilização:** primeiro foi forrado com uma manta de tecido-não-tecido (tipo bidim), depois uma manta de polietileno de alta densidade (PEAD) e depois foi colocado outra manta de tecido-não-tecido para proteger o PEAD.
- **Material de suporte:** O primeiro sistema (leito de brita) é composto por brita n°1, brita n° 3 e areia grossa, já o material de suporte do segundo sistema (leito de isopor) é composto por pedrisco, poliestireno expandido (isopor) moído e reciclado e areia grossa.
- **Pré-tratamento usado:** gradeamento, decantador primário e peneira estática.
- **Macrófitas utilizadas:** Capim Vetiver (*Chrysopogon zizanioides* L.)
- **Destino final do efluente tratado:** não informado
- **Eficiências de remoção:** Tabela 5

Tabela 5 - Resultados das análises dos parâmetros de entrada e saída nos sistemas de leito de brita e leito de isopor

Parâmetro	Leito de Brita			Leito de isopor		
	Entrada do sistema WC	Saída do sistema WC	Remoção (%)	Entrada do sistema WC	Saída do sistema WC	Remoção (%)
DBO	279,81 mg.O ₂ /L	35,07 mg.O ₂ /L	87,46	279,81 mg.O ₂ /L	52,93 mg.O ₂ /L	81,08
DQO	330,67 mg.O ₂ /L	36,88 mg.O ₂ /L	88,85	330,67 mg.O ₂ /L	45,51 mg.O ₂ /L	86,24
pH	7,41	7,47	-	7,41	6,87	-
Nitrogênio (Amoniacal)	53,30 mg.N/L	13,49 mg.N/L	74,69	53,30 mg.N/L	19,95 mg.N/L	62,56
Fósforo	14,47 mg.P/L	6,65 mg.P/L	54,04	14,47 mg.P/L	13,83 mg.P/L	4,42
Coliformes termotolerantes	123,25 NMP/100ml	26,93 NMP/100ml	78,15	123,25 NMP/100ml	32,97 NMP/100ml	73,24
Coliformes Totais	211,00 NMP/100ml	93,8 NMP/100ml	55,54	211 NMP/100ml	126 NMP/100ml	40,28

Fonte: Adaptado de VON DREIFUS (2012)

5.6 Análise dos estudos de caso

Com o desenvolvimento dos *wetlands* construídos foram criadas várias técnicas de construção do sistema, nos casos acima foram analisados somente sistemas de fluxo subsuperficial, porque evita-se o uso de sistemas superficiais por causarem proliferação de mosquitos e ocasionarem odor. A única variação entre eles seria a direção do fluxo em que o efluente é despejado, onde o caso 1 é de fluxo vertical e os outros casos de fluxo horizontal. Mas essa diferença não interferiu de na comparação das eficiências estudadas.

Nos casos estudados foi possível comprovar o quão diversificado podem ser os materiais usados como material de suporte, de maneira econômica e eficiente, sem afetar o resultado final do tratamento. Como o uso de materiais reciclados no caso do isopor, palha de arroz e uso de conchas de ostras.

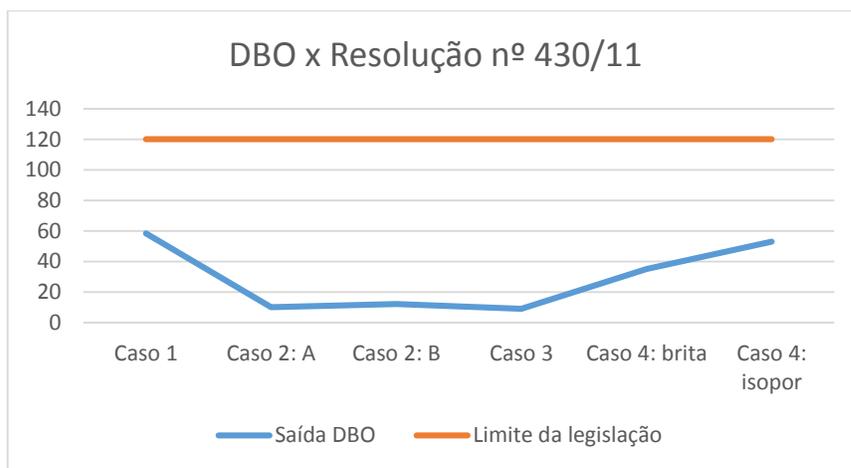
É importante destacar que a impermeabilização do sistema deve ser muito bem-feita, como notado no caso 1, onde houveram danos nas eficiências de remoções ocasionados por problemas na impermeabilização do sistema.

A necessidade de um pré-tratamento é comprovada ao analisar os estudos de caso, pois sem ele ocasionariam danos aos *wetlands* como colmatação e entupimento das tubulações. Além disso o pré-tratamento ajuda na remoção dos poluentes de forma a melhor enquadrar os efluentes tratados na legislação vigente.

5.6.1 Comparação das remoções dos sistemas com a legislação

Ao se comparar os dados das saídas dos sistemas WC estudados, é possível notar que além da alta eficiência de remoção de matéria orgânica que variou entre 81,08 – 93,39%, os sistemas atendem os limites da resolução nº 430/11 do CONAMA, de acordo com o gráfico 1.

