

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SANEAMENTO,
MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS

**AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES
DE OXIRREDUÇÃO EM SISTEMA
ALAGADO CONSTRUÍDO DE ESCOAMENTO
HORIZONTAL SUBSUPERFICIAL**

Gabriel Rodrigues Vasconcellos

Belo Horizonte

2015

**AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES
DE OXIRREDUÇÃO EM SISTEMA
ALAGADO CONSTRUÍDO DE ESCOAMENTO
HORIZONTAL SUBSUPERFICIAL**

Gabriel Rodrigues Vasconcellos

Gabriel Rodrigues Vasconcellos

**AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES
DE OXIRREDUÇÃO EM SISTEMA
ALAGADO CONSTRUÍDO DE ESCOAMENTO
HORIZONTAL SUBSUPERFICIAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de concentração: Saneamento

Linha de pesquisa: Tratamento de Águas Residuárias

Orientador: Prof. Dr. Marcos von Sperling

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2015

V441a	<p>Vasconcellos, Gabriel Rodrigues. Avaliação das condições de oxirredução em sistema alagado construído de escoamento horizontal subsuperficial [manuscrito] / Gabriel Rodrigues Vasconcellos – 2015. 110 f., enc. : il.</p> <p>Orientador: Marcos von Sperling.</p> <p>Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Bibliografia: f.105-110.</p> <p>1. Engenharia Sanitária -Teses. 2. Saneamento -Teses. I. Von Sperling, Marcos. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 628(043)</p>
-------	---



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos

Avenida Antônio Carlos, 6627 - 4º andar - 31270-901 - Belo Horizonte - BRASIL

Telefax: 55 (31) 3409-1882 - posgrad@desa.ufmg.br

<http://www.smarh.eng.ufmg.br>

FOLHA DE APROVAÇÃO

Avaliação das condições de oxirredução em sistema alagado
construído de escoamento horizontal subsuperficial

GABRIEL RODRIGUES VASCONCELLOS

Dissertação defendida e aprovada pela banca examinadora constituída pelos Senhores:

Prof. MARCOS VON SPERLING - Orientador

Prof. CARLOS AUGUSTO DE LEMOS CHERNICHARO

Prof. ANTONIO TEIXEIRA DE MATOS

Prof. RONALDO FIA

Aprovada pelo Colegiado do PG SMARH

Versão Final aprovada por

Profª. Juliana Calábria de Araújo
Coordenadora

Prof. Marcos Von Sperling
Orientador

Belo Horizonte, 30 de março de 2015.

Ofereço a informação;
Dedico ao conhecimento;
Prezo a sabedoria.

“A curiosidade é mais importante do que o conhecimento”.

“A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao seu tamanho original”.

Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

Agradeço a LUZ, que me mantém sempre conectado aos meus objetivos de vida.

Aos companheiros da Missão Rama e aos Guias Confederados.

Aos meus pais, Rodrigo e Marlene, minha irmã Elisa, pelo incentivo e ajuda em minha trajetória de vida. A toda minha família pelo apoio.

Ao meu orientador, Prof. Marcos von Sperling, pelo exemplo, conselhos, competência e conhecimentos transmitidos na realização desta pesquisa.

A André Baxter que foi meu parceiro de trabalho em todos os momentos, sempre me dando apoio e conselhos, gerando resultados satisfatórios para o sucesso da nossa pesquisa.

A Luisa Gazola pela companhia, pelos momentos de amor, carinho e compreensão.

Aos meus colegas de caminhada Thiago Bressani, Bernardo Ornelas e Cynthia Franco, pela ajuda, companheirismo e momentos de diversão.

Aos demais colegas de pesquisa Ricardo Passos, Daniel Dias, Elias Manjate, Luisa Calderón, Túlio Gonçalves, Valéria Rodrigues, Thiago Emmanuel, Mateus Matos, pelos momentos de alegria e cumplicidade.

A Giovanna Calazans por todo apoio, principalmente nos testes estatísticos.

A Cíntia Leal, por toda ajuda e empréstimo de materiais.

Aos amigos Guilherme Tavares e Lucas Mattos, que participam da minha formação.

Agradecimentos especiais a Débora Moraes, Paulo Vieira, Lívia Lana e Jocilene Costa, que me deram incentivo, exemplo permitindo a realização da minha trajetória.

Aos funcionários Suzane, Cassiano, Iara, Júlio, Norma, Lucilaine, Mirna e Deise, que desempenharam seus fundamentais papéis nesta trajetória.

Aos alunos de Iniciação Científica Bruna Emanuela, Calebe Rodrigues, Leandro Jefferson, Fernando Thomaz, Lorena Lorraine, Izabela Jesuino, Isabella Couto, Pamella Martins, Gabriel Lopes, Letícia Rosa, Weverton Lehmann, Amanda Ribeiro, Sara Espeschit, Priscila Costa, Priscila Oliveira, pelo trabalho e comprometimento na realização das análises de laboratório e na geração dos resultados.

Aos DTI Tomas Motta e Gabriel Tadeu, que estiveram sempre presente, agradeço e desejo sucesso.

Ao Sr. Raimundo, Juju e Ronaldo pelos momentos de diversão, pelos ensinamentos, pelo trabalho e dedicação exercido no CePTS.

Aos professores Carlos Chernicharo, Antônio Matos, Juliana Calábria, Cláudio Souza, Sílvia Oliveira, Léo Heller, Eduardo von Sperling, Marcelo Libânio, Valter Pádua e outros professores do departamento de que de alguma forma contribuíram para minha formação.

Ao Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, ao Departamento de Recursos Hídricos e ao programa de pós-graduação SMARH pela oportunidade em minha carreira e em minha vida.

A CAPES, pela bolsa, ao CNPq e FAPEMIG, pelos projetos financiadores que permitiram a realização desta pesquisa e a compra de equipamentos.

RESUMO

A presente pesquisa teve como objetivo monitorar e avaliar as condições ambientais (potencial redox, oxigênio dissolvido, pH, temperatura e radiação solar) em dois Sistemas Alagados Construídos (SAC), um plantado com *Typha latifolia* e um não plantado, ambos de escoamento horizontal subsuperficial. O SAC atuou como pós-tratamento do efluente de um reator tipo UASB recebendo esgotos sanitários. O equivalente populacional aproximado de cada unidade é de 50 habitantes. Ambas operam há aproximadamente sete anos com uma vazão de 7,5 m³/d. O leito das duas unidades encontra-se em avançado estado de colmatação. Cada SAC apresenta 25 metros de comprimento por 3 m de largura e uma altura do leito de 0,4 m, empregando escória de alto forno como meio suporte. O monitoramento das condições ambientais foi realizado em dois pontos ao longo do comprimento (região de central e região de saída do leito), da unidade plantada e não plantada, e em seis reatores de leito fixo (RLF), que objetivaram avaliar a influência da vegetação e diferenças das condições ambientais ao longo do comprimento de cada leito. Além da comparação ao longo do comprimento, foram investigadas as condições ambientais em RLF plantado com *Typha latifolia*, plantado com *Canna x generalis* e não plantado. Os resultados indicam predominância de condições redutoras no SAC. A presença da vegetação aumentou os valores de potencial redox e reduziu os valores de pH, mantendo-os próximos à neutralidade. Em geral, os valores de potencial redox, oxigênio dissolvido e pH foram mais elevados na região de saída do SAC plantado e não plantado do que na região central.

ABSTRACT

This research aimed to evaluate the environmental conditions (redox potential, dissolved oxygen, pH, temperature and solar radiation) in two Constructed Wetland Systems (CWS), one planted with *Typha latifolia* and the other not planted, both with subsurface horizontal flow. The CWS served as post-treatment of the effluent from a UASB reactor, which received raw sewage. Each treatment unit has a capacity to treat approximately 50 inhabitants. Both units have been operating for about seven years with a flow rate of 7,5 m³/d. The filter bed of both units is in an advanced state of clogging. Each CWS is 25 meters long, 3 meters wide and have bed height of 0.4 meters, using blast furnace slag as a means of support. The monitoring of environmental conditions was conducted at two points along the length (inlet region and outlet region of the bed), of the planted and not planted units, and six fixed bed reactors (FBR), for evaluating the influence of vegetation and differences of environmental conditions along the length of each bed. In addition to the comparison along the length, environmental conditions were also investigated in the FBR planted with *Typha latifolia*, with *Canna x generalis*, as well as the not planted. The results indicate a predominance of reducing conditions in the CWS. The presence of vegetation increased redox potential values and reduced pH values, keeping them close to neutral. In general, the redox potential values, dissolved oxygen concentration and pH values were higher at the outlet region of the planted CWS and not planted CWS.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	9
LISTA DE TABELAS.....	13
LISTA DE ABREVIATURAS	15
1 INTRODUÇÃO.....	16
2 OBJETIVOS	18
2.1 OBJETIVO GERAL.....	18
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
3 REVISÃO DA LITERATURA	19
3.1 OS SISTEMAS ALAGADOS CONSTRUÍDOS.....	19
3.2 A INFLUÊNCIA DAS PLANTAS NO DESEMPENHO DE SISTEMAS ALAGADOS CONSTRUÍDOS	21
3.3 O POTENCIAL DE OXIRREDUÇÃO.....	26
3.4 O REATOR DE LEITO FIXO	32
3.5 COMPORTAMENTO HIDRODINÂMICO DE REATORES REAIS.....	33
4 MATERIAL E MÉTODOS	35
4.1 CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE ESTUDO.....	35
4.2 CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA ALAGADO CONSTRUÍDO	35
4.3 EXPERIMENTOS COM REATORES DE LEITO FIXO	37
4.4 CARACTERÍSTICAS DOS POÇOS DE MONITORAMENTO	42
4.5 PONTOS DE MONITORAMENTO.....	43
4.6 PARÂMETROS E MÉTODOS DE MONITORAMENTO	44
4.7 ANÁLISE DOS DADOS AMBIENTAIS	47
4.8 COMPORTAMENTO HIDRODINÂMICO DO REATOR DE LEITO FIXO	47
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
5.1 AVALIAÇÃO DO DESENVOLVIMENTO DAS PLANTAS NOS REATORES DE LEITO FIXO	52
5.2 MONITORAMENTO DO SISTEMA ALAGADO CONSTRUÍDO	56
5.3 AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO HIDRODINÂMICO DOS REATORES DE LEITO FIXO.....	60
5.4 MONITORAMENTO DAS CONDIÇÕES AMBIENTAIS NO SISTEMA ALAGADO CONSTRUÍDO E NOS REATORES DE LEITO FIXO	63
5.4.1 <i>Avaliação global das condições ambientais no Sistema Alagado Construído e nos Reatores de Leito Fixo</i>	64
5.4.1.1 Potencial redox.....	64
5.4.1.2 Oxigênio dissolvido.....	66
5.4.1.3 Potencial hidrogeniônico	68
5.4.1.4 Temperatura.....	70
5.4.2 <i>Avaliação da influência da vegetação</i>	72
5.4.2.1 Comparação: SACP central com SACNP central.....	72
5.4.2.2 Comparação: SACP saída com SACNP saída.....	75
5.4.2.3 Comparação: RLF <i>Typha</i> central com RLFNP central.....	77
5.4.2.4 Comparação: RLF <i>Typha</i> saída com RLFNP saída.....	80
5.4.3 <i>Avaliação da posição ao longo do comprimento do leito</i>	82
5.4.3.1 Comparação: SACP central com SACP saída	83
5.4.3.2 Comparação: SACNP central com SACNP saída.....	84
5.4.3.3 Comparação: RLF <i>Typha</i> central com RLF <i>Typha</i> saída.....	87
5.4.3.4 Comparação: RLF <i>Canna</i> central com RLF <i>Canna</i> saída	88
5.4.3.5 Comparação: RLFNP central com RLFNP saída.....	89
5.4.4 <i>Avaliação do Reator de Leito Fixo como método de análise aplicado a Sistema Alagado Construído</i>	91
5.4.4.1 Comparação: SACP central com RLF <i>Typha</i> central.....	91
5.4.4.2 Comparação: SACNP central com RLFNP central.....	92
5.4.4.3 Comparação: SACP saída com RLF <i>Typha</i> saída.....	94
5.4.4.4 Comparação: SACNP saída com RLFNP saída.....	95

5.4.5	<i>Avaliação da espécie de planta nos reatores de leito fixo</i>	97
5.4.5.1	Comparação: RLF <i>Typha</i> central com RLF <i>Canna</i> central	97
5.4.5.2	Comparação: RLF <i>Typha</i> saída com RLF <i>Canna</i> saída	99
5.4.6	<i>Síntese dos resultados dos testes estatísticos</i>	100
6	CONCLUSÕES	103
7	RECOMENDAÇÕES	104
	REFERÊNCIAS	105

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Desenho esquemático de um Sistema de alagado construído de escoamento horizontal subsuperficial.	20
Figura 3.2: Perfil longitudinal da concentração de oxigênio dissolvido (em mg/L) da modelagem matemática em um Sistema de alagado construído de escoamento horizontal subsuperficial não plantado (acima) e plantado (abaixo).	20
Figura 3.3: Ilustração do perfil longitudinal da modelagem matemática de bactérias em um Sistema de alagado construído de escoamento horizontal subsuperficial.	21
Figura 3.4: Formação de microzonas na região da rizosfera.	24
Figura 3.5: Taxa de liberação de oxigênio em duas espécies de plantas em função do potencial redox.	25
Figura 3.6: Processos de transformação em função do potencial redox.	28
Figura 3.7: Variações diárias do potencial redox operando sob condições de fluxo intermitente. Obs.: as setas representam episódios de alimentação.	30
Figura 3.8: Variações diárias do potencial redox e oxigênio dissolvido na rizosfera correlacionada com a intensidade luminosa em PFR.	31
Figura 3.9: Concepção do <i>planted fixed bed reactor</i>	32
Figura 4.1: Reator UASB (esquerda) e os Sistemas Alagados Construídos (direita).	36
Figura 4.2: Evolução do escoamento superficial no Sistema Alagado Construído.	37
Figura 4.3: Representação da amostra indeformada do leito.	38
Figura 4.4: Desenho esquemático do funcionamento hidráulico do reator de leito fixo.	39
Figura 4.5: Reprodução dos reatores de leito fixo e a região de representatividade.	40
Figura 4.6: Cestas plantadas com <i>Typha latifolia</i> e <i>Canna x genaralis</i> (esquerda) ambientando no leito do SAC plantado; e cesta não plantada (direita) ambientando no leito do SAC não plantado.	41
Figura 4.7: Cesta do RLF não plantado ao lado da cesta do leito.	41
Figura 4.8: Aparato experimental dos reatores de leito fixo.	42
Figura 4.9: Fluxograma do sistema alagado construído, localização dos poços de monitoramento e das cestas do leito. Obs.: Desenho fora de escala. Legenda: EB=esgoto bruto; UASB= <i>upflow anaerobic sludge blanket</i> ; SACP=sistema alagado construído plantado; SACNP=sistema alagado construído não plantado; PM=poço de monitoramento; CL=cesta do leito.	42
Figura 4.10: Características e instalação do poço de monitoramento. Detalhe do poço (superior esquerda), instalação do poço (direita) e poço instalado (inferior esquerda).	43
Figura 4.11: Fluxograma do sistema alagado construído, localização dos poços de monitoramento, dos reatores de leito fixo e dos pontos de coleta. Obs.: Desenho fora de escala. Legenda: EB=esgoto bruto; UASB= <i>upflow anaerobic sludge blanket</i> ; SACP=sistema alagado construído plantado; SACNP=sistema alagado construído não plantado; RLF=reator de leito fixo; PM=poço de monitoramento.	44
Figura 4.12: Desenho esquemático do funcionamento da célula de fluxo.	46
Figura 4.13: Interior do abrigo da bomba peristáltica.	47
Figura 4.14: Representação esquemática do teste com traçador no reator de leito fixo.	50
Figura 4.15: Testes hidrodinâmicos no reator de leito fixo não plantado (esquerda) e no reator de leito fixo plantado com <i>Typha</i> (direita).	51
Figura 5.1: Cestas ambientadas no leito do Sistema Alagado Construído plantado e não plantado em 09/09/2014.	52
Figura 5.2: Cestas dos Reatores de Leito Fixo em 30/10/2014.	53
Figura 5.3: Interior do RLF plantado com <i>Canna</i> região central (esquerda) e do RLF não plantado região saída (direita) em 30/10/2014.	54
Figura 5.4: Interior do RLF plantado com <i>Typha</i> saída (esquerda) e interior do RLF plantado com <i>Canna</i> saída (direita) em 30/10/2014.	54
Figura 5.5: Cestas dos Reatores de Leito Fixo em 07/01/2015.	55
Figura 5.6: Biofilme da cesta do RLF não plantado região de saída (esquerda) e biofilme do interior do RLF não plantado região de saída (direita) em 07/01/2015.	56

Figura 5.7: Perda de carga nos reatores de leito fixo após 170 dias de operação.	56
Figura 5.8: Gráfico box-plot dos dados de DBO nos pontos monitorados. Legenda: UASB= <i>upflow anaerobic sludge blanket</i> ; SACP=sistema alagado construído plantado; SACNP=sistema alagado construído não plantado; DBO=demanda bioquímica de oxigênio.	57
Figura 5.9: Gráfico box-plot dos dados de DQO nos pontos monitorados. Legenda: UASB= <i>upflow anaerobic sludge blanket</i> ; SACP=sistema alagado construído plantado; SACNP=sistema alagado construído não plantado; DQO=demanda química de oxigênio.	58
Figura 5.10: Gráfico box-plot dos dados de SST nos pontos monitorados. Legenda: UASB= <i>upflow anaerobic sludge blanket</i> ; SACP=sistema alagado construído plantado; SACNP=sistema alagado construído não plantado; SST=sólidos suspensos totais.	58
Figura 5.11: Gráfico box-plot das eficiências de remoção de SST nos Sistema Alagado Construído plantado e não plantado. Legenda: SACP=sistema alagado construído plantado; SACNP=sistema alagado construído não plantado; DBO=Demanda Bioquímica de Oxigênio.	59
Figura 5.12: Gráfico box-plot das eficiências de remoção de DQO nos Sistema Alagado Construído plantado e não plantado. Legenda: SACP=sistema alagado construído plantado; SACNP=sistema alagado construído não plantado; DBO=Demanda Química de Oxigênio.	59
Figura 5.13: Gráfico box-plot das eficiências de remoção de SST nos Sistema Alagado Construído plantado e não plantado. Legenda: SACP=sistema alagado construído plantado; SACNP=sistema alagado construído não plantado; SST=Sólidos em Suspensão Totais.	60
Figura 5.14: Gráfico dos ajustes à distribuição dos tempos de residência (função gama) no teste do RLF sem recirculação (esquerda) e com recirculação (direita).	63
Figura 5.15: Gráfico box-plot dos dados de potencial redox (Eh) nos pontos monitorados.	66
Figura 5.16: Gráfico box-plot dos dados de oxigênio dissolvido (OD) nos pontos monitorados.	68
Figura 5.17: Gráfico box-plot dos dados de pH nos pontos monitorados.	70
Figura 5.18: Gráfico box-plot dos dados de temperatura nos pontos monitorados.	72
Figura 5.19: Gráfico box-plot das comparações de potencial redox (esquerda) e oxigênio dissolvido (direita) entre o SAC plantado da região central (ponto C) com o SAC não plantado da região central (ponto J).	73
Figura 5.20: Gráfico box-plot das comparações de pH (esquerda) e temperatura (direita) entre o SAC plantado da região central (ponto C) com o SAC não plantado da região central (ponto J).	74
Figura 5.21: Monitoramento diário do oxigênio dissolvido nos pontos C e J entre os dias 09/10/2014 e 13/10/2014.	74
Figura 5.22: Gráfico box-plot das comparações de potencial redox (esquerda) e oxigênio dissolvido (direita) entre o SAC plantado da região de saída (ponto F) com o SAC não plantado da região de saída (ponto L).	76
Figura 5.23: Gráfico box-plot das comparações de pH (esquerda) e temperatura (direita) entre o SAC plantado da região de saída (ponto F) com o SAC não plantado da região de saída (ponto L).	76
Figura 5.24: Monitoramento diário do potencial redox nos pontos F e L entre os dias 14/10/2014 e 17/10/2014.	76
Figura 5.25: Monitoramento diário do oxigênio dissolvido nos pontos F e L entre os dias 14/10/2014 e 17/10/2014.	77
Figura 5.26: Gráfico box-plot das comparações de potencial redox (esquerda) e oxigênio dissolvido (direita) entre o RLF plantado com <i>Typha</i> da região central (ponto D) com o RLF não plantado da região central (ponto K).	78
Figura 5.27: Gráfico box-plot das comparações de pH (esquerda) e temperatura (direita) entre o RLF plantado com <i>Typha</i> da região central (ponto D) com o RLF não plantado da região central (ponto K).	78
Figura 5.28: Monitoramento diário do potencial redox nos pontos D e K entre os dias 19/09/2014 e 25/09/2014.	79
Figura 5.29: Monitoramento diário do oxigênio dissolvido nos pontos D e K entre os dias 19/09/2014 e 25/09/2014.	79
Figura 5.30: Gráfico box-plot das comparações de potencial redox (esquerda) e oxigênio dissolvido (direita) entre o RLF plantado com <i>Typha</i> da região de saída (ponto G) com o RLF não plantado da região de saída (ponto M).	80

Figura 5.31: Gráfico box-plot das comparações de pH (esquerda) e temperatura (direita) entre o RLF plantado com <i>Typha</i> da região de saída (ponto G) com o RLF não plantado da região de saída (ponto M).	81
Figura 5.32: Monitoramento diário da radiação solar e do oxigênio dissolvido nos pontos G e M entre os dias 25/09/2014 e 02/10/2014.	81
Figura 5.33: Monitoramento diário da temperatura do ar e do oxigênio dissolvido nos pontos G e M entre os dias 25/09/2014 e 02/10/2014.	82
Figura 5.34: Gráfico box-plot das comparações de potencial redox (esquerda) e oxigênio dissolvido (direita) entre o SAC plantado da região central (ponto C) com o SAC plantado da região de saída (ponto F).	83
Figura 5.35: Gráfico box-plot das comparações de pH (esquerda) e temperatura (direita) entre o SAC plantado da região central (ponto C) com o SAC plantado da região de saída (ponto F).	84
Figura 5.36: Monitoramento diário do oxigênio dissolvido nos pontos C e F entre os dias 18/10/2014 e 21/10/2014.	84
Figura 5.37: Gráfico box-plot das comparações de potencial redox (esquerda) e oxigênio dissolvido (direita) entre o SAC não plantado da região central (ponto J) com o SAC não plantado da região de saída (ponto L).	85
Figura 5.38: Gráfico box-plot das comparações de pH (esquerda) e temperatura (direita) entre o SAC não plantado da região central (ponto J) com o SAC não plantado da região de saída (ponto L).	85
Figura 5.39: Monitoramento diário da radiação solar e potencial redox nos pontos J e L entre os dias 23/10/2014 e 30/10/2014.	86
Figura 5.40: Monitoramento diário da temperatura do ar e potencial redox nos pontos J e L entre os dias 23/10/2014 e 30/10/2014.	86
Figura 5.41: Monitoramento diário do oxigênio dissolvido nos pontos J e L entre os dias 23/10/2014 e 30/10/2014.	87
Figura 5.42: Gráfico box-plot das comparações de potencial redox (esquerda) e oxigênio dissolvido (direita) entre o RLF plantado com <i>Typha</i> da região central (ponto D) com o RLF plantado com <i>Typha</i> da região de saída (ponto G).	88
Figura 5.43: Gráfico box-plot das comparações de pH (esquerda) e temperatura (direita) entre o RLF plantado com <i>Typha</i> da região central (ponto D) com o RLF plantado com <i>Typha</i> da região de saída (ponto G).	88
Figura 5.44: Gráfico box-plot das comparações de potencial redox entre o RLF plantado com <i>Canna</i> da região central (ponto E) com o RLF plantado com <i>Canna</i> da região de saída (ponto H).	89
Figura 5.45: Gráfico box-plot das comparações de pH (esquerda) e temperatura (direita) entre o RLF plantado com <i>Canna</i> da região central (ponto E) com o RLF plantado com <i>Canna</i> da região de saída (ponto H).	89
Figura 5.46: Gráfico box-plot das comparações de potencial redox (esquerda) e oxigênio dissolvido (direita) entre o RLF não plantado da região central (ponto K) com o RLF não plantado da região de saída (ponto M).	90
Figura 5.47: Gráfico box-plot das comparações de pH (esquerda) e temperatura (direita) entre o RLF não plantado da região central (ponto K) com o RLF não plantado da região de saída (ponto M).	90
Figura 5.48: Gráfico box-plot das comparações de potencial redox (esquerda) e oxigênio dissolvido (direita) entre o SAC plantado da região central (ponto C) com o RLF plantado com <i>Typha</i> da região central (ponto D).	92
Figura 5.49: Gráfico box-plot das comparações de pH (esquerda) e temperatura (direita) entre o SAC plantado da região central (ponto C) com o RLF plantado com <i>Typha</i> da região central (ponto D).	92
Figura 5.50: Gráfico box-plot das comparações de potencial redox (esquerda) e oxigênio dissolvido (direita) entre o SAC não plantado da região central (ponto J) com o RLF não plantado da região central (ponto K).	93
Figura 5.51: Gráfico box-plot das comparações de pH (esquerda) e temperatura (direita) entre o SAC não plantado da região central (ponto J) com o RLF não plantado da região central (ponto K).	94

Figura 5.52: Gráfico box-plot das comparações de potencial redox (esquerda) e oxigênio dissolvido (direita) entre o SAC plantado região de saída (ponto F) com o RLF plantado com <i>Typha</i> da região de saída (ponto G).	95
Figura 5.53: Gráfico box-plot das comparações de pH (esquerda) e temperatura (direita) entre o SAC plantado região de saída (ponto F) com o RLF plantado com <i>Typha</i> da região de saída (ponto G).	95
Figura 5.54: Gráfico box-plot das comparações de potencial redox (esquerda) e oxigênio dissolvido (direita) entre o SAC não plantado da região de saída (ponto L) com o RLF não plantado da região de saída (ponto M).	96
Figura 5.55: Gráfico box-plot das comparações de pH (esquerda) e temperatura (direita) entre o SAC não plantado da região de saída (ponto L) com o RLF não plantado da região de saída (ponto M).	97
Figura 5.56: Gráfico box-plot das comparações de potencial redox (esquerda) e oxigênio dissolvido (direita) entre o RLF plantado com <i>Typha</i> da região central (ponto D) com o RLF plantado com <i>Canna</i> da região central (ponto E).	98
Figura 5.57: Gráfico box-plot das comparações de pH (esquerda) e temperatura (direita) entre o RLF plantado com <i>Typha</i> da região central (ponto D) com o RLF plantado com <i>Canna</i> da região central (ponto E).	98
Figura 5.58: Monitoramento diário do oxigênio dissolvido nos pontos D e E entre os dias 19/09/2014 e 25/09/2014.	99
Figura 5.59: Gráfico box-plot das comparações de potencial redox entre o RLF plantado com <i>Typha</i> da região central (ponto D) com o RLF plantado com <i>Canna</i> da região central (ponto E) utilizando os dados do monitoramento realizado em 19/09/2014 a 25/09/2014.	99
Figura 5.60: Gráfico box-plot das comparações de potencial redox (esquerda) e oxigênio dissolvido (direita) entre o RLF plantado com <i>Typha</i> da região de saída (ponto G) com o RLF plantado com <i>Canna</i> da região de saída (ponto H).	100
Figura 5.61: Gráfico box-plot das comparações de pH (esquerda) e temperatura (direita) entre o RLF plantado com <i>Typha</i> da região de saída (ponto G) com o RLF plantado com <i>Canna</i> da região de saída (ponto H).	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Vantagens e desvantagens da utilização de plantas para fitorremediação.	23
Tabela 3.2: Tipos de reações de oxirredução promovidas por microrganismos.	28
Tabela 3.3: Graus de dispersão em reatores.	34
Tabela 4.1: Características construtivas de cada leito do Sistema de Alagado Construído.	36
Tabela 4.2: Características das unidades em estudo.	39
Tabela 4.3: Origem e destino do meio suporte.	40
Tabela 4.4: Esquema de alimentação dos reatores de leito fixo.	43
Tabela 4.5: Esquema de alimentação dos reatores de leito fixo.	44
Tabela 4.6: Períodos de monitoramento realizado pelas sondas multiparamétricas, pontos de monitoramento e objetivos no ano de 2014.	46
Tabela 4.7: Condições dos testes hidrodinâmicos realizados no RLF.	48
Tabela 4.8: Volume das unidades em estudo.	49
Tabela 5.1: Estatística descritiva das concentrações de DBO, DQO e SST nos pontos monitorados nos anos de 2013 e 2014.	57
Tabela 5.2: Estatística descritiva das eficiências de remoção do SAC plantado e do SAC não plantado calculadas a partir da carga removida.	59
Tabela 5.3: Resultados dos ensaios hidrodinâmicos nos reatores de leito fixo.	61
Tabela 5.4: Estatística descritiva dos dados de potencial redox (Eh) nos pontos monitorados.	65
Tabela 5.5: Estatística descritiva dos dados de oxigênio dissolvido (OD) nos pontos monitorados.	67
Tabela 5.6: Estatística descritiva dos dados de pH nos pontos monitorados.	69
Tabela 5.7: Estatística descritiva dos dados de temperatura nos pontos monitorados.	71
Tabela 5.8: Resultados do teste estatístico da comparação entre o SAC plantado da região central (ponto C) com o SAC não plantado da região central (ponto J).	73
Tabela 5.9: Resultados do teste estatístico da comparação entre o SAC plantado da região de saída (ponto F) com o SAC não plantado da região de saída (ponto L).	75
Tabela 5.10: Resultados do teste estatístico da comparação entre o RLF plantado com <i>Typha</i> da região central (ponto D) com o RLF não plantado da região central (ponto K).	77
Tabela 5.11: Resultados do teste estatístico da comparação entre o RLF plantado com <i>Typha</i> da região de saída (ponto G) com o RLF não plantado da região de saída (ponto M).	80
Tabela 5.12: Resultados do teste estatístico da comparação entre o SAC plantado da região central (ponto C) com o SAC plantado da região de saída (ponto F).	83
Tabela 5.13: Resultados do teste estatístico da comparação entre o SAC não plantado da região central (ponto J) com o SAC não plantado da região de saída (ponto L).	85
Tabela 5.14: Resultados do teste estatístico da comparação entre o RLF plantado com <i>Typha</i> da região central (ponto D) com o RLF plantado com <i>Typha</i> da região de saída (ponto G).	87
Tabela 5.15: Resultados do teste estatístico da comparação entre o RLF plantado com <i>Canna</i> da região central (ponto E) com o RLF plantado com <i>Canna</i> da região de saída (ponto H).	88
Tabela 5.16: Resultados do teste estatístico da comparação entre o RLF não plantado da região central (ponto K) com o RLF não plantado da região de saída (ponto M).	90
Tabela 5.17: Resultados do teste estatístico da comparação entre o SAC plantado da região central (ponto C) com o RLF plantado com <i>Typha</i> da região central (ponto D).	91
Tabela 5.18: Resultados do teste estatístico da comparação entre o SAC não plantado da região central (ponto J) com o RLF não plantado da região central (ponto K).	93
Tabela 5.19: Resultados do teste estatístico da comparação entre o SAC plantado região de saída (ponto F) com o RLF plantado com <i>Typha</i> da região de saída (ponto G).	94
Tabela 5.20: Resultados do teste estatístico da comparação entre o SAC não plantado da região de saída (ponto L) com o RLF não plantado da região de saída (ponto M).	96
Tabela 5.21: Resultados do teste estatístico da comparação entre o RLF plantado com <i>Typha</i> da região central (ponto D) com o RLF plantado com <i>Canna</i> da região central (ponto E).	97

Tabela 5.22: Resultados do teste estatístico da comparação entre o RLF plantado com <i>Typha</i> da região de saída (ponto G) com o RLF plantado com <i>Canna</i> da região de saída (ponto H).	99
Tabela 5.23: Resumo das comparações realizadas pelos testes estatísticos.	101
Tabela 5.24: Resumo das diferenças entre os valores de medianas do sistema alagado construído e reator de leito fixo.....	102

LISTA DE ABREVIATURAS

CE	Condutividade Elétrica
CePTS	Centro de Pesquisa e Treinamento em Saneamento
CL	Cesta do Leito
COPASA	Companhia de Saneamento de Minas Gerais
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DESA	Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental
DQO	Demanda Química de Oxigênio
Eh	Potencial Redox
NaCl	Cloreto de Sódio
OD	Oxigênio Dissolvido
pH	Potencial Hidrogeniônico
PM	Poço de Monitoramento
POR	Potencial de Oxirredução
PVC	Policloreto de Vinila
Q	Vazão
RLF	Reator de Leito Fixo
RLFNP	Reator de Leito Fixo Não Plantado
RLFP	Reator de Leito Fixo Plantado
SAC	Sistema de Alagado Construído
SACNP	Sistema de Alagado Construído Não Plantado
SACP	Sistema de Alagado Construído Plantado
SST	Sólidos Suspensos Totais
TDH	Tempo de Detenção Hidráulica
UASB	<i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket</i>
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais

1 INTRODUÇÃO

O progresso da infraestrutura do saneamento mundial está sendo significativo, mas não satisfatório. No ano de 2012, cerca de 2,5 bilhões de pessoas não tinham acesso a uma instalação sanitária adequada, abaixo dos 2,7 bilhões em 1990, representando uma redução de 7%. Se as tendências continuarem, ainda haverá aproximadamente 2,4 bilhões de pessoas sem acesso ao saneamento básico em 2015 (WHO/UNICEF, 2014). Em 2013, no Brasil cerca de 42,4 milhões de habitantes ainda destinavam esgotos sanitários de forma inadequada e apenas 39% dos esgotos gerados no país recebiam algum tipo de tratamento (PLANSAB, 2013; SNIS, 2014). Esses dados demonstram haver uma ampla necessidade de tratamento de esgotos, a fim de alcançar a salubridade ambiental, protegendo e melhorando a qualidade de vida da população. O avanço na implantação das tecnologias de tratamento deve superar as taxas de crescimento populacional como o propósito de suprir estas demandas.

O Brasil possui um clima favorável para implantação de sistemas naturais de tratamento de esgotos, além de possuir amplo território e ter tradição na utilização de sistemas de baixo custo e simplicidade operacional.

Os Sistemas de Alagados Construídos (SAC), também conhecidos internacionalmente como *Constructed Wetlands*, são sistemas naturais projetados para remover poluentes em águas residuárias recriando, em ambiente controlado, processos que ocorrem em pântanos naturais, utilizando uma combinação de plantas, microrganismos e meio suporte (VYMAZAL, 2010). Sua utilização tem sido comum em vários países, devido as boas eficiências de remoção, facilidade construtiva, simplicidade operacional, além de oferecer ao local implantado um diferencial na harmonia paisagística.

A aplicação dos SAC para tratamento de águas residuárias torna-se uma técnica economicamente atrativa, especialmente em áreas que não possuem sistemas públicos de esgotamento ou que sejam economicamente subdesenvolvidas (BRIX, 1999; VYMAZAL, 2005).

Segundo Kadlec e Wallace (2009), à medida que os estudos em SAC vão se desenvolvendo, observa-se sua complexidade e necessidade de aprofundar, principalmente no que diz respeito à função das plantas nos processos de tratamento e no crescimento de microrganismos. É preciso compreender, também, se as condições ambientais (potencial redox, oxigênio dissolvido, pH, temperatura, radiação solar, etc.) influenciam significativamente na

incorporação de oxigênio pelas plantas, na mudança da comunidade microbiana e no desempenho do sistema.

A vegetação exerce um importante papel nos processos de tratamento dos SAC. Os efeitos mais importantes, segundo Brix (1997), são de: promover área superficial para crescimento de microrganismos; absorver nutrientes; incorporar oxigênio no meio líquido; estabilizar a superfície dos SAC; oferecer boas condições para filtração; evitar que os sistemas de escoamento vertical colmatem; e embelezamento paisagístico.

O trabalho estudou um SAC de escoamento horizontal subsuperficial atuando como pós-tratamento de efluente de um reator tipo UASB recebendo esgotos sanitários. O estudo foi desenvolvido no centro de pesquisas da Universidade Federal de Minas Gerais e objetivou compreender o desempenho da vegetação através de condições ambientais, utilizando um Reator de Leito Fixo (RLF) como método de investigação.

A pesquisa em questão está inserida em uma pesquisa mais ampla, envolvendo um doutorado, e ambas contaram com financiamento do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG).

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar as condições ambientais em Sistemas Alagados Construídos, em elevado estado de colmatação, plantado e não plantado, atuantes no pós-tratamento de efluente de um reator tipo UASB, ao longo do comprimento do leito e em função das variações ao longo do dia.

2.2 Objetivos específicos

- Avaliar se a presença das plantas altera as condições ambientais (potencial redox, oxigênio dissolvido, temperatura e pH) no Sistema Alagado Construído;
- Avaliar as condições ambientais (potencial redox, oxigênio dissolvido, pH e temperatura) ao longo do comprimento e do dia no Sistema Alagado Construído;
- Avaliar duas espécies de plantas (*Typha latifolia* e *Canna x genaralis*) atuantes em Sistema Alagado Construído e suas influências nas condições ambientais (potencial redox, oxigênio dissolvido, temperatura e pH);
- Avaliar a representatividade da metodologia do Reator de Leito Fixo para representar o Sistema Alagado Construído.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Os Sistemas Alagados Construídos

Os Sistemas de Alagados Construídos começaram a ser desenvolvidos na Alemanha em 1950 por Kathe Seidel. Em 1960 Seidel e Kickuth aprimoraram o sistema para tratamento de fenóis e de efluentes gerados em usinas de processamento de leite (PHILIPPI e SEZERINO, 2004; KADLEC e WALLACE, 2009). A partir de então, a tecnologia começou a ser desenvolvida nos Estados Unidos e Europa. Atualmente, os SAC são aplicados em todo o mundo para tratamento de águas residuárias e industriais.

Os SAC são uma tecnologia de tratamento que promovem a despoluição das águas residuárias a partir de processos físicos, químicos e biológicos realizados por um conjunto de microrganismos em parceria com as plantas. Para aperfeiçoar os parâmetros de projeto e maximizar as eficiências de remoção de poluentes em SAC, é preciso compreender a interação planta/microrganismo e as rotas de degradação de poluentes (KAPPELMEYER *et al.*, 2002).

Existem dois tipos de configuração de SAC em função do regime de escoamento, sendo elas: SAC de escoamento superficial e de escoamento subsuperficial. Os SAC de escoamento subsuperficial são divididos em horizontal e vertical (KADLEC e WALLACE, 2009). Diversas configurações podem ser combinadas entre si, inclusive utilizando outros sistemas de tratamento, objetivando aperfeiçoar a remoção de poluentes específicos ou se enquadrando a requisitos da legislação local.

