

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE QUÍMICA
Programa de Pós-Graduação em Química

Destilação Solar: aplicação no tratamento de efluentes líquidos de laboratórios

Claudio Gastão da Costa

Orientador: Prof. Dr. Antônio José Moraes Guaritá dos Santos

Brasília, Agosto de 2008



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE QUÍMICA
Programa de Pós-Graduação em Química

Destilação Solar: aplicação no tratamento de efluentes líquidos de laboratórios

Claudio Gastão da Costa

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Química da UnB, como requisito para obtenção do título de mestre em Química Analítica.

Orientador: Prof. Dr. Antônio José Moraes Guaritá dos Santos

Brasília, Agosto de 2008

Dedico

À minha filha, Estela Aurora

À minha esposa, Maíra Brito

À minha mãe (*in memoriam*), Lúcia Medeiros

Ao meu pai (*in memoriam*), João Bertoldino

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Dr. Antônio José Moraes Guaritá dos Santos, por ter sido um grande amigo durante essa jornada, além de ter me oferecido força, acolhimento, paciência e, principalmente, compreensão.

Ao Prof. Dr. João Manoel Dias Pimenta e a sua equipe do Laboratório de Ar-Condicionado e Refrigeração (LAAR) do Departamento de Engenharia Mecânica, da UnB, por ajudar na construção deste trabalho.

Ao prof. Dr. Joel Camargo Rubim e à Flávia Carneiro da Cunha Oliveira, do Laboratório de Materiais e Combustíveis (LMC), da UnB, por ajudar na construção deste trabalho.

Aos professores Dr.^a Denise Imbroisi, Dr. Jurandir Rodrigues e Dr. Gaston Ponce por terem me acolhido no Laboratório de Química Analítica Ambiental e pelos ensinamentos.

À minha irmã, Lúcia Helena, obrigado pelas orações.

À minha irmã Wanda – sem ela, eu não seria uma pessoa responsável.

Às minhas sobrinhas e ao meu cunhado pela presença de espírito.

À minha sogra e à minha cunhada pelo apoio constante.

Às minhas tias Maria Gorete e Célia Medeiros, pelo incentivo eterno.

Aos meus professores da UFPE, prof. Dr. Alexandre Schuler e prof.^a Dr.^a Valdinete Lins, que sempre me incentivaram e ofereceram conhecimentos. E também aos demais professores, que me ajudaram a chegar aqui.

Aos meus amigos de ETFPE e UFPE, sempre dividindo informação e fazendo ‘Ciência’.

A Eduardo Perreira, meu grande companheiro e grande amigo de fins de semana na bancada do LQAA, sempre trocando uma idéia e disposto a ajudar em tudo e a todo momento.

À Fátima Barreto, pela grande ajuda e boa vontade.

Aos colegas Jeane, Carla, Cleiton e Carlos, pela disposição constante em me ajudar nas análises e na construção deste trabalho.

A todos os outros amigos do LQAA, por estarem sempre perto e ajudando.

Ao Júnior e ao Tiago, sempre auxiliando no que fosse necessário na secretaria da Pós-graduação a todo instante.

A todos os professores do IQ, dos quais pude aproveitar ao máximo os conhecimentos compartilhados.

Aos meus amigos de Caesb pela paciência durante momentos em que precisei me ausentar.

RESUMO

Este trabalho apresenta estudo inovador sobre o uso de destilação solar convencional, para tratamento de resíduos líquidos. São tratados três tipos de resíduos líquidos diferentes provenientes de laboratórios da Universidade de Brasília e coletados pela Comissão para Gestão de Resíduos Químicos da Universidade de Brasília (CGRQ – UnB). Os três resíduos líquidos tratados são: resíduo líquido contendo álcool, resíduo líquido contendo metais e resíduo líquido contendo formol. Em seguida a realização do tratamento de destilação solar, foram realizadas determinações de parâmetros nas amostras dos resíduos líquidos antes e depois de executado o tratamento. Para o resíduo contendo álcool, o tratamento realizado mostrou uma redução na quantidade de sólidos acima de 98%, de TKN superior a 96% e de óleos e graxas acima de 90%. Para o resíduo contendo metais, as reduções das quantidades de cromo, ferro, cobre e zinco foram superior a 99%. Para o resíduo contendo formol, as reduções em termos de condutividade superaram os 97%. Assim, conclui-se que esse é um tratamento eficiente para os resíduos líquidos tratados, principalmente para o resíduo contendo metais. Também fica demonstrado ser um processo viável economicamente e tecnicamente. Quando comparado os custos financeiros com o processo de tratamento de resíduos líquidos por destilação solar e os atuais custos de tratamento e/ou descarte utilizados para os mesmos analisados neste trabalho, é verificado uma redução financeira acima de 97%, mostrando a viabilidade econômica do processo de destilação solar convencional para tratamento de resíduos líquidos.