Gráfico 1 - Comparação dos resultados de DBO com a Resolução nº 430/11



Fonte: Autor (a)

Já em relação a DQO, não há limitação de valores para o lançamento de efluentes, mas com os valores da relação DBO/DQO nas entradas dos sistemas, é possível avaliar a capacidade de biodegradabilidade dos efluentes a serem tratados e se o tratamento por meio de *wetlands* (tratamento biológico) foi o ideal para o tratamento desses efluentes. Uma relação DBO/DQO menor que 0,2 é considerada baixa e caracteriza um efluente de difícil tratamento biológico, não sendo recomendado o uso de sistemas WC, felizmente, como mostrado na tabela 6, todos os casos

estudados se encontram acima desse valor e por isso apresentam elevados níveis de eficiência de remoção de matéria orgânica.

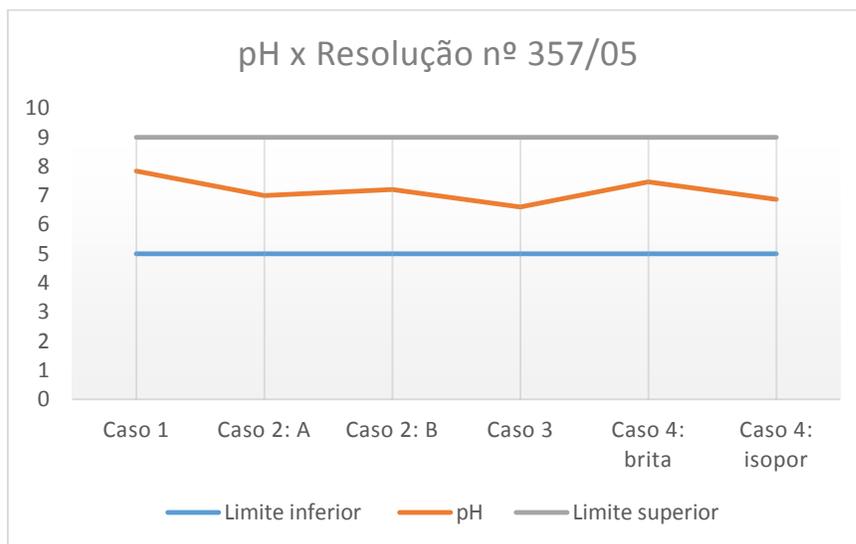
Tabela 6 - Relação DBO/DQO

Caso estudado	Relação DBO/DQO
Caso 1	0,61
Caso 2: A	0,32
Caso 2: B	0,44
Caso 3	0,39
Caso 4: brita	0,85
Caso 4: isopor	0,85

Fonte: Autor (a)

O valor do pH estipulado pela resolução CONAMA nº 357/05 deve estar dentro da faixa de 5 – 9. Todos os casos tiveram seus valores de pH variando entorno de 6 ou 7 obedecendo assim essa legislação, como mostrado no gráfico 2. Essa pequena variação no pH deve-se as reações químicas que ocorrem dentro do sistema e o fato de não ocorrerem muitas flutuações significam o equilíbrio químico dos *wetlands*.

Gráfico 2 - Comparação dos resultados de pH com a Resolução nº 357/05

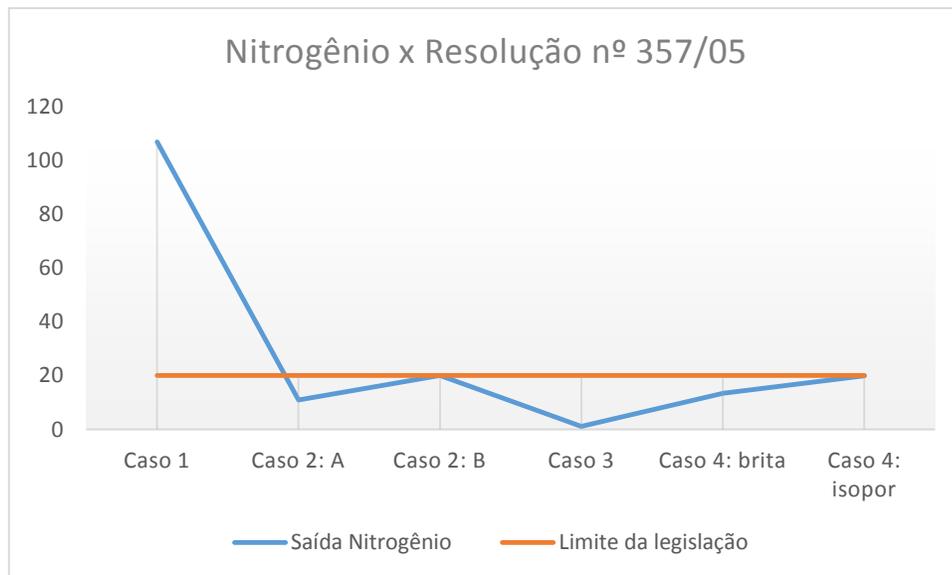


Fonte: Autor (a)

Foram analisados os dados da concentração de nitrogênio amoniacal de todos os casos com o limite de 20 mg/L determinado na resolução do CONAMA nº 430/2011. Em três dos casos estudados o limite para o lançamento do efluente foi obedecido, apenas no Caso 1, como mostrado no gráfico 3, o limite é extrapolado.