Os SAC de escoamento horizontal subsuperficial utilizam um meio suporte para a fixação de plantas e aderência de microrganismos. O líquido é mantido abaixo da superfície do leito e esco horizontalmente de uma extremidade a outra. A Figura 3.1 ilustra a configuração desse modelo.

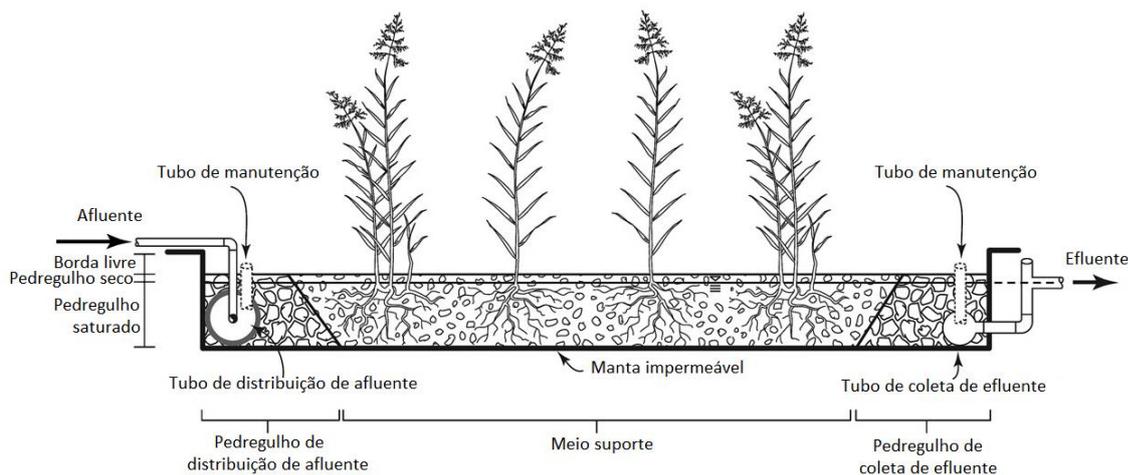


Figura 3.1: Desenho esquemático de um Sistema de alagado construído de escoamento horizontal subsuperficial.
 Fonte: Adaptado de Nivala *et al.* (2013).

Por meio de modelos matemáticos, Langergraber e Šimůnek (2012), simularam a influência das plantas na fixação da biomassa em SAC de escoamento horizontal subsuperficial. Os autores objetivaram comparar uma unidade plantada com *Phragmites australis* e outra unidade não plantada. Para alimentar o modelo, foi adotado uma liberação de oxigênio pelas plantas de $5 \text{ gO}_2/\text{m}^2.\text{d}^{-1}$, valor tipicamente reportado para a espécie de planta utilizada. A Figura 3.2 mostra o perfil longitudinal do SAC considerando a presença e ausência das plantas. Os resultados ainda mostraram que na unidade plantada há uma maior concentração de bactérias aeróbias, enquanto no sistema não plantado as bactérias fermentativas anaeróbias predominam no sistema.

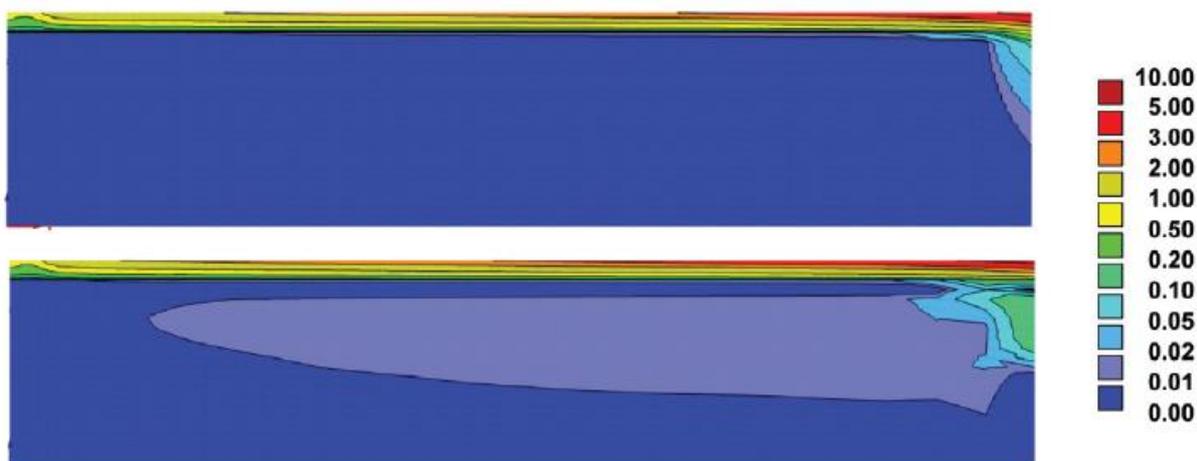


Figura 3.2: Perfil longitudinal da concentração de oxigênio dissolvido (em mg/L) da modelagem matemática em um Sistema de alagado construído de escoamento horizontal subsuperficial não plantado (acima) e plantado (abaixo).
 Fonte: Langergraber e Šimůnek (2012).

Outra simulação matemática, realizado por Samsó e García (2013), apresenta distribuição de bactérias em SAC de escoamento horizontal subsuperficial. Os grupos modelados são de bactérias heterotróficas, nitrificantes, fermentativas, metanogênicas, redutoras de sulfato e oxidadoras de sulfeto. A estabilidade das comunidades microbianas no SAC foi alcançada entre 400 a 700 dias do início de operação do sistema, demonstrando que o processo é mais lento do que se imaginava. Depois de ocorrer a estabilidade das bactérias heterotróficas e nitrificantes, foi observado que elas ocuparam os primeiros centímetros perto da superfície do SAC, onde as concentrações de oxigênio eram maiores, enquanto as fermentativas, matanogênicas e redutoras de sulfato cresceram no restante do SAC e, assim, apresentou uma distribuição vertical mais ampla. As bactérias oxidadoras de sulfeto se desenvolveram em uma área muito limitada na região de saída do SAC, onde ocorrem maiores concentrações de H₂S. A Figura 3.3 ilustra o resultado deste modelo.

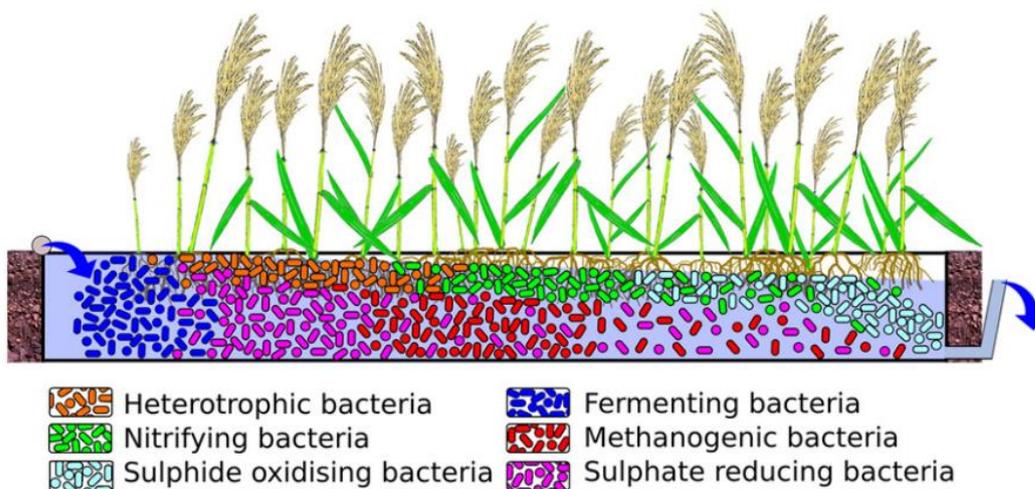


Figura 3.3: Ilustração do perfil longitudinal da modelagem matemática de bactérias em um Sistema de alagado construído de escoamento horizontal subsuperficial.
 Fonte: Samsó e García (2013).

3.2 A influência das plantas no desempenho de Sistemas Alagados Construídos

Existe uma ampla diversidade de espécies de plantas que podem ser empregadas em SAC. A escolha dependerá basicamente da capacidade da planta tolerar ambientes saturados, seu potencial de crescimento, suas adaptações climáticas, seu aspecto paisagístico e sua contribuição no tratamento (PHILIPPI e SEZERINO, 2004; ANDRADE, 2007).

Macrófitas aquáticas é a denominação mais adequada para caracterizar os vegetais utilizados em SAC, habitam desde brejos até ambientes totalmente saturados de água (ESTEVEZ, 1998).

Desempenham um importante papel no funcionamento do ecossistema, acumulando nutrientes, liberando exsudatos no meio e servindo com habitat para uma variedade de microrganismos. Segundo Cooper *et al.* (1996), as macrófitas emergentes são as mais indicadas para aplicação em SAC de escoamento horizontal subsuperficial, uma vez que o nível d'água se encontra abaixo da superfície, proporcionando o enraizamento e crescimento das raízes.

Segundo Brix (1997), a planta contribui com vários fatores no tratamento de esgotos. A parte aérea da planta armazena nutrientes, cria um efeito isotérmico, atenuando a radiação solar e promovendo um embelezamento paisagístico. Já os tecidos das plantas que estão em contato com a água residuária, promovem filtração, liberam exsudatos, dispõem área para aderência de microrganismos, facilitam as transferências de gases e retiram nutrientes do meio líquido.

As plantas produzem uma grande quantidade de biomassa por unidade de área e possuem capacidade de estocar grande quantidade de nutrientes. A taxa de crescimento, a concentração de nutrientes, e a capacidade de assimilação de nutrientes pelas plantas são devido às condições do sistema de tratamento, as carga de afluente aplicada, a densidade de plantas, o clima e a frequência do corte da parte aérea (REDDY e DEBUSK, 1987). No período de crescimento, as plantas podem absorver macronutrientes (N e P) e micronutrientes, incluindo metais (MATOS *et al.*, 2009).

A remediação de poluentes em SAC ocorre não somente pela presença das plantas, mas também por diversos microrganismos que estão associados às suas raízes, onde, por exemplo, plantas interagem simbioticamente com bactérias. Nessa simbiose, as plantas produzem a maior parte do oxigênio utilizado pelas bactérias aeróbias na degradação da matéria orgânica. Outra simbiose de importância é a presença de micorrizas, uma associação mutualística existente entre fungos e raízes, que aumentam a absorção de água e elementos inorgânicos pelas plantas (ANDRADE, 2007). Seo e DeLaune (2010) observaram que os fungos foram responsáveis pela maior parte da desnitrificação sob condições aeróbias em um sistema de alagado natural (pântano) à jusante de um sistema de tratamento de esgotos nos Estados Unidos.

Segundo Andrade (2007), o uso de plantas para remover poluentes da água, do ar ou do solo é denominado como fitorremediação. Os processos da fitorremediação que ocorrem em SAC são de rizodegradação, rizofiltração, fitoacumulação, degradação dos contaminantes pela biomassa e retenção pela barreira reativa (retenção química e física). A utilização de plantas para a fitorremediação possuem vantagens e desvantagens conforme mostrado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Vantagens e desvantagens da utilização de plantas para fitorremediação.

Vantagens	Desvantagens
Baixo investimento em implantação e custo operacional	Resultados mais lentos, do que, por exemplo, utilizando tecnologias mecanizadas
Mais facilmente monitoradas do que, por exemplo, os microrganismos	Necessitam de maior demanda de área para tratamento
São bem aceitas pela sociedade	O crescimento de algumas plantas depende de condições ambientais
Poluentes orgânicos podem ser mineralizados	Aplica-se a poucas profundidades, pois apenas ao alcance das raízes das plantas
Aplica-se em uma grande variedade de poluentes, inclusive para recalcitrantes	A concentração do poluente pode ser tóxica para a planta, prejudicando o tratamento
A biomassa produzida nos SAC pode ser convertido em matéria-prima, produzindo fibras ou gerando energia	Existe necessidade de disposição adequada da biomassa, quando ocorre fitoextração de poluentes não metabolizáveis ou metabolizados a compostos tóxicos

Fonte: Adaptado de Andrade (2007).

Plantas aquáticas submersas ou parcialmente submersas possuem aerênquima, um tecido formado por espaços vazios, que possibilita a planta armazenar o oxigênio produzido pela fotossíntese e permite sua rápida difusão para as regiões onde se faz necessário a respiração celular. O aerênquima confere também um poder de flutuação para a planta, além disso, por conter muito menos células do que a maioria dos outros tecidos vegetais, apresentam um metabolismo respiratório com taxa mais baixa, e a necessidade de oxigênio nessa região é reduzida (SADAVA *et al.*, 2009).

De acordo com Brix (1993) as plantas liberam oxigênio para o meio líquido através dos aerênquimas, possibilitando a formação de microzonas aeróbias e, por consequência no desenvolvimento de comunidades aeróbias na rizosfera. Durante a respiração celular, o oxigênio que não foi consumido pela planta é difundido para a zona de raízes através dos aerênquimas (STOTTMEISTER *et al.*, 2003). A Figura 3.4 ilustra a formação de diferentes gradientes aeróbios e anaeróbio, formados na rizosfera. Também há possibilidade de ocorrer microzonas anóxicas, em função das transformações do nitrogênio disponível. A distância destas regiões é definida entre uma raiz e outra, criando uma variedade de microrganismos na rizosfera (KADLEC e WALLACE, 2009). A liberação de oxigênio na zona radicular cria condições de oxidação no meio, que estimulam também o crescimento de bactérias nitrificantes (TAO e WANG, 2009; MATOS *et al.*, 2010).

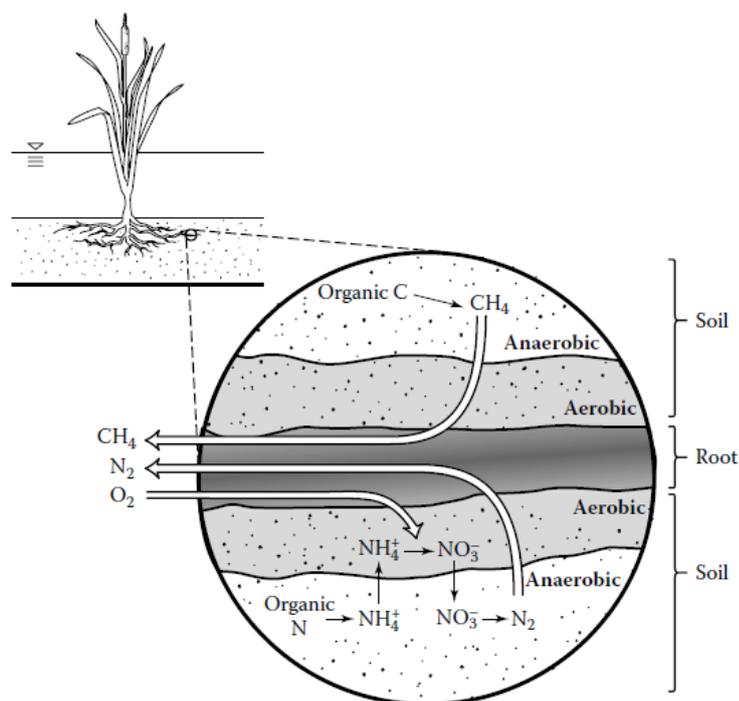


Figura 3.4: Formação de microzonas na região da rizosfera.
 Fonte: Kadlec e Wallace (2009).

Segundo Stottmeister *et al.* (2003) na zona de raízes é onde a interação planta e microrganismo é mais intensa e o suprimento de oxigênio fornecido pelas plantas é essencial para a atividade dos microrganismos.

Lai *et al.* (2012) estudaram 35 espécies de plantas atuantes em SAC e observaram que existem diferenças significativas de transferência de oxigênio, fotossíntese e remoção de nutrientes entre todas as espécies estudadas. A quantidade de oxigênio liberada na rizosfera é influenciada por diversos fatores, tais como a espécie, o pH, a concentração de oxigênio, as características químicas, a temperatura, a intensidade de luz e o potencial redox do meio (STOTTMEISTER *et al.*, 2003).

Wang e Li (2014) monitoraram o oxigênio dissolvido, a 10 cm de profundidade, em dois SAC de escoamento horizontal subsuperficial (uma unidade plantada com *Acorus calamus L.* e outra unidade não plantada). Encontraram valores de 0 a 1,0 mg/L na unidade plantada e 0 mg/L em todo o período de monitoramento da unidade não plantada. Foi realizada contagem de bactérias anammox nos dois sistemas, resultando em maiores quantidades na unidade plantada. Os autores atribuíram os maiores valores de OD e de bactérias anammox ao sistema radicular da planta e na liberação de exsudatos. Os autores afirmam que a vegetação pode manter o pH próximo a neutralidade, favorecendo as condições para crescimento bacteriano. Além disso, a

maior demanda de área promovida pelas raízes pode ter influenciado na maior quantidade de microrganismos da unidade plantada. O inverno diminuiu a quantidade de organismos em ambas as unidades, porém na unidade plantada os valores de organismos permaneceram ligeiramente superiores do que na unidade não plantada.

Estudos indicam que a taxa de transferência de oxigênio pelas raízes das plantas está associada à intensidade luminosa (CONNELL *et al.*, 1999; WIEßNER *et al.*, 2005; TANAKA *et al.*, 2007) e que a difusão do transporte de oxigênio está relacionada com a porosidade da raiz (PEZESHKI, 2001; COLMER, 2003). Lai *et al.* (2012) observaram que a porosidade da raiz e a área foliar afetaram, significativamente, na taxa de transferência de oxigênio e na remoção de nutrientes.

Wießner *et al.* (2002) mostraram que o potencial redox da rizosfera causa um efeito significativo na intensidade de liberação de oxigênio pelas raízes da *Typha latifolia* e *Juncus effusus*, como mostrado na Figura 3.5.

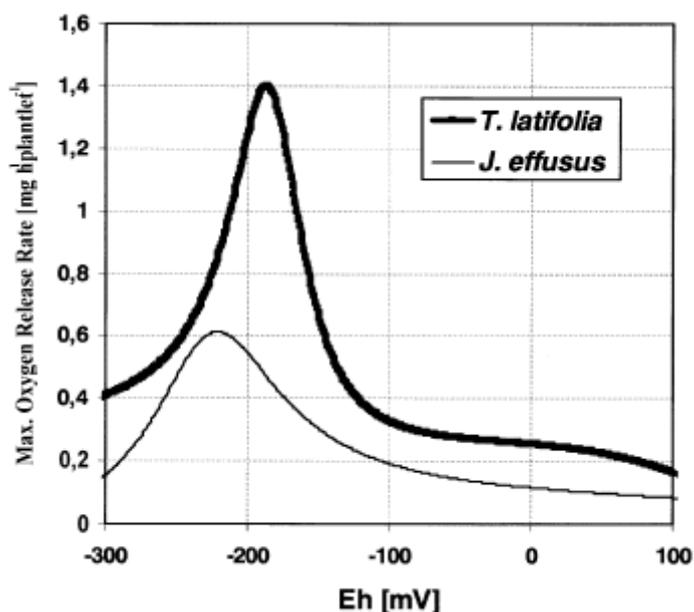


Figura 3.5: Taxa de liberação de oxigênio em duas espécies de plantas em função do potencial redox.

Fonte: Wießner *et al.* (2002).

As macrófitas aquáticas alteram o pH do meio, interferindo nas flutuações diárias do íon H⁺, devido à produção e consumo de CO₂ ao longo do dia. As flutuações de pH são maiores, quanto maior for a biomassa vegetal em relação à massa de água, além disso as flutuações variam de acordo com a espécie presente. Esteves (1998) afirma que o grupo *Sphagnum* tem maior capacidade de acidificar o meio, devido sua alta capacidade de troca iônica. Tao e Wang (2009)

observaram que a *Typha latifolia* aplicada em um SAC de escoamento superficial, manteve o pH próximo à neutralidade, quando comparado com o mesmo sistema sem plantas. As variações de temperatura do líquido também foram menores no sistema plantado.

Os SAC recebem uma carga de sólidos que durante o tempo vão acumulando e ocupando os poros do leito. Este fato causa um aumento no processo de colmatção, que por sua vez reduz a condutividade hidráulica do sistema. As condições de oxirredução do meio, podem ainda levar a formação de precipitados inertes que aumentam mais o processo de colmatção (KADLEC e WALLACE, 2009). Por outro lado, as raízes e rizomas das plantas crescem no meio suporte, criando canais e favorecendo a passagem do líquido que promove um aumento na condutividade hidráulica. A estrutura destes canais está em função do crescimento da planta e da espécie utilizada (BRIX, 1994).

De Paoli (2010) estudou a quantidade de sólidos em dois SAC, um plantado e outro não plantado, e observou que a quantidade de sólidos no primeiro terço do SAC plantado foi de duas a três vezes superiores que a quantidade de sólidos encontrada na mesma região da unidade não plantada. Em ambas as unidades 80% dos sólidos foram caracterizados como sólidos fixos, ou seja, recalcitrantes. O mesmo autor realizou testes hidrodinâmicos, e concluiu que a unidade não plantada apresentou melhor eficiência volumétrica que a unidade plantada, atribuindo este resultado à presença do sistema radicular da planta.

A planta interfere também na evapotranspiração do sistema, causando reduções no volume de água e como consequência no aumento da concentração de poluentes (USEPA, 2000). A evapotranspiração está relacionada com a temperatura, radiação solar, umidade do ar, velocidade do vento e espécie de planta utilizada (área foliar), e interfere no comportamento hidrológico do SAC (COLLISCHONN, 2001; RIBEIRO, 2007).

3.3 O potencial de oxirredução

Em uma reação de oxirredução tanto a oxidação quanto a redução devem ocorrer, ou seja, se uma substância for oxidada a outra deverá ser reduzida. Nestas reações ocorrem transferência de elétrons entre duas espécies químicas. O conceito de reação de oxirredução não está relacionado somente com a presença do oxigênio na reação, mas sim com a ocorrência da transferência de elétrons. A substância que é possível de ser oxidada é chamada de agente oxidante, pois remove elétrons de outra substância adquirindo-o, portanto o agente oxidante é reduzido. Por outro lado, o agente redutor fornece elétrons, fazendo com que outra substância

seja reduzida, isto é, o agente redutor é oxidado no processo. Quando os elétrons são transferidos de uma substância para outra, cria-se uma diferença de potencial, sendo esta medida em milivolts (mV). Quanto mais oxidada for a substância, mais positiva será o seu potencial elétrico. Este potencial é conhecido como potencial redox, e é utilizado para compreender as reações de oxirredução que ocorrem entre substâncias (BROWN *et al.*, 2005).

O potencial redox é uma medição potenciométrica em que se mede o potencial que o meio tem de transferir elétrons, também é conhecido como ORP (*Oxidation Reduction Potential*) e traduzido para POR (Potencial de Oxidação Redução). A medida é sempre realizada em relação a um eletrodo de referência. O eletrodo SHE (*Standard Hydrogen Electrode*) ou simplesmente eletrodo padrão de hidrogênio, utiliza um sensor de platina cercado de hidrogênio nas condições padrões (1 mol/L de H⁺, pressão do H₂ a 1 atm a 25 °C) e foi escolhido como referência para ser o valor de 0 mV. Porém como é difícil utilizar este eletrodo, utiliza-se o eletrodo de Ag/AgCl ou de calomelano (Hg/Hg₂Cl₂). O eletrodo de Ag/AgCl é o mais usual, e também é utilizado para medições de pH. Ressalta-se que ao utilizar um eletrodo que não seja o de referência (SHE) é necessário corrigir os valores para Eh padrão, visando comparar os resultados com os de referência. Os valores de ORP são 200 mV superiores aos valores reportados pelo sensor SHE (YSI, 2001). A calibração dos sensores pH/POR devem ser realizadas seguindo os padrões de referência e corrigidos com a temperatura conforme recomendações do fabricante do sensor.

Estudos do monitoramento do potencial redox em SAC são efetuados em todo o mundo e demonstram ser uma técnica aplicável para a compreensão dos mecanismos de funcionamento do sistema (LARIVIERE, *et al.* 2003; SEO e DELAUNE, 2010).

A disponibilidade de oxigênio do meio irá estabelecer as condições de oxidação e redução e, por sequência, as rotas de transformação de poluentes. As sequências de transformação da matéria carbonácea e da matéria nitrogenada são função do acceptor de elétrons e do estado de oxidação do composto, que podem ser compreendidos através do potencial redox (VON SPERLING, 1996). A Figura 3.6 mostra as faixas de valores de potencial redox (reportados em ORP) e os processos de transformação que ocorrem em cada faixa.

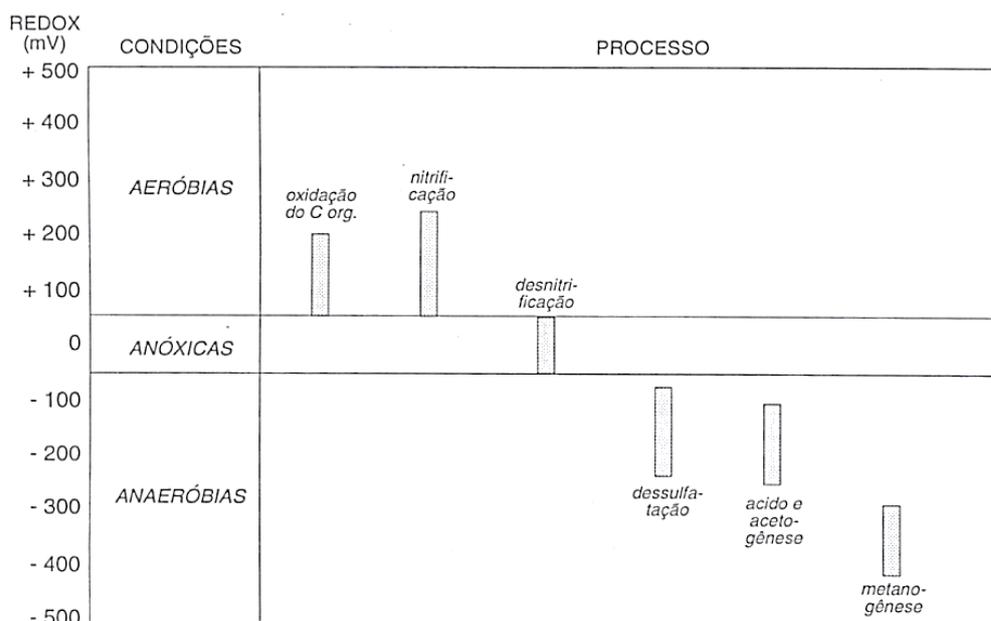


Figura 3.6: Processos de transformação em função do potencial redox.
Obs.: Valores reportados em ORP. Fonte: von Sperling (1996).

Em SAC ocorre uma existência simultânea de zonas com diferentes condições redox (anaeróbias, anóxicas e aeróbias), permitindo que diferentes processos físicos, químicos e microbiológicos ocorram ao mesmo tempo (OJEDA *et al.*, 2008; GARCÍA *et al.*, 2010).

A respiração realizada pelos microrganismos segue uma sequência dentro das faixas de potencial redox e de produção de energia, como reportadas na Tabela 3.2. Quando a vários aceptores de elétrons disponíveis no meio, os microrganismos irão utilizar aquele que produz a mais alta quantidade de energia (VON SPERLING, 1996).

Tabela 3.2: Tipos de reações de oxirredução promovidas por microrganismos.

Processo	Aceptor de elétrons	Produto final	Mol de e ⁻ por mol do acceptor de elétrons	ΔG° (kJ/mol de e ⁻)	Faixa de potencial Redox (mV)
Respiração aeróbia	O ₂	H ₂ O	4	-125,1	300 a 700
Redução do nitrato	NO ₃ ⁻	N ₂ , NO _x	5	-118,8	100 a 350
Redução do manganês	Mn ⁴⁺	Mn ²⁺	2	-94,5	-100 a 300
Redução do ferro	Fe ³⁺	Fe ²⁺	1	-24,3	-100 a 200
Redução do sulfato	SO ₄ ²⁻	S ²⁻	8	-25,4	-200 a -100
Metanogênese	CO ₂	CH ₄ , CO ₂	8	-23,2	-350 a -100

Obs.: ΔG° =energia livre; dados de potencial redox reportados em SHE.
Fonte: Faulwetter *et al.* (2009).

Faulwetter *et al.* (2009) demonstraram que alguns fatores operacionais e o tipo de plantas utilizado influenciam nas condições redox e o desenvolvimento das comunidades microbianas em SAC, alterando a eficiência do tratamento.

Valores elevados de potencial redox (ORP = +100 a +500 mV) estão associados a um ambiente oxidante e promovem processos aeróbios, tais como a nitrificação. Em contrapartida, valores de potencial redox mais baixos (ORP = -100 a -500 mV) estão associados a condições redutoras e promovem processos anaeróbios, tais como a redução de sulfato, acetogênese e metanogênese. Em condições anóxicas (ORP próximo a 0 mV), os processos de desnitrificação são favorecidos (VON SPERLING, 1996; FAULWETTER *et al.*, 2009).

Estudos realizados por Avila *et al.* (2013) demonstraram que o potencial redox mais elevado leva à eliminação de poluentes convencionais e de microcontaminantes emergentes. As reações químicas no interior dos SAC são essencialmente reguladas pelo potencial redox, e podem conduzir à formação de precipitados químicos insolúveis, podendo conduzir à colmatção do leito (KADLEC e WALLACE, 2009).

As plantas estimulam maiores condições de potencial redox em SAC plantado quando comparado com SAC não plantado (TANNER, 2001; FAULWETTER *et al.*, 2009; BIALOWIEC *et al.* 2012). Estudos observaram variações do potencial redox em SAC ao longo do dia (DUŠEK *et al.*, 2008; FAULWETTER, *et al.*, 2009). O potencial redox em SAC é afetado tanto pela presença quanto pelo tipo de espécie utilizada (DUŠEK *et al.*, 2008; BIAOLWIEC *et al.*, 2012).

Nas camadas mais próximas à superfície dos SAC as flutuações do potencial redox são mais intensas e prevalecem condições aeróbias, devido à presença do sistema radicular das plantas. A zona de raízes faz com que as camadas superiores permaneçam aeróbias a maior parte do tempo (DUŠEK *et al.*, 2008). As plantas cultivadas em sistemas de escoamento horizontal subsuperficial desenvolvem-se preferencialmente na parte superior do leito, pois as condições redox são mais propícias ao crescimento do sistema radicular (KADLEC e WALLACE, 2009).

Um estudo realizado por Corbella *et al.* (2014) mediu o potencial redox ao longo da profundidade em um SAC de escoamento subsuperficial em diferentes regimes hidráulicos (alimentação contínua e intermitente). Os resultados indicaram que a presença da planta e as condições operacionais de alimentação influenciam as condições redox, principalmente a uma profundidade de 15 cm, onde o potencial redox variou de -300 a +50 mV. As condições redox mais elevadas foram observadas na alimentação de fluxo intermitente. A Figura 3.7 mostra o resultado das variações do potencial redox em três profundidades (5, 15, 25 cm).

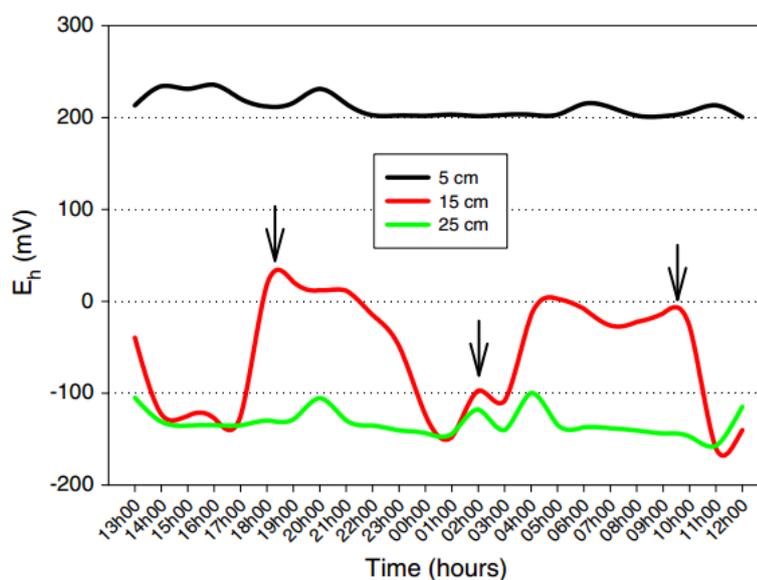


Figura 3.7: Variações diárias do potencial redox operando sob condições de fluxo intermitente. Obs.: as setas representam episódios de alimentação.

Fonte: Corbella *et al.* (2014).

Bactérias e fungos são os microrganismos que predominam em SAC tratando águas residuárias. Ambos contribuem para a transformação de poluentes. Essa contribuição foi mensurada por Seo e DeLaune (2010) utilizando o potencial redox. Em ambientes anaeróbios, com potencial redox próximo a -200 mV, bactérias encontram-se mais ativas e realizam desnitrificação em maior quantidade que os fungos. Em ambientes com potencial redox próximo a +200 mV, os fungos passam a dominar os processos de desnitrificação. Com valores de potencial redox variando entre -100 e +100 mV, bactérias e fungos convivem em harmonia.

Estudos no Centro Helmholtz para Pesquisa Ambiental (Alemanha) mensuraram as variações diárias no potencial redox em *planted fixed bed reactor* (PFR), que simulam compartimentos de SAC de escoamento horizontal subsuperficial, e chegaram à conclusão que as variações no potencial redox em espaços de tempo estão em função da atividade fotossintética da planta em fornecer oxigênio para o meio. Durante o dia (presença de luz) as plantas realizam fotossíntese e liberam oxigênio no meio líquido, através do sistema aerênquimas, e durante a noite ocorre o consumo do oxigênio. A atividade fotossintética da planta pode ser a melhor explicação para as variações do potencial redox ao longo do dia (NIKOLAUSZ *et al.*, 2008). E essa variação explica a coexistência de microrganismos aeróbios e anaeróbios na rizosfera dos SAC (KAPPELMEYER *et al.*, 2002).

Wießner *et al.* (2005) estudaram o PFR plantado com *Juncus effusus* aplicado ao tratamento de água residuárias sintética e observaram variações diárias de potencial redox e oxigênio

dissolvido, bem como a eficiência de remoção de C e N. As variações do potencial redox acompanhavam a intensidade luminosa e os valores deslocavam-se de -200 a +200 mV. A Figura 3.8 mostra os resultados.

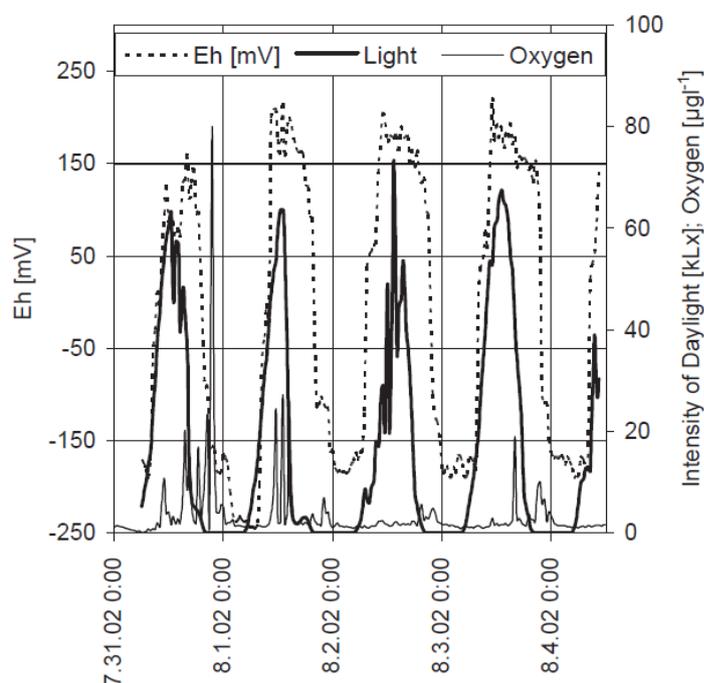


Figura 3.8: Variações diárias do potencial redox e oxigênio dissolvido na rizosfera correlacionada com a intensidade luminosa em PFR.
Fonte: Wießner *et al.* (2005).

Matos *et al.* (2010) observaram influência da espécie vegetal no do potencial redox em cinco SAC, com dimensões de 24,0 m x 1,1 m x 0,70 m, tratando água residuária da suinocultura. Nos SAC1, SAC2 e SAC3 foram plantados, respectivamente, *Typha latifolia* L. (taboa), *Alternanthera philoxeroides* (Mart.) Griseb (alternanthera) e *Cynodon dactylon* Pers. (capim tifton-85). No SAC4 foi plantado, no primeiro terço do tanque, alternanthera, no segundo terço, taboa e no terceiro terço, capim tifton-85. O SAC5 foi mantido como unidade controle (sem plantas). Os resultados do potencial redox indicaram que o SAC1 (plantado com taboa), apresentou maiores valores de potencial redox no início do leito, embora a partir da metade do comprimento do leito as diferenças no potencial redox nos cinco SAC foram estatisticamente iguais entre si. Os autores observaram que no SAC5 (não plantado), os valores de potencial redox mantiveram-se inferiores ao leito cultivado, demonstrando a contribuição das plantas na oxigenação do sistema.

3.4 O Reator de Leito Fixo

O Reator de Leito Fixo (RLF) é uma adaptação do *planted fixed bed reactor* (PFR) que foi desenvolvido por Kappelmeyer *et al.* (2002) como unidade para testes em solos plantados em escala laboratorial. Segundo os criadores, este reator simula o ambiente subsuperficial do SAC, permitindo investigações sobre os processos que ocorrem na rizosfera, em um sistema com o escoamento uniforme no meio poroso, sem gradientes hidráulicos, garantindo a mistura completa no interior do reator. As características construtivas do PFR recriam o ambiente subsuperficial, onde as complexas interações de raízes, microrganismos, meio suporte e líquido intersticial ocorrem. Seus criadores afirmam que o PFR é ideal para estudar a interação de microrganismos com zona de raízes e o meio suporte. Além disso, o reator permite estudos de mobilidade de poluentes, ensaios com traçadores, produção de gases e ensaios respirométricos.