ABSTRACT

This work shows an innovative wastewater treatment with the use of solar still (conventional still or simple still). Three different types of liquid residues were proceeded from laboratories of the University of Brasilia and collected by Commission for Management Chemical Residues (CGRQ - UnB). The three residues are: liquid residue contend alcohol, liquid residue contend metals and liquid residue contend formaldehyde. After treatment of solar distillation there are showed reduction amount: for residue contend alcohol of solids above 98%, TKN over 96%, oils and greases beyond of 90%; for the residue contend metals of chromium, iron and zinc above 99% and for residue contend formaldehyde of conductivity surpassed 97%. This treatment for liquid residues is efficient for solutions with metals. And the process is economically and technical viable. The process of treatment - solar distillation presents a financial reduction above of 97%.

ÍNDICE

ÍNDICE	i
LISTA DE ABREVIATURAS	iii
LISTA DE QUADROS	iv
LISTA DE TABELAS	v
LISTA DE FIGURAS	vi
1. INTRODUÇÃO	1
2. EFLUENTES INDUSTRIAIS	4
2.1. Processos biológicos de tratamento de efluentes	5
2.1.1. Processos aeróbios de tratamento	5
2.1.2. Processos anaeróbios de tratamento	7
2.1.3. Outros processos biológicos de tratamento de efluentes	9
2.2. Processos químicos de tratamento de efluentes	9
2.3. Processos físicos de tratamento de efluentes	10
Com separação de fases	11
Com transferência de fases	15
Com separação molecular	17
Com transição de fases	19
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
3.1. Energia térmica solar	21
3.2. Destiladores solares	23
Destiladores solares simples ou convencionais	23
3.3. Variáveis de um destilador solar	32
Superfície refletora e isolamento térmico	32
Eficiência da destilação solar	34
3.4. Uso de destilação solar para tratamento de efluentes	35
4. EXECUÇÃO DO TRABALHO	37
4.1. Concepção do trabalho	37
Breve histórico da Comissão para Gestão de Resíduos Químicos da Universidade de Brasília	37
Escolha dos resíduos líquidos a tratar	38
Características e constituições dos efluentes	39
4.2. Concepção e montagem do destilador solar usado no projeto	41
Composição	41
Funcionamento	45
Instalação do destilador solar	45
4.3. Execução dos testes com os resíduos líquidos	45
4.3.1. Teste com solução de NaCl	46
4.3.2. Teste com solução contendo Álcool	47

4.3.3. Teste com solução contendo Metais	50
4.3.4. Teste com solução contendo Formol	53
5. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	57
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES	58
6.1. Teste com solução de NaCl	58
6.2. Teste com solução contendo Álcool	59
i. Sólidos Totais	59
ii. Sólidos Sedimentáveis	61
iii. Cloretos	62
iv. Total Nitrogênio Kjeldahl - TKN	64
v. Fósforo Total	65
vi. Álcool em Água	67
vii. Demanda Química de Oxigênio	68
viii. Óleos e Graxas	70
6.3. Teste com solução contendo Metais	71
6.3.1. Para efluentes líquidos	71
i. Cromo Total, Ferro Total, Cobre Total e Zinco Total	71
ii. Condutividade e pH	72
6.3.2. Para amostras sólidas	74
6.4. Teste com solução contendo Formol	74
i. Condutividade	75
ii. Formol Livre	76
7. CUSTOS DO PROCESSO	77
8. CONCLUSÕES	80
8.1. Teste com solução contendo Álcool	80
8.2. Teste com solução contendo Metais	80
8.3. Teste com solução contendo Formol	80
8.4. Considerações Finais	81
9. PERSPECTIVAS E PROPOSIÇÕES DE ESTUDOS FUTUROS	82
REFERÊNCIAS	83
ANEXO 1 – Resolução CONAMA 357/2005	86
ANEXO 2 – Decreto Distrital nº 18.328/1997	92

LISTA DE ABREVIATURAS

bar	unidade de pressão
CGRQ – UnB	Comissão para Gestão de Resíduos Químicos da Universidade de Brasília
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
kgO ₂ /m ³	quilograma de oxigênio por metro cúbico, medida de DQO por volume
LQAA	Laboratório de Química Analítica Ambiental da Universidade de Brasília
m/d	metro por dia, taxa de fluxo de filtros, igual a m ³ .m ⁻² .d ⁻¹
mL.L ⁻¹ ou mL/L	mililitro por litro
mol/L ou mol.L ⁻¹	concentração expressa em Molaridade
N	concentração expressa