Van Kaick (2002) justifica o elevado valor de nitrogênio amoniacal em seu experimento devido a juventude das macrófitas no sistema, que sendo assim ainda estavam se adaptando ao ambiente e por isso sua remoção não foi eficiente, além disso, a carga de nitrogênio que entrou no sistema, foi muito maior que a dos outros casos estudados o que sobrecarregou o sistema.

Gráfico 3 - Comparação dos resultados de Nitrogênio Amoniacal com a Resolução nº 430/11



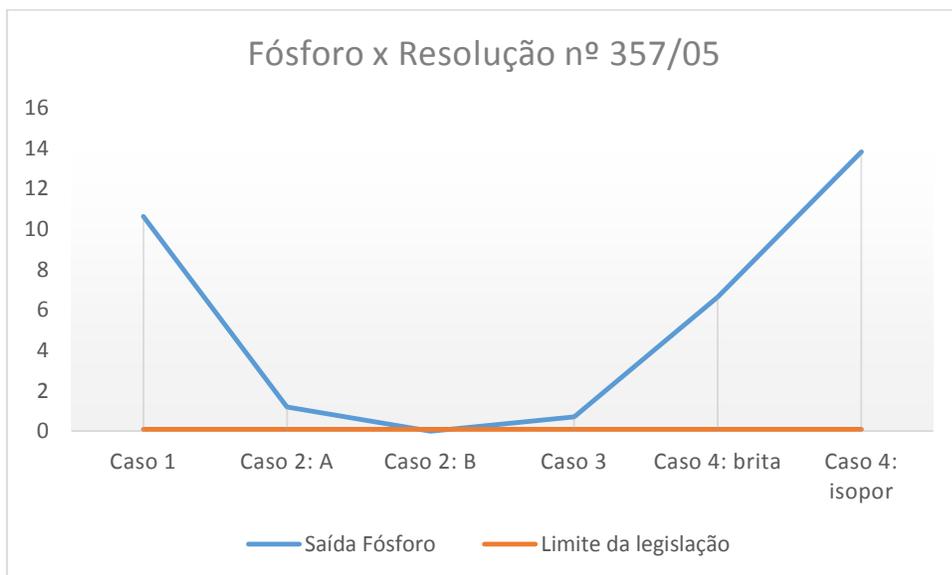
Fonte: Autor (a)

A quantidade fósforo deve ser limitada pelo risco de causar eutrofização nos corpos receptores. A resolução CONAMA nº 357/2005 limita a quantidade fósforo para o lançamento de efluentes baseada no tipo de corpo receptor, nos casos estudados os destinos finais podem ser considerados como ambientes lóticos, onde há uma maior movimentação das águas sendo assim o limite é de 0,1 mg/L.

As eficiências de remoção do fósforo sofreram muitas variações entre os casos, desde 0%, como no Caso 1, a 100 % como no Sistema B do Caso 2. É preciso entender que o processo de

remoção do fósforo é feito por meio de sua absorção do mesmo pelas macrófitas, como foram usadas espécies de plantas diferentes e em estágios de amadurecimento essa alta variação se justifica.

Gráfico 4 - Comparação dos resultados de Fósforo Total com a Resolução nº 357/05

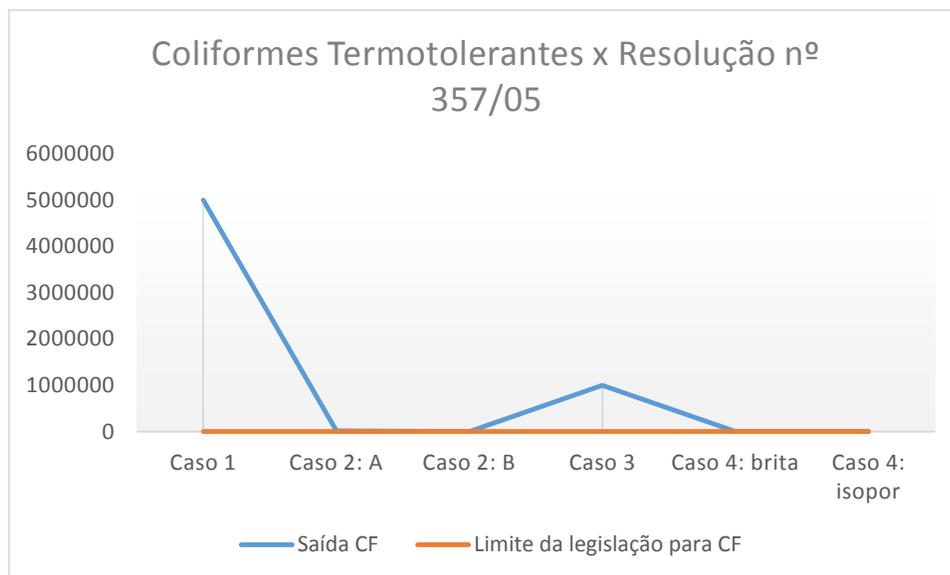


Fonte: Autor (a)

Como é possível notar no gráfico 4, praticamente nenhum dos casos estudados atingiu o padrão determinado pela norma apenas o sistema B do caso 2, que conseguiu zerar a concentração de fósforo, mas isso aconteceu devido a pequena concentração de fósforo que entrou para ser tratado. De acordo com Aiesse (1997), é recomendado que os limites de fósforo total estabelecidos pelo CONAMA sejam revisados, agora levando em conta que ambientes aquáticos tropicais tem uma capacidade muito maior de assimilar fósforo do que as regiões de clima temperado, nos quais a legislação foi baseada.