O projeto original do ano de 2002 foi aperfeiçoado ao longo do tempo e, atualmente consiste, em um recipiente de vidro com 30 cm de diâmetro e 30 cm de altura. Uma cesta perfurada em aço inoxidável acondiciona o meio suporte no interior do reator, possui um diâmetro de 27 cm e 30 cm de altura. Uma tubulação perfurada de aço inoxidável de 4 cm de diâmetro e 30 cm de altura coleta o efluente no centro do reator. A cesta interna foi preenchida com 20 kg de cascalho (diâmetro=2-4 mm) e foi plantada com 5 unidades de *Juncus effusus*. O volume de líquido ocupado pelos poros é de aproximadamente 10 litros. A alimentação do reator é realizada pela parte superior, a saída do efluente se dá por um orifício no fundo onde tubo central se conecta. Existe uma recirculação interna realizada por uma bomba peristáltica. A vazão de recirculação é 10 vezes superior à vazão de alimentação, proporcionando uma completa mistura do líquido no interior do reator. O tempo de detenção hidráulica é de aproximadamente 5 dias. A Figura 3.9 ilustra a configuração do reator.

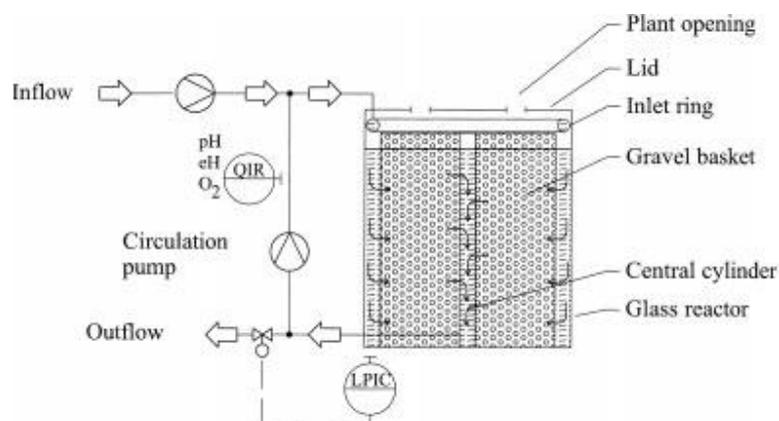


Figura 3.9: Concepção do *planted fixed bed reactor*
Fonte: Kappelmeyer *et al.* (2002).

3.5 **Comportamento hidrodinâmico de reatores reais**

O estudo da hidrodinâmica de reatores é importante para compreender as condições reais de escoamento, uma vez que os reatores são projetados seguindo modelos teóricos de escoamento ideal, como o fluxo em pistão ou reatores de mistura completa. As condições reais de escoamento possibilitam a formação de curto-circuito hidráulico, zonas mortas, dispersão axial e longitudinal do líquido. Alguns fatores interferem na hidrodinâmica do reator como geometria do tanque, tamanho, presença de plantas e o meio suporte utilizado. Os modelos mais utilizados para representar o escoamento real de um reator são os de fluxo disperso e de mistura completa com tanques em série, pois representam, em maior grau os reatores compactos ou alongados e os com leitos recheados (VON SPERLING e CHERNICHARO, 2005).

Levenspiel (2000) propõe técnicas para estudo dos tipos de escoamento, por meio de um traçador, que pode ser aplicado seguindo alguns modelos alimentação. A técnica mais utilizada é a de pulso, por sua simplicidade, conhecida também como técnica de estímulo-resposta, onde se injeta uma concentração conhecida de traçador na entrada do reator e em tempos pré-determinados verifica-se sua saída. O método utilizado para a injeção do traçador determinará o tipo de resposta a ser observada na saída, e a sua escolha dependerá das características do líquido em estudo (METCALF e EDDY, 2003).

Alguns critérios devem ser seguidos para escolha do traçador, a saber (LEVENSPIEL, 2000; METCALF e EDDY, 2003):

- Ter um comportamento fluidodinâmico similar ao da substância que se pretende estudar;
- Apresentar boa solubilidade em água limpa e em águas residuárias, não reagir com os poluentes ou com os constituintes do sistema, incluindo deixar resíduos;
- Apresentar estabilidade com o tempo;
- Não apresentar biodegradabilidade em curto prazo;
- Possuir uma característica adicional que permita diferenciá-lo no sistema de estudo, não devendo existir no meio;
- Não ser adsorvido pela biomassa do reator, apresentando baixa difusividade molecular;
- Apresentar facilidade de injeção;
- Não ser adsorvido em bolhas de gás;
- Possuir uma composição química que não seja tóxica aos seres vivos;

- Possibilitar a que o método de detecção e de medição do traçador seja fácil e de alta eficiência.

A resposta do traçador resultará em graus de dispersão, que por sua vez permitirá conhecer o comportamento do sistema e enquadrá-lo em um modelo de escoamento. Metcalf e Eddy (2003) propõem algumas faixas dos números de dispersão para se enquadrar em um modelo, conforme Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Graus de dispersão em reatores.

Grau de dispersão	Número de dispersão (d)
Nenhuma dispersão	$d = 0$ (fluxo em pistão ideal)
Dispersão baixa	$d \leq 0,05$
Dispersão moderada	$0,05 < d < 0,25$
Dispersão elevada	$d \geq 0,25$
Dispersão infinita	$d \rightarrow \infty$ (mistura completa)

Fonte: Metcalf e Eddy (2003).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 *Características da área de estudo*

O estudo foi realizado no Centro de Pesquisa e Treinamento em Saneamento (CePTS) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), em parceria com a Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA). O CePTS localiza-se na Estação de Tratamento de Esgotos do Arrudas (ETE Arrudas), no município de Belo Horizonte, Minas Gerais (coordenadas 19°53'42" S e 43°52'42" W). A ETE Arrudas recebe a maior parte dos esgotos sanitários gerados na bacia do Ribeirão Arrudas, englobando as cidades de Belo Horizonte e Contagem. Uma pequena parte da vazão da ETE Arrudas é direcionada para o CePTS.

O clima de Belo Horizonte, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Cwa (tropical de altitude). Durante o ano a região é influenciada por sistemas extratropicais, que provocam chuvas durante o verão e a primavera. Duas estações bem definidas podem ser identificadas: uma seca, que se estende de abril a setembro, e outra chuvosa, compreendendo os meses de outubro a março. A temperatura média anual é de 21,1°C, com pequena variação entre as estações. A média anual de precipitação é de 1.450 mm (PINHEIRO e BAPTISTA, 1998) e a altitude da região em relação ao nível do mar é de 758 m.

4.2 *Características do Sistema Alagado Construído*

A presente pesquisa utilizou um sistema de alagado construído de escoamento horizontal subsuperficial que recebe efluente de um reator tipo UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*). O esgoto, antes de ser encaminhado para a unidade em estudo, passa pelo tratamento preliminar da ETE Arrudas, composto por um sistema de gradeamento (grade grossa e fina) e desarenador.

O reator UASB apresenta um volume útil de 22 m³, e opera com uma vazão de aproximadamente 80 m³/d, resultando em um Tempo de Detenção Hidráulica (TDH) médio de 6,6 h. Parte do efluente do reator tipo UASB é encaminhado para o SAC de escoamento horizontal subsuperficial. O SAC foi dividido em dois leitos que operam em paralelo, e recebem cada uma, a vazão de cerca de 7,5 m³/d. O equivalente populacional de cada leito é da ordem de 50 habitantes. Uma unidade foi plantada com *Typha latifolia* (conhecida popularmente como Taboa) e outra permaneceu não plantada (unidade controle). Entretanto, a unidade plantada divide espaço com uma espécie invasora, sendo essa identificada como *Echinochloa crus-galli*. O corte da parte aérea das plantas do leito plantado foi realizado na época em que a taboa atinge sua maturidade, ou seja, na inflorescência da planta, e quando esta ocorre, retiram-se as espécies

invasoras. O corte foi realizado com cerca de 10 cm de altura a partir do caule da planta. Espécies invasoras tentam dominar a unidade não plantada, que comumente são retiradas pela raiz.

A Figura 4.1 apresenta o reator UASB e o SAC, que é dividido em Sistema Alagado Construído Plantado (SACP) e Sistema Alagado Construído Não Plantado (SACNP).



Figura 4.1: Reator UASB (esquerda) e os Sistemas Alagados Construídos (direita).

Os SAC operam desde 2007 e ambas as unidades utilizam escória de alto forno como meio suporte, com $d_{10}=19$ mm, coeficiente de desuniformidade $d_{60}/d_{10}=1,2$ e um volume de vazios de 40% (DORNELAS, 2008). Em 2010 o TDH médio dos SAC foi de 1,30 dia para a unidade plantada e 1,43 dia para a unidade não plantada (DE PAOLI, 2010). Em 2014 o TDH foi medido novamente e apresentou valores de 1,06 dia para unidade não plantada e 1,45 dia para unidade plantada em estágio de maturidade da planta, e 1,38 dia para a unidade plantada em estágio de crescimento da planta (MATOS *et al.*, 2015). Os detalhes construtivos de cada unidade estão descritos na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Características construtivas de cada leito do Sistema de Alagado Construído.

Parâmetro	Valor
Comprimento da superfície (m)	25,0
Largura da superfície (m)	3,0
Altura do leito (m)	0,4
Altura útil do leito – lâmina d'água de projeto (m)	0,3
Inclinação longitudinal do fundo (%)	0,5
Volume total de escória em cada leito (m ³)	27,6

O SAC está entrando em seu 8º ano de operação, e atualmente os dois leitos encontra-se em elevado grau de colmatção, fato este demonstrado pelo escoamento superficial em praticamente todo o comprimento dos leitos. A Figura 4.2 apresenta a evolução do escoamento superficial ao longo do tempo. É possível observar que o escoamento superficial está próximo

às saídas das unidades. Este fato pode gerar caminhos preferenciais no sistema, potencialmente causando deterioração do efluente final.



Figura 4.2: Evolução do escoamento superficial no Sistema Alagado Construído.

Por meio da Figura 4.2, observa-se que a partir do 1º semestre de 2013 (início dessa pesquisa), na entrada do SAC já surgia o escoamento superficial, indicando possível colmatção desta região. Por este motivo, foi descartado o monitoramento na zona de entrada do sistema e escolhidos dois pontos de monitoramento a 13 m (aproximadamente metade do comprimento) da entrada da unidade plantada e não plantada e mais dois pontos de monitoramento a 23 m (região próxima à saída) da entrada da unidade plantada e não plantada, resultando em uma diferença de 10 m entre os pontos escolhidos. Esses pontos foram escolhidos com o propósito de comparar as condições ambientais do SACP e do SACNP ao longo do comprimento.

4.3 Experimentos com Reatores de Leito Fixo

Em função do estado de colmatção dos SAC e com o objetivo de obter uma amostra representativa e indeformada do leito em estudo (Figura 4.3), adotou-se o Reator de leito fixo (RLF) como método de análise sob condições controladas de operação em campo para monitoramento de condições ambientais. Este reator foi adaptado nesta pesquisa para utilização em campo, e também auxiliará futuras pesquisas da comunidade microbiológica do SAC. Os RLF procuraram recriar as condições dos SAC, utilizando a escória do leito e recebendo por bombeamento o líquido que está escoando no interior do SAC.

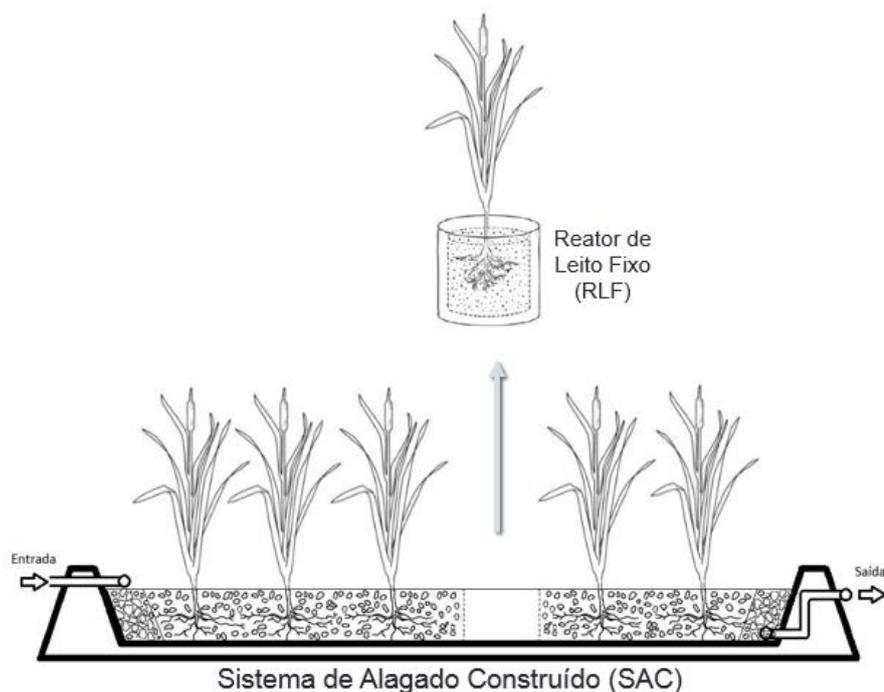


Figura 4.3: Representação da amostra indeformada do leito.

Com a intenção de manter o reator em boa mistura e evitar gradientes hidráulicos, concebeu-se o reator em formato circular, com alimentação radial e fluxo concêntrico. Deste modo, procurou-se reproduzir as condições de carga e os processos bioquímicos que ocorrem em um determinado ponto do SAC.

O RLF é constituído em tubo de PVC com a superfície aberta e o fundo fechado. A altura adotada do RLF é de 30 cm, semelhante à altura útil do leito, e seu diâmetro externo é de 30 cm, resultando em um volume de 21,2 litros. A distribuição do afluente se dá através de um anel de distribuição na parte superior de forma radial. O líquido escoar pelo meio suporte até o centro do reator, onde é coletado por um tubo perfurado de 40 mm de diâmetro e 30 cm de altura. No fundo, há um orifício de 20 mm de diâmetro para a coleta do efluente, acoplado a uma mangueira que se ergue até uma altura de 30 cm, garantindo o nível de aproximadamente 30 cm no interior do reator. Na Figura 4.4 é possível observar o esquema de funcionamento hidráulico do RLF. No interior do RLF existe uma cesta móvel armada em fios de aço inoxidável constituindo uma malha de 5 mm x 5 mm, a qual permite a passagem livre do líquido e mantém o meio suporte contido. A armação da cesta, onde a malha foi fixada também é de aço inoxidável. A cesta interna do RLF apresenta um diâmetro de 28 cm e uma altura de 30 cm, totalizando um volume de escória de 18,5 litros. O espaço de 1 cm entre as paredes do reator e da cesta interna objetiva a circulação livre do líquido na entrada do sistema, permitindo uma distribuição homogênea ao longo de todo o perímetro e a altura do RLF.

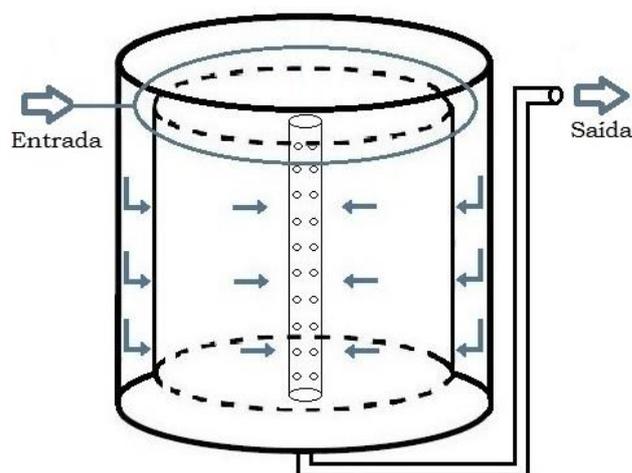


Figura 4.4: Desenho esquemático do funcionamento hidráulico do reator de leito fixo.

A vazão de alimentação calculada para a operação do RLF foi de $0,75 \text{ m}^3/\text{d}$, ou $520 \text{ mL}/\text{min}$. Esta vazão, foi calculada proporcionalmente à vazão de operação de um SAC. Como o diâmetro do RLF representa 10% da largura do SAC, logo sua vazão também deverá ter 10% da vazão do SAC. A Tabela 4.2 resume as características de cada unidade em estudo. Esses valores foram adotados de forma a representar em maior grau as condições do SAC nos RLF.

Tabela 4.2: Características das unidades em estudo.

Unidade	Dimensões	Vazão
Sistema de Alagado Construído	3,0 m de largura	$7,5 \text{ m}^3/\text{d}$
Reator de Leito Fixo	0,3 m de diâmetro	$0,75 \text{ m}^3/\text{d}$

Para estudo comparativo de duas espécies de plantas foram avaliadas, no RLF, a mesma espécie utilizada no SAC plantado (*Typha latifolia*) e uma segunda espécie, a *Canna x genaralis*. Essa segunda espécie foi escolhida devido à sua capacidade de suportar elevadas concentrações de poluentes; apresentar elevada taxa de crescimento; ter reprodução por rizomas; não ser classificada como espécie invasora; ser proveniente da América do Sul; e ser esteticamente atraente.

Com o estudo da comparação de diferentes espécies e ao mesmo tempo da avaliação do comprimento do leito, foi necessário construir no total 6 RLF. Logo, tem-se 3 RLF na região central do SAC e 3 RLF na região de saída, como ilustrado na Figura 4.5.

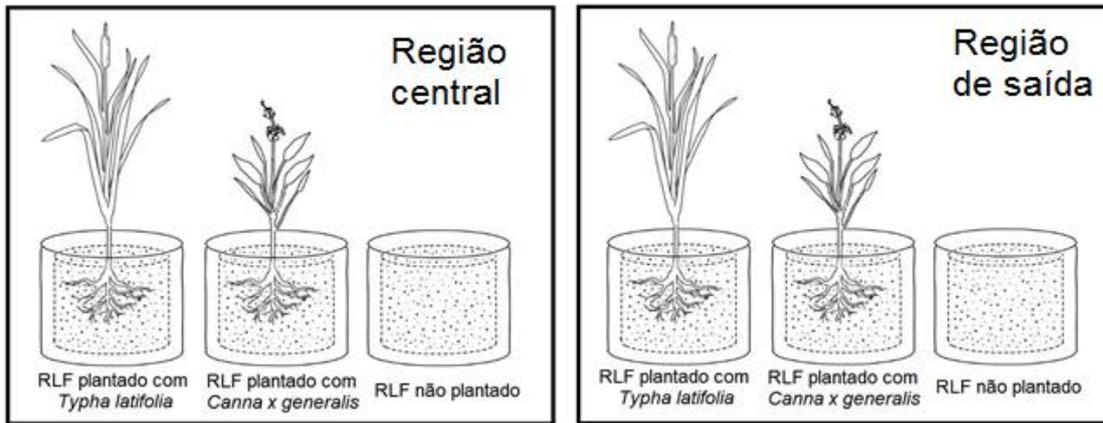


Figura 4.5: Reprodução dos reatores de leito fixo e a região de representatividade.

Buscando representar as condições do SAC, foi utilizado no RLF o mesmo meio suporte (escória de alto forno) do leito. Em 30/04/2014 foram retiradas quatro amostras do leito do SACP, sendo duas amostras retiradas a 13 m da entrada da unidade (região central) e duas a 23 m (região de saída). Outras duas amostras de escória foram retiradas do SACNP, sendo uma amostra a 13 m e a outra a 23 m. Cada amostra continha aproximadamente 18 litros de escória e foram introduzidas nas respectivas cestas do RLF. Partiu-se do princípio que nas amostras já estivessem presentes microrganismos do local de estudo, mas, preocupou-se em retirar as amostras em camadas, fazendo a montagem das cestas sem misturar o material do fundo com o material da superfície do SAC. O destino e a origem dos pontos de coleta de escória estão descritos na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Origem e destino do meio suporte.

Origem do meio suporte	Destino do meio suporte
SACP região central	Cesta do RLF plantado com <i>Typha</i> região central
SACP região central	Cesta do RLF plantado com <i>Canna</i> região central
SACP região saída	Cesta do RLF plantado com <i>Typha</i> região saída
SACP região saída	Cesta do RLF plantado com <i>Canna</i> região saída
SACNP região central	Cesta do RLF não plantado região central
SACNP região saída	Cesta do RLF não plantado região saída

A montagem das cestas foi realizada com cautela, no sentido de representar em maior grau uma amostra indeformada do leito em estudo. Após montagem e plantio, as cestas foram ambientadas no leito por um período de 132 dias. As ambientações das cestas tiveram como objetivo promover o crescimento das plantas e a interação das raízes com os microrganismos e, além disso, aclimatar o meio suporte no leito, pois com a retirada do material poderia ter ocorrido uma perturbação da amostra. Para ambientação das cestas, foi introduzida no leito uma cesta com diâmetro maior, permitindo que a cesta do RLF encaixasse dentro da cesta do leito.

Duas cestas (uma plantada com *Typha* e outra plantada com *Canna*) foram ambientadas a 13 metros da entrada do SACP e mais duas cestas (uma plantada com *Typha* e outra plantada com *Canna*) foram ambientadas a 23 metros da entrada do SACP. Uma cesta não plantada foi ambientada a 13 metros da entrada do SAC não plantado e outra cesta não plantada foi ambientada a 23 metros da entrada do SAC não plantado. A Figura 4.6 mostra as cestas plantadas com *Typha*, plantada com *Canna* e não plantada ambientando no leito. Pela Figura 4.6 (direita) é possível perceber com maior detalhe a cesta do RLF inserida dentro da cesta do leito.



Figura 4.6: Cestas plantadas com *Typha latifolia* e *Canna x generalis* (esquerda) ambientando no leito do SAC plantado; e cesta não plantada (direita) ambientando no leito do SAC não plantado.

A Figura 4.7 mostra a cesta do RLF não plantado ao lado da cesta do leito. Nota-se ainda, o nível d'água no interior do leito da unidade não plantada.



Figura 4.7: Cesta do RLF não plantado ao lado da cesta do leito.

Depois de ambientadas, as cestas foram retiradas do leito em 09/09/2014 e inseridas nos RLF. Em seguida iniciou-se a operação dos RLF alimentados com líquido intersticial do SAC. Para realização dessa pesquisa, foi necessário construir um abrigo para a bomba peristáltica e um suporte para apoio dos RLF (Figura 4.8). A alimentação foi realizada por uma bomba

peristáltica, marca Provitec, com 6 linhas, uma linha para cada RLF. A Figura 4.8 mostra o aparato experimental, após a montagem dos RLF.



Figura 4.8: Aparato experimental dos reatores de leito fixo.

4.4 Características dos poços de monitoramento

Foram selecionados quatro poços de monitoramento ao longo do comprimento do SAC para alimentar os RLF. Dois poços de monitoramento encontram-se ao longo do comprimento do SAC plantado (13 e 23 m) e dois ao longo do comprimento do SAC não plantado (13 e 23 m). Os poços têm como objetivo servir como ponto de monitoramento dos SAC e ainda fornecem alimentação para os RLF.

A metodologia do poço de monitoramento empregou conceitos de amostragem de baixa vazão (ABNT NBR 15847:2010) e adaptações da metodologia de amostragem proposta por Nivala *et al.* (2013). Os poços de monitoramento foram instalados a 25 cm de profundidade (aproximadamente metade da altura útil do leito) a jusante das cestas do leito, como mostrado na Figura 4.9.

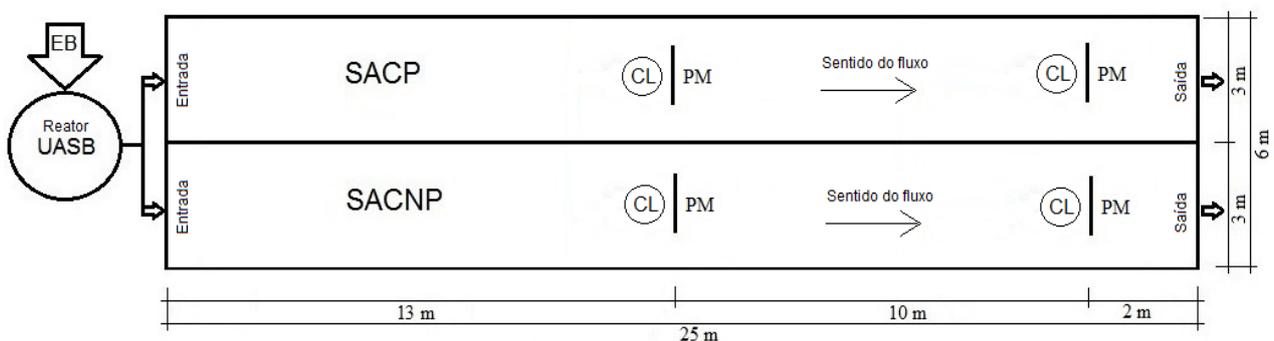


Figura 4.9: Fluxograma do sistema alagado construído, localização dos poços de monitoramento e das cestas do leito. Obs.: Desenho fora de escala. Legenda: EB=esgoto bruto; UASB=*upflow anaerobic sludge blanket*; SACP=sistema alagado construído plantado; SACNP=sistema alagado construído não plantado; PM=poço de monitoramento; CL=cesta do leito.

Os poços são construídos em tubos de PVC com 20 mm de diâmetro, com furos de 2 mm de diâmetro e espaçamento de 10 cm entre furos. Cada poço apresenta 2 m de largura e foi instalado perpendicularmente à direção do escoamento do leito. A Figura 4.10 ilustra as características e instalação do poço de monitoramento.



Figura 4.10: Características e instalação do poço de monitoramento. Detalhe do poço (superior esquerda), instalação do poço (direita) e poço instalado (inferior esquerda).

Uma bomba peristáltica retirava o líquido dos SAC por meio dos poços de monitoramento e bombeava para os respectivos RLF. A Tabela 4.4 apresenta o esquema de alimentação dos RLF. Nota-se que os poços de monitoramento do SACP alimentavam tanto os RLF plantados com *Typha* quanto os RLF plantados com *Canna*.

Tabela 4.4: Esquema de alimentação dos reatores de leito fixo.

Origem do líquido	Destino do líquido
Poço de monitoramento do SACP da região central	RLF plantado com <i>Typha</i> região central
Poço de monitoramento do SACP da região central	RLF plantado com <i>Canna</i> região central
Poço de monitoramento do SACP da região saída	RLF plantado com <i>Typha</i> região saída
Poço de monitoramento do SACP da região saída	RLF plantado com <i>Canna</i> região saída
Poço de monitoramento do SACNP da região central	RLF não plantado região central
Poço de monitoramento do SACNP da região saída	RLF não plantado região saída

4.5 Pontos de monitoramento

Na presente pesquisa, foram monitorados 14 pontos, e com o intuito de simplificar a análise dos dados, para cada ponto foi atribuído uma letra, conforme descrita na Tabela 4.5.

Tabela 4.5: Esquema de alimentação dos reatores de leito fixo.

Ponto de monitoramento	Letra atribuída
Esgoto bruto	A
Efluente do reator UASB (afluente ao SAC)	B
Poço de monitoramento do SACP região central	C
RLF plantado com <i>Typha</i> região central	D
RLF plantado com <i>Canna</i> região central	E
Poço de monitoramento do SACP região de saída	F
RLF plantado com <i>Typha</i> região de saída	G
RLF plantado com <i>Canna</i> região de saída	H
Efluente do SACP	I
Poço de monitoramento do SACNP região central	J
RLF não plantado região central	K
Poço de monitoramento do SACNP região de saída	L
RLF não plantado região de saída	M
Efluente do SACNP	N

Observa-se pela Tabela 4.5 que os pontos de monitoramento de C a I são referentes à unidade plantada e os pontos de J a N referem-se à unidade não plantada. A Figura 4.11 apresenta o fluxograma completo de funcionamento do SAC e dos RLF, bem como a distribuição dos pontos de coleta representados pelas letras de A a N.

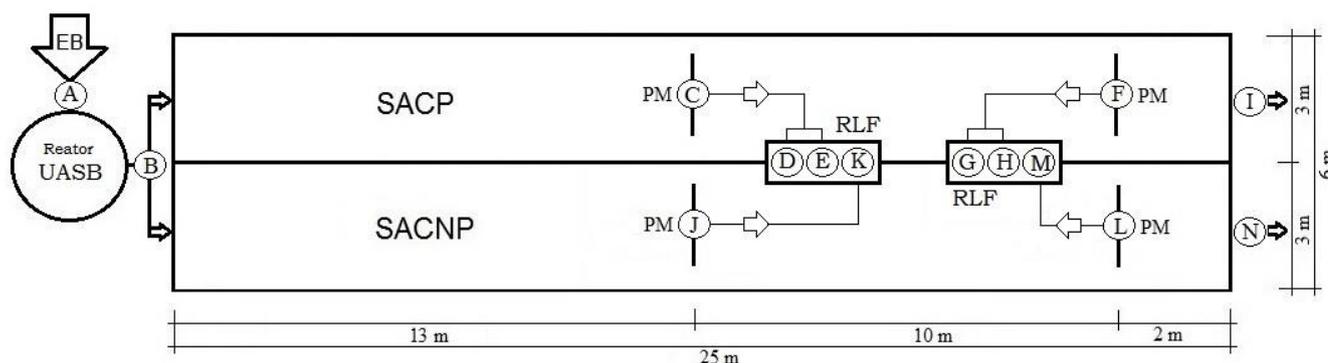


Figura 4.11: Fluxograma do sistema alagado construído, localização dos poços de monitoramento, dos reatores de leito fixo e dos pontos de coleta. Obs.: Desenho fora de escala. Legenda: EB=esgoto bruto; UASB=*upflow anaerobic sludge blanket*; SACP=sistema alagado construído plantado; SACNP=sistema alagado construído não plantado; RLF=reator de leito fixo; PM=poço de monitoramento.

4.6 Parâmetros e métodos de monitoramento

Para o monitoramento dos parâmetros de qualidade, foram realizadas amostras pontuais do esgoto bruto (ponto A), do efluente do reator UASB (ponto B), efluentes do SAC plantado (ponto I) e SAC não plantado (ponto N). As amostras foram preservadas a 4 °C e encaminhada para o laboratório de análises físico-químicas do DESA/UFMG. Com o objetivo de avaliar o desempenho do sistema de alagado construído, foram analisados os seguintes parâmetros:

demanda bioquímica de oxigênio (DBO_5^{20}), demanda química de oxigênio (DQO) e sólidos suspensos totais (SST). Os parâmetros foram relativos a amostras não filtradas (efluente bruto). O monitoramento destes parâmetros ocorreu ao longo do ano de 2013 e 2014. Todas as análises foram realizadas de acordo com os procedimentos descritos no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (AWWA/APHA/WEF, 2005).

O monitoramento dos parâmetros ambientais nos RLF foi realizado por meio de três sondas multiparamétricas da marca YSI modelo 600 XLM, equipadas com *data logger* interno. Este equipamento permite medir simultaneamente potencial redox (Eh), potencial hidrogeniônico (pH), oxigênio dissolvido (OD), condutividade elétrica (CE) e temperatura. As leituras de ORP e pH foram realizadas através de um sensor constituído por eletrodo de prata/cloreto de prata (Ag/AgCl). Para converter o potencial redox em ORP para Eh (referência ao eletrodo padrão de hidrogênio), foram adicionados 200 mV nos resultados, visando corrigir o potencial redox para o eletrodo padrão de hidrogênio (SHE), conforme nota técnica do fabricante (YSI, 2001). A calibração dos sensores para todos os parâmetros investigados foi realizada antes do monitoramento. Para calibração dos sensores, foram utilizados os padrões de referência fornecidos pelo fabricante. O sensor de pH/POR possui capacidade de leitura de POR de -999 a +999 mV, com precisão de ± 20 mV, e capacidade de leitura de pH de 0 a 14 com precisão de $\pm 0,2$. As leituras de OD foram realizadas por um sensor óptico (luminescência), com capacidade de leitura de 0 a 50 mg/L e precisão de $\pm 0,2$ mg/L. O sensor de temperatura possui capacidade de medição de -5 a +50 °C, com precisão de $\pm 0,15$ °C. A calibração dos sensores para todos os parâmetros investigados foi realizada antes dos períodos de monitoramento.

O monitoramento do ORP, pH, OD, CE e temperatura foram realizados nos pontos de C a L. E o monitoramento da DBO, DQO e SST foram realizados nos pontos A, B, I e N (conforme descritos na Tabela 4.5 e ilustrados na Figura 4.11).

A radiação solar foi monitorada por um sensor de radiação solar acoplado a uma estação meteorológica da marca DAVIS *Instruments*, modelo Vantage Pro 2. Este equipamento também coletou dados de temperatura do ar. A estação meteorológica foi instalada a uma distância de cerca de 10 m ao lado do SAC. A frequência das coletas dos dados pela estação meteorológica foi contínua, com intervalos de 5 min. A frequência das coletas dos dados pelas sondas multiparamétricas foi realizada por um conjunto de dias, com intervalo de 15 min. Os dias de monitoramento assim como os pontos e os objetivos, são apresentados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6: Períodos de monitoramento realizado pelas sondas multiparamétricas, pontos de monitoramento e objetivos no ano de 2014.

Início	Fim	Pontos			Objetivo
15/08	18/08	B	C	J	Investigar a influência da vegetação na região central do SAC
18/08	21/08	B	L	F	Investigar a influência da vegetação na região de saída do SAC
19/09	25/09	D	E	K	Investigar os RLF na região central
25/09	02/10	G	H	M	Investigar os RLF na região de saída
09/10	13/10	B	C	J	Investigar a influência da vegetação na região central do SAC
14/10	17/10	B	L	F	Investigar a influência da vegetação na região de saída do SAC
18/10	21/10	B	C	F	Investigar diferenças entre o comprimento do SACP
23/10	30/10	B	J	L	Investigar diferenças entre o comprimento do SACNP
11/11	14/11	D	E	K	Investigar os RLF na região central
16/11	20/11	G	H	M	Investigar os RLF na região de saída
20/11	26/11	D	E	K	Investigar os RLF na região central

Para realizar o monitoramento nos RLF pelas sondas multiparamétricas, foi utilizada uma célula de fluxo acoplada às linhas de coleta do efluente dos RLF. Conforme Tabela 4.6 as sondas eram trocadas de posição conforme o objetivo do monitoramento. No monitoramento do SAC o conjunto célula-sonda foi acoplado na linha de alimentação dos RLF, que eram bombeadas por meio dos poços de monitoramento. O líquido entrava em uma extremidade da célula de fluxo, passava pelos sensores que mediam os parâmetros de interesse e depois saía pela outra extremidade. A sonda multiparamétrica foi acoplada à célula de fluxo, como mostra a Figura 4.12.

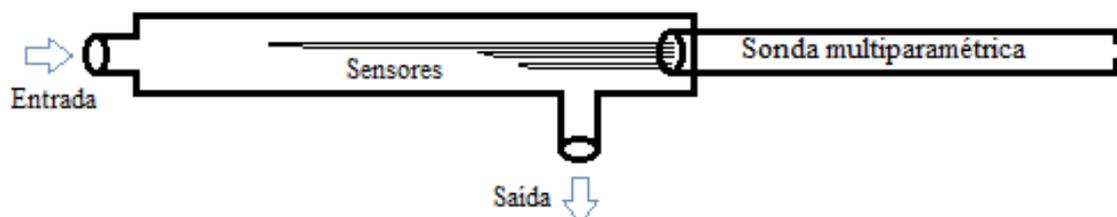


Figura 4.12: Desenho esquemático do funcionamento da célula de fluxo.

A Figura 4.13 mostra o interior do abrigo da bomba peristáltica. É possível perceber na parte superior do abrigo a bomba com as linhas de coleta e alimentação, e na parte inferior as sondas YSI acopladas às células de fluxo.



Figura 4.13: Interior do abrigo da bomba peristáltica.

4.7 Análise dos dados ambientais

Na avaliação global das condições ambientais no SAC e nos RLF, foi realizada uma análise descritiva dos resultados obtidos no monitoramento do potencial redox, oxigênio dissolvido, pH e temperatura, efetuadas com a finalidade de obter uma melhor compreensão da distribuição dos dados. Os resultados foram apresentados em tabelas e gráficos box-plot.

Com o objetivo de avaliar as diferenças entre grupos independentes, utilizou-se o teste não paramétrico de Mann-Whitney, com um nível de 95% de confiança. Os testes estatísticos de correlação foram realizados através da correlação de Spearman. Ambos os testes foram executados no *software* Statistica 10.

4.8 Comportamento hidrodinâmico do Reator de Leito Fixo

Os testes com traçador tiveram como objetivo conhecer o comportamento hidrodinâmico do RLF sem a linha de recirculação proposta por Kappelmeyer *et al.* (2002), e determinar possíveis diferenças na condutividade hidráulica de amostras ao longo do comprimento do SACP e SACNP. A avaliação da hidrodinâmica do RLF foi realizada com o emprego da técnica estímulo resposta e optou-se pela técnica de pulso conforme metodologia apresentada em Levenspiel (2000) e Metcalf e Eddy (2003). A recuperação do traçador se deu através do monitoramento da condutividade elétrica.

Os testes com amostras ao longo do comprimento do leito foram realizados nas cestas após período de ambientação, e procurou-se comparar a condutividade hidráulica nas regiões central

(13 m) e de saída (23 m) do SACP e do SACNP. Para isso, utilizou-se o meio suporte em cinco diferentes condições, sendo elas: i) escória limpa; ii) escória do SACP região central; iii) escória SACP região de saída; iv) escória do SACNP região central; e v) escória do SACNP região de saída. A escória limpa não foi utilizada como meio suporte, ou seja é isenta de biofilme, não possui acúmulo de sólidos e presença de raízes. Os demais pontos são amostras reais do leito, que foram ambientadas recebendo carga de sólidos, e em algumas condições apresentam raízes. Estes fatores contribuem para alteração na condutividade hidráulica. Para cada situação, foi realizado mais de um teste, como apresentado na Tabela 4.7.

Tabela 4.7: Condições dos testes hidrodinâmicos realizados no RLF.

Número do teste	Material suporte utilizado	Possui linha de recirculação	Vazão de alimentação (mL/min)	TDH teórico (mim)
1	Cesta com escória limpa	Não	440	24,7
2	Cesta com escória limpa	Não	450	24,1
3	Cesta com escória limpa	Sim	450	24,1
4	Cesta do SACP região central	Não	450	24,1
5	Cesta do SACP região central	Não	450	24,1
6	Cesta do SACP região de saída	Não	450	24,1
7	Cesta do SACP região de saída	Não	450	24,1
8	Cesta do SACNP região central	Não	440	24,7
9	Cesta do SACNP região central	Não	450	24,1
10	Cesta do SACNP região central	Não	450	24,1
11	Cesta do SACNP região de saída	Não	450	24,1
12	Cesta do SACNP região de saída	Não	450	24,1

Como mostrado na Tabela 4.7, apenas o teste nº 3 foi realizado com linha de recirculação, com uma vazão de 1500 mL/min, resultando em uma razão de recirculação interna do reator três vezes superior à vazão de alimentação. Kappelmeyer *et al.* (2002) operaram o reator com taxas de recirculação da ordem de 3, 10 e 30 vezes superiores à vazão de alimentação. Porém as vazões de alimentações utilizadas pelos autores eram de 15 a 40 mL/mim, ou seja muito baixas quando comparadas com as vazões utilizadas nessa pesquisa. Por isso a necessidade de adotar a recirculação.