Em relação as comparações dos valores de coliformes termotolerantes com o limite de 1000 NMP/100mL determinado pela resolução do CONAMA nº 357/05, nota-se no gráfico 5 que três sistemas *wetlands* estudados não passaram: Caso 1, sistema A do Caso 2 e Caso 3.

Gráfico 5 - Comparação dos resultados de Coliformes termotolerantes com a Resolução nº 357/05



Fonte: Autor (a)

No caso 1 os altos valores de coliformes podem ser justificados pelos vários problemas durante a implantação do projeto, como a ruptura do piso da caixa de concreto e a proliferação de algas nos canos de saída do efluente devido a problemas na vedação.

No caso 2, é justificado pela falta de um tratamento preliminar mais específico, de forma a reduzir a quantidade de coliformes fecais que entram no sistema, já que a eficiência de remoção do sistema foi de 99,9%, redução de um log.

Nos sistemas do caso 4, os valores de entrada de coliformes já eram extremamente baixos e obedeciam a norma antes mesmo do tratamento, o autor atribui isso ao tipo de tratamento preliminar realizado antes do lançamento dos efluentes nos *wetlands* construídos.

5.7 Vantagens e desvantagens do sistema

Antes que seja considerado a construção de um sistema WC, é preciso considerar todas as vantagens e desvantagens, como mostradas nas tabelas 7 e 8 de modo a escolher o tipo de sistema adequado para a utilização desejada.

As principais vantagens dos *wetlands* estão relacionadas ao seu baixo custo de implantação e manutenção quando comparadas aos sistemas convencionais, além disso muitos autores citam

que o sistema deve ser usado devido a sua excelente capacidade de remoção, não só da matéria orgânica como também a capacidade de remoção significativa de nutrientes como fósforo e nitrogênio, algo que é insignificante nos tratamentos convencionais.

Tabela 7 - Vantagens dos sistemas *wetlands* construídos

Vantagens dos <i>Wetlands</i> Construídos	Referências Bibliográficas
Baixo custo de construção, operação e manutenção	Michael Jr., 2003 e IWA, 2000, apud Lin et al, 2005
Pouco ou nenhum uso de energia elétrica	Hammer, 1994
Podem ser implementados no próprio local onde a água residuária é gerada (Saneamento descentralizado)	Brix, 1993
Tolerância a flutuações no ciclo hidrológico e nas cargas de poluentes	Kadlec e Knight, 1996 Silvestre e Pedro-de-Jesus, 2002
Podem ser integrados perfeitamente à paisagem natural (função paisagística) Adequação à paisagem natural / harmonia paisagística	Platzer et al., 2007
Apelo estético da presença de vegetação colabora para a redução nos índices de rejeição ao sistema de tratamento de águas residuárias por parte da população	Zanella et al., 2007
Considerável redução de patógenos	Chernicharo, 2001
Não há lodo a ser tratado	Platzer et al., 2007
Independência de produtos químicos e equipamentos mecânicos	Silvestre e Pedro-de-Jesus, 2002
Produção de água para reuso e valorização dos efluentes	Duarte, 2002
Reuso da biomassa produzida como na produção de ração animal, energia (biogás) e biofertilizantes	IEA, 2004
Remoção satisfatória de matéria orgânica, sólidos suspensos, nitrogênio e fósforo	Chernicharo, 2001 Cooper, 1999
Ausência de odores, vibração e ruído	www.wetlands.com.br
Construídos com solo e usando o mínimo de concreto e aço	Sienza et al. 2003
Eficiência na remoção de metais pesados	Kadlec, 1996
Podem ser operados por mão de obra não especializada	Brix (1993)

Fonte: Autor (a)

A principal desvantagem da utilização do sistema seria a grande demanda por área, que acaba por limitar o uso a locais menos populosos. Segundo Silva (2007), os sistemas WC são mais recomendados para cidades pequenas que tem uma maior disponibilidade de área para sua implantação e que podem ser associados a sistemas individuais de tratamento de esgotos

domésticos. Já o tratamento convencional seria mais recomendado para grandes cidades, onde a disponibilidade de área é menor e o contingente populacional é maior.

Outra desvantagem é quanto ao processo de colmatação que ocorre com muita frequência em sistemas deste tipo, para que ele seja minimizado é necessário acrescentar um tratamento preliminar antes de lançar os efluentes no sistema e controlar a carga hidráulica nele lançada.

É importante se atentar também para a questão de proliferação dos mosquitos, principalmente em países tropicais como o Brasil. Atualmente, há um grande surto de doenças transmitidas pelo mosquito *Aedes aegypti*, como a dengue e o zika vírus. Para evitar problemas com o mosquito, não se recomenda o uso de *wetlands* de fluxo superficial em locais tropicais. Por isso mesmo, todos os casos estudados no presente trabalho são de sistemas de fluxo subsuperficial.

Tabela 8 - Desvantagens dos sistemas de *wetlands* construídos

Desvantagens	Referências Bibliográficas
Alta demanda de área	Chernicharo, 2001
Necessidade de Substrato como brita e areia (dependendo do local pode sair caro)	Chernicharo, 2001
Necessidade de manejo das macrófitas (precisa de alguém que tenha conhecimento do assunto, como um botânico)	Chernicharo, 2001
Falta de manutenção acarreta em má distribuição do afluente, formação de caminhos preferenciais e entupimentos resultando, assim, em uma progressiva deterioração do desempenho do sistema que muitas vezes pode se tornar irreversível	Rousseau, 2005
Pode causar problemas com mosquitos, como o <i>Aedes aegypti</i> (sistemas de fluxo superficial)	Silvestre e Pedro-de-Jesus, 2002
Requerer um período de início até a vegetação estar estabelecida	Silvestre e Pedro-de-Jesus, 2002
Eficiências sazonais	Duarte, 2002
Alguns compostos orgânicos removidos pelo sistema podem estar ligados aos sedimentos e se acumularem ao longo do tempo	Silvestre e Pedro-de-Jesus, 2002
Necessidade de caracterizações precisas dos sólidos do efluente a tratar, do tipo e enchimento, do ciclo hidrológico e do regime de temperatura	Silvestre e Pedro-de-Jesus, 2002
Colmatação	Silvestre e Pedro-de-Jesus, 2002

Fonte: Autor (a)

5.8 Dados econômicos

Os custos para a implantação de *wetlands* construídos podem variar muito, por isso deve-se levar em consideração muitas variáveis como: o local onde vai ser implantado o projeto do

sistema, terraplanagem, tipo de impermeabilização, tempo de detenção hidráulica, disponibilidade de material no local, que pode reduzir muito os custos se existir no local solo já adequado e a existência de plantas apropriadas no local que diminui o custo da compra (SAUER e KIMBER, 2001).

Segundo a NFSC (2005), os custos de implantação desse tipo de ecotecnologia fica entre 50 e 90% menores que um sistema de tratamento de efluentes convencional, além disso, por praticamente não usar energia elétrica e produtos químicos, o custo de operação é extremamente baixo.

A tabela 9, compara a eficiência de remoção da matéria orgânica, os principais requisitos de projeto como a área e a quantidade de energia que será gasta e os custos por habitante entre diversos tipos de tratamentos convencionais em relação ao tratamento por *wetlands* construídos. De forma a provar que o sistema é tão ou mais eficiente no tratamento de efluentes quantos os sistemas mais usuais e possui um custo bastante baixo.

Tabela 9 - Comparação de eficiências, requisitos e custos entre diversos tipos de tratamento

Sistemas de tratamento	Eficiência de remoção (Matéria orgânica)	Requisitos		Custos (US\$/hab)
		Área (m ² /hab)	Potência (W/hab)	
Preliminar	0 - 5	< 0,001	≈ 0	2 - 8
Primário	35 - 40	0,03 - 0,05	≈ 0	20 - 30
Fossa séptica com filtro	70 - 90	1,6	≈ 0	60 - 90
Lagoas sem aeração	80 - 90	1,5 - 5	≈ 0	10 - 30
Disposição no solo	85 - 99	1 - 50	≈ 0	5 - 20
Sistemas anaeróbios	60 - 90	0,05 - 0,4	≈ 0	20 - 80
Lagoas com aeração	70 - 90	0,2 - 2,5	1 - 1,7	10 - 30
Filtros biológicos	80 - 93	0,15 - 0,7	0,2 - 1,6	40 - 120
Lodos ativados	85 - 98	0,2 - 0,35	1,5 - 4	40 - 120
Wetlands construídos	65 - 90	1 - 1,6	≈ 0	30 - 50

Fonte: Adaptada de VON SPERLING (2014)

No entanto, é preciso levar em consideração que os custos individuais para implantação de um sistema WC podem ter enormes variações dependendo da parte do mundo onde será construído, além disso sistemas maiores tendem a demonstrar maiores economias (VYZMAZAL, 2010).

5.9 Viabilidade técnica ambiental (riscos e impactos ambientais)

O principal risco ambiental referente ao tratamento de águas residuárias por WC está relacionado a eficiência de remoção do sistema. Mesmo sendo considerado um sistema com elevada remoção de poluentes, ele tem enormes flutuações em sua eficiência, principalmente devido as alterações climáticas. Muitas vezes por não se ter um controle rígido dos valores de entrada e saída como se é exigido dos sistemas convencionais, são lançados efluentes tratados pelo sistema diretamente nos corpos d'água, mesmo sem saber se eles se enquadram na legislação dos órgãos responsáveis como o CONAMA. Para evitar problemas de contaminação dos corpos receptores, é preciso que o controle dos *wetlands* sejam rígidos, mesmo em sistemas pequenos.