Salienta-se que foram realizados mais dois testes com a linha de recirculação, porém devido a problemas operacionais os testes foram perdidos. Perderam-se também mais três testes com escória do leito.

O TDH teórico pode ser calculado pelo quociente entre o volume (multiplicado pela porosidade) e a vazão aplicada. A porosidade da escória limpa, utilizada nos testes, foi de 0,5.

A análise da porosidade do material foi realizada utilizando uma proveta graduada e água. A porosidade foi calculada através do volume de água que ocupava os poros do material.

O volume útil ocupado pelo líquido em todo o sistema (reator com amostra, mangueiras e célula de fluxo) foi de 10,9 litros, calculado a partir das dimensões da cesta interna (altura= 0,30 m e diâmetro= 0,28 m) aplicada ao volume do cilindro. A Tabela 4.8 resume os volumes das unidades em estudo.

Tabela 4.8: Volume das unidades em estudo.

Unidade	Valor (litros)
Volume do RLF	21,2
Volume da cesta do RLF	18,5
Volume útil do RLF	9,6
Volume das mangueiras + célula de fluxo	1,3
Volume útil do sistema	10,9

A vazão de projeto do RLF da presente pesquisa foi de 520 mL/min, contudo devido às condições operacionais da bomba a vazão necessitou ser ajustada para 450 mL/min. Para realização dos testes utilizaram-se vazões de 440 e 450 mL/min, resultando em um TDH teórico igual a 24,7 min e 24,1 min, respectivamente.

O traçador escolhido para realização dos testes foi o cloreto de sódio (NaCl), devido à sua fácil aquisição; fácil detecção em meio líquido; boa solubilidade em água; quando solúvel, apresenta um comportamento fluidodinâmico equivalente ao da água; e não degradação no período em estudo.

Para todos os testes realizados, foi preparada uma solução salina com uma massa de 60 g de sal diluídas em 450 mL de água e em seguida aplicado o pulso no RLF. Para o monitoramento da recuperação do traçador, utilizou-se um sensor de condutividade elétrica da marca YSI modelo 600 XLM. O sensor possui limite de detecção de 0 a 100.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. A massa de sal escolhida remete a uma condutividade elétrica da solução salina da ordem de 15.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, valor dentro da faixa detectável pelo sensor utilizado. Foi utilizado um fator de 0,536 para converter os valores de condutividade elétrica para concentração de NaCl, tal como determinado por calibração por Nascimento (2014).

Metcalf e Eddy (2003) recomendam que o tempo de injeção deva se realizar em curto espaço de tempo. De acordo com Macedo (2007) a injeção do traçador deve ser realizada sem perturbações no sistema em estudo, e por conta disso optou-se por interromper a alimentação

do reator e introduzir a solução salina na linha de alimentação. Como a solução salina continha 450 mL, e a vazão da bomba possuía 450 mL/min, logo o tempo de injeção para praticamente todos os testes teve duração de aproximadamente 1 minuto.

A realização dos testes ocorreu em laboratório e foi necessário montar um aparato utilizando bomba peristáltica, célula de fluxo e um reservatório de água limpa para alimentação. Nos testes que avaliaram o comportamento do reator com a linha de recirculação, foram utilizadas mais uma bomba peristáltica e mais uma célula de fluxo. Em todos os testes realizados, utilizou-se água limpa. A condutividade elétrica da água foi medida e utilizada como valor de *background*. A água foi retirada de um reservatório por meio da bomba peristáltica e introduzida no RLF pelo anel de distribuição localizado na parte superior do reator. O líquido foi coletado por um tubo no fundo e direcionado para uma célula de fluxo na saída do RLF, onde estava acoplado um sensor de condutividade elétrica. A Figura 4.14 apresenta o esquema de funcionamento do teste, e a Figura 4.15 o teste sendo realizado.

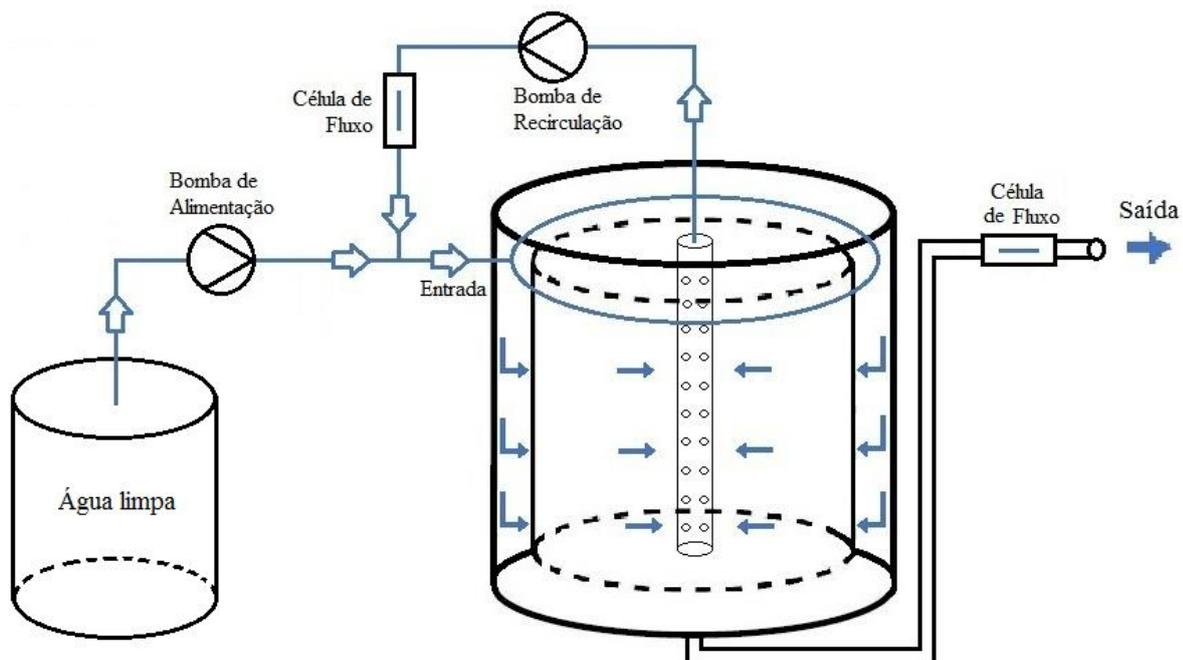


Figura 4.14: Representação esquemática do teste com traçador no reator de leito fixo.



Figura 4.15: Testes hidrodinâmicos no reator de leito fixo não plantado (esquerda) e no reator de leito fixo plantado com *Typha* (direita).

Os dados foram coletados pela sonda YSI, configurada para medição a cada 10 segundos. A duração de cada teste foi estipulada pela recuperação do traçador, até que a condutividade elétrica retornasse ao valor de *background*. O número de tanques em série (N) foi calculado pela função gama, descrito por Kadlec e Wallace (2009).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Avaliação do desenvolvimento das plantas nos Reatores de Leito Fixo

Após período de 132 dias de ambientação no leito, as cestas foram retiradas, em 09/09/2014, e em seguida inseridas nos respectivos RLF. A Figura 5.1 apresenta o desenvolvimento das raízes e parte aérea das plantas. Nota-se que a cesta plantada com *Canna* ambientada no leito do SACP próximo à saída estava com as raízes mais desenvolvidas e já apresentava flores. Por outro lado, a parte aérea das cestas plantadas com *Canna* e *Typha* que foram ambientadas no leito do SACP, região central, se desenvolveu melhor que nas cestas ambientadas na região de saída do SACP, como se pode observar pela quantidade e tamanho das folhas.



Figura 5.1: Cestas ambientadas no leito do Sistema Alagado Construído plantado e não plantado em 09/09/2014.

Depois de inseridas nos RLF, e após 51 dias de operação, as cestas foram retiradas em 30/10/2014 para avaliação do desenvolvimento das raízes. Pela Figura 5.2, é possível notar que as raízes da *Typha*, tanto da região central, quanto da região de saída, desenvolveram-se mais que as raízes da *Canna*. Estes resultados sugerem maior aplicabilidade da *Typha* em SAC, quando comparado com a *Canna*, pois a zona de raízes promovida pelas plantas interfere diretamente no desempenho do SAC.



Figura 5.2: Cestas dos Reatores de Leito Fixo em 30/10/2014.

Comparando o desenvolvimento das raízes da mesma espécie em diferentes zonas, observa-se pela Figura 5.2 que as raízes da *Typha* na região de saída buscaram maior desenvolvimento, enquanto que os rizomas da *Typha* desenvolveram-se mais na região central. Fazendo uma análise da *Canna* em diferentes regiões, nota-se que as raízes da *Canna* na região de saída desenvolveram-se mais que na região central. Este fato se deve a diferentes condições e adaptação da planta em cada zona. Também é possível notar que as cestas do RLF da região central plantadas com *Typha* e *Canna* apresentam coloração mais clara que as demais cestas. Era de se esperar que na região central as cestas estivessem com a coloração mais escura pois, além do efluente estar mais séptico, estariam presentes microrganismos anaeróbios (que conferem uma coloração escura). De forma similar, seria de se esperar que na região de saída as cestas apresentassem coloração mais clara, pois as condições proporcionariam o desenvolvimento de microrganismos aeróbios (coloração clara). Neste caso, devido às condições de colmatação do SAC, toda a região do leito, incluindo a saída, encontra-se em condições anaeróbias, fato demonstrado pelos resultados de oxigênio dissolvido e potencial redox apresentados no item 5.4. A coloração clara apareceu apenas nos RLF plantados da região central, chama a atenção para a presença das plantas, o que poderia ter influenciado na comunidade microbiológica e em consequência na coloração das cestas.

A Figura 5.3 mostra o interior do RLF plantado com *Canna* na região central e do interior do RLF não plantado na região de saída. É possível observar que a coloração do interior do RLF é semelhante à da cesta. A tonalidade clara também estava presente nas mangueiras de coleta do efluente dos RLF plantados com *Typha* e *Canna* na região central (Figura 5.3, esquerda) operando sob condições do SAC plantado. As mangueiras dos demais reatores apresentavam coloração escura.



Figura 5.3: Interior do RLF plantado com *Canna* região central (esquerda) e do RLF não plantado região saída (direita) em 30/10/2014.

Foi observada no interior dos RLF plantados com *Typha* e com *Canna* na região de saída (Figura 5.4), uma coloração rósea, sugerindo a presença de bactérias púrpuras sulfurosas, que se desenvolvem em condições anaeróbias e estão relacionadas ao ciclo do enxofre. Estes resultados são coerentes com as remoções de sulfato observadas no monitoramento dos SAC. No RLF plantado com *Typha* a coloração rósea está mais intensa que no RLF plantado com *Canna*.



Figura 5.4: Interior do RLF plantado com *Typha* saída (esquerda) e interior do RLF plantado com *Canna* saída (direita) em 30/10/2014.

Em 07/01/2015 as cestas foram removidas novamente para averiguação, completando 121 dias de operação dos RLF. A Figura 5.5 mostra as cestas após este período. É possível observar que todas as cestas apresentam coloração escura, inclusive as cestas plantadas com *Typha* e *Canna* da região central. O desenvolvimento das raízes da *Typha* continuou a superar a *Canna*, entretanto a parte aérea da *Canna* desenvolveu-se melhor que a *Typha*, como mostrado na Figura 5.5. Sabe-se que o desenvolvimento das raízes das plantas é mais relevante para o desempenho dos SAC que o desenvolvimento de sua parte aérea (BRIX, 1997).



Figura 5.5: Cestas dos Reatores de Leito Fixo em 07/01/2015.

O corte da parte aérea da vegetação dos RLF foi realizado junto com o corte do SACP. Cortou-se a parte aérea das plantas junto ao caule, utilizando uma faca. Foi observado que algumas plantas da região de saída do RLF plantado com *Typha* não resistiram ao corte, e algumas unidades vieram a morrer. A substituição das plantas mortas por novas mudas foi providenciada quando percebido. O fato de algumas unidades da *Typha* não resistirem ao corte também foi observado no leito do SAC. Quando isso ocorria eram providenciadas novas mudas, repondo as que morriam. Após avaliação das raízes dos RLF, foi necessário retirar o excesso de raízes e rizomas que dificultavam o retorno da cesta para o RLF, principalmente nas cestas plantadas com *Typha*, que desenvolviam suas raízes consideravelmente. Este fato também pode ter contribuído para que as plantas morressem.

A coloração rósea nos RLF não plantados (região central e saída) foi observada apenas na averiguação realizada em 07/01/2015. Na Figura 5.6 (esquerda) é possível observar o biofilme púrpura formado na malha da cesta do RLF não plantado da região de saída. Este biofilme formou-se em vários pontos da cesta interna, mas não chegou ao ponto de colorir a parede interna do RLF. No interior do RLF plantado com *Canna* região de saída foi observado um denso biofilme púrpura que mantinha contato com a raiz das plantas (Figura 5.6 direita).



Figura 5.6: Biofilme da cesta do RLF não plantado região de saída (esquerda) e biofilme do interior do RLF não plantado região de saída (direita) em 07/01/2015.

Pela Figura 5.7 é possível notar que a perda de carga hidráulica no interior do RLF aumentou a ponto de o líquido transbordar para fora. Este fato foi observado após 170 dias de operação. Para corrigir este problema foi necessário abaixar o nível d'água no interior do RLF e evitar o transbordamento. Acredita-se que a perda de carga foi causada pelo crescimento da biomassa no interior do reator e pelo acúmulo de sólidos presentes no leito.



Figura 5.7: Perda de carga nos reatores de leito fixo após 170 dias de operação.

5.2 **Monitoramento do Sistema Alagado Construído**

O monitoramento do SAC foi realizado com o objetivo de compreender o comportamento ambiental do sistema, uma vez que se encontra em avançado estado de colmatção. A Tabela 5.1 apresenta a estatística descritiva das concentrações de DBO, DQO e SST do esgoto bruto, reator UASB, SAC plantado e SAC não plantado. Os dados correspondem ao monitoramento dos anos de 2013 e 2014. Nota-se que as concentrações médias de DBO, DQO e SST do esgoto

bruto estão abaixo dos valores típicos reportados por von Sperling (2005), considerando concentrações típicas com médias de 300 mg/L de DBO, 600 mg/L de DQO e 350 mg/L de SST.

Tabela 5.1: Estatística descritiva das concentrações de DBO, DQO e SST nos pontos monitorados nos anos de 2013 e 2014.

Ponto de amostragem	Parâmetro	Número de dados	Média aritmética	Mediana	Mínimo	Máximo	Desvio padrão
Esgoto bruto	DBO	27	262	250	44	446	111
	DQO	24	415	411	143	821	158
	SST	25	209	160	92	440	111
Reator UASB	DBO	23	54	63	13	93	22
	DQO	21	260	220	105	527	131
	SST	26	68	64	10	191	45
SACP	DBO	18	13	13	2	25	7
	DQO	19	85	54	3	268	75
	SST	19	32	18	11	206	44
SACNP	DBO	19	10	11	3	16	4
	DQO	19	80	37	4	266	78
	SST	18	25	10	2	170	40

Obs.: a unidade dos dados está em miligramas por litro (mg/L). Legenda: UASB=*upflow anaerobic sludge blanket*; SACP=sistema alagado construído plantado; SACNP=sistema alagado construído não plantado; DBO=demanda bioquímica de oxigênio; DQO=demanda química de oxigênio; SST=sólidos suspensos totais.

A Figura 5.8 apresenta o box-plot dos dados de DBO dos pontos monitorados. O padrão de lançamento para DBO estabelecido na Deliberação Normativa COPAM/CERH nº 01 de 2008 (MINAS GERAIS, 2008) é de 60 mg/L. Nota-se que 100% dos valores atenderam o padrão de lançamento de DBO no SAC plantado e não plantado, para o período avaliado.

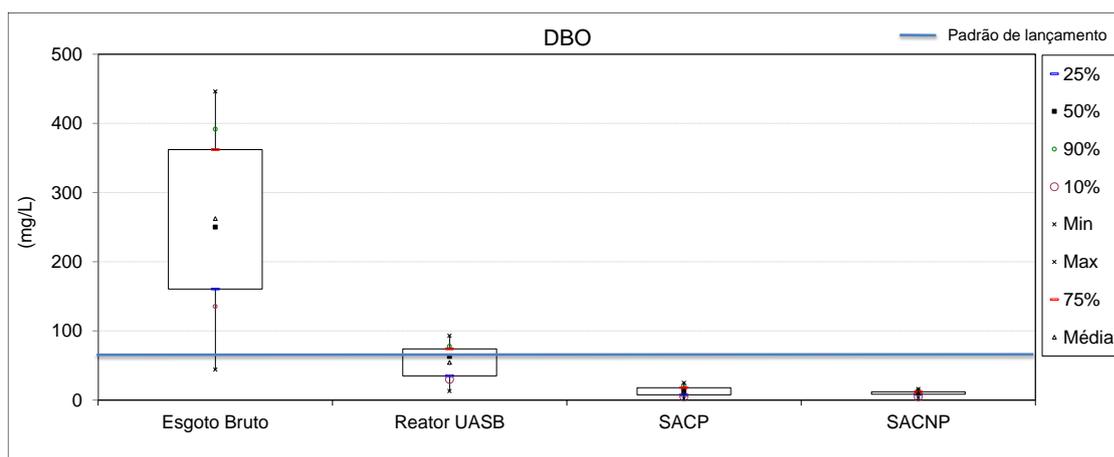


Figura 5.8: Gráfico box-plot dos dados de DBO nos pontos monitorados. Legenda: UASB=*upflow anaerobic sludge blanket*; SACP=sistema alagado construído plantado; SACNP=sistema alagado construído não plantado; DBO=demanda bioquímica de oxigênio.

A legislação vigente estabelece um padrão de lançamento de 180 mg/L de DQO e 100 mg/L de SST. As Figuras 5.9 e 5.10 apresentam os gráficos box-plot dos valores de DQO e SST, respectivamente. Observa-se que nem todos os dados cumprem os padrões de lançamento.

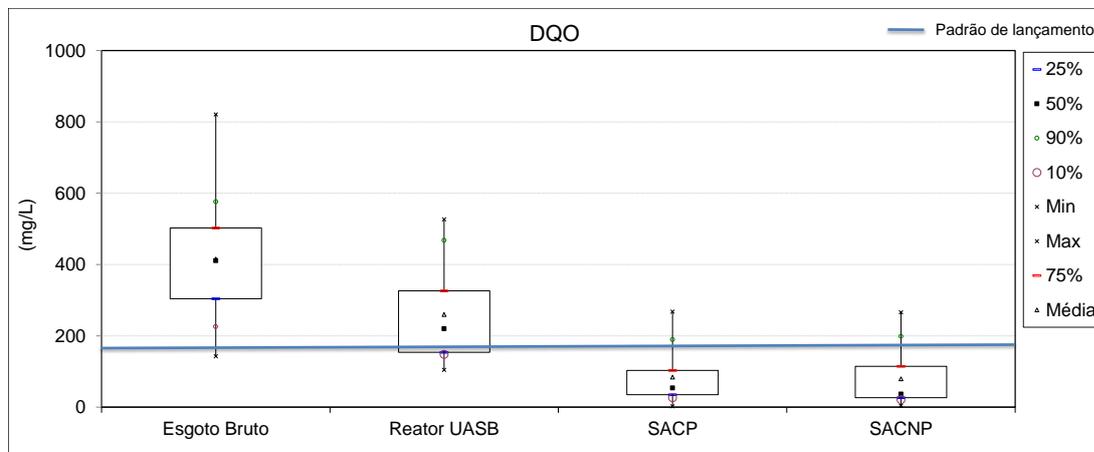


Figura 5.9: Gráfico box-plot dos dados de DQO nos pontos monitorados. Legenda: UASB=*upflow anaerobic sludge blanket*; SACP=sistema alagado construído plantado; SACNP=sistema alagado construído não plantado; DQO=demanda química de oxigênio.

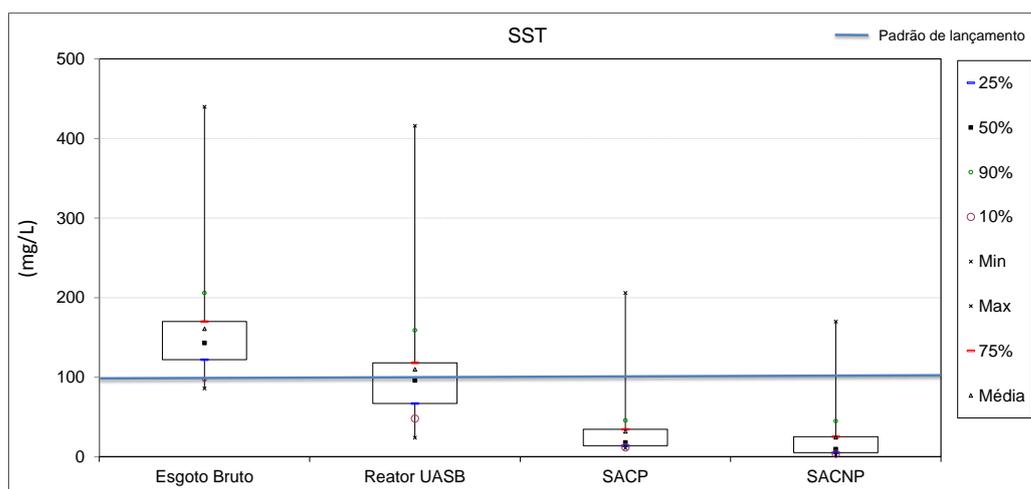


Figura 5.10: Gráfico box-plot dos dados de SST nos pontos monitorados. Legenda: UASB=*upflow anaerobic sludge blanket*; SACP=sistema alagado construído plantado; SACNP=sistema alagado construído não plantado; SST=sólidos suspensos totais.

A Tabela 5.2, apresenta a estatística descritiva das eficiências de remoção de DBO, DQO e SST do SAC plantado e do SAC não plantado. Os valores de eficiência foram calculados a partir da carga afluyente do sistema, assim, foram levados em conta os valores de concentração e vazões afluentes. As eficiências de remoção foram calculadas com os valores de concentração do efluente do reator UASB, ou seja, não foram levados em conta os valores de esgoto bruto. Pelos valores médios de eficiências de remoção, é possível observar que o SAC não plantado apresenta melhor desempenho na remoção de DQO e SST.

Tabela 5.2: Estatística descritiva das eficiências de remoção do SAC plantado e do SAC não plantado calculadas a partir da carga removida.

Sistema	Parâmetro	Número de dados	Média aritmética	Mediana	Mínimo	Máximo	Desvio padrão
SACP	DBO	16	80	87	41	97	16
	DQO	10	77	72	60	99	15
	SST	14	82	86	50	94	11
SACNP	DBO	17	83	87	59	96	12
	DQO	17	79	85	20	95	19
	SST	13	82	91	38	98	18

Obs.: os dados estão em porcentagem (%). Legenda: SACP=sistema alagado construído plantado; SACNP=sistema alagado construído não plantado; DBO=demanda bioquímica de oxigênio; DQO=demanda química de oxigênio; SST=sólidos suspensos totais.

As Figuras 5.11, 5.12 e 5.13 apresentam os gráficos box-plot das eficiências de remoção de DBO, DQO e SST, respectivamente. A legislação vigente estabelece uma redução de no mínimo 60% de DBO e 55% de DQO. Apenas os valores de DQO do SAC plantado atendem 100% dos padrões.

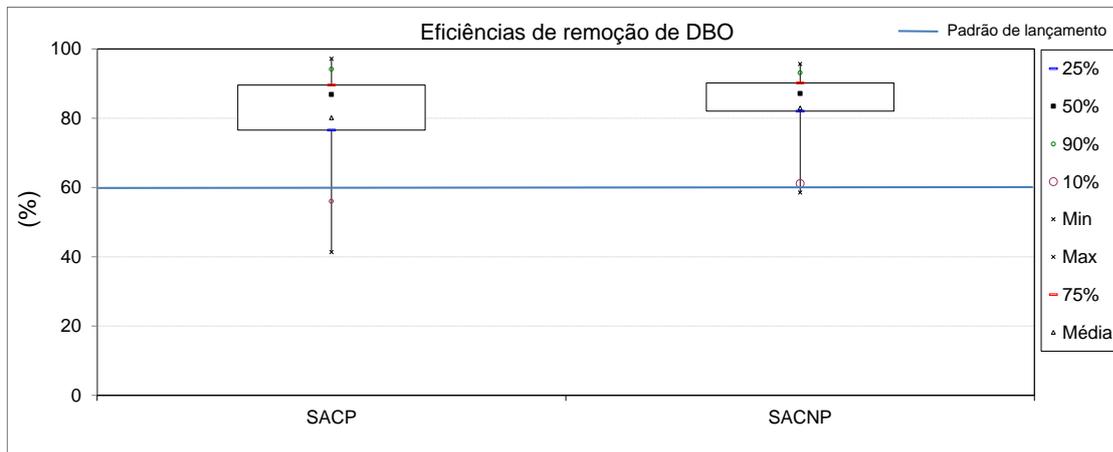


Figura 5.11: Gráfico box-plot das eficiências de remoção de SST nos Sistema Alagado Construído plantado e não plantado. Legenda: SACP=sistema alagado construído plantado; SACNP=sistema alagado construído não plantado; DBO=Demanda Bioquímica de Oxigênio.

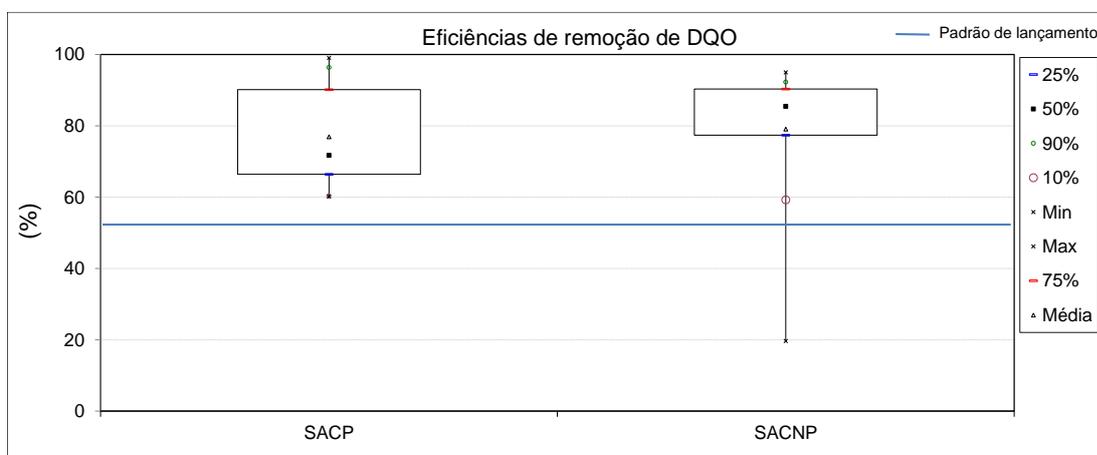


Figura 5.12: Gráfico box-plot das eficiências de remoção de DQO nos Sistema Alagado Construído plantado e não plantado. Legenda: SACP=sistema alagado construído plantado; SACNP=sistema alagado construído não plantado; DBO=Demanda Química de Oxigênio.

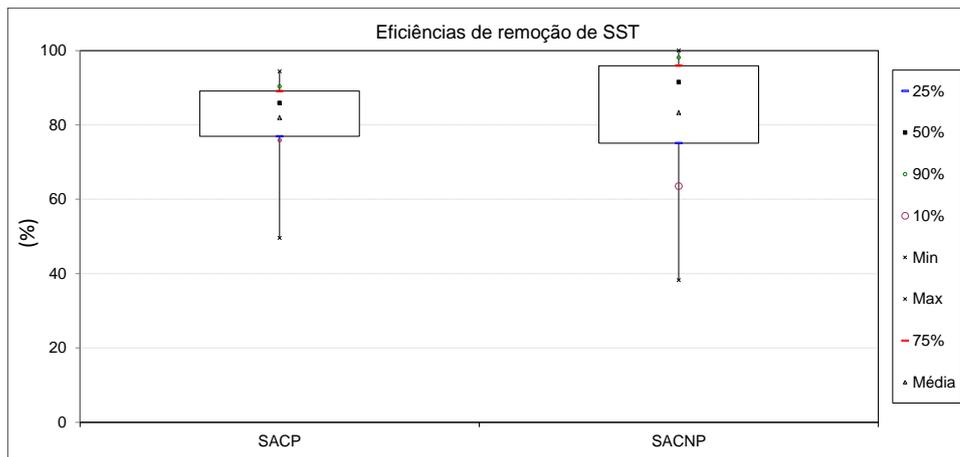


Figura 5.13: Gráfico box-plot das eficiências de remoção de SST nos Sistema Alagado Construído plantado e não plantado. Legenda: SACP=sistema alagado construído plantado; SACNP=sistema alagado construído não plantado; SST=Sólidos em Suspensão Totais.

Apesar do elevado estado de colmatção do sistema, o desempenho continua satisfatório para os parâmetros avaliados.

5.3 Avaliação do comportamento hidrodinâmico dos Reatores de Leito Fixo

A adaptação da metodologia do RLF proposta por Kappelmeyer *et al.* (2002) foi avaliada por ensaios hidrodinâmicos e os resultados são apresentados na Tabela 5.3. Para melhor compreensão dos resultados, é importante destacar que o RLF opera submerso, possui alimentação radial (na parte superior) e fluxo cêntrico (sentido da periferia para o centro do reator).

Os testes realizados com amostras de escória limpa buscaram conhecer o comportamento hidrodinâmico do RLF utilizando escória de alto forno, e avaliar seu desempenho sem a linha de recirculação. Os demais testes foram realizados com amostras do leito do SACP e SACNP procurando diferenças na condutividade hidráulica ao longo do comprimento e a influência das raízes na hidrodinâmica do reator.

Tabela 5.3: Resultados dos ensaios hidrodinâmicos nos reatores de leito fixo.

Condição do teste	Escória limpa			Amostra do SAC plantado				Amostra do SAC não plantado				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Número do teste	19/05	09/09	09/09	24/07	02/09	24/07	02/09	21/05	28/07	02/09	28/07	02/09
Data de realização do teste em 2014	19/05	09/09	09/09	24/07	02/09	24/07	02/09	21/05	28/07	02/09	28/07	02/09
Dias de ambientação da cesta no leito	-	-	-	85	125	85	125	21	89	125	89	125
Tipo do material suporte	Cesta com escória limpa	Cesta com escória limpa	Cesta com escória limpa	Cesta do SACP região central	Cesta do SACP região central	Cesta do SACP região de saída	Cesta do SACP região de saída	Cesta do SACNP região central	Cesta do SACNP região central	Cesta do SACNP região central	Cesta do SACNP região de saída	Cesta do SACNP região de saída
Vazão de alimentação (mL/min)	440	450	450	450	450	450	450	440	450	450	450	450
Vazão de recirculação (mL/min)	-	-	1500	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Razão de recirculação	-	-	3:1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TDH teórico (min)	24,7	24,1	24,1	24,1	24,1	24,1	24,1	24,7	24,1	24,1	24,1	24,1
TDH observado (min)	13,9	14,9	18,6	12,1	15	12,3	11,3	13,1	13,6	12,6	14	10,4
Duração da injeção do pulso (h)	00:01:05	00:01:05	00:01:04	00:01:05	00:00:56	00:01:02	00:00:58	00:01:06	00:01:03	00:00:59	00:01:03	00:00:57
Duração do teste (h)	02:14:06	02:15:20	02:09:50	01:38:02	01:52:07	01:32:01	01:14:47	01:23:02	01:33:53	02:00:13	01:33:47	01:15:00
Número de tanques em série - N	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Coefficiente de determinação - R ²	0,97	0,96	0,87	0,97	0,92	0,97	0,98	0,97	0,96	0,95	0,97	0,96
t médio/(t médio - t pico)	1,37	1,27	1,16	1,44	1,25	1,29	1,28	1,52	1,39	1,36	1,75	1,32
Número de dispersão	0,29	0,62	-	1,15	1,38	0,49	0,55	0,48	0,98	2,42	0,78	1,07
Eficiência volumétrica	0,565	0,621	0,770	0,504	0,620	0,509	0,469	0,533	0,565	0,520	0,578	0,429
Fração de zonas mortas	0,435	0,380	0,230	0,496	0,380	0,491	0,530	0,467	0,440	0,480	0,422	0,570
Recuperação do traçador (%)	100	113	92	89	130	100	95	93	92	89	90	88

Legenda: TDH=tempo de detenção hidráulica; t=tempo; SAC= sistema de alagado construído; SACP=sistema de alagado construído plantado; SACNP=sistema de alagado construído não plantado.

Esperava-se que as amostras na região central do leito estivessem com um maior acúmulo de sólidos que as amostras da região de saída, contribuindo para a redução da condutividade hidráulica do reator e por consequência em perdas em sua eficiência volumétrica. Os resultados obtidos para as amostras do SACP foram semelhantes ao do SACNP, procurando comparar as diferenças entre o leito plantado e não plantado e a posição ao longo do comprimento de cada unidade. No dia 30/04/2014 as cestas com as amostras do SACP e do SACNP foram montadas e inseridas no leito. Durante o período de ambientação, alguns testes foram realizados, por conta disso, as cestas tiveram diferentes tempos de ambientação antes da realização do teste. A Tabela 5.3 apresenta os dias em que a cesta permaneceu no leito até a data de realização do teste. Acredita-se que o período de ambientação não foi suficiente para o desenvolvimento das raízes e para que a colmatação ocorresse nas amostras. Desta maneira, não foram observadas diferenças entre amostras ao longo do comprimento (região central e saída) e amostras com presença/ausência de raízes, e conclui-se que com as amostras no determinado tempo de ambientação no leito não apresentaram diferenças entre si. A colmatação é um fator que interfere no desempenho dos SAC, pois pode provocar a redução da condutividade hidráulica (PLATZER e MAUCH, 1997; MOLLE *et al.*, 2006).

As vazões de 440 mL/min utilizadas no teste nº 1 e 8 foram devidas a limitações da bomba utilizada no teste. Por consequência o TDH teórico do reator permaneceu em 24,7 min (6 segundos superior), somente 2 % superior ao dos demais testes, valor considerado desprezível nessa situação. No geral, os resultados do TDH médio foram cerca da metade dos valores de TDH teórico, indicando uma redução de aproximadamente metade do volume útil do reator. Apenas no teste com a linha de recirculação a diferença entre o TDH teórico e TDH médio reduziu pela metade, demonstrando que com a linha de recirculação o reator se comporta mais próximo de um reator ideal, fato este demonstrado pelo valor de N (número de tanques em série) ser igual a 1.

A principal conclusão dos testes hidrodinâmicos, de particular interesse para a avaliação dos RLF, foi que nos testes sem linha de recirculação o valor de N foi baixo, indicando condições próximas à mistura completa. O valor obtido foi igual a 2. Utilizando-se a função gama, o ajuste deste valor é realizado por números inteiros e possivelmente os valores encontraram-se representados por um número entre 1 e 2, como mostrado pela relação entre o TDH médio e o tempo do pico (Tabela 5.1). Ainda assim, o RLF sem a linha de recirculação demonstrou ser um reator de boa mistura, conforme mostrado na Figura 5.15. É possível perceber que, com cerca de

6 minutos o pico da concentração do traçador já atinge a saída do RLF, ou seja, aproxima-se do modelo de mistura completa.

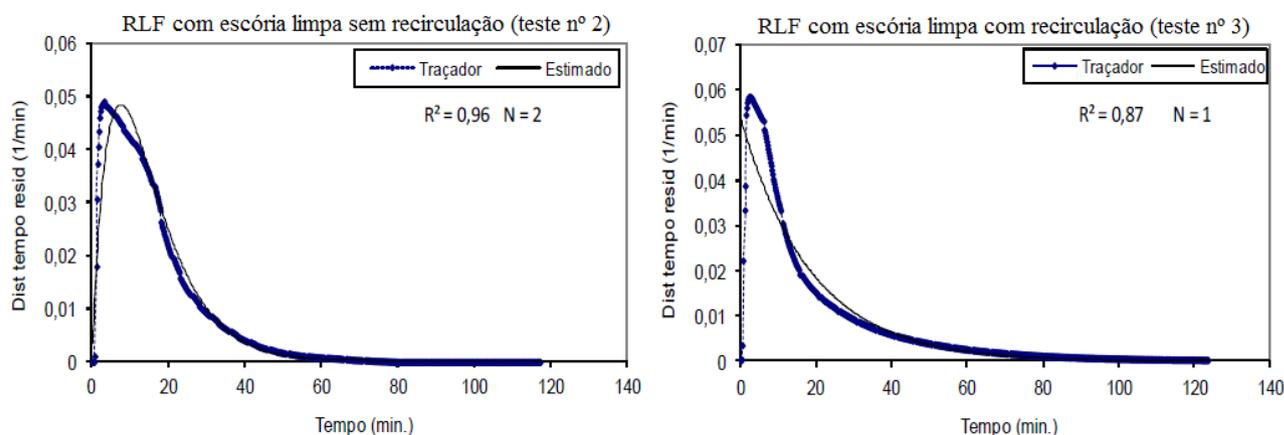


Figura 5.14: Gráfico dos ajustes à distribuição dos tempos de residência (função gama) no teste do RLF sem recirculação (esquerda) e com recirculação (direita).

Segundo Cossio (1993), para validar o experimento é necessário obter no mínimo 85% da massa inicial de traçador aplicado. Nos testes realizados, a recuperação do traçador manteve-se acima dos 85%, sendo em que em alguns testes o valor ultrapassou os 100%, devido ao ajuste da curva adotada pelos valores de *background*.

O projeto de RLF de Kappelmeyer *et al.* (2002) utilizou 21 kg de cascalho fino (diâmetro = 2-4 mm) como meio suporte, e uma vazão de 15-40 mL/min. O RLF da presente pesquisa utilizou 18,5 kg de escória de alto forno, com uma granulometria bem maior (diâmetro = 20-30 mm), com uma vazão bem mais elevada, de 450 mL/min. Diante desses valores e dos testes aplicados (reatores próximos à mistura completa), pode-se concluir que com a granulometria utilizada, somada às elevadas vazões, não se identificou a necessidade de se adotar a linha de recirculação.

5.4 Monitoramento das condições ambientais no Sistema Alagado Construído e nos reatores de Leito Fixo

Neste item, os dados do monitoramento ambiental realizado no Sistema de alagado construído e nos reatores de Leito Fixo são apresentados de duas maneiras: i) Análise global das condições ambientais do sistema e; ii) Análise focada em um objetivo de acordo com a Tabela 4.6. Os objetivos foram: avaliar a influência da vegetação, diferenças entre o comprimento do leito, a diferença entre duas espécies de planta e avaliar o Reator de Leito Fixo como método de análise aplicada ao Sistema de Alagado Construído.

A análise global foi realizada utilizando todos os dados adquiridos no monitoramento, ou seja, agruparam-se todos os períodos descritos na Tabela 4.6. A análise focada em um objetivo utilizou os dados agrupados de todos os períodos e apresenta alguns resultados do monitoramento diário realizado de acordo com a Tabela 4.6.

5.4.1 Avaliação global das condições ambientais no Sistema Alagado Construído e nos Reatores de Leito Fixo

Os resultados do monitoramento do potencial redox, oxigênio dissolvido, pH e temperatura, foram agrupados em todos os períodos avaliados e tratados em conjunto com o objetivo de avaliar o comportamento de cada parâmetro em um determinado ponto de monitoramento. Nos testes estatísticos de comparação entre duas amostras, optou-se por não se fazer comparações usando amostras pareadas (quando fosse o caso), mas considerar amostras independentes, não pareadas. Tem-se uma possível perda na robustez, quando comparado com um teste pareado, porém um ganho no número de dados, pois desta forma puderam ser usados todos os dados da série, ao invés de apenas os dados obtidos simultaneamente. A apresentação da análise de cada parâmetro foi feita individualmente em tópicos.

5.4.1.1 Potencial redox

O potencial redox é o parâmetro de maior interesse na presente pesquisa, pois retrata as condições gerais do sistema, mostrando as condições de redução ou oxidação do meio. A Tabela 5.4 apresenta a estatística descritiva deste parâmetro, os pontos onde foi monitorado e o período de monitoramento. Ao se interpretar os valores, deve-se destacar que todos os dados de potencial redox estão apresentados como Eh, ou seja, são 200 mV superiores aos valores que seriam expressos como ORP, devido à correção do eletrodo de referência (ver item 4.6).

Tabela 5.4: Estatística descritiva dos dados de potencial redox (Eh) nos pontos monitorados.

Ponto	Local de monitoramento	10%	90%	Mín.	Máx.	Média aritmética	Mediana	Desvio padrão	Número de dados	Período de monitoramento em 2014
B	Reator UASB	-222	-136	-230	-90	-189	-205	32	2564	15/08 a 21/08 09/10 a 30/10
C	SACP central	-249	-178	-253	-101	-217	-223	27	1151	15/08 a 18/08 9/10 a 13/10 18/10 a 21/10
D	RLF Typha central	-291	-178	-298	-25	-232	-236	43	1375	19/09 a 25/09 11/11 a 14/11 20/11 a 26/11
E	RLF Canna central	-296	-218	-303	-100	-245	-237	32	1280	19/09 a 25/09 12/11 a 14/11 20/11 a 26/11
F	SACP saída	-255	-134	-259	-2	-205	-219	51	1029	18/08 a 21/08 14/10 a 21/10
G	RLF Typha saída	-264	-205	-282	-31	-233	-233	37	785	27/09 a 02/10 16/11 a 20/11
H	RLF Canna saída	-280	-205	-297	-2	-235	-236	39	1181	25/09 a 02/10 14/11 a 20/11
J	SACNP central	-263	-159	-275	-100	-226	-242	41	1379	14/08 a 18/08 09/10 a 13/10 23/10 a 30/10
K	RLFNP central	-305	-183	-317	-102	-249	-254	43	1381	19/09 a 25/09 11/11 a 14/11 20/11 a 26/11
L	SACNP saída	-280	-197	-290	-101	-247	-255	35	1253	18/08 a 21/08 13/10 a 17/10 23/10 a 30/10
M	RLFNP saída	-293	-195	-315	-37	-258	-272	52	1161	26/09 a 02/10 14/11 a 20/11

Obs.: Exceto para número de dados, a unidade dos dados está em milivolts (mV). Legenda: UASB=*upflow anaerobic sludge blanket*; SACP=sistema alagado construído plantado; SACNP=sistema alagado construído não plantado; RLF=reator de leito fixo; RLFNP=reator de leito fixo não plantado; Mín.=Mínimo; Máx.=Máximo.

Observa-se que todos os resultados de potencial redox encontram-se negativos, ou seja, estão em condições redutoras (condições anaeróbias), favorecendo o crescimento de microrganismos fermentativos, metanogênicos e redutores de sulfato, conforme mostrados na Figura 3.6. Os resultados observados não favorecem as condições anóxicas, pois os valores médios encontram-se abaixo de -200 mV (faixa anaeróbia). Contudo, nota-se pela Tabela 5.4, os valores máximos de potencial redox, indicando que há flutuações dos valores na faixa anóxica (-100 a +100 mV).

Pela Tabela 5.4, nota-se que o maior número de dados encontra-se no monitoramento do reator UASB, pois enquanto duas sondas estavam medindo em dois pontos pareados (ponto F com L, C com F e J com L), a terceira sonda ficou instalada no ponto B, servindo como um local a mais de comparação à dos pontos monitorados. A distribuição dos pontos de monitoramento pode ser observada na Figura 4.11. Nota-se que a mediana dos valores do efluente do reator UASB

encontra-se menos negativa à dos demais pontos monitorados. Este fato é atribuído às condições de colmatação do leito, que levam o líquido a permanecer em maior contato com ambiente redutor, deslocando o potencial redox para valores mais negativos. O maior contato do líquido com o meio também está relacionado com os maiores tempos de detenção hidráulica do SAC, quando comparados com o reator UASB (TDH médio nos leitos cerca de 5 vezes superior).

Pela Figura 5.16, é possível perceber que os valores de potencial redox do SACP encontram-se ligeiramente superiores aos valores do potencial redox do SACNP. Estes resultados estão coerentes com a literatura, indicando que as plantas podem contribuir para elevar o potencial redox, com a liberação de oxigênio, favorecendo o crescimento de microrganismos aeróbios (GAGNON *et al.*, 2007; FAULWETTER *et al.*, 2009; LAI *et al.*, 2012). No entanto, as condições de altas cargas superficiais e volumétricas conduzem a que o oxigênio fornecido pelas plantas não seja suficiente a ponto de elevar o potencial redox e tornar as condições menos redutoras. Apesar das poucas diferenças observadas, sob as atuais condições de colmatação do leito as plantas desempenham um importante papel.

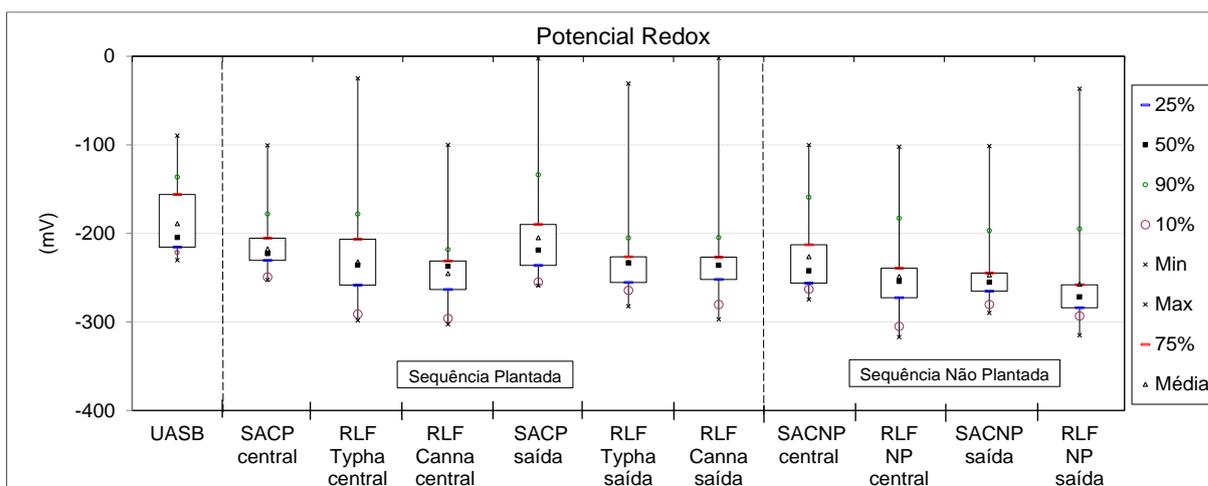


Figura 5.15: Gráfico box-plot dos dados de potencial redox (Eh) nos pontos monitorados.

5.4.1.2 Oxigênio dissolvido

O oxigênio dissolvido (OD) é um parâmetro de difícil mensuração em ambientes predominantemente redutores, como no caso do SAC em estudo, pois seu consumo pelos microrganismos presentes no sistema é imediato (NIVALA *et al.*, 2012), e as concentrações são usualmente baixas. Quando o oxigênio dissolvido encontra-se disponível no meio, o sistema utiliza-o primeiro como acceptor de elétrons, por produzir a mais alta quantidade de energia (VON SPERLING, 1996). Entretanto pequenas concentrações foram medidas, como apresentado na

Tabela 5.5. Já era de se esperar que os valores de oxigênio dissolvido fossem sempre baixos em todos os pontos de monitoramento, em virtude das condições redutoras dos SAC, tal como evidenciado pelos valores do potencial redox. As condições observadas de oxigênio dissolvido estão de acordo com o esperado. Observar-se que todos os valores permanecem inferiores a 1 mg/L.

Tabela 5.5: Estatística descritiva dos dados de oxigênio dissolvido (OD) nos pontos monitorados.

Ponto	Local de monitoramento	10%	90%	Mín.	Máx.	Média aritmética	Mediana	Desvio padrão	Número de dados	Período de monitoramento em 2014
B	Reator UASB	0,10	0,11	0,09	0,11	0,10	0,10	0,00	591	15/08 a 21/08
C	SACP central	0,09	0,13	0,08	0,14	0,10	0,10	0,02	1151	15/08 a 18/08 9/10 a 13/10 18/10 a 21/10
D	RLF Typha central	0,08	0,12	0,07	0,15	0,10	0,10	0,01	1375	19/09 a 25/09 11/11 a 14/11 20/11 a 26/11
F	SACP saída	0,09	0,18	0,09	0,19	0,14	0,13	0,04	1029	18/08 a 21/08 14/10 a 21/10
G	RLF Typha saída	0,09	0,11	0,09	0,17	0,10	0,10	0,01	785	27/09 a 02/10 16/11 a 20/11
J	SACNP central	0,06	0,21	0,05	0,22	0,12	0,10	0,06	1379	14/08 a 18/08 09/10 a 13/10 23/10 a 30/10
K	RLFNP central	0,15	0,17	0,15	0,19	0,16	0,16	0,01	1381	19/09 a 25/09 11/11 a 14/11 20/11 a 26/11
L	SACNP saída	0,07	0,22	0,04	0,22	0,17	0,18	0,05	1253	18/08 a 21/08 13/10 a 17/10 23/10 a 30/10
M	RLFNP saída	0,16	0,17	0,15	0,31	0,17	0,16	0,02	1161	26/09 a 02/10 14/11 a 20/11

Obs.: Exceto para número de dados, a unidade dos dados está em miligramas por litro (mg/L). Legenda: UASB=*upflow anaerobic sludge blanket*; SACP=sistema alagado construído plantado; SACNP=sistema alagado construído não plantado; RLF=reator de leito fixo; RLFNP=reator de leito fixo não plantado; Mín.=Mínimo; Máx.=Máximo.

Como esperado, os valores de oxigênio dissolvido do reator UASB estão próximos de 0 mg/L, pois consiste em um sistema anaeróbio. As pequenas concentrações detectadas podem ser atribuídas à difusão turbulenta ocorrida na saída do reator, e não refletem o ambiente dentro do reator em si. De acordo com von Sperling (2005), quando ocorre um déficit de oxigênio na massa líquida, há uma busca para uma situação de equilíbrio, permitindo uma maior absorção de oxigênio pela transferência gasosa, o que pode ter justificado a existência de valores positivos (ainda que baixos) de OD nas tubulações de saída do reator UASB.

Observa-se visualmente pela Figura 5.17, que os valores de oxigênio dissolvido dos três últimos pontos (RLFNP central, SACNP saída e RLFNP saída) apresentam concentrações de oxigênio dissolvido ligeiramente superiores aos demais pontos. Este fato sugere uma maior demanda de oxigênio exercida pela biomassa do sistema plantado. As observações de campo, amostras de o SAC plantado apresentar coloração mais avermelhada do que no SAC não plantado, corroboram com esta hipótese. Vários estudos mostram que a presença das plantas favorece a atividade, diversidade e densidade de microrganismos no meio (OTTOVA *et al.*, 1997; MÜNCH *et al.*, 2005; GAGNON *et al.*, 2007; FAULWETTER *et al.*, 2009; FAULWETTER *et al.*, 2012; LAI *et al.*, 2012; LANGERGRABER e SIMUNEK, 2012). Por outro lado, o oxigênio dissolvido do SAC não plantado da região central (ponto J), apresentou valores próximos aos do SAC plantado, com medianas de 0,10 mg/L. Nota-se, pela Figura 5.10, que as variações dos dados de OD nos pontos plantados são menores que nos pontos não plantados, indicando maior estabilidade no sistema ou maior consumo pela biomassa presente. Apesar dos baixos valores de oxigênio dissolvido, foi possível observar diferenças entre a unidade plantada e não plantada.

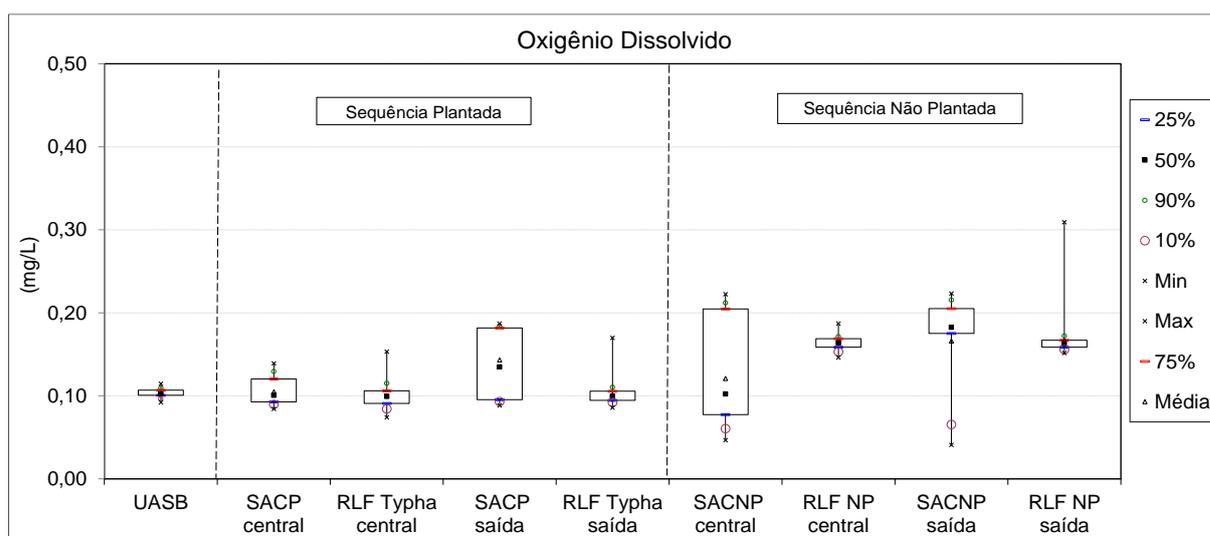


Figura 5.16: Gráfico box-plot dos dados de oxigênio dissolvido (OD) nos pontos monitorados.

5.4.1.3 Potencial hidrogeniônico

O potencial hidrogeniônico (pH) é um parâmetro de interesse, pois representa a concentração de íons hidrogênio H^+ , indicando as condições de acidez, neutralidade ou alcalinidade do efluente. A Tabela 5.6 apresenta a estatística descritiva dos dados de pH nos pontos monitorados.

Tabela 5.6: Estatística descritiva dos dados de pH nos pontos monitorados.

Ponto	Local de monitoramento	10%	90%	Mín.	Máx.	Média aritmética	Mediana	Desvio padrão	Número de dados	Período de monitoramento em 2014
B	Reator UASB	6,6	6,8	6,6	6,8	6,7	6,7	0,1	2564	15/08 a 21/08 9/10 a 30/10
C	SACP central	6,9	7,2	6,9	7,3	7,1	7,0	0,1	1151	15/08 a 18/08 9/10 a 13/10 18/10 a 21/10
D	RLF Typha central	6,8	7,0	6,7	7,1	6,9	7,00	0,1	1375	19/09 a 25/09 11/11 a 14/11 20/11 a 26/11
E	RLF Canna central	6,9	7,2	6,8	7,3	7,0	7,1	0,1	1280	19/09 a 25/09 12/11 a 14/11 20/11 a 26/11
F	SACP saída	7,0	7,3	7,0	7,4	7,1	7,1	0,1	1029	18/08 a 21/08 14/10 a 21/10
G	RLF Typha saída	6,9	7,2	6,9	7,3	7,1	7,00	0,1	785	27/09 a 02/10 16/11 a 20/11
H	RLF Canna saída	7,00	7,3	6,9	7,4	7,1	7,0	0,2	1181	25/09 a 02/10 14/11 a 20/11
J	SACNP central	7,2	7,6	7,2	7,7	7,4	7,3	0,1	1379	14/08 a 18/08 09/10 a 13/10 23/10 a 30/10
K	RLFNP central	7,2	7,4	7,2	7,4	7,3	7,3	0,1	1381	19/09 a 25/09 11/11 a 14/11 20/11 a 26/11
L	SACNP saída	7,5	7,7	7,5	7,8	7,6	7,6	0,1	1253	18/08 a 21/08 13/10 a 17/10 23/10 a 30/10
M	RLFNP saída	7,5	7,6	7,5	7,7	7,5	7,5	0,1	1161	26/09 a 02/10 14/11 a 20/11

Legenda: UASB=*upflow anaerobic sludge blanket*; SACP=sistema alagado construído plantado; SACNP=sistema alagado construído não plantado; RLF=reator de leito fixo; RLFNP=reator de leito fixo não plantado; Mín.=Mínimo; Máx.=Máximo.

Os valores de pH do SAC estão superiores aos do reator UASB. Segundo de Paoli (2010), este fato ocorre devido ao fornecimento de componentes alcalinos, como o CaO e MgO presentes na escória de alto forno. Dependendo da escória utilizada, os valores de pH podem se elevar a ponto de necessitar de correção antes de seu lançamento no corpo receptor. Pela Tabela 5.4, construiu-se o gráfico box-plot (Figura 5.18) com objetivo de permitir melhor visualização dos resultados.

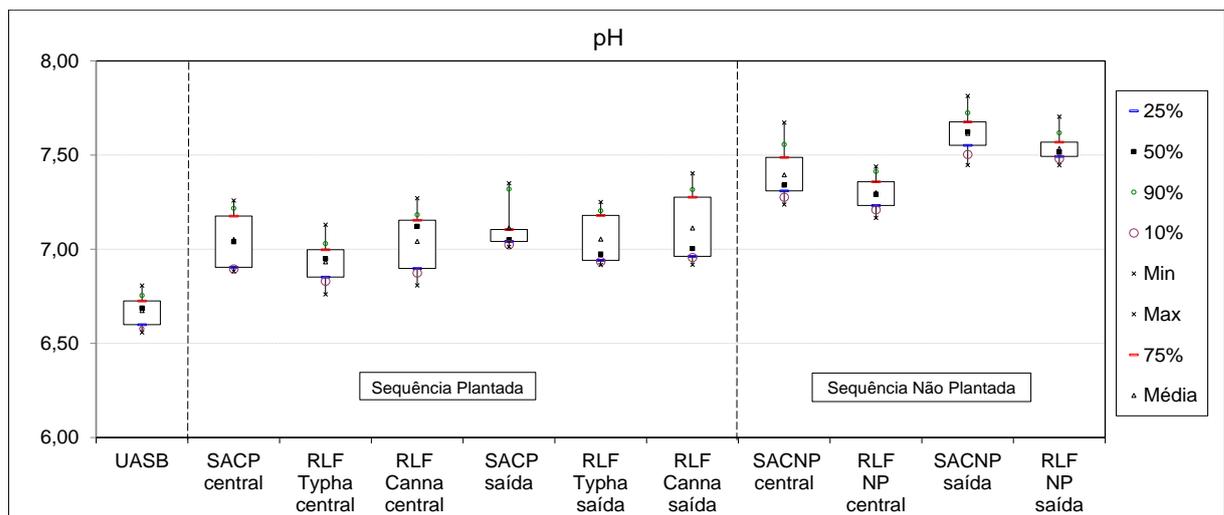


Figura 5.17: Gráfico box-plot dos dados de pH nos pontos monitorados.

Observa-se pela Figura 5.18, que os valores de pH das amostras não plantadas estão superiores aos valores de pH da unidade plantada. Acredita-se que é devido aos processos de decomposição e respiração dos microrganismos nas amostras plantadas, o que reduz o pH do meio, pois há liberação de CO_2 , e conseqüentemente a formação de ácido carbônico e íons hidrogênio. Este processo também pode ocorrer pela respiração das raízes das plantas. Além disso, as plantas liberam substâncias orgânicas que podem ser convertidas em ácidos húmicos, reduzindo o pH. Os resultados de pH reforçam os indícios da diversidade microbiana ser maior na unidade plantada e o possível papel das plantas neste parâmetro. Os valores de pH estão de acordo com os padrões de lançamento (6,0 a 9,0) descritos na legislação do estado de Minas Gerais (MINAS GERAIS, 2008).

5.4.1.4 Temperatura

A temperatura retrata a intensidade do calor, neste caso o calor atribuído ao líquido em estudo. Segundo von Sperling (2005), é um parâmetro de importância, pois está relacionado com o aumento das taxas de reações (físicas, químicas e biológicas), e sua elevação causa um aumento nas taxas de transferência, podendo gerar mau cheiro, pela dessorção de gases dissolvidos (no caso do H_2S) e diminuição da solubilidade dos gases. A Tabela 5.7 apresenta a estatística descritiva dos dados de temperatura dos pontos monitorados na presente pesquisa.

Tabela 5.7: Estatística descritiva dos dados de temperatura nos pontos monitorados.

Ponto	Local de monitoramento	10%	90%	Mín.	Máx.	Média aritmética	Mediana	Desvio padrão	Número de dados	Período de monitoramento em 2014
B	Reator UASB	22,1	27,4	20,8	29,1	25,2	25,5	1,9	2564	15/08 a 21/08 9/10 a 30/10
C	SACP central	19,2	24,2	17,0	25,1	22,0	22,1	1,8	1151	15/08 a 18/08 9/10 a 13/10 18/10 a 21/10
D	RLF Typha central	21,4	27,3	19,2	35,3	24,0	23,5	2,7	1375	19/09 a 25/09 11/11 a 14/11 20/11 a 26/11
E	RLF Canna central	21,5	26,9	19,3	31,5	24,1	23,9	2,2	1280	19/09 a 25/09 12/11 a 14/11 20/11 a 26/11
F	SACP saída	20,3	23,8	19,0	24,9	22,5	22,9	1,3	1029	18/08 a 21/08 14/10 a 21/10
G	RLF Typha saída	22,3	25,7	21,0	27,1	24,0	24,1	1,3	785	27/09 a 02/10 16/11 a 20/11
H	RLF Canna saída	21,1	25,5	19,3	28,2	23,4	23,5	1,6	1181	25/09 a 02/10 14/11 a 20/11
J	SACNP central	19,6	25,2	16,4	27,1	22,5	22,8	2,1	1379	14/08 a 18/08 09/10 a 13/10 23/10 a 30/10
K	RLFNP central	21,6	26,9	19,4	31,1	24,3	24,3	2,1	1381	19/09 a 25/09 11/11 a 14/11 20/11 a 26/11
L	SACNP saída	20,0	25,6	16,5	29,2	22,5	22,3	2,3	1253	18/08 a 21/08 13/10 a 17/10 23/10 a 30/10
M	RLFNP saída	20,5	26,9	19,0	28,7	23,8	23,8	2,4	1161	26/09 a 02/10 14/11 a 20/11

Obs.: Exceto para número de dados, a unidade dos dados está em grau Celsius (°C). Legenda: UASB=*upflow anaerobic sludge blanket*; SACP=sistema alagado construído plantado; SACNP=sistema alagado construído não plantado; RLF=reator de leito fixo; RLFNP=reator de leito fixo não plantado; Mín.=Mínimo; Máx.=Máximo.

Apesar de os valores de temperatura apresentarem poucas variações, permanecendo na faixa de 20 a 25 °C, este parâmetro foi avaliado, buscando compreender possíveis influências e diferenças nas espécies de plantas avaliadas. Buscou-se também associar a influência da temperatura nas taxas de transferência de oxigênio dissolvido no meio líquido. Foi possível concluir que nos RLF a temperatura é ligeiramente superior à do SAC. Comparando o RLF correspondente ao ponto de monitoramento do SAC, nota-se um acréscimo de cerca de 1 °C. Este fato é explicado pela maior incidência de radiação solar sobre o RLF em relação ao SAC. Há também uma tendência das variações nas unidades não plantadas serem maiores que nas unidades plantadas. Na Figura 5.19 é possível observar estas variações.

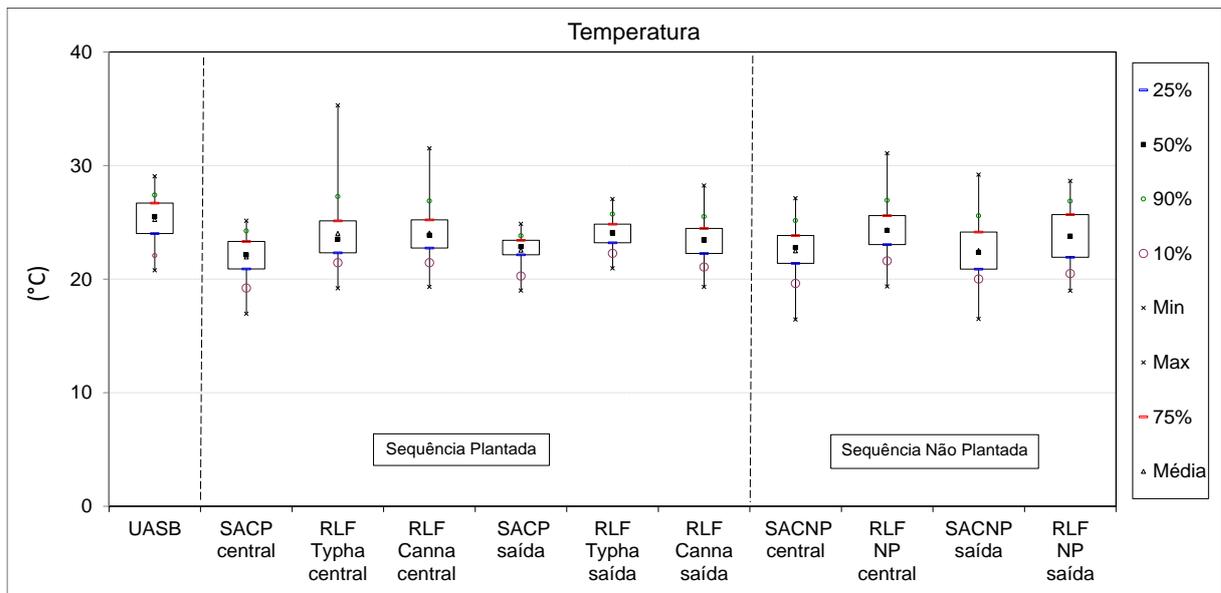


Figura 5.18: Gráfico box-plot dos dados de temperatura nos pontos monitorados.

5.4.2 Avaliação da influência da vegetação

Neste item buscou-se avaliar a influência das plantas nos parâmetros potencial redox, oxigênio dissolvido, pH e temperatura no Sistema de alagado construído e nos Reatores de Leito Fixo.

Para isso comparam-se os seguintes pontos de monitoramento:

- SACP central (ponto C) com SACNP central (ponto J);
- SACP saída (ponto F) com SACNP saída (ponto L);
- RLF *Typha* central (ponto D) com RLFNP central (ponto K);
- RLF *Typha* saída (ponto G) com RLFNP saída (ponto M).

Os resultados de cada comparação serão apresentados individualmente em tópicos, para possibilitar maior organização do conteúdo.

5.4.2.1 Comparação: SACP central com SACNP central

A seguinte análise teve como objetivo investigar se a presença da vegetação altera as condições ambientais na região central do SAC. Com o intuito de simplificar, o ponto de monitoramento SACP central será tratado como ponto C, e o ponto SACNP central será tratado como ponto J. Os resultados estatísticos da comparação do ponto C com J (Tabela 5.8) mostraram que há diferença significativa nos parâmetros Eh, OD, pH e temperatura para o período avaliado. Se o valor de p estiver abaixo (ou igual) de 0,05, o teste estatístico considera que existem diferenças significativas. Quando o valor de p for maior que 0,05 os dados apresentam semelhança, ou seja, não são estatisticamente diferentes. O teste apresenta um nível de 95% de confiança.

Tabela 5.8: Resultados do teste estatístico da comparação entre o SAC plantado da região central (ponto C) com o SAC não plantado da região central (ponto J).

Ponto de monitoramento	Teste estatístico aplicado	Parâmetro	Resultado	Valor de p	
C	J	Mann-Whitney	Eh	Existe diferença significativa	0,000000
			OD	Existe diferença significativa	0,002846
			pH	Existe diferença significativa	0,000000
			Temperatura	Existe diferença significativa	0,000000

Obs.: a diferença é considerada significativa quando o valor de p é inferior a 0,05 (5% de nível de significância).

Os valores de potencial redox do SAC plantado região central com o SAC não plantado região central mostraram ser diferentes entre si. É possível notar que os valores do SAC plantado foram superiores aos valores do SAC não plantado, mostrando que a planta interfere nas condições de oxirredução. Entretanto, ambos encontram-se na mesma faixa de potencial redox (-200 a -300 mV), ou seja, apresentam aproximadamente as mesmas condições de oxirredução.

A Figura 5.20 (direita) permite notar as variações dos dados de oxigênio dissolvido no SAC não plantado (ponto J), permanecendo maiores que as variações do SAC plantado. Isso demonstra que as plantas conferem uma estabilidade no sistema para este parâmetro, pois a dinâmica de produção e consumo de oxigênio no sistema plantado é mais rápida que no sistema não plantado, possivelmente devido à comunidade microbiana presente (NIVALA *et al.*, 2012).

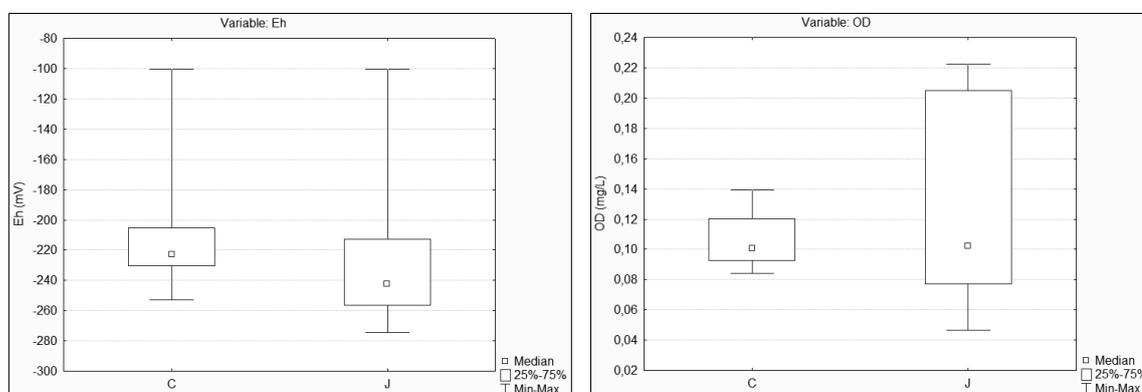


Figura 5.19: Gráfico box-plot das comparações de potencial redox (esquerda) e oxigênio dissolvido (direita) entre o SAC plantado da região central (ponto C) com o SAC não plantado da região central (ponto J).

Os dados de pH do SAC não plantado mantiveram-se superiores aos do SAC plantado, demonstrando que as plantas mantêm o pH do líquido intersticial próximo à neutralidade, resultados em conformidade com os descritos em Tao e Wang (2009).

Apesar de o teste estatístico mostrar diferenças entre os dados de temperatura, as medianas do SAC plantado e não plantado estiveram em 22,1 e 22,8 °C, respectivamente, ou seja, bem próximos do ponto de vista de influência no comportamento microbiano.

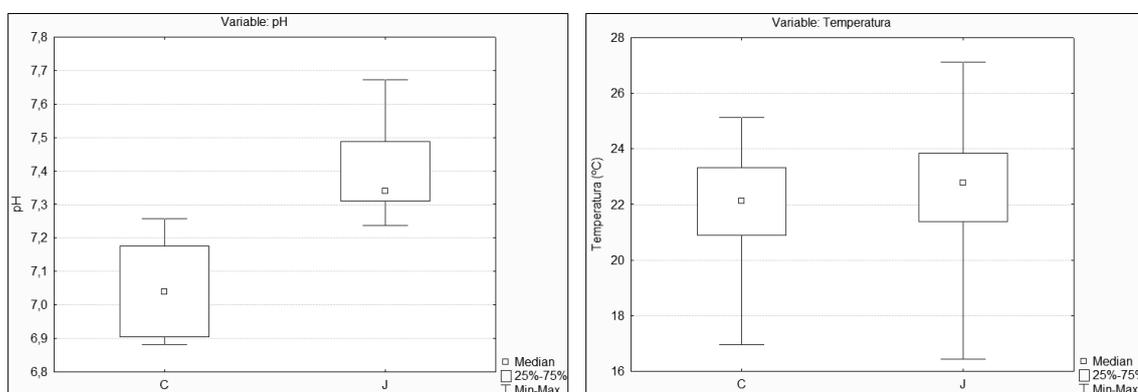


Figura 5.20: Gráfico box-plot das comparações de pH (esquerda) e temperatura (direita) entre o SAC plantado da região central (ponto C) com o SAC não plantado da região central (ponto J).

A análise global do oxigênio dissolvido, mostrada no Item 5.3.1.2, demonstrou que os valores de oxigênio dissolvido no SAC não plantado mantiveram-se superiores aos valores de oxigênio dissolvido no SAC plantado. Os resultados estão de acordo com o monitoramento das flutuações diárias realizadas simultaneamente nos SAC plantado e não plantado (região central). O monitoramento ocorreu entre os dias 09/10/2014 e 13/10/2014 (Figura 5.22). Os valores de oxigênio dissolvido do SAC não plantado mantiveram-se superiores aos do SAC plantado. Vale destacar que os valores deste monitoramento levam em conta apenas o período avaliado. Embora sutil, nota-se pela Figura 5.22, que as concentrações de oxigênio dissolvido em ambos os pontos diminuem à noite e aumentam à tarde.

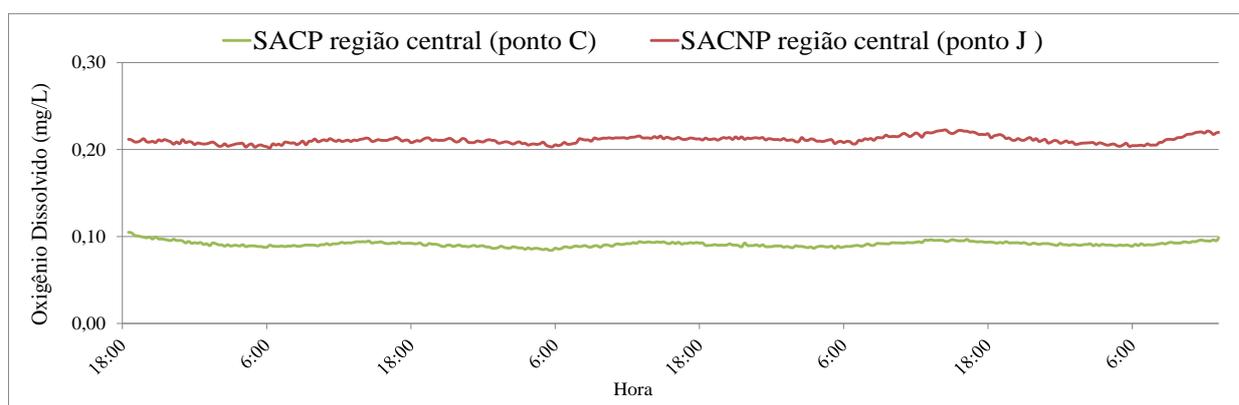


Figura 5.21: Monitoramento diário do oxigênio dissolvido nos pontos C e J entre os dias 09/10/2014 e 13/10/2014.

5.4.2.2 Comparação: SACP saída com SACNP saída

O objetivo desta análise foi investigar a presença da vegetação na região de saída do SAC. O SAC plantado da região de saída será denominado como ponto F, e o SAC não plantado da região de saída será chamado de ponto L. Os resultados estatísticos da comparação do ponto F com L são apresentados na Tabela 5.9. De acordo com o teste estatístico, existe diferença significativa entre os pontos para os parâmetros Eh, OD e pH. Apenas a temperatura dos pontos F e L não indicaram diferença significativa entre os dados (embora o valor de p estivesse apenas ligeiramente superior a 0,05), diferente dos resultados encontrados na região central do SAC.

Tabela 5.9: Resultados do teste estatístico da comparação entre o SAC plantado da região de saída (ponto F) com o SAC não plantado da região de saída (ponto L).

Ponto de monitoramento		Teste estatístico aplicado	Parâmetro	Resultado	Valor de p
F	L	Mann-Whitney	Eh	Existe diferença significativa	0,000000
			OD	Existe diferença significativa	0,000000
			pH	Existe diferença significativa	0,000000
			Temperatura	Não existe diferença significativa	0,060966

Obs.: a diferença é considerada significativa quando o valor de p é inferior a 0,05 (5% de nível de significância).

Os resultados mostram que, tanto para a região central quanto para a região de saída os valores de potencial redox na unidade plantada foram superiores aos valores na unidade não plantada, demonstrando a influência das plantas neste parâmetro. Os valores de oxigênio dissolvido no SAC não plantado mostraram-se superiores aos valores de oxigênio dissolvido no SAC plantado. Também foi possível observar que as variações dos dados de oxigênio dissolvido no SAC não plantado foram maiores que as variações do SAC plantado, demonstrando uma semelhança do comportamento do oxigênio dissolvido nas regiões central e de saída do SAC.

Também foi possível observar uma discrepância dos valores de pH no SAC plantado e no SAC não plantado, demonstrando que as condições do SAC não plantado são mais básicas que do SAC plantado (Figura 5.24, lado esquerdo).

Apesar de os testes estatísticos demonstrarem que não há diferença significativa da temperatura para o SAC plantado e não plantado, as variações dos valores de temperatura do SAC não plantado foram maiores que as variações nos valores do SAC plantado, demonstrando que as plantas podem deixar o sistema mais estável para este parâmetro. Alguns microrganismos são sensíveis a variações de temperatura e pH, e a maioria se desenvolve nas faixas ótimas de 25 a 40 °C (VON SPERLING, 1996).