Outro problema que deve ser levado em consideração durante a elaboração do projeto é a proximidade com áreas residenciais. Mesmo o sistema sendo usado em projetos de jardins filtrantes é preciso que se tenha em mente que um sistema desse tipo atrai vários de tipos de animais e insetos que podem afetar a saúde humana. Um exemplo prático desse problema, é o mosquito *Aedes aegypti*, que se prolifera em ambientes que contenham água parada como é o caso de *wetlands* construídos de fluxo superficial e pode transmitir várias doenças como a dengue e o zika vírus.

De acordo com informações do EPA (1999), a inserção de outros animais que não pertencem aquele ecossistema pode provocar um enorme desequilíbrio ambiental. Da mesma forma que os animais, uma vegetação que também não pertence aquele lugar pode acabar acarretando problemas ambientais futuros. Por isso durante a implantação do sistema é preciso fazer um estudo de impacto ambiental sobre como ele irá afetar o ecossistema ao redor, de modo a poder minimizar os danos que possam vir a ser causados

Como já foi tratado, os *wetlands* construídos também podem ser usados como tratamento secundário e terciário de esgotos. Segundo Toniato (2005), no caso de tratamento secundário os locais podem não ser agradáveis para a circulação de pessoas, além disso apresentam riscos à saúde humana similares aos sistemas de lagoas, como o risco de contato e transmissão de doenças. Para se evitar problemas deste tipo, é recomendado o uso de cercas, avisos de perigo, entre outros sistemas de controle de acesso.

Já no caso do uso de WC como tratamento terciário, mais especificamente em lagoas de polimento, Toniato (2005), diz que pelo tratamento já ter atingido os requerimentos necessários de tratamento o risco a saúde humana é bem inferior.

É também preciso ficar muito atento a impermeabilização utilizada na implantação do sistema. Ela não deve ser desconsiderada, pois é ela que evita que os efluentes entrem em contato com lençóis freáticos vindo assim a contaminá-los.

Para que esses e outros impactos ambientais sejam evitados é importante que os *wetlands* construídos sejam bem projetados, de modo a garantir o seu pleno funcionamento, otimização da remoção e que se evite contaminação dos corpos receptores.

6. CONCLUSÕES

Ao analisar os dados levantados no decorrer do trabalho, verificou-se que as eficiências de remoção de DBO mantiveram os padrões já esperados variando entre 80 e 90%. Já as eficiências de remoção de nutrientes (fósforo e nitrogênio) e coliformes sofreram grandes variações de 0% a 99,9 %, variações essas que podem ser justificadas pelas diferenças de projeto dos casos estudados como: uso de macrófitas diferentes, material filtrante variável, características do efluente de entrada, variação do tipo de fluxo e principalmente amadurecimento das macrófitas.

Quanto aos limites da legislação CONAMA, é possível notar que em relação aos valores de DBO, DQO e pH todos os sistemas estudados passaram. Os problemas começam com a remoção de nitrogênio, onde o caso 1 não só não passou no limite da norma, como teve uma eficiência de remoção extremamente baixa, justificado pela falta de amadurecimento das plantas. Já ao comparar os valores de fósforo com a legislação é possível notar que houve apenas um único sistema estudado que passou nos limites (Sistema B, Caso 2), o que levou a notar uma falha na legislação brasileira que por se basear em normas europeias não leva em consideração que águas tropicais absorvem maior quantidade de fósforo. Por último os coliformes fecais, com exceção do sistema A do caso 2 e dos dois sistemas do caso 4, também não passaram nos limites da legislação mesmo tem eficiências de remoção elevadas.

Baseado nos resultados obtidos pela comparação com as resoluções nº 357/2005 e nº 430/2011 do CONAMA, é possível concluir que os sistemas *wetlands* não atingem, por si só, todos os parâmetros de qualidade exigidos, por isso há a necessidade de um tratamento preliminar eficaz que proteja o sistema WC e que também ajude a melhorar a qualidade do efluente a ser tratado, como é o exemplo dos sistemas estudados no Caso 4, que por ter um sistema preliminar eficiente obedeceram todos os parâmetros da norma.

Para evitar que haja danos ambientais é importante que, da mesma maneira que os sistemas de tratamento convencionais, haja um maior controle da qualidade do efluente tratado na saída dos *wetlands* para evitar que se polua os corpos receptores, caso não tenham atingido os limites da legislação necessários.

Os *wetlands* construídos, como mostrado em todo o decorrer do trabalho, de fato são tecnologias viáveis técnica, econômica e ambientalmente para tratamento de águas residuárias de

pequenas comunidades. Como foi visto, melhoram a qualidade das águas residuárias, além de reduzirem muito mais a quantidade de nutrientes do que os sistemas convencionais. Mas é preciso estar ciente que existe uma variedade de combinações de plantas, material de suporte e tipos de técnicas de construção e isso influencia na eficiência de remoção dessa ecotecnologia. Por isso é necessário que haja maior incentivo em novas pesquisas para o desenvolvimento desse tipo de sistema no país, de modo a determinar melhor os parâmetros de projeto para um melhor dimensionamento.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AISSE, M. M.. Padrões de qualidade ambiental: discussão de alguns parâmetros relacionados ao lançamento de efluentes líquidos e a qualidade dos corpos d'água receptores. Curitiba: SANARE, v.8, n.8, jul. – dez. 1997.