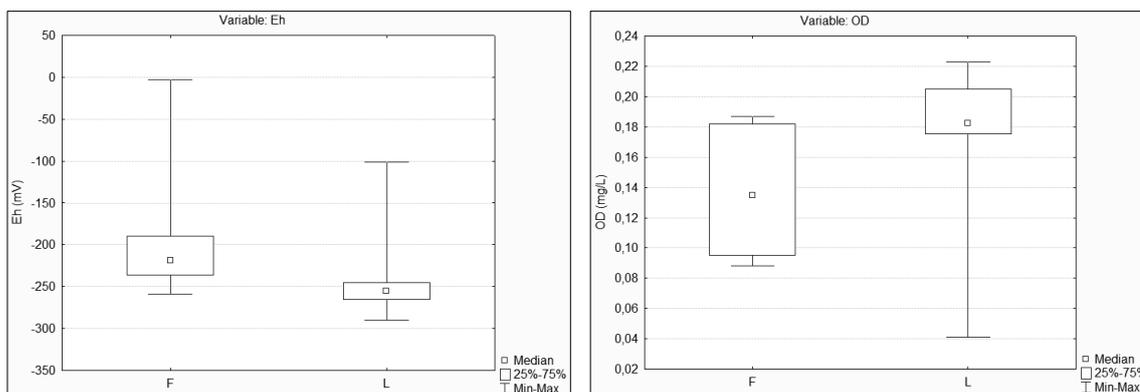


Figura 5.22: Gráfico box-plot das comparações de potencial redox (esquerda) e oxigênio dissolvido (direita) entre o SAC plantado da região de saída (ponto F) com o SAC não plantado da região de saída (ponto L).

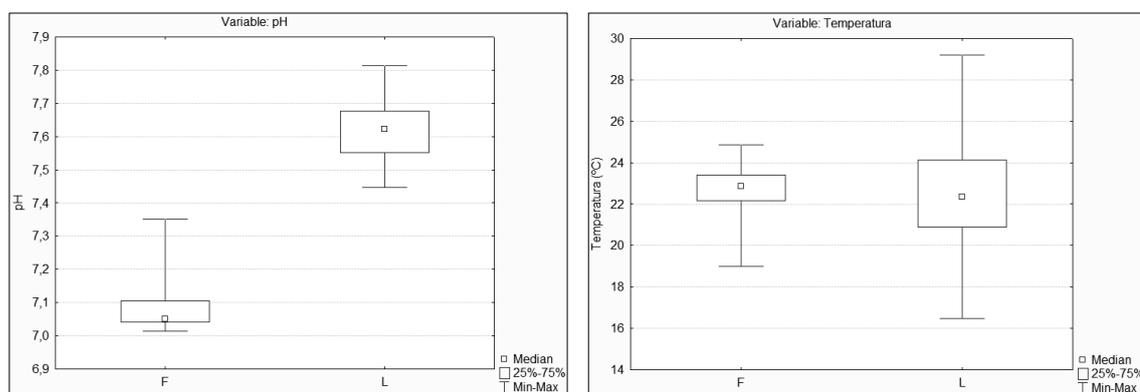


Figura 5.23: Gráfico box-plot das comparações de pH (esquerda) e temperatura (direita) entre o SAC plantado da região de saída (ponto F) com o SAC não plantado da região de saída (ponto L).

O monitoramento diário do potencial redox nos SAC plantado e não plantado ocorreu entre os dias 14/10/2014 e 17/10/2014. Apesar de os valores de potencial redox do SAC plantado estarem acima dos valores do não plantado, ambos encontram-se na mesma faixa (-200 a -300 mV).

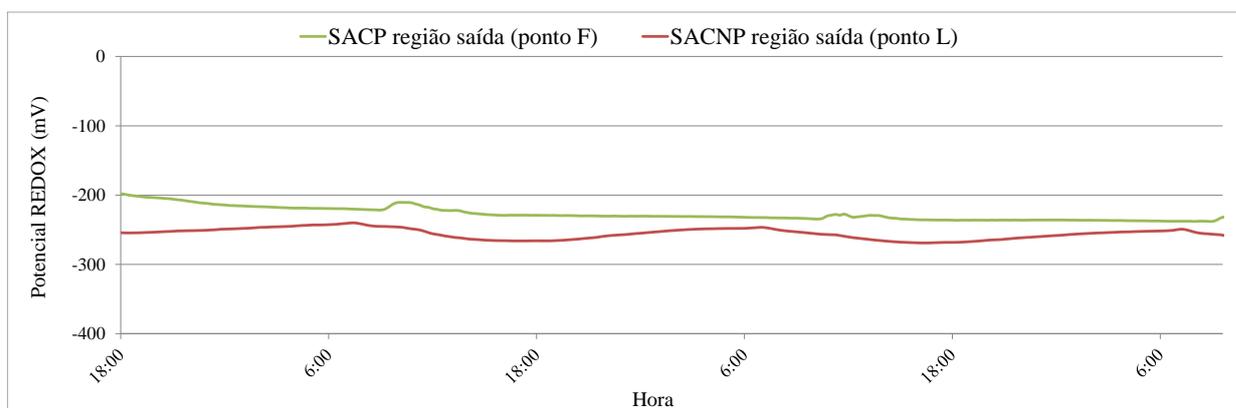


Figura 5.24: Monitoramento diário do potencial redox nos pontos F e L entre os dias 14/10/2014 e 17/10/2014.

Assim como no Item 5.4.2.1, foi realizado o monitoramento das flutuações diárias do oxigênio dissolvido (Figura 5.26), entre os dias 14/10/2014 e 17/10/2014. Os resultados demonstraram que as concentrações de oxigênio dissolvido no SAC não plantado mantiveram-se acima dos valores de oxigênio dissolvido no SAC plantado. Observa-se um padrão no aumento das concentrações de oxigênio dissolvido no período da manhã e um decréscimo das concentrações à noite.

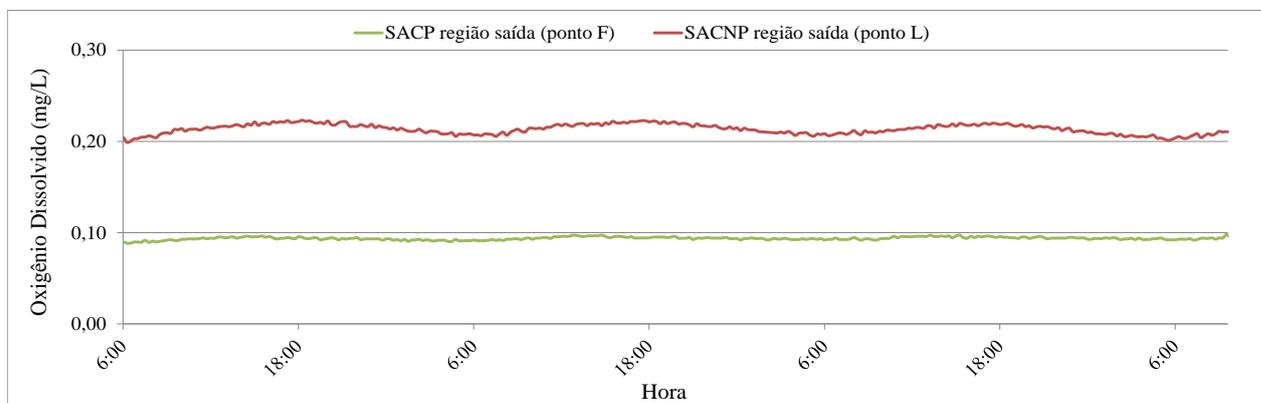


Figura 5.25: Monitoramento diário do oxigênio dissolvido nos pontos F e L entre os dias 14/10/2014 e 17/10/2014.

5.4.2.3 Comparação: RLF *Typha* central com RLFNP central

O objetivo deste item foi investigar os RLF da região central plantado com *Typha* e não plantado, buscando diferenças entre as amostras no que tange à presença de planta no RLF. Os pontos D e K representam respectivamente o RLF plantado com *Typha* da região central e o RLF não plantado da região central. A Tabela 5.10 apresenta os resultados da investigação.

Tabela 5.10: Resultados do teste estatístico da comparação entre o RLF plantado com *Typha* da região central (ponto D) com o RLF não plantado da região central (ponto K).

Ponto de monitoramento	Teste estatístico aplicado	Parâmetro	Resultado	Valor de p	
D	K	Mann-Whitney	Eh	Existe diferença significativa	0,000000
			OD	Existe diferença significativa	0,000000
			pH	Existe diferença significativa	0,000000
			Temperatura	Existe diferença significativa	0,000000

Obs.: a diferença é considerada significativa quando o valor de p é inferior a 0,05 (5% de nível de significância).

A análise estatística mostrou que existem diferenças significativas nos RLF plantado com *Typha* e no RLF não plantado para Eh, OD, pH e temperatura. Os valores de oxigênio dissolvido e pH dos RLF plantado com *Typha* e não plantado foram distintos entre si, mostrando que o oxigênio dissolvido e pH na amostra não plantada são maiores que o oxigênio dissolvido e pH na amostra plantada. Os dados de temperatura mostraram que as variações para o RLF plantado foram

maiores que as variações do RLF não plantado, opostamente às análises anteriores. Entretanto para o potencial redox, os valores médios e as variações dos dados na unidade plantada permaneceram superiores aos da unidade não plantada.

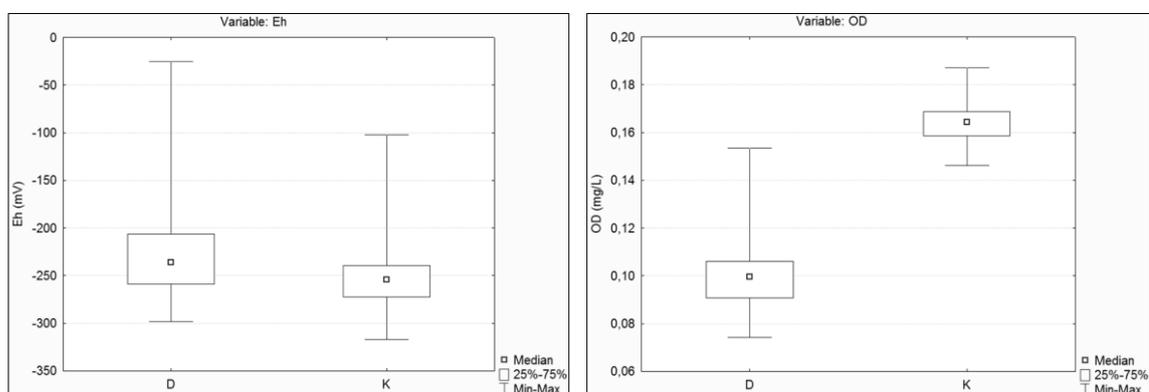


Figura 5.26: Gráfico box-plot das comparações de potencial redox (esquerda) e oxigênio dissolvido (direita) entre o RLF plantado com *Typha* da região central (ponto D) com o RLF não plantado da região central (ponto K).

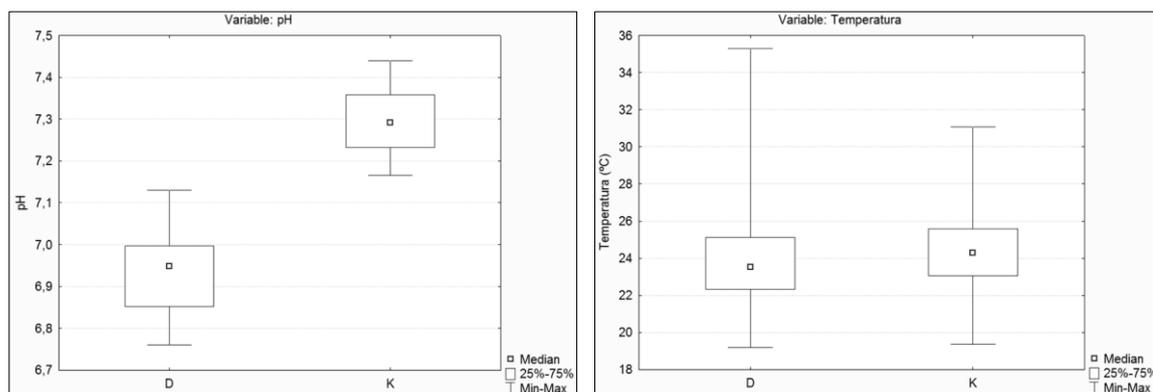


Figura 5.27: Gráfico box-plot das comparações de pH (esquerda) e temperatura (direita) entre o RLF plantado com *Typha* da região central (ponto D) com o RLF não plantado da região central (ponto K).

O monitoramento contínuo do potencial redox foi realizado entre os dias 19/09/2014 e 25/09/2014 e é apresentado na Figura 5.29. É possível perceber, para o período avaliado, que os valores de potencial redox do RLF não plantado mantiveram-se inferiores aos valores de potencial redox do RLF plantado. As variações diárias de ambos os dados sofrem interferência nos períodos diurnos, sendo que as flutuações do RLF não plantado são maiores que a do RLF plantado, indicando mais uma vez que as plantas trazem estabilidade ao processo. Os dados de radiação solar e temperatura externa não foram coletados neste período, podendo ser estes fatores

a causa das flutuações diárias. Nota-se que os valores de potencial redox são negativos, portanto o eixo das ordenadas inicia-se em -400 mV.

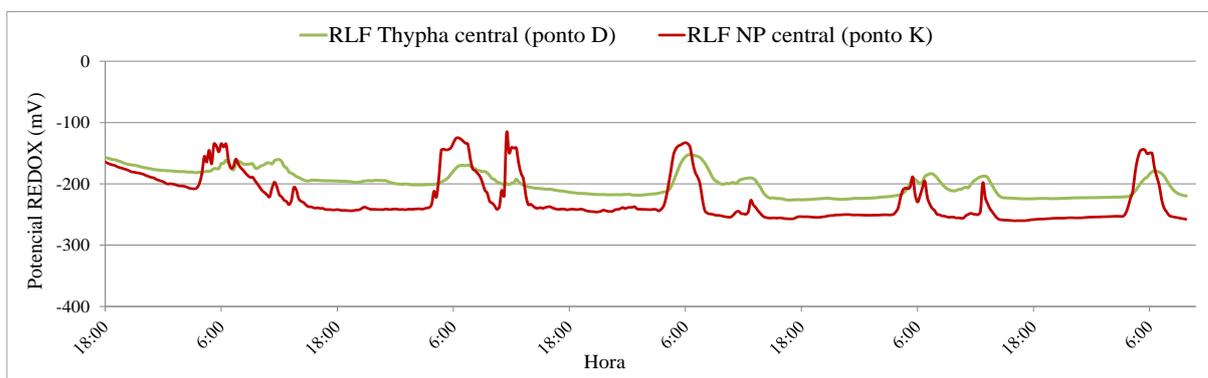


Figura 5.28: Monitoramento diário do potencial redox nos pontos D e K entre os dias 19/09/2014 e 25/09/2014.

A Figura 5.30 apresenta o monitoramento contínuo do oxigênio dissolvido entre os dias 19/09/2014 e 25/09/2014. Observa-se que os valores de oxigênio dissolvido do RLF não plantado (ponto K) foram-se superiores aos valores de oxigênio dissolvido do RLF plantado com *Typha* (ponto D), mostrando a mesma tendência das análises anteriores. Nota-se também que neste período o oxigênio dissolvido dos RLF apresentou flutuações diárias, ao contrário do oxigênio dissolvido monitorado no SAC (Figura 5.25). Estes resultados demonstram que o RLF é mais susceptível às mudanças ambientais, por apresentar pouco volume e maior área lateral de contato, ao contrário do SAC, que se encontra escavado no solo. Por volta das 6:00 h, observa-se um declínio nas concentrações de oxigênio dissolvido, e neste mesmo horário os valores de potencial redox apresentam um pico (Figura 5.29 e Figura 5.30).

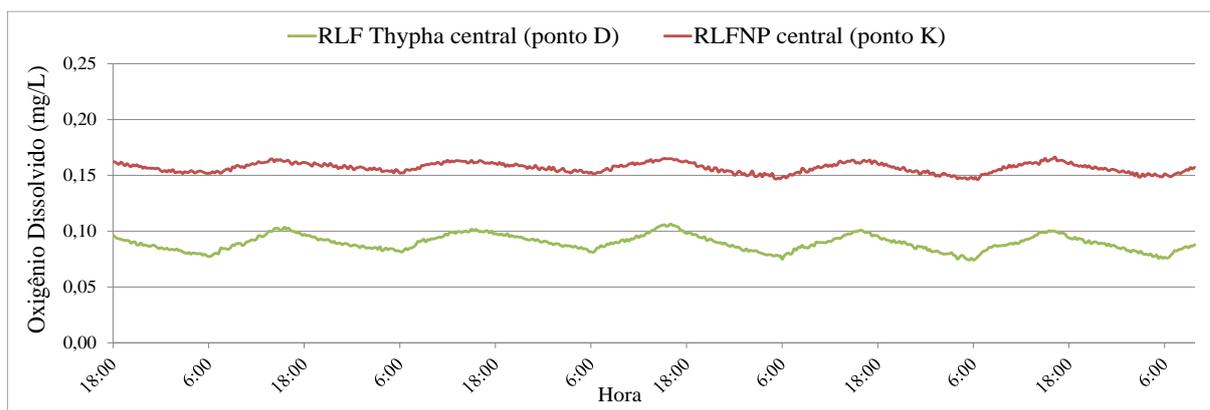


Figura 5.29: Monitoramento diário do oxigênio dissolvido nos pontos D e K entre os dias 19/09/2014 e 25/09/2014.

5.4.2.4 Comparação: RLF *Typha* saída com RLFNP saída

Esta análise teve como propósito investigar os RLF plantado com *Typha* e não plantado na região de saída, buscando avaliar a participação das plantas sob estas condições. Como observado na Tabela 5.11, para todos os parâmetros avaliados (Eh, OD, pH e temperatura) existiram diferenças significativas.

Tabela 5.11: Resultados do teste estatístico da comparação entre o RLF plantado com *Typha* da região de saída (ponto G) com o RLF não plantado da região de saída (ponto M).

Ponto de monitoramento	Teste estatístico aplicado	Parâmetro	Resultado	Valor de p	
G	M	Mann-Whitney	Eh	Existe diferença significativa	0,000000
			OD	Existe diferença significativa	0,000000
			pH	Existe diferença significativa	0,000000
			Temperatura	Existe diferença significativa	0,028812

Obs.: a diferença é considerada significativa quando o valor de p é inferior a 0,05 (5% de nível de significância).

Assim como na investigação da região central, os RLF nas condições de saída apresentaram valores de oxigênio dissolvido e pH superiores na unidade não plantada. As variações dos valores de oxigênio dissolvido do RLF não plantado foram maiores que as variações do RLF plantado, indicando novamente a influência das plantas neste parâmetro. Os valores de potencial redox do RLF plantado permaneceram acima dos valores de potencial redox do RLF não plantado (Figura 5.31 lado esquerdo), demonstrando outra vez que a presença das plantas modifica as condições de oxirredução.

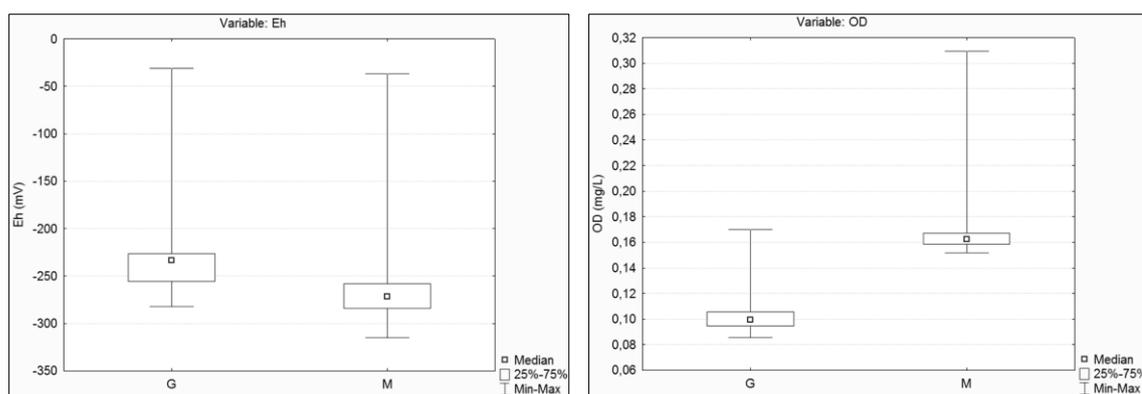


Figura 5.30: Gráfico box-plot das comparações de potencial redox (esquerda) e oxigênio dissolvido (direita) entre o RLF plantado com *Typha* da região de saída (ponto G) com o RLF não plantado da região de saída (ponto M).

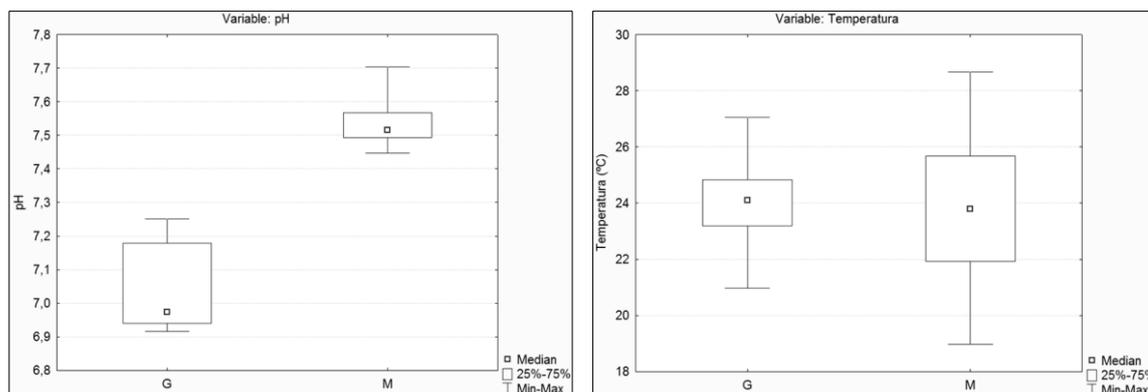


Figura 5.31: Gráfico box-plot das comparações de pH (esquerda) e temperatura (direita) entre o RLF plantado com *Typha* da região de saída (ponto G) com o RLF não plantado da região de saída (ponto M).

A Figura 5.33 apresenta o monitoramento diário da radiação solar e do oxigênio dissolvido dos RLF plantado com *Typha* e não plantado. O período avaliado foi de 25/09/2014 a 02/10/2014. Os resultados estatísticos com o teste de correlação de Spearman mostraram que existe uma correlação de 74% dos dados de oxigênio dissolvido do RLF não plantado com a radiação solar. Os dados do RLF plantado com *Typha* também apresentaram correlação, porém com 52%, ou seja, a unidade não plantada é mais susceptível às variações de radiação solar do que a unidade plantada.

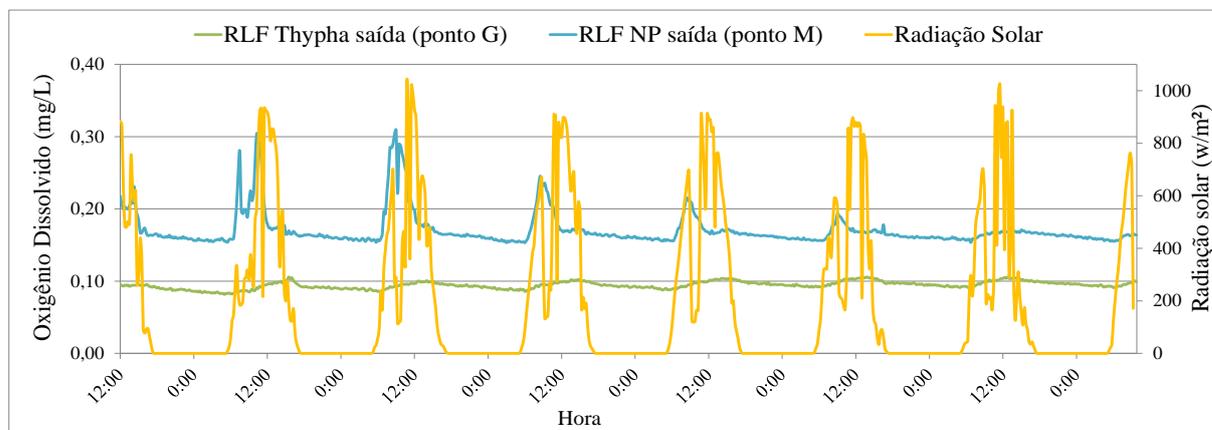


Figura 5.32: Monitoramento diário da radiação solar e do oxigênio dissolvido nos pontos G e M entre os dias 25/09/2014 e 02/10/2014.

Para o monitoramento da temperatura do ar (Figura 5.34), os dados de oxigênio dissolvido do RLF plantado apresentaram uma correlação de 82%. Por outro lado, os dados de oxigênio dissolvido do RLF não plantado apresentaram uma correlação de 68% com a temperatura do ar. Nota-se, pelo gráfico, que, quando os valores de temperatura se elevam, os valores de oxigênio dissolvido da unidade não plantada decrescem.

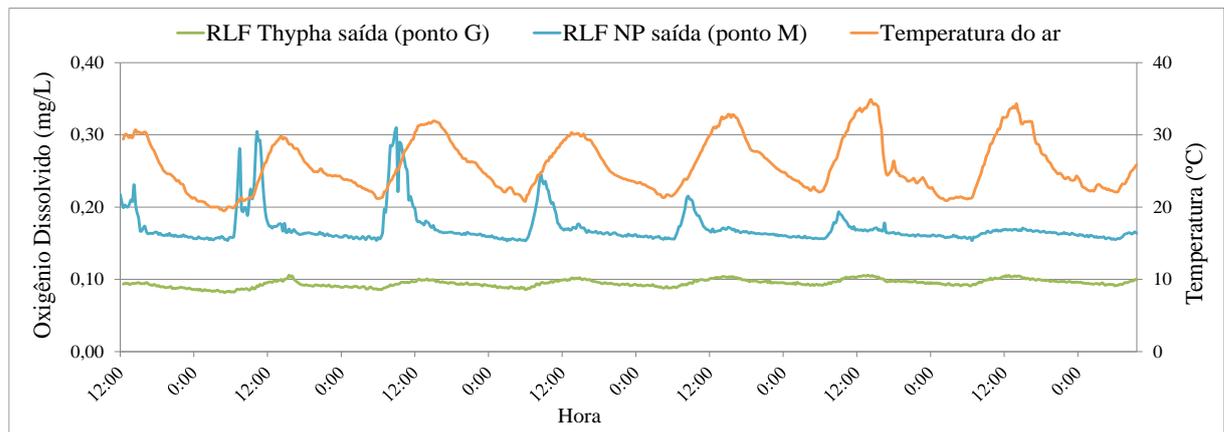


Figura 5.33: Monitoramento diário da temperatura do ar e do oxigênio dissolvido nos pontos G e M entre os dias 25/09/2014 e 02/10/2014.

Com os resultados do teste de correlação de Spearman, conclui-se que os dados de oxigênio dissolvido do RLF não plantado se correlacionaram melhor com a radiação solar, enquanto que os dados de oxigênio dissolvido do RLF plantado com *Typha* se correlacionaram melhor com a temperatura. Acreditava-se que, com a maior incidência de radiação solar, as plantas em seus processos fotossintéticos liberariam mais oxigênio na zona de raízes e a temperatura influenciaria em maior grau na transferência de oxigênio no leito não plantado. Como os resultados foram controversos, pressupõe-se que a demanda pelo oxigênio dissolvido na unidade plantada seja maior que na unidade não plantada.

5.4.3 Avaliação da posição ao longo do comprimento do leito

A presente pesquisa avaliou a diferença nos parâmetros Eh, OD e pH ao longo do comprimento do leito (região central e região de saída) nos SAC e nos RLF. Para isso, compararam-se os seguintes pontos de monitoramento:

- SACP central (ponto C) com SACP saída (ponto F);
- SACNP central (ponto J) com SACNP saída (ponto L);
- RLF *Typha* central (ponto D) com RLF *Typha* saída (ponto G);
- RLF *Canna* central (ponto E) com RLF *Canna* saída (ponto H);
- RLFNP central (ponto K) com RLFNP saída (ponto M).

Os resultados das comparações acima são apresentados a seguir.

5.4.3.1 Comparação: SACP central com SACP saída

O objetivo da investigação do SAC plantado central (ponto C) com SAC plantado saída (ponto F) foi avaliar as condições ambientais (Eh, OD, pH e temperatura) ao longo do comprimento do leito. Os resultados desta avaliação estão mostrados na Tabela 5.12.

Tabela 5.12: Resultados do teste estatístico da comparação entre o SAC plantado da região central (ponto C) com o SAC plantado da região de saída (ponto F).

Ponto de monitoramento	Teste estatístico aplicado	Parâmetro	Resultado	Valor de p
C	Mann-Whitney	Eh	Existe diferença significativa	0,002261
		OD	Existe diferença significativa	0,000000
		pH	Existe diferença significativa	0,000000
		Temperatura	Existe diferença significativa	0,000000

Obs.: a diferença é considerada significativa quando o valor de p é inferior a 0,05 (5% de nível de significância).

Como esperado, a análise estatística mostrou que existem diferenças significativas para todos os parâmetros investigados (Eh, OD, pH e temperatura). O potencial redox na saída do SAC plantado apresentou valores médios superiores aos da região central, e as variações também foram mais elevadas na saída. A região central do SAC plantado encontra-se com maiores cargas de sólidos, em decorrência de a colmatção estar mais avançada neste trecho do leito. Estas condições levam a maiores condições de redução, em consequência os valores de oxigênio dissolvido na região central estiveram inferiores aos da região de saída (Figura 5.35 lado direito). Os valores de pH da região de saída foram superiores aos valores de pH na região central do leito, fato já mostrado nos itens anteriores em função do meio suporte utilizado.

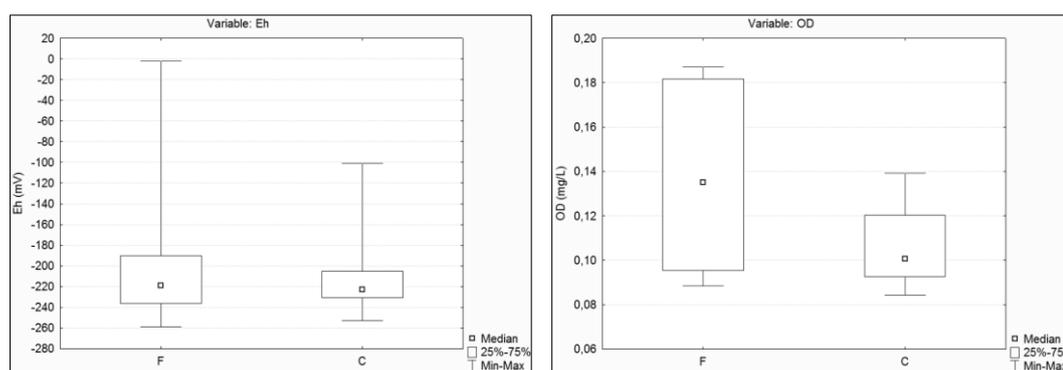


Figura 5.34: Gráfico box-plot das comparações de potencial redox (esquerda) e oxigênio dissolvido (direita) entre o SAC plantado da região central (ponto C) com o SAC plantado da região de saída (ponto F).

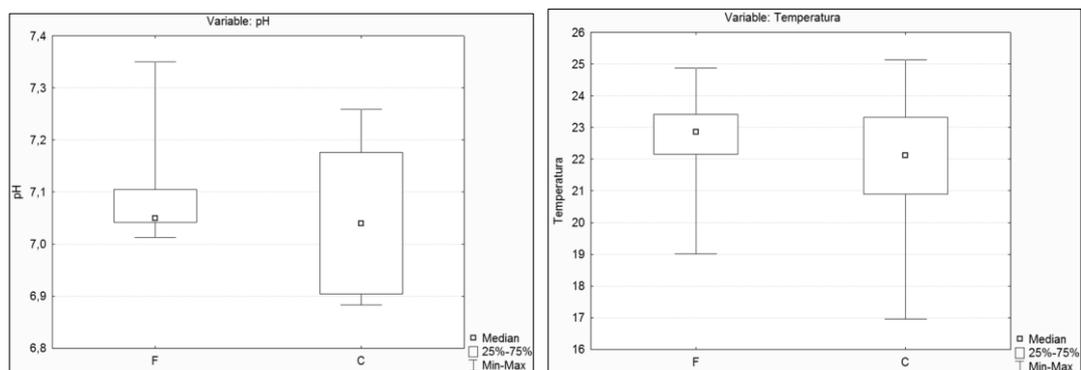


Figura 5.35: Gráfico box-plot das comparações de pH (esquerda) e temperatura (direita) entre o SAC plantado da região central (ponto C) com o SAC plantado da região de saída (ponto F).

Como era de se esperar, os valores de oxigênio dissolvido na região de saída foram maiores aos valores de oxigênio dissolvido na região central, como mostra o monitoramento diário (Figura 5.37). Diferente das flutuações de OD observadas nos RLF (Figura 5.34 e Figura 5.34), os SAC apresentam mais tolerância às flutuações diárias de temperaturas e radiação solar.

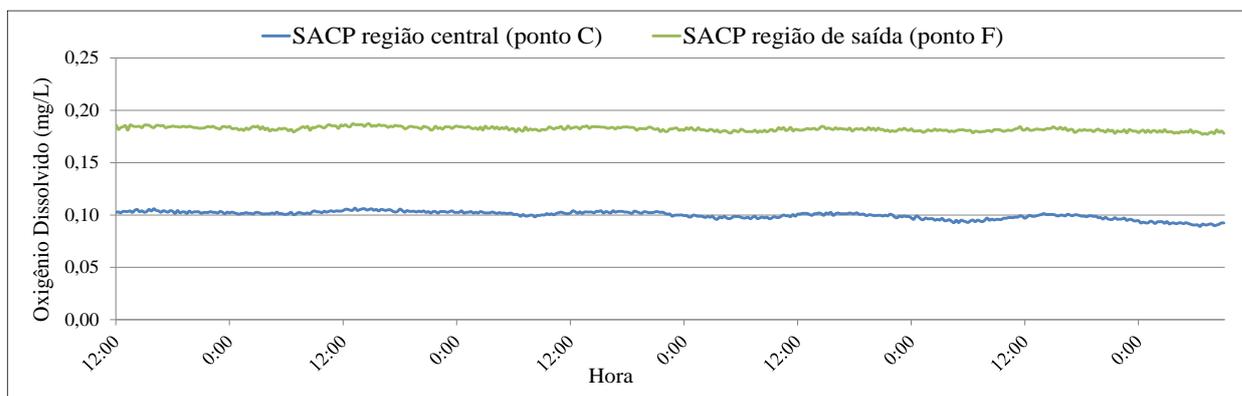


Figura 5.36: Monitoramento diário do oxigênio dissolvido nos pontos C e F entre os dias 18/10/2014 e 21/10/2014.

5.4.3.2 Comparação: SACNP central com SACNP saída

Na investigação do SAC não plantado central (ponto J) com o SAC não plantado saída (ponto L), foram observadas diferenças para os parâmetros Eh, OD e pH. Apenas a temperatura ao longo do leito não plantado não apresentou diferença nos dados, ou seja, valor de $p > 0,05$. A Tabela 5.13 resume os resultados encontrados.

Tabela 5.13: Resultados do teste estatístico da comparação entre o SAC não plantado da região central (ponto J) com o SAC não plantado da região de saída (ponto L).

Ponto de monitoramento	Teste estatístico aplicado	Parâmetro	Resultado	Valor de p	
J	L	Mann-Whitney	Eh	Existe diferença significativa	0,000000
			OD	Existe diferença significativa	0,000000
			pH	Existe diferença significativa	0,000000
			Temperatura	Não existe diferença significativa	0,124807

Obs.: a diferença é considerada significativa quando o valor de p é inferior a 0,05 (5% de nível de significância).

Os valores de potencial redox na região central do SAC não plantado (ponto J) foram superiores aos encontrados na região de saída (ponto L). Era esperado que a região central apresentasse condições mais redutoras que a região de saída. Este fato pode ser explicado pelo TDH do SAC ser elevado, resultando em valores mais negativos do potencial redox na região de saída. Por outro lado, os valores médios de oxigênio dissolvido na região de saída estão maiores que na região central do leito, assim como os valores de pH. Como observado pela Tabela 5.13, a temperatura não apresentou diferença significativa.

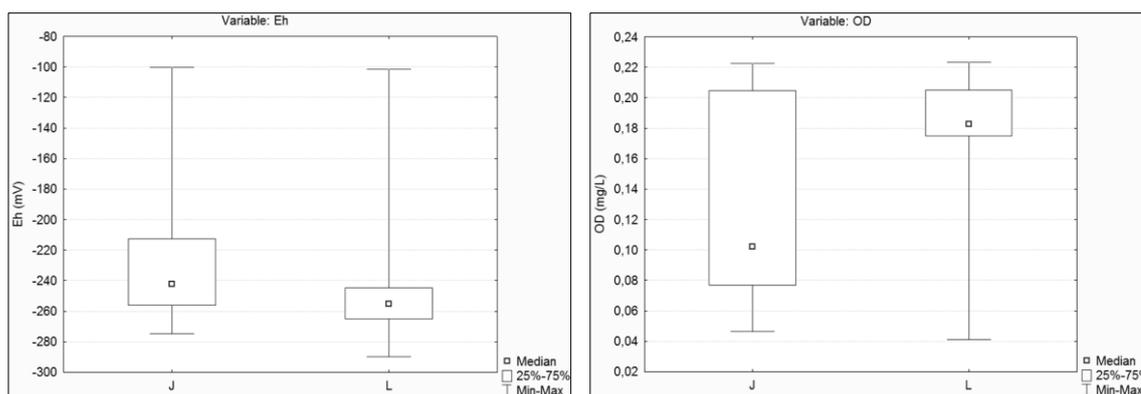


Figura 5.37: Gráfico box-plot das comparações de potencial redox (esquerda) e oxigênio dissolvido (direita) entre o SAC não plantado da região central (ponto J) com o SAC não plantado da região de saída (ponto L).

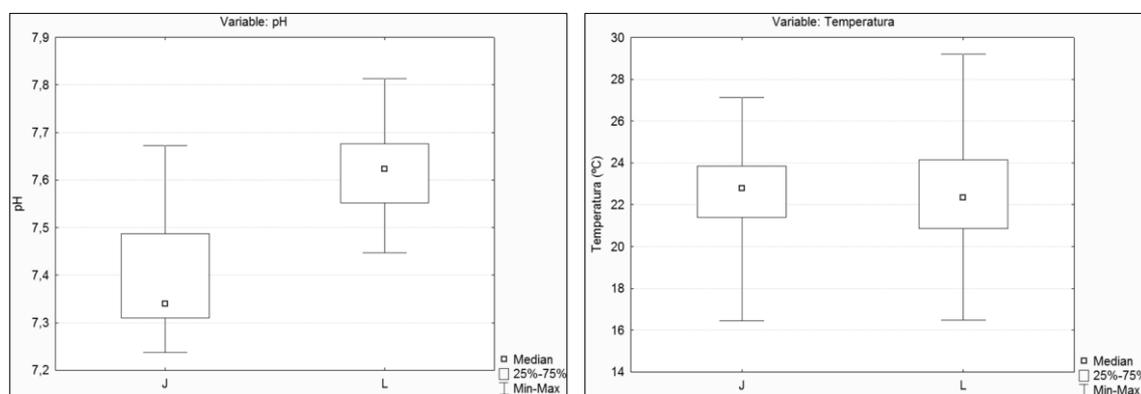


Figura 5.38: Gráfico box-plot das comparações de pH (esquerda) e temperatura (direita) entre o SAC não plantado da região central (ponto J) com o SAC não plantado da região de saída (ponto L).

Foi realizado um monitoramento contínuo do potencial redox, oxigênio dissolvido, temperatura do ar e radiação solar da região central e da região de saída do SAC não plantado. O monitoramento ocorreu entre os dias 23/10/2014 e 30/10/2014. Os dados do monitoramento do potencial redox junto com a radiação solar são apresentados na Figura 5.40. Nota-se que os valores de potencial redox da região de saída sofreram alterações com a redução da radiação solar. As variações da radiação solar variaram em função da nebulosidade local. Este comportamento também foi observado com a redução da temperatura no mesmo período (Figura 5.41).

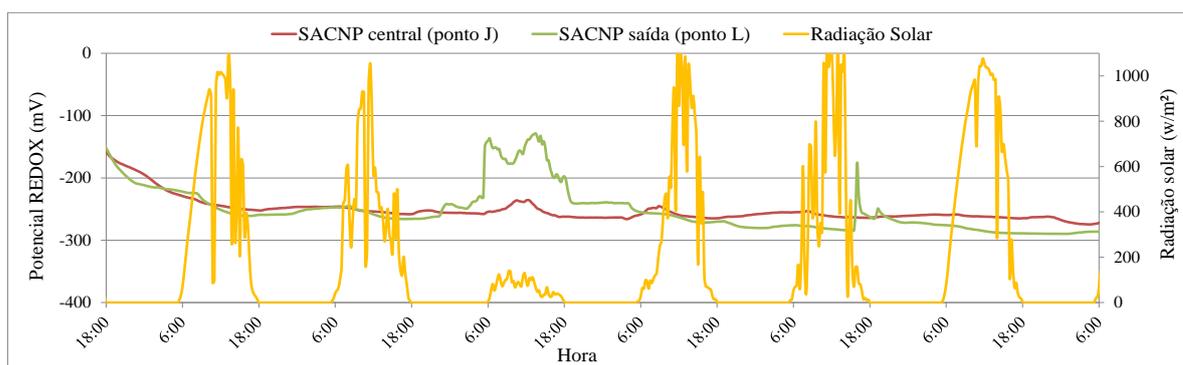


Figura 5.39: Monitoramento diário da radiação solar e potencial redox nos pontos J e L entre os dias 23/10/2014 e 30/10/2014.

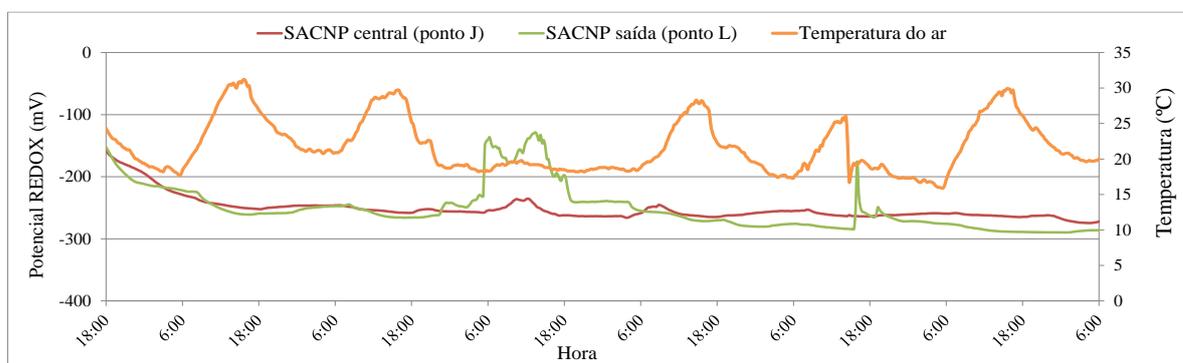


Figura 5.40: Monitoramento diário da temperatura do ar e potencial redox nos pontos J e L entre os dias 23/10/2014 e 30/10/2014.

No monitoramento contínuo da radiação solar com os dados de oxigênio (Figura 5.42), também foi observado que na região de saída do SAC não plantado o oxigênio dissolvido encontrava-se mais elevado que na região central, e que na região de saída as flutuações de oxigênio dissolvido encontravam-se mais suscetíveis às variações de radiação solar. É possível perceber uma singularidade dos dados entre os dois pontos.

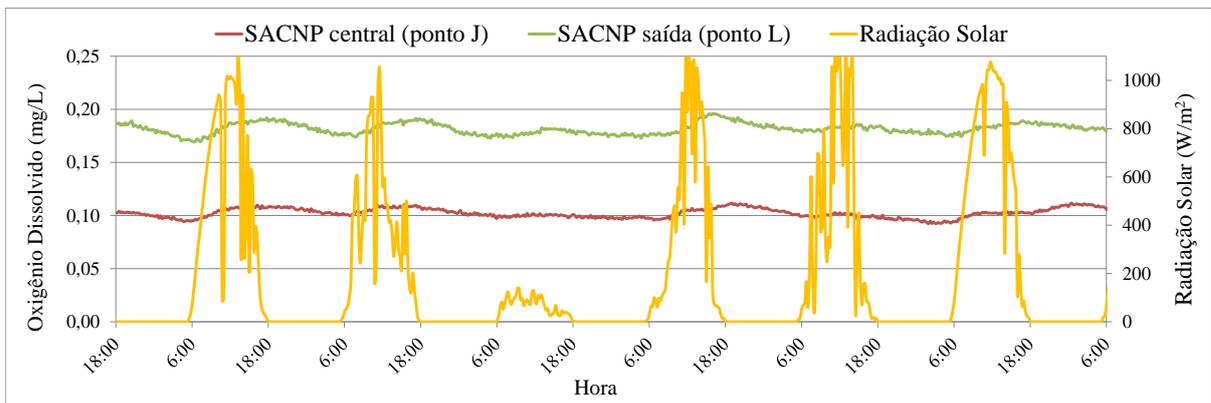


Figura 5.41: Monitoramento diário do oxigênio dissolvido nos pontos J e L entre os dias 23/10/2014 e 30/10/2014.

5.4.3.3 Comparação: RLF *Typha* central com RLF *Typha* saída

A comparação ao longo do comprimento também foi realizada nos RLF. Os resultados são apresentados na Tabela 5.14. Neste item foi analisado o RLF plantado com *Typha* da região central (ponto D) com o RLF plantado *Typha* da região de saída (ponto G).

Tabela 5.14: Resultados do teste estatístico da comparação entre o RLF plantado com *Typha* da região central (ponto D) com o RLF plantado com *Typha* da região de saída (ponto G).

Ponto de monitoramento	Teste estatístico aplicado	Parâmetro	Resultado	Valor de p	
D	G	Mann-Whitney	Eh	Não existe diferença significativa	0,109951
			OD	Existe diferença significativa	0,020604
			pH	Existe diferença significativa	0,000000
			Temperatura	Existe diferença significativa	0,000004

Obs.: a diferença é considerada significativa quando o valor de p é inferior a 0,05 (5% de nível de significância).

Apenas entre os valores de potencial redox do RLF plantado com *Typha* (região central e saída) não foi observado diferença. Os valores de oxigênio dissolvido do RLF na saída estão ligeiramente superiores aos da região central, assim como o pH e a temperatura. Embora os valores de temperatura na região de saída do RLF plantado com *Typha* apresentem-se mais elevados, as variações da região central foram maiores.

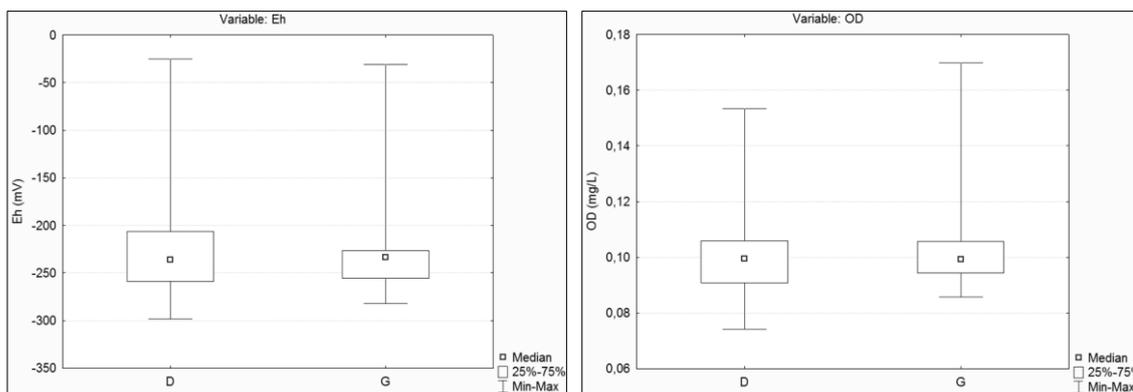


Figura 5.42: Gráfico box-plot das comparações de potencial redox (esquerda) e oxigênio dissolvido (direita) entre o RLF plantado com *Typha* da região central (ponto D) com o RLF plantado com *Typha* da região de saída (ponto G).

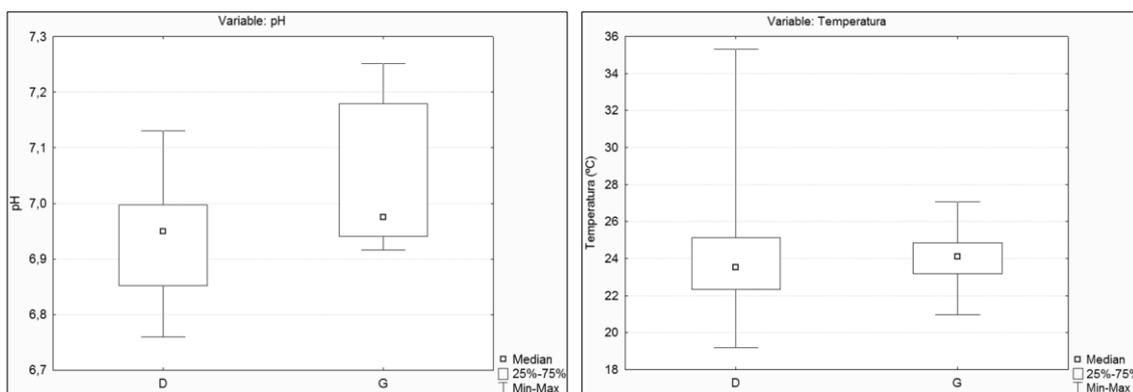


Figura 5.43: Gráfico box-plot das comparações de pH (esquerda) e temperatura (direita) entre o RLF plantado com *Typha* da região central (ponto D) com o RLF plantado com *Typha* da região de saída (ponto G).

5.4.3.4 Comparação: RLF *Canna* central com RLF *Canna* saída

Foram avaliadas as condições ambientais (Eh, pH e temperatura) ao longo do comprimento do RLF plantado com *Canna* na região central e do RLF plantado com *Canna* na região de saída. Os dados de oxigênio dissolvido não foram coletados em função de falhas no sensor. Os resultados estatísticos da comparação são apresentados na Tabela 5.15.

Tabela 5.15: Resultados do teste estatístico da comparação entre o RLF plantado com *Canna* da região central (ponto E) com o RLF plantado com *Canna* da região de saída (ponto H).

Ponto de monitoramento	Teste estatístico aplicado	Parâmetro	Resultado	Valor de p
E	Mann-Whitney	Eh	Existe diferença significativa	0,000000
		pH	Existe diferença significativa	0,000000
		Temperatura	Existe diferença significativa	0,000000

Obs.: a diferença é considerada significativa quando o valor de p é inferior a 0,05 (5% de nível de significância).

Os resultados estatísticos mostram que as diferenças existem para todos os parâmetros avaliados. Os valores médios do potencial redox no RLF plantado com *Canna* da região central estão iguais aos valores de saída. Porém as flutuações da região de saída foram maiores. Os valores de pH e temperatura estão semelhantes às análises anteriores, ou seja, os valores de pH são maiores na saída, e os valores de temperaturas são maiores na região central. As Figuras 5.45 e 5.46 apresentam os gráficos box-plot das comparações entre os pontos E e H.

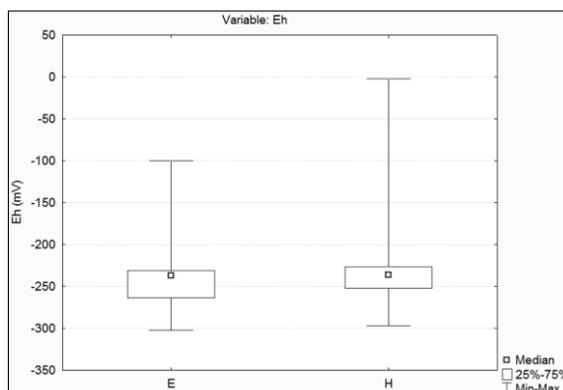


Figura 5.44: Gráfico box-plot das comparações de potencial redox entre o RLF plantado com *Canna* da região central (ponto E) com o RLF plantado com *Canna* da região de saída (ponto H).

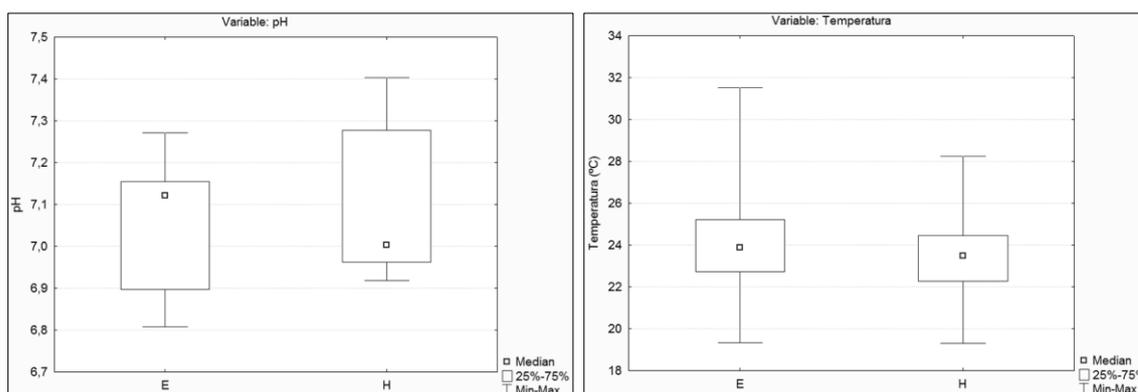


Figura 5.45: Gráfico box-plot das comparações de pH (esquerda) e temperatura (direita) entre o RLF plantado com *Canna* da região central (ponto E) com o RLF plantado com *Canna* da região de saída (ponto H).

5.4.3.5 Comparação: RLFNP central com RLFNP saída

A comparação realizada entre os RLF não plantados da região central e saída, apresentaram resultados diferentes das comparações do SAC não plantado na região central e saída. Apenas para o oxigênio dissolvido os valores não foram diferentes entre si. Os demais parâmetros (Eh, pH e temperatura) apresentaram diferenças significativas.

Tabela 5.16: Resultados do teste estatístico da comparação entre o RLF não plantado da região central (ponto K) com o RLF não plantado da região de saída (ponto M).

Ponto de monitoramento	Teste estatístico aplicado	Parâmetro	Resultado	Valor de p	
K	M	Mann-Whitney	Eh	Existe diferença significativa	0,000000
			OD	Não existe diferença significativa	0,195851
			pH	Existe diferença significativa	0,000000
			Temperatura	Existe diferença significativa	0,001116

Obs.: a diferença é considerada significativa quando o valor de p é inferior a 0,05 (5% de nível de significância).

Os valores médios do potencial redox no RLF não plantado da região central mantiveram-se acima dos valores da região de saída, porém as flutuações na saída foram maiores. A mesma tendência foi observada no oxigênio dissolvido. Os valores de pH da região de saída encontram-se bem acima dos valores de pH da região central. Os valores de temperatura na região central apresentam maiores variações que na região de saída.

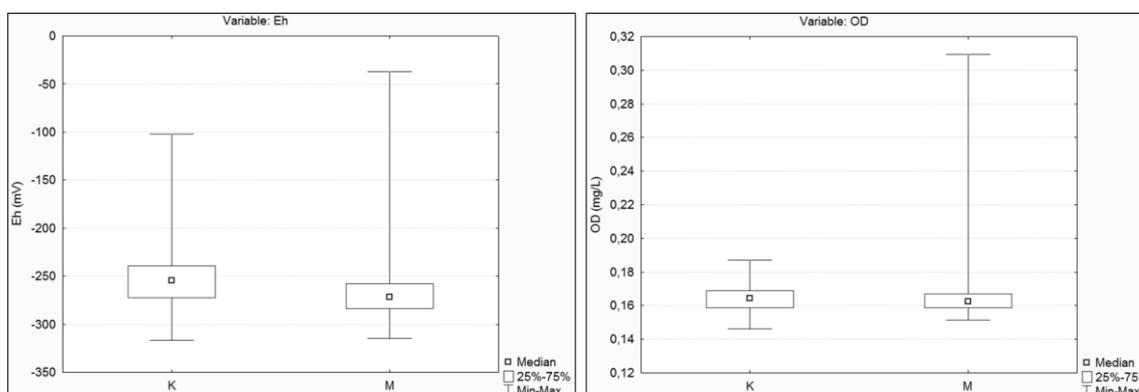


Figura 5.46: Gráfico box-plot das comparações de potencial redox (esquerda) e oxigênio dissolvido (direita) entre o RLF não plantado da região central (ponto K) com o RLF não plantado da região de saída (ponto M).

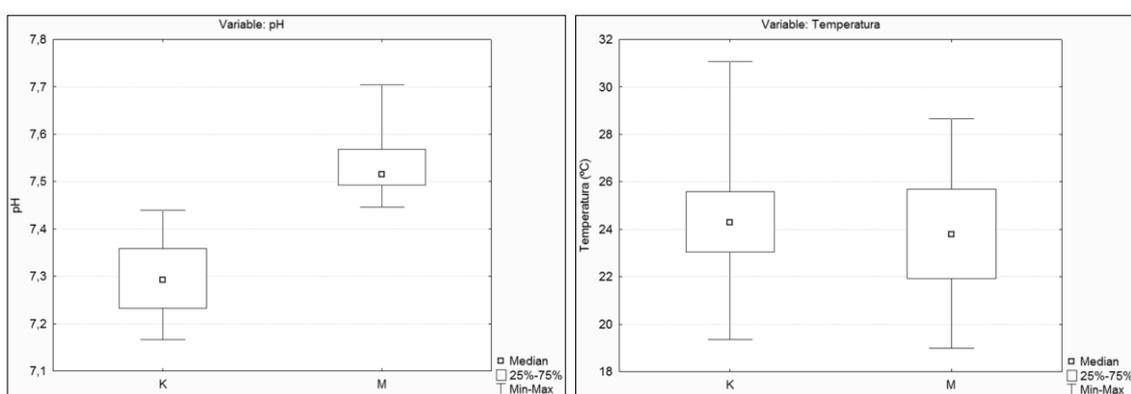


Figura 5.47: Gráfico box-plot das comparações de pH (esquerda) e temperatura (direita) entre o RLF não plantado da região central (ponto K) com o RLF não plantado da região de saída (ponto M).

5.4.4 Avaliação do Reator de Leito Fixo como método de análise aplicado a Sistema Alagado Construído

Neste item, buscou-se avaliar se a metodologia aplicada do Reator de Leito Fixo representou as condições do Sistema Alagado Construído. Para isso, foi realizado o monitoramento dos seguintes parâmetros: Eh, OD, pH e temperatura nos RLF correspondentes aos pontos de monitoramento do SAC. Dessa forma compararam-se os seguintes pontos:

- SACP central (ponto C) com RLF *Typha* central (ponto D);
- SACNP central (ponto J) com RLFNP central (ponto K);
- SACP saída (ponto F) com RLF *Typha* saída (ponto G);
- SACNP saída (ponto L) com RLFNP saída (ponto M).

5.4.4.1 Comparação: SACP central com RLF *Typha* central

O SAC plantado da região central (ponto C) foi representado pelo RLF plantado com *Typha* (ponto D), operando sob as mesmas condições do leito. Os resultados dos testes estatísticos irão auxiliar nas discussões sobre o presente item.

Tabela 5.17: Resultados do teste estatístico da comparação entre o SAC plantado da região central (ponto C) com o RLF plantado com *Typha* da região central (ponto D).

Ponto de monitoramento		Teste estatístico aplicado	Parâmetro	Resultado	Valor de p
C	D	Mann-Whitney	Eh	Existe diferença significativa	0,038665
			OD	Existe diferença significativa	0,000000
			pH	Existe diferença significativa	0,000000
			Temperatura	Existe diferença significativa	0,000000

Obs.: a diferença é considerada significativa quando o valor de p é inferior a 0,05 (5% de nível de significância).

Como observado, para todos os parâmetros avaliados, o RLF plantado com *Typha* apresentou diferenças significativas do SAC plantado. Embora os valores médios do potencial redox no SAC encontram-se acima dos valores do RLF, ambos permanecem na mesma faixa (-200 a -250 mV), ou seja, apresentam aproximadamente as mesmas condições. Nota-se uma tendência de maiores flutuações do potencial redox no RLF, em função deste apresentar menor volume e apresentar maior área lateral para incidência de radiação solar. Os dados de oxigênio dissolvido seguem as mesmas tendências de flutuações, devido ao mesmo fator. Apesar das diferenças encontradas no teste estatístico, as medianas dos valores de oxigênio dissolvido em ambos os pontos permaneceram iguais a 0,10 mg/L (ver Tabela 5.5).

As flutuações de temperatura no RLF também foram maiores do que no SAC, reforçando a hipótese do RLF ser mais sensível às variações ambientais. Os valores de pH do SAC permaneceram acima dos valores de pH do RLF, pois com o aumento da temperatura, uma proporção maior de moléculas de água se quebram, produzindo maiores quantidade de íon H^+ , o que causa uma redução nos valores de pH.

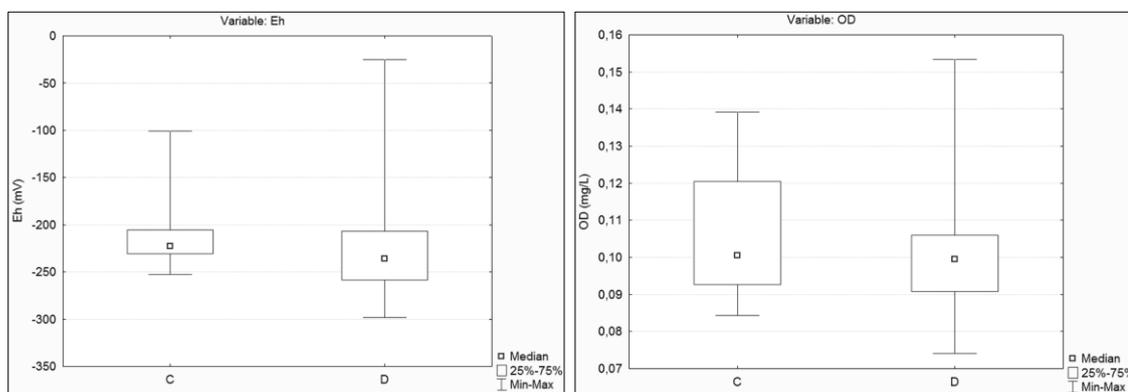


Figura 5.48: Gráfico box-plot das comparações de potencial redox (esquerda) e oxigênio dissolvido (direita) entre o SAC plantado da região central (ponto C) com o RLF plantado com *Typha* da região central (ponto D).

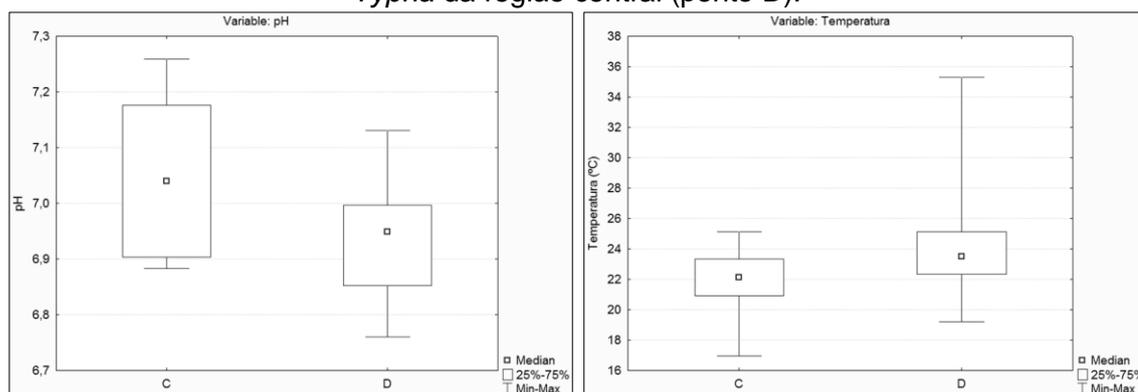


Figura 5.49: Gráfico box-plot das comparações de pH (esquerda) e temperatura (direita) entre o SAC plantado da região central (ponto C) com o RLF plantado com *Typha* da região central (ponto D).

5.4.4.2 Comparação: SACNP central com RLFNP central

O RLF não plantado da região central (ponto K) buscou reproduzir as condições do SAC não plantado da região central (ponto J), operando sob as mesmas condições. Os resultados das comparações entre os pontos são apresentados a seguir.

Tabela 5.18: Resultados do teste estatístico da comparação entre o SAC não plantado da região central (ponto J) com o RLF não plantado da região central (ponto K).

Ponto de monitoramento		Teste estatístico aplicado	Parâmetro	Resultado	Valor de p
J	K	Mann-Whitney	Eh	Não existe diferença significativa	0,119082
			OD	Existe diferença significativa	0,000000
			pH	Existe diferença significativa	0,000000
			Temperatura	Existe diferença significativa	0,000000

Obs.: a diferença é considerada significativa quando o valor de p é inferior a 0,05 (5% de nível de significância).

A Tabela 5.18 mostra que apenas para os dados de potencial redox não foram encontradas diferenças significativas entre os pontos, uma vez que o valor de p foi maior que 0,05. Ainda que não observada diferença, os dados de potencial redox no RLF não plantado apresentavam maiores flutuações que no SAC, como pode ser observado na Figura 5.51 (lado esquerdo). Os valores de oxigênio dissolvido apresentaram amplas diferenças (Figura 5.51, lado direito), sendo que no RLF o oxigênio dissolvido encontrou-se com valores médios superiores ao SAC e menores flutuações, indicando que o RLF apresenta uma maior estabilidade para este parâmetro. Os resultados de temperatura confirmam que o RLF sofre maior incidência da radiação solar, e por consequência um maior aumento na temperatura e redução do pH do líquido intersticial.

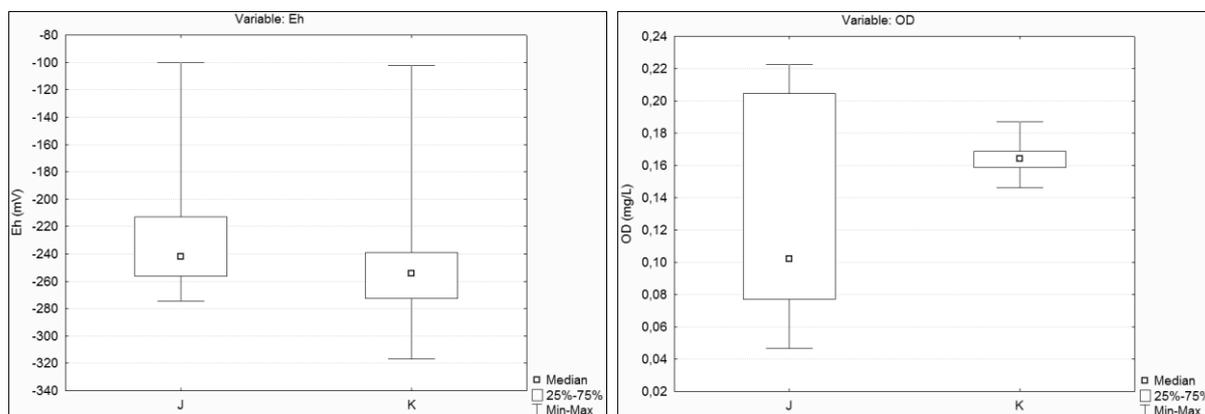


Figura 5.50: Gráfico box-plot das comparações de potencial redox (esquerda) e oxigênio dissolvido (direita) entre o SAC não plantado da região central (ponto J) com o RLF não plantado da região central (ponto K).

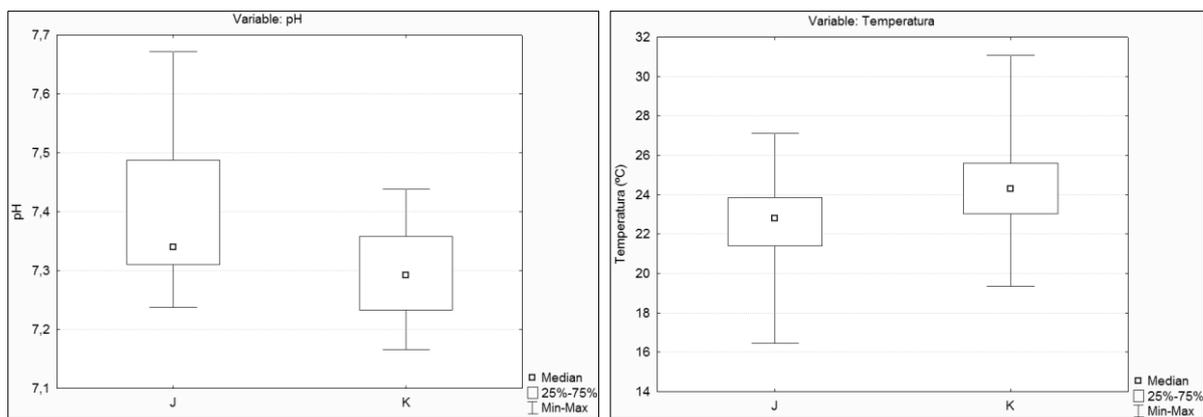


Figura 5.51: Gráfico box-plot das comparações de pH (esquerda) e temperatura (direita) entre o SAC não plantado da região central (ponto J) com o RLF não plantado da região central (ponto K).

5.4.4.3 Comparação: SACP saída com RLF *Typha* saída

O SAC plantado da região de saída (ponto F) foi representado pelo RLF plantado com *Typha* (ponto G), buscando reproduzir as condições do leito. Os resultados dos testes estatísticos são mostrados na Tabela 5.19.

Tabela 5.19: Resultados do teste estatístico da comparação entre o SAC plantado região de saída (ponto F) com o RLF plantado com *Typha* da região de saída (ponto G).

Ponto de monitoramento	Teste estatístico aplicado	Parâmetro	Resultado	Valor de p	
F	G	Mann-Whitney	Eh	Existe diferença significativa	0,00000
			OD	Existe diferença significativa	0,00000
			pH	Existe diferença significativa	0,00000
			Temperatura	Existe diferença significativa	0,00000

Obs.: a diferença é considerada significativa quando o valor de p é inferior a 0,05 (5% de nível de significância).

Os testes estatísticos apontaram uma diferença significativa para todos os parâmetros avaliados (Eh, OD, pH e temperatura). No entanto, os valores de potencial redox mostram-se semelhantes nas flutuações e mantiveram-se na mesma faixa de potencial redox (-200 a -250 mV). Para o oxigênio dissolvido, o SAC apresentou maiores flutuações e os valores médios deste parâmetro encontraram-se mais elevados que nos RLF. Este fato pode ser atribuído ao maior desenvolvimento das plantas no RLF do que no SAC, alterando a relação de raízes por volume de meio suporte, e em consequência ao maior crescimento de microrganismos que demandam elevado consumo de oxigênio, levando inclusive as condições de oxirredução para valores inferiores ao SAC. Os valores de oxigênio dissolvido do RLF plantado com *Typha*, quando comparado com o RLF não plantado (Item 5.4.2.3) confirmam esta hipótese.

A diferença nos valores de pH e temperatura no SAC, comparados com os valores de pH e temperatura do RLF, estão semelhantes aos itens anteriores, ou seja, os valores de temperatura no RLF encontram-se superiores aos valores do SAC, e os valores de pH no SAC encontram-se superiores aos valores de pH do RLF.

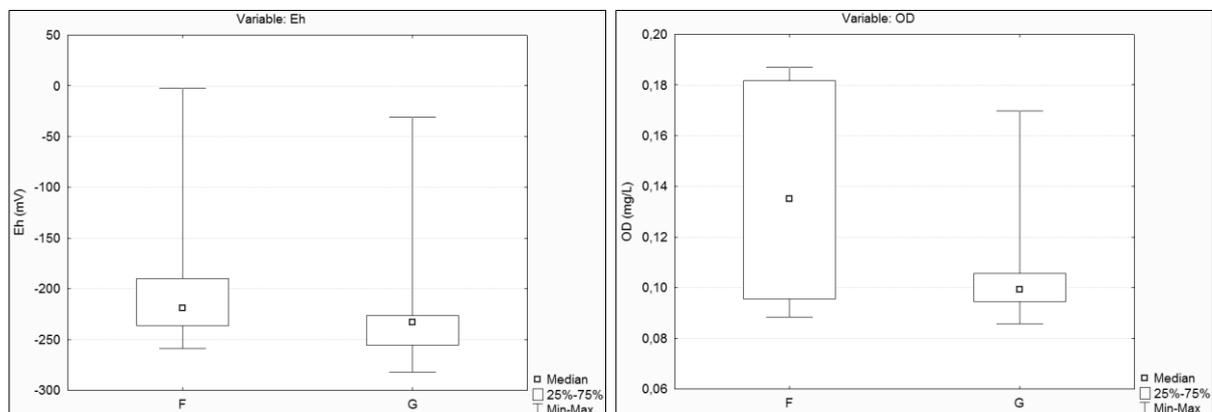


Figura 5.52: Gráfico box-plot das comparações de potencial redox (esquerda) e oxigênio dissolvido (direita) entre o SAC plantado região de saída (ponto F) com o RLF plantado com *Typha* da região de saída (ponto G).

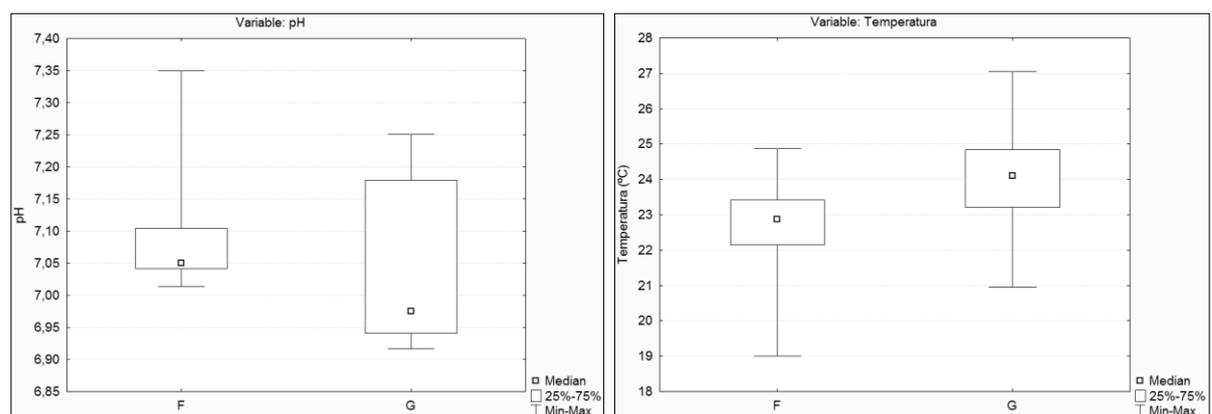


Figura 5.53: Gráfico box-plot das comparações de pH (esquerda) e temperatura (direita) entre o SAC plantado região de saída (ponto F) com o RLF plantado com *Typha* da região de saída (ponto G).

5.4.4.4 Comparação: SACNP saída com RLFNP saída

O último item de comparação do SAC com o RLF ocorreu na região de saída do leito não plantado. Os resultados são apresentados a seguir.

Tabela 5.20: Resultados do teste estatístico da comparação entre o SAC não plantado da região de saída (ponto L) com o RLF não plantado da região de saída (ponto M).

Ponto de monitoramento		Teste estatístico aplicado	Parâmetro	Resultado	Valor de p
L	M	Mann-Whitney	Eh	Existe diferença significativa	0,000000
			OD	Existe diferença significativa	0,000000
			pH	Existe diferença significativa	0,000000
			Temperatura	Existe diferença significativa	0,000000

Obs.: a diferença é considerada significativa quando o valor de p é inferior a 0,05 (5% de nível de significância).

Os resultados apresentados na Tabela 5.20 mostram que existem diferenças para todos os parâmetros avaliados. Da mesma forma que nos itens anteriores, o potencial redox do RLF apresentou maiores variações do que no SAC, no entanto os valores médios do potencial redox no SAC permaneceram superiores aos valores médios do potencial redox no RLF. Os resultados do oxigênio dissolvido mostraram que os valores médios do SAC não plantado encontram-se acima dos valores médios do RLF. Assim como nas comparações anteriores, o pH do RLF encontra-se com valores abaixo do SAC, e a temperatura do RLF encontra-se com seus valores médios acima do SAC.