BRIX, H. Wasterwater treatment in Constructed Wetlands: System Design, Removal Processes, and Treatment Performance. In: MOSHIRI, G.A. (ed.) Constructed Wetlands for Water Quality Improvement. Boca Raton: Lewis Publishers, 1993.

BURMAN, R.D.; NIXON, P.R.; WRIGHT, J.L.; PRUITT, W.O. Water requirements. In: JENSEN, M.E. (Ed.) Design and operation of farm irrigation systems. St. Joseph: ASAE, 1983.

CAERN- Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte. Disponível em: <http://www.caern.rn.gov.br/> (Visualizado em 8 de abril de 2016)

CHERNICHARO, C. A. L. (2001) “Pós-tratamento de Efluentes de Reatores Anaeróbios”. PROSAB – Programa de Pesquisa em Saneamento Básico. Belo Horizonte. 2, 55- 63. 544p.

COLLISCHONN, W. (2010). Disponível em: <http://www.ufrgs.br/propeq1/pp/areasConhec/shadowbox/folhas/grupo.php?g=649> (Vizualizado dia 5 de maio de 2016)

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente (Brasil). Resolução nº430, de 13 de março de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente -CONAMA. Diário oficial (da) República Federativa do Brasil, Brasília, DF, n. 92. Seção 1, p. 89, 16 maio 2011.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Diário oficial (da) República Federativa do Brasil, Brasília, DF, ano 142, n. 53. Seção 1, p. 58-63, 18 mar. 2005

COOPER, P. (1999). “A review of the design and performance of vertical-flow and hybrid reed bed treatment systems”. *Water Science e Technology*, 40(3), 1-9.

COOPER, P. F., JOB, G. D., GREEN, M. B., SHUTES, R. B. E., 1996. Reed Beds and Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. Swindon: WRc plc, 184pp

COOPER, P., e GEEN, B. (1995). “Reed bed treatment systems for sewage treatment in the United Kingdom – The First 10 Years Experience”. *Water Science e Technology*, 32(3), 317-327.

DE COSTA LUNA, Luciana et al. Eficiência de Wetlands construídos com dez dias de detenção hidráulica na remoção de colílagos e bacteriófagos. *Revista de biologia e ciências da terra*, v. 3, n. 1, p. 0, 2003.

EPA (1993). *Subsurface Flow Constructed Wetlands for Wastewater Treatment*. Tecnology Assessment. United States Environmental Protection Agency, Washington, D. C., U.S.A, 87p.

EPA (1999). *Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters*. EPA/625/R/010, Cincinnati, Ohio, U.S.A, 165p.

FRAGMAQ. Disponível em: <http://www.fragmaq.com.br/blog/meio-ambiente/o-que-e-a-ecotecnologia/> (Visualizado em 2 de maio de 2016)

FERREIRA, F. D. ; CARAIOLA, M Eficiência do lodo ativado em fluxo contínuo para tratamento de esgoto. Curitiba, *Revista Acadêmica, ciências agrarias ambientais*, abril/junho 2008

FRERS, Cristian - El uso de plantas acuáticas para el tratamiento de aguas residuales –Técnico Superior em Gestión Ambiental, Consultor ambiental – Observatorio Medioambiental 2008, vol 11(301-305)

HAMMER, D.A. and R.L. Knight. (1994). “Designing constructed wetlands for nitrogen removal”. *Water Science and Technology* 29(4): 15-27.

Humedales Artificiales para el tratamiento de aguas residuales – *Revista Ciencia e Ingeniería Neogranadina* ISSN 0124-8170 N° 13 (Págs. 17-24)

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), 20015. Pesquisa nacional de saneamento básico 2008. IBGE, Brasília, Brasil.

IEA, Instituto de Ecologia Aplicada. (2004). “Wetland”. Disponível em: <http://www.wetland.com.br>.

IWA Specialist group on the use of macrophytes in water pollution control, Constructed wetlands for pollution control: processes, performance, design and operation – scientific and technical report n.8. London –UK. IWA Publishing 2000. 156p.

KADLEC, R. H. (1995). “Overview: surface flow constructed wetlands”. *Water Science e Technology*, 32(3), 1-12.

KADLEC, R. H. e KNIGHT, R. L., 1996. Treatment wetlands. Boca Raton: Lewis Publishers, 893pp.

KADLEC, R.H. e KNIGHT, R. L., VYMAZAL, J., BRIX, H., COOPER, P., HABERL, R. (Eds.), 2000. Constructed wetlands for pollution control— Processes, performance, design and operation. IWA Scientific and Technical Report n°. 8, IWA Publishing, London, UK.

KADLEC, Robert H.; WALLACE, Scott D. - TREATMENT WETLANDS, SECOND EDITION – CRC PRESS (2009)

LAUTENSCHLAGER, S. R. - Modelagem do desempenho de Wetlands construídas. São Paulo, (2001), 90p.

LEITÃO, T. E., BARBOSA, A.E., IKÄVALKO, V.M., MENEZES, J.M., AKHAROVA, T.V. Avaliação e Gestão Ambiental das águas de escorrência de estradas, 2002. 2º Relatório, Relatório 205/02 –GIAS/DH, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 71p.