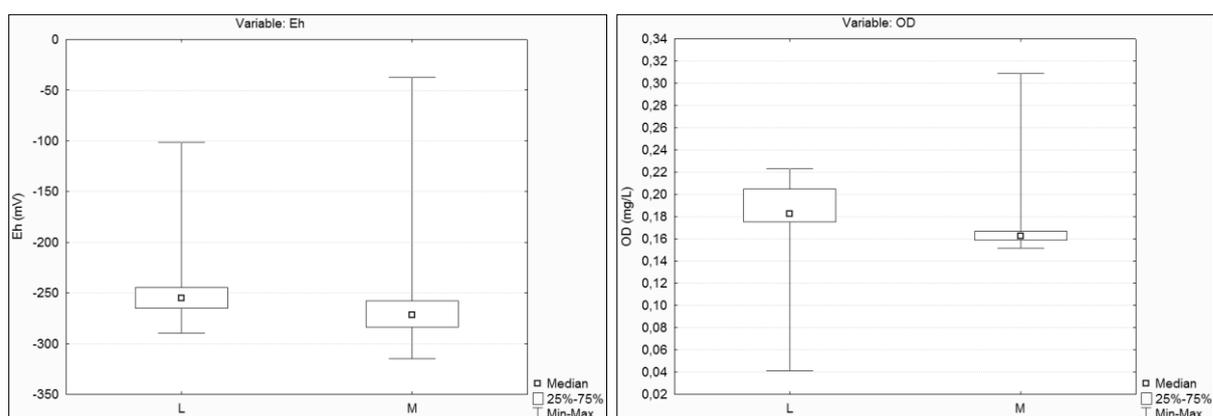


Figura 5.54: Gráfico box-plot das comparações de potencial redox (esquerda) e oxigênio dissolvido (direita) entre o SAC não plantado da região de saída (ponto L) com o RLF não plantado da região de saída (ponto M).

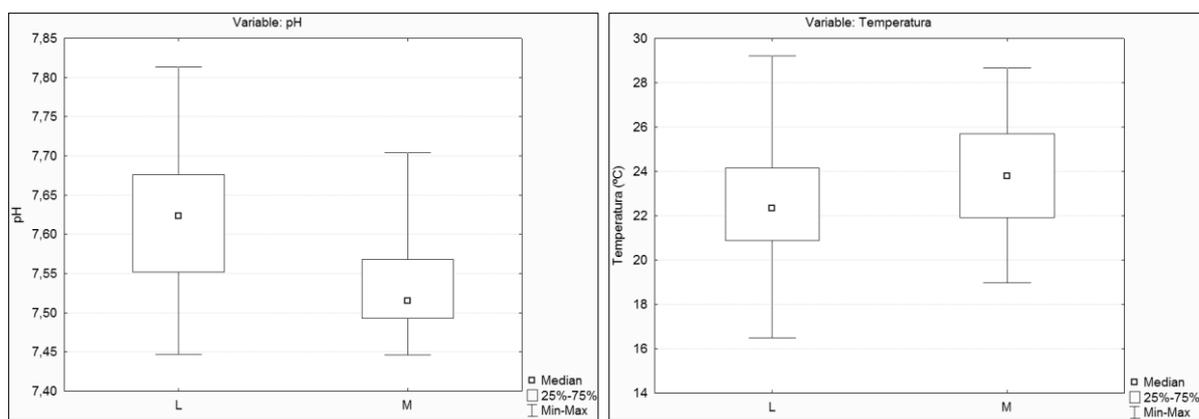


Figura 5.55: Gráfico box-plot das comparações de pH (esquerda) e temperatura (direita) entre o SAC não plantado da região de saída (ponto L) com o RLF não plantado da região de saída (ponto M).

5.4.5 Avaliação da espécie de planta nos reatores de leito fixo

O presente item procurou avaliar a influência de duas espécies de plantas (*Typha latifolia* e *Canna x genaralis*) nas condições ambientais (potencial redox, temperatura e pH) atuantes no Sistema de Alagado Construído. Desta forma, utilizou-se o Reator de Leito Fixo como método de análise das condições ambientais. Os pontos monitorados foram:

- RLF *Typha* central (ponto D) com RLF *Canna* central (ponto E);
- RLF *Typha* saída (ponto G) com RLF *Canna* saída (ponto H).

5.4.5.1 Comparação: RLF *Typha* central com RLF *Canna* central

Inicialmente foi avaliado o RLF plantado com *Typha* (ponto D) e o RLF plantado com *Canna* (ponto E) sob condições da região central do SAC plantado. Os resultados desta comparação são apresentados na Tabela 5.21.

Tabela 5.21: Resultados do teste estatístico da comparação entre o RLF plantado com *Typha* da região central (ponto D) com o RLF plantado com *Canna* da região central (ponto E).

Ponto de monitoramento	Teste estatístico aplicado	Parâmetro	Resultado	Valor de p
D	Mann-Whitney	Eh	Existe diferença significativa	0,000000
		pH	Existe diferença significativa	0,000000
		Temperatura	Existe diferença significativa	0,000000

Obs.: a diferença é considerada significativa quando o valor de p é inferior a 0,05 (5% de nível de significância).

No RLF plantado com *Canna* não foi realizada análise de oxigênio dissolvido em função de falhas no sensor. A análise estatística indicou diferenças significativas para os parâmetros potencial redox, pH e temperatura. Apesar disso, nota-se uma semelhança nas distribuições dos dados de potencial redox e temperatura. Apenas para os dados de pH percebe-se diferenças nas

distribuições dos dados (Figura 5.58 lado esquerdo), sendo que o RLF plantado com *Canna* apresentou pH mais elevado que no RLF plantado com *Typha*. A diferença da mediana entre as espécies foi de 0,17. Observa-se que o líquido intersticial do RLF plantado com *Canna* apresenta maiores variações de pH e que o líquido intersticial do RLF plantado com *Typha* apresenta maiores flutuações de temperatura.

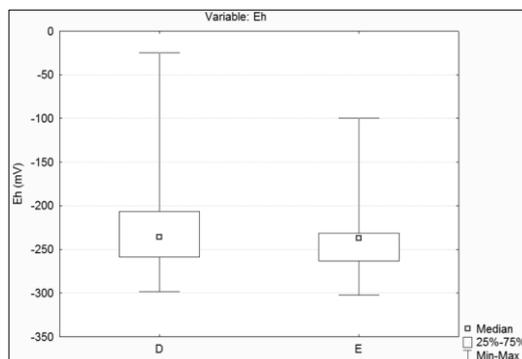


Figura 5.56: Gráfico box-plot das comparações de potencial redox (esquerda) e oxigênio dissolvido (direita) entre o RLF plantado com *Typha* da região central (ponto D) com o RLF plantado com *Canna* da região central (ponto E).

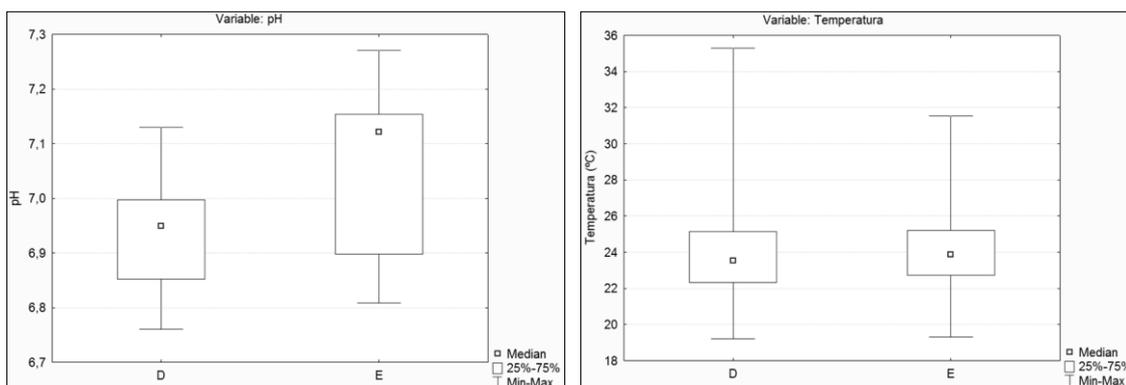


Figura 5.57: Gráfico box-plot das comparações de pH (esquerda) e temperatura (direita) entre o RLF plantado com *Typha* da região central (ponto D) com o RLF plantado com *Canna* da região central (ponto E).

Foi realizada uma campanha de monitoramento entre os dias 19/09/2014 e 25/09/2014. Os resultados avaliados neste período indicam que a *Canna* apresenta maior estabilidade no potencial redox do que a *Typha*. Os resultados deste monitoramento são mostrados na Figura 5.59 e Figura 5.60. A análise global com todos os dados do monitoramento da *Typha* e da *Canna* corrobora esta conclusão.

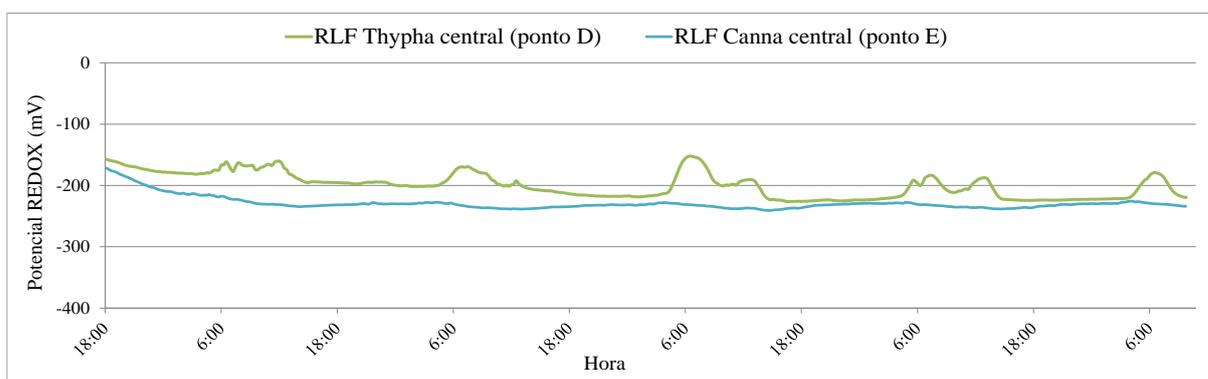


Figura 5.58: Monitoramento diário do oxigênio dissolvido nos pontos D e E entre os dias 19/09/2014 e 25/09/2014.

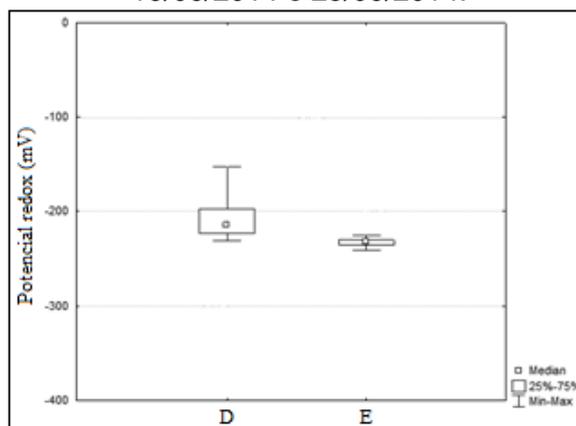


Figura 5.59: Gráfico box-plot das comparações de potencial redox entre o RLF plantado com *Typha* da região central (ponto D) com o RLF plantado com *Canna* da região central (ponto E) utilizando os dados do monitoramento realizado em 19/09/2014 a 25/09/2014.

5.4.5.2 Comparação: RLF *Typha* saída com RLF *Canna* saída

Posteriormente foi avaliado o RLF plantado com *Typha* (ponto G) e o RLF plantado com *Canna* (ponto H) sob condições da região de saída do SAC plantado.

Tabela 5.22: Resultados do teste estatístico da comparação entre o RLF plantado com *Typha* da região de saída (ponto G) com o RLF plantado com *Canna* da região de saída (ponto H).

Ponto de monitoramento	Teste estatístico aplicado	Parâmetro	Resultado	Valor de p
G	Mann-Whitney	Eh	Não existe diferença significativa	0,059137
		pH	Existe diferença significativa	0,000000
		Temperatura	Existe diferença significativa	0,000000

Obs.: a diferença é considerada significativa quando o valor de p é inferior a 0,05 (5% de nível de significância).

Como já citado anteriormente, os dados de oxigênio dissolvido da *Canna* não foram coletados, por conta disso não foram realizadas comparações com este parâmetro. As demais comparações indicam que apenas os dados de potencial redox do RLF plantado com *Typha* e do RLF plantado com *Canna* da região de saída não apresentam diferenças (embora o valor de p esteja apenas marginalmente superior ao nível de significância de 5%). Os parâmetros pH e temperatura entre

os pontos possuem diferenças significativas. Do mesmo modo que na comparação da região central, a mediana dos dados do RLF plantado com *Canna* encontra-se acima da mediana dos dados do RLF plantado com *Typha* na região de saída. As variações dos dados de pH da *Canna* também foram maiores na região de saída. Entretanto, na região de saída a temperatura do líquido intersticial do RLF plantado com *Canna* apresentou maiores variações do que na região central, apesar dos valores médios do RLF plantado com *Typha* estarem maiores que no RLF plantado com *Canna*.

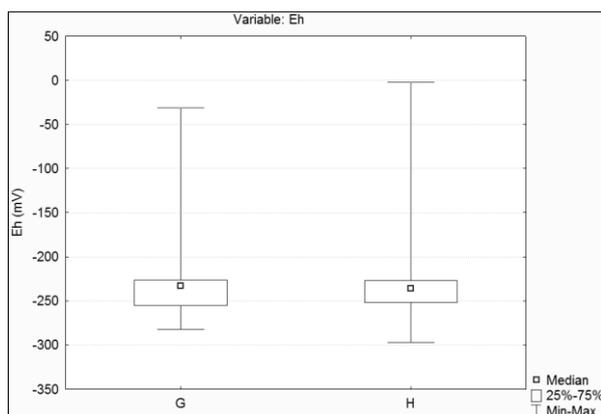


Figura 5.60: Gráfico box-plot das comparações de potencial redox (esquerda) e oxigênio dissolvido (direita) entre o RLF plantado com *Typha* da região de saída (ponto G) com o RLF plantado com *Canna* da região de saída (ponto H).

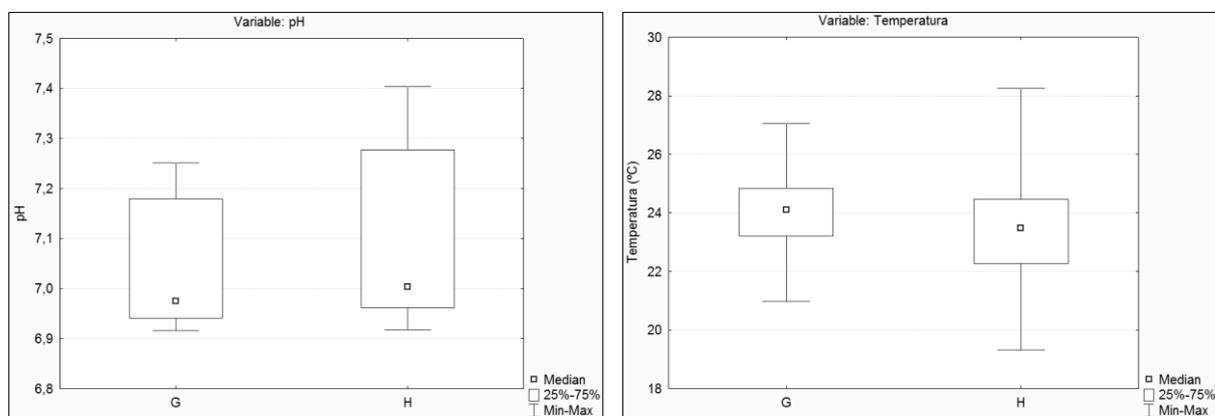


Figura 5.61: Gráfico box-plot das comparações de pH (esquerda) e temperatura (direita) entre o RLF plantado com *Typha* da região de saída (ponto G) com o RLF plantado com *Canna* da região de saída (ponto H).

5.4.6 Síntese dos resultados dos testes estatísticos

Os testes estatísticos não devem ser empregados como uma ferramenta isolada para interpretação dos resultados. Na Tabela 5.23 é apresentada uma síntese dos resultados das comparações realizadas pelos testes estatísticos de Mann-Whitney. É importante comentar que os testes

estatísticos foram utilizados para auxiliar a interpretação dos dados, mas os resultados dos testes não podem ser analisados sem levar em conta as características dos parâmetros analisados e seu significado ambiental.

Tabela 5.23: Resumo das comparações realizadas pelos testes estatísticos.

Objetivo	Comparações	Parâmetro			
		Eh	OD	pH	Temp.
Avaliação da influência da vegetação	SACP central com SACNP central	✓	✓	✓	✓
	SACP saída com SACNP saída	✓	✓	✓	✗
	RLF <i>Typha</i> central com RLFNP central	✓	✓	✓	✓
	RLF <i>Typha</i> saída com RLFNP saída	✓	✓	✓	✓
Avaliação da posição ao longo do comprimento do leito	SACP central com SACP saída	✓	✓	✓	✓
	SACNP central com SACNP saída	✓	✓	✓	✗
	RLF <i>Typha</i> central com RLF <i>Typha</i> saída	✗	✓	✓	✓
	RLF <i>Canna</i> central com RLF <i>Canna</i> saída	✓	–	✓	✓
	RLFNP central com RLFNP saída	✓	✗	✓	✓
Avaliação do Reator de Leito Fixo como método de análise aplicado a Sistema Alagado Construído	SACP central com RLF <i>Typha</i> central	✓	✓	✓	✓
	SACNP central com RLFNP central	✗	✓	✓	✓
	SACP saída com RLF <i>Typha</i> saída	✓	✓	✓	✓
	SACNP saída com RLFNP saída	✓	✓	✓	✓
Avaliação da espécie de planta no Reator de Leito Fixo	RLF <i>Typha</i> central com RLF <i>Canna</i> central	✓	–	✓	✓
	RLF <i>Typha</i> saída com RLF <i>Canna</i> saída	✗	–	✓	✓

Obs.: O nível de significância considerado no teste de Mann-Whitney foi de 5%.

Legenda: (✓)=Existe diferença significativa; (✗)=Não existe diferença significativa; (–)=Dado não disponível; SACP=sistema de alagado construído plantado; SACNP=sistema de alagado construído não plantado; RLF=reator de leito fixo; RLFNP=reator de leito fixo não plantado; Eh=potencial redox; OD=oxigênio dissolvido; pH=potencial hidrogeniônico; Temp.=temperatura.

Apesar das diferenças estatísticas obtidas, o método do reator de leito fixo empregado na presente pesquisa, demonstrou ser válido para representar o sistema alagado construído nos parâmetros potencial redox, oxigênio dissolvido, pH e temperatura. Houve diferenças nas distribuições dos dados; entretanto, as diferenças entre as medianas dos valores são consideradas pequenas em termos de porcentagem (Tabela 5.24).

A Tabela 5.24 resume as diferenças encontradas entre as medianas do SAC e o do RLF. É possível observar que as diferenças entre os valores de potencial redox são pequenas, entre 12 e 17 mV, valor considerado desprezível dentro das faixas de potencial redox. Para o oxigênio dissolvido as diferenças entre as medianas estão entre 0 e 0,06 mg/L, também um valor

considerado baixo. Como os valores são baixos, pequenas diferenças resultam em variações relativas maiores (como observado nos valores reportados em % de OD na Tabela 5.24). A temperatura apresentou diferenças entre 1,2 a 1,5 °C, e o pH entre 0,05 e 0,10. Ou seja, todos os parâmetros avaliados estão de certa forma com desprezíveis diferenças entre as medianas, podendo inferir que o reator de leito fixo representou as condições ambientais do sistema alagado construído.

Tabela 5.24: Resumo das diferenças entre os valores de medianas do sistema alagado construído e reator de leito fixo.

Ponto	Potencial redox (mV)	Oxigênio dissolvido (mg/L)	Temperatura (°C)	pH
SACP central (ponto C)	-223	0,10	22,1	7,04
RLF <i>Typha</i> central (ponto D)	-236	0,10	23,5	6,95
Diferença C com D	13 (5,8%)	0,00 (0%)	1,4 (6,3%)	0,09 (1,3%)
SACNP central (ponto J)	-242	0,10	22,8	7,34
RLFNP central (ponto K)	-254	0,16	24,3	7,29
Diferença J com K	12 (5,0%)	0,06 (60%)	1,5 (6,6%)	0,05 (0,7%)
SACP saída (ponto F)	-219	0,13	22,9	7,05
RLF <i>Typha</i> saída (ponto G)	-233	0,10	24,1	6,97
Diferença F com G	14 (%)	0,03 (23%)	1,2 (5,2%)	0,08 (1,1%)
SACNP saída (ponto L)	-255	0,18	22,3	7,62
RLFNP saída (ponto M)	-272	0,16	23,8	7,52
Diferença L com M	17 (%)	0,02 (11%)	1,5 (6,7%)	0,10 (1,3%)

Obs.: Valores das medianas dos pontos. * Não foi observado diferença significativa pelo teste de Mann-Whitney. Legenda: SACP=sistema de alagado construído plantado; SACNP=sistema de alagado construído não plantado; RLF=reator de leito fixo; RLFNP=reator de leito fixo não plantado; pH=potencial hidrogeniônico.

6 CONCLUSÕES

As conclusões da presente pesquisa foram:

- Com relação à hidrodinâmica do Reator de Leito Fixo (RLF): a avaliação sem a linha de recirculação demonstrou que o reator se aproxima de um reator de mistura completa (utilizando escória de alto forno, com $d = 20-30$ mm e vazão = 450 mL/min), sendo um aspecto desejado e importante para ocorrer o processo de tratamento e a interação do líquido com o meio suporte.
- No que diz respeito à presença das plantas: os valores e as variações diárias do potencial redox no SAC plantado foram maiores do que no SAC não plantado, pois há uma pequena liberação de oxigênio pelo sistema radicular das plantas. Apesar das diferenças entre os valores da unidade plantada e não plantada, ambas estiveram na mesma faixa de potencial redox (-200 a -300 mV). Foram observadas baixas concentrações de oxigênio dissolvido em ambas as unidades, sendo que na unidade não plantada as concentrações foram ligeiramente superiores às da unidade plantada. Este fato pode ser explicado pela demanda de oxigênio na unidade plantada ser superior à unidade não plantada. As variações de oxigênio dissolvido também foram maiores na unidade não plantada, corroborando com a hipótese de que no leito plantado o consumo de oxigênio é maior. As variações de temperatura no SAC não plantado foram superiores às do SAC plantado, indicando que a planta contribui para a estabilização deste parâmetro. Os valores de pH no SAC não plantado mantiveram-se superiores aos valores de pH do SAC plantado, fato atribuído à liberação de substâncias orgânicas pelas plantas que podem ser convertidas em ácidos húmicos, reduzindo o pH.
- No que se refere à posição ao longo do comprimento dos SAC: os valores e as variações do potencial redox na região de saída do SAC plantado e não plantado foram maiores que na região central. Os valores de oxigênio dissolvido e pH na região de saída do SAC plantado e não plantado também foram maiores que na região central. A temperatura em ambas as regiões foi semelhante.
- Com relação à espécie de planta: a *Canna x genaralis* apresentou maior estabilidade no potencial redox e pH mais elevado que a *Typha latifolia*.
- No que se refere à metodologia do RLF: os resultados estatísticos demonstram existir diferenças significativas dos RLF correspondentes ao SAC para todos os parâmetros

avaliados (exceto para potencial redox do SAC não plantado da região central). Entretanto, o potencial redox apresentou semelhança nos dados em todas as comparações realizadas e os valores encontram-se na mesma faixa de potencial redox. A temperatura foi mais elevada nos RLF, devido à sua área de exposição lateral ser proporcionalmente maior, contribuindo para a disponibilidade do íon hidrogênio e conseqüentemente para a redução do pH. Apesar das diferenças observadas, pode-se concluir que nas atuais condições de estudo os RLF representaram bem as condições do SAC, principalmente em relação ao potencial redox.

7 RECOMENDAÇÕES

Recomenda-se para futuras pesquisas no RLF operando sob condições do SAC:

- Avaliar a hidrodinâmica do reator com as cestas em maior período de ambientação, promovendo o completo crescimento das raízes e reprodução das condições do SAC nas cestas, buscando observar diferenças entre amostras do leito plantado e não plantado e diferenças na condutividade hidráulica ao longo do comprimento. As condições de colmatação nas diferentes posições do leito possivelmente influenciarão as características hidrodinâmicas do meio suporte.
- Quantificar a biomassa presente nos SAC e nos RLF plantado e não plantado, buscando confirmar a hipótese de que o consumo de oxigênio na unidade plantada é maior que na unidade não plantada.
- Mudar o afluente aos RLF para condições oxidantes, o que poderá permitir melhor avaliação das flutuações diárias.
- Comparar as amostras do RLF sob diferentes condições de carga.
- Comparar outras espécies de planta, buscando maiores interferências na incorporação de oxigênio pelas raízes.

REFERÊNCIAS

- ABNT NBR 15847:2010. Associação Brasileira de Normas Técnicas. *Amostragem de água subterrânea em poços de monitoramento — Métodos de purga*. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.
- ANDRADE, J. C. da M.; TAVARES, S. R. de L.; MAHLER, C. F. *Fitorremediação: o uso de plantas na melhoria da qualidade ambiental*. São Paulo: Oficina de Textos, 176 p., 2007.
- APHA. AWWA. WEF. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. Washington, D.C.: American Public Health Association. American Water Works Association, Water Pollution Control Federation. 2005. 1325 p.
- ÁVILA, C.; REYES, C.; BAYONA, J. M.; GARCÍA, J. Emerging organic contaminant removal depending on primary treatment and operational strategy in horizontal subsurface flow constructed wetlands: Influence of redox. *Water Research*, v. 47, p. 18, 2013.
- BIALOWIEC, A.; DAVIES, L.; ALBUQUERQUE, A.; RANDERSON, P. F. Nitrogen removal from landfill leachate in constructed wetlands with reed and willow: Redox potential in the root zone. *Journal of Environmental Management*, v. 97, p. 5, 2012.
- BRIX, H. Functions of macrophytes in constructed wetlands. *Water Science and Technology*, v. 29, n. 4, p. 71-78, 1994.
- BRIX, H. How 'green' are aquaculture, constructed wetlands and conventional wastewater treatment systems? *Water Science and Technology*. 40, 45–50. 1999.
- BRIX, H. Macrophytes play a role in constructed treatment wetlands? *Water Science and Technology*, v. 35, p. 11–17, 1997.
- BRIX, H.. *Macrophyte-mediated oxygen transfer in wetlands: transport mechanisms and rates*. In: Moshiri, G.A. (Ed.), *Constructed Wetland for Water Quality Improvement*. CRC Press, Boca Raton, FL, USA, pp. 391–398. 1993.
- BROWN, T. L.; LEMAY, H. E.; BERSTEN, B.E. *Química, a ciência central*. 9ª ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 992 p. 2005.
- CHAZARENC F.; GÉRARD M.; GONTHEIR Y. Hydrodynamics of horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Ecological Engineering* 21: 165–173. 9 p. 2003.
- COLLISCHONN, W. *Simulação hidrológica de grandes bacias*, tese de doutorado, IPH-UFRGS, 196p., 2001.
- COLMER T.D. Long distance transport of gases in plants: a perspective on internal aeration and radial oxygen loss from roots. *Plant, Cell and Environment*, 26: 17-36. 2003.
- CONNELL, E.L.; COLMER, T.D.; WALKER, D.I. Radial oxygen loss from intact roots of *Halophila ovalis* as a function of distance behind the root tip and shoot illumination. *Aquat. Bot.* 63, 219–228. 1999.

COOPER P. F.; JOB G. D.; GREEN B.; SHUTES R. B. E. Reed beds and constructed wetlands for wastewater treatment. *Wrc publications*. Swindon, United Kingdom, 184pp. 1996.

CORBELLA, C.; GARFÍ, M.; PUIGAGUT, J. Vertical redox profiles in treatment wetlands as function of hydraulic regime and macrophytes presence: Surveying the optimal scenario for microbial fuel cell implementation. *Science of the Total Environment* 470-471. 5 p. 2014.

COSSIO, F. Y. *Lagunas de Estabilización - Teoría, Diseño, Evaluación y Mantenimiento*. OPS/OMS, 1993.

COSTA, J. F. *Remoção de poluentes em um sistema de alagados construídos atuando como pós-tratamento de efluente de reator uasb e de filtro biológico percolador*. Tese (doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Universidade Federal de Minas Gerais. 193 p. 2013

DE PAOLI, André Cordeiro. *Análise de desempenho e comportamento de wetlands horizontais de fluxo subsuperficial baseado em modelos hidráulicos e cinéticos*. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais. 149p. 2010.

DORNELAS, Filipe Lima. *Avaliação do desempenho de wetlands horizontais subsuperficiais como pós-tratamento de efluentes de reatores UASB*. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais. 101p. 2008.

DUŠEK, J.; PICEK, T.; ČÍŽKOVÁ, H. Redox potential dynamics in a horizontal subsurface flow constructed wetland for wastewater treatment: Diel, seasonal and spatial fluctuations. *Ecological Engineering*. v. 34, p. 223–232, 2008.

ESTEVES, F. de A. *Fundamentos de limnologia*. 2ª Ed. Rio de Janeiro: Interciência, 626 p., 1998.

FAULWETTER, J. L.; GAGNON, V.; SUNDBERG, C.; CHAZARENC, F.; BURR, M. D.; BRISSON, J.; CAMPER, A. K.; STEIN, O. R. Microbial processes influencing performance of treatment wetlands: A review. *Ecological Engineering*, v. 35, p. 18, 2009.

GAGNON, V.; CHAZARENC, F.; COMEAU, Y.; BRISSON, J. Influence of macrophyte species on microbial density and activity in constructed wetlands. *Water Science and Technology*. v. 56, n. 3, p. 249-254, 2007.

GARCÍA, J.; ROUSSEAU, D. P. L.; MORATÓ, J.; LESAGE, E.; MATAMOROS, V.; BAYONA, J. M. Contaminant removal processes in subsurface-flow constructed wetlands: a review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. v. 40, p. 561-661, 2010.

KADLEC, R. H.; WALLACE, S. D. *Treatment Wetland*. p.1016. 2009.

KAPPELMEYER, U; WIEBNER, A; KUSCHK, P; KASTNER, M. Operation of a universal test for planted soil filters – planted fixed bed reactor. *Engineering in Life Sciences*, 2002.

- LAI, W. L. ; ZHANG, Y. ; CHEN, Z. H. Radial oxygen loss, photosynthesis and nutrient removal of 35 wetland plants. *Ecological Engineering*. v. 39, p. 24-30, 2012.
- LANGERGRABER G.; ŠIMŮNEK J. Reactive transport modeling of subsurface flow constructed wetlands using the hydrus wetland module. *Vadose Zone Journal*, v. 11, 14 p., 2012.
- LARIVIERE, D.; AUTENRIETH, R.; BONNER, J. Redox dynamics during recovery of an oil-impacted estuarine wetland. *Water Research*, v. 37, p.11, 2003.
- LEVENSPIEL, O. *Engenharia das Reações Químicas*. São Paulo: *Edgard Blugher*, 563p., 2000.
- MACEDO, J. A. B. *Águas & Águas*. 3ª Ed. Belo Horizonte: CRQ-MG., 1042p., 2007.
- MATOS, A. T.; FREITAS, W. S.; BRASIL, M. S.; BORGES, A. C. Influência da espécie vegetal cultivada nas condições redox de sistemas alagados construídos. *Eng. Agríc., Jaboticabal*, v.30, n.3, p.518-526, maio/jun. 2010.
- MATOS, A. T.; FREITAS, W. S.; LO MONACO, P. A. V. Capacidade extratora de diferentes espécies vegetais cultivadas em sistemas alagados utilizados no tratamento de águas residuárias da suinocultura. *Amibi-Água*, v. 4, n. 2, p. 31-45, 2009.
- MATOS, M. P.; VON SPERLING, M.; MATOS, A. T.; PASSOS, R. G. Uso de traçador salino para avaliação da colmatação e das condições hidrodinâmicas em sistema alagado construído de escoamento horizontal subsuperficial. In: 28º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2015 (Anais). Rio de Janeiro: ABES, 2015.
- METCALF & EDDY. *Wastewater engineering: treatment, and reuse*. New York: Metcalf & Eddy, Inc., 4 th. ed.,1819 p., 2003.
- MINAS GERAIS. Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG nº 1, de 5 de Maio de 2008. *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*. Belo Horizonte: Conselho de Política Ambiental de Minas Gerais – COPAM e Conselho Estadual de Recursos Hídricos – CERH, 2008.
- MOLLE, P.; LIÉNARD, A.; Grasmick, A.; IWEMA, A. Effect of reeds and feeding operations on hydraulic behavior of vertical flow constructed wetlands under hydraulic overloads. *Water Research*, v.40, n.3, p.606-612, 2006.
- MÜNCH, Ch.; KUSCHK, P.; RÖSKE, I. Root stimulated nitrogen removal: only a local effect or important for water treatment? *Water Science and Technology*. v. 51, n. 9, p. 185 - 192, 2005.
- NASCIMENTO, T. E. P. F. *Lodo em lagoas de polimento: acúmulo e implicações no comportamento hidrodinâmico e no desempenho do sistema*. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG.133p. 2014.

NIKOLAUSZ, M.; KAPPELMEYER, U.; SZEKELY, A.; RUSZNYAK, A.; MARIALIGETI, K.; KASTNER, M. Diurnal redox fluctuation and microbial activity in the rhizosphere of wetland plants. *European Journal of Soil Biology*, v. 44, 2008.

NIVALA, J.; HEADLEY, T.; WALLACE, S.; BERNHARD, K.; BRIX, H.; AFFERDEN, M.; MULLER, R. A. Comparative analysis of constructed wetlands: The design and construction of the ecotechnology research facility in Langenreichenbach, Germany. *Ecological Engineering – 2472*, p. 17, 2013.

NIVALA, J.; WALLACE, S.; HEADLEY, T.; KASSA, K.; BRIX, H.; VAN AFFERDEN, M.; MÜLLER, R. Oxygen transfer and consumption in subsurface flow treatment wetlands. *Ecological Engineering*. V.61, p. 544-554, 2012.

OJEDA, E.; CALDENTEY, J.; SAALTINK, M. W.; GARCÍA, J. Evaluation of relative importance of different microbial reactions on organic matter removal in horizontal subsurface-flow constructed wetlands using a 2D simulation model. *Ecological Engineering*, v. 34, p. 67-75, 2008.

OTTOVÁ, V.; BALCAROVÁ, J.; VYMAZAL, J. Microbial characteristics of constructed wetlands. *Water Science and Technology*, v.35, N. 5, p.117-123, 1997.

PEZESHKI, S. R. Wetland plant responses to soil flooding. *Environmental and Experimental Botany*, Paris, v. 46, n. 3, p. 299–312, 2001.

PHILIPPI, L. S.; SEZERINO, P. *Aplicação de sistemas tipo wetlands no tratamento de águas residuárias: utilização de filtros plantados com macrófitas*. Ed. do autor, Florianópolis, 144 p. 2004.

PINHEIRO, M. M. G.; BAPTISTA, M. B. Análise regional de frequência e distribuição temporal das tempestades na Região Metropolitana de Belo Horizonte – RMBH. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.3, n.4, p.73-88, 1998.

PLANSAB. Plano Nacional de Saneamento Básico. *Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental*. Brasília. 173 p. 2013.

PLATZER, C. MAUCH, K. Soil clogging in vertical flow reed beds - mechanisms, parameters, consequences and solutions? *Water Science and Technology*, v. 35, n. 5, p. 175-181, 1997.

REDDY, K. R.; DE BUSK, T. A. State of-the-art utilization of aquatic plants in water pollution control. *Water Science and Technology*, v.19, n. 10, p. 61-79, 1987.

RIBEIRO J. P. L., *Modelação do Comportamento Hidráulico de Leitos de Macrófitas*. Dissertação (Mestrado). Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2007.

SADAVA, David; HELLER, Craig; ORIAN, Gordon H.; PUERVES, Willian K.; HILLIS, David M. *Vida: A ciência da biologia*. 8 ed., v. 3: Plantas e animais, Porto Alegre: Artmed, 1252 p., 2009.

- SAMSÓ, R.; GARCÍA, J. Bacteria distribution and dynamics in constructed wetlands based on modelling results. *Science of the Total Environment* 461-462 (2013) 430-440.
- SEO, D. C.; DELAUNE, R. D. Fungal and bacterial mediated denitrification in wetlands: Influence of sediment redox condition. *Water Research*, v. 44, p. 9, 2010.
- SNIS. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto – 2013. *Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental*. Brasília: SNSA/MCIDADES, 2014. 181 p.
- STOTTMEISTER, U.; WIEßNER, A.; KUSCHK, P.; KAPPELMEYER, U.; KÄSTNER, M.; BEDERSKI, O.; MÜLLER, R.A.; MOORMANN, H. Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment. *Biotechnology Advances*, v.22, n.1-2, p. 93-117, 2003.
- TANAKA, N.; YUTANI, K.; AYE, T.; JINADASA, K.B.S.N. Effect of broken dead culms of *Phragmites australis* on radial oxygen loss in relation to radiation and temperature. *Hydrobiologia*, 583, 165–172. 2007.
- TANNER, C.C. Plants as ecosystem engineers in subsurface-flow treatment wetlands. *Water Science and Technology*, 44 9–17. 2001.
- TAO, W., WANG, J. Effects of vegetation, limestone and aeration on nitrification, anammox and denitrification in wetland treatment systems. *Ecological Engineering*, 35, 836-842. 2009.
- USEPA, *Constructed wetlands treatment of municipal wastewaters*. United States Environmental Protection Agency. 154 p., 2000.
- VON SPERLING, M.; CHERNICHARO, C.A.L. Biological wastewater treatment in warm climate regions. Two volumes. *IWA Publishing*, London. 1496 p. 2005.
- VON SPERLING, Marcos. *Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias: Princípios básicos do tratamento de esgotos*. 2ª ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais, 1996. 211 p.
- VON SPERLING, Marcos. *Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias: Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. 3ª ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais, 2005. 452 p.
- VYMAZAL, Jan. Constructed wetlands for wastewater treatment. *Ecological Engineering*, 25, 475–477. 2005.
- VYMAZAL, Jan. Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. *Water*, 2010, 2, 530-549.
- WANG, Ling; LI, Tian. Vegetation effects on anammox spatial distribution and nitrogen removal in constructed wetlands treated with domestic sewage. *Water Science and Technology*. p. 1370-1375. 2014
- WHO/UNICEF. Progress on drinking water and sanitation. *World Health Organization*. Switzerland, 2014. 80 p.

WIEßNER A, KUSCHK P, STOTTMEISTER U. Oxygen release by roots of *Typha latifolia* and *Juncus effuses* in laboratory hydroponic systems. *Acta Biotechnol*,22:209– 16. 2002.

WIEßNER, A.; KAPPELMEYER, U.; KUSCH, P.; KASTNER, M.; Influence of the redox condition dynamics on the removal efficiency of a laboratory-scale constructed wetland. *Water Research*. v. 39, p. 248-256, 2005.

YSI. *Measuring ORP on YSI 6-Series Sondes: Tips, Cautions and Limitations*. Tech note, YSI Environmental, 5 p., 2001.