OLIVEIRA, E. L; TALAMONI, J. L. B; ENOKIBARA, M; FILHO, G. S. C; NETO, L. C. Alagados Construídos no tratamento de águas residuárias do Jardim Botânico Municipal de Bauru/SP. In: 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2005.

PLATZER, C., HOFFMANN, H., CARDIA, W., 2007a. O wetland como componente de ecosan – experiências com o uso e dimensionamento no clima subtropical. In: Proceedings of the International conference on sustainable sanitation: Food and water security for Latin America. Fortaleza, Brazil.

PLATZER, Chr., SENFT, C., HOFFMANN, H., CARDIA, W., COSTA, R. H. R. (2007) Dimensionamento de Wetland de fluxo vertical com nitrificação - Adaptação de modelo europeu para as condições climáticas do Brasil 24. Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária Ambiental (ABES), Belo Horizonte, Brasil

PELA NATUREZA! Disponível em: <http://pelanatureza.pt/agua/ecoinfo/tratamento-de-aguas-residuais> (visualizado em 06 de abril de 2016)

PROSAB – PROGRAMA DE PESQUISA EM SANAMENTO BÁSICO. Nutrientes de esgoto sanitário: utilização e remoção. Rio de Janeiro, 2009. Disponível em: http://www.finep.gov.br/prosab/livros/prosab5_tema%202.pdf. (Visualizado em 25 de fevereiro de 2016).

PIVELI, R. P. ; KATO, M. T. . Qualidade das Águas e Poluição: Aspectos Físico-Químicos. 01. ed. São Paulo/SP: ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2005. v. 01. 285 p.

SALATI, E. Controle de qualidade de água através de sistemas de wetlands construídos. Rio de Janeiro: Fundação Brasileira para o Desenvolvimento Sustentável, 2006.

SALATI, E. Utilização de sistemas de wetlands construídas para tratamento de águas. São Paulo, Biológico, 2003. v.65

SAUER, P. A e KIMBER, A. (2001). “Technical assessment of constructed wetlands for wastewater treatment in Iowa”. IOWA Associate of Municipal Utilites. United States.

SENZIA, A.M, Mashauri, D. A, Mayo, A.W. (2004). “Modelling nitrogen transformation in horizontal subsurface flow constructed wetlands planted with *Phragmites Mauritanus*”. *Journal of Civil Engineering Research and Practice*, 1(2), 1-15.

SEZERINO, P. H. Potencialidade dos filtros plantados com macrófitas (*constructed wetlands*) no pós-tratamento de lagoas de estabilização sob condições de clima subtropical. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, UFSC. Florianópolis, 2006. 171 f.

SILVA, S. C. (2007). “*Wetlands Construídos*” de Fluxo Vertical com Meio Suporte de Solo Natural Modificado no Tratamento de Esgotos Domésticos. Tese de Doutorado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Publicação PTARH.TD-003/07, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 205p.

SILVESTRE, A. e PEDRO-DE-JESUS, M. (2002). *Tratamento de Águas Residuais Domésticas em Zonas Húmidas Artificiais*. Monografia de Final de Curso, Instituto Superior Técnico, Departamento de Engenharia Biológica e Química.

TONIATO, J. V. (2005). Avaliação de um wetland construído no tratamento de efluentes sépticos – Estudo de caso Ilha Grande Rio de Janeiro, Brasil. Tese de mestrado, Fundação Oswaldo Cruz, 95p.

UWAI, M. S.; SILVA, S. M. C.; BATISTA, G. A. – Tratamento de esgoto por wetland implantado em condomínio fechado: avaliação de eficiência correlacionada a ocupação local. ENTAC 2008, 10p.

VALENTIM, M.A.A. Desempenho de leitos cultivados para tratamento de esgoto: contribuição para concepção e operação. Tese de doutorado. Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, SP, 208p. 2003.

VAN KAICK, T. S. Estação de tratamento de esgoto por meio de zona de raízes: uma proposta de tecnologia apropriada para saneamento básico no litoral do Paraná. 2002. 116 f. Dissertação de Mestrado. Centro de Educação Tecnológica do Paraná. Curitiba, Paraná.

VON DREIFUS, Thais. Tratamento de águas residuárias por alagados construídos (*wetlands*) de fluxo subsuperficial horizontal, utilizando vetiver (*chrysopogon zizanoidesl.*): avaliação e desempenho de três leitos distintos. Thais Von Dreifus/ Bauru, 2012.84 f. II.

VON SPERLING, M. Lagoas de estabilização - Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. Belo Horizonte, UFMG. 2 ed. 196 p. 1986.

VON SPERLING, M. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. Vol. 1, 3ª ed. Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – DESA: Editora UFMG. 443p. Belo Horizonte, 20014

VYMAZAL, J. & KROEPFELOVÁ, L. (2008) Wastewater Treatment in Constructed Wetlands with Horizontal Sub-Surface Flow. Environmental pollution, v. 14. Praga: Springer. 566 p

ZANOTELLI, C. T. (2002). *Modelagem Matemática de Nitrogênio e Fósforo em Lagoas Facultativas e de Aguapés para Tratamento de Dejetos de Suínos*. Tese de doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, 180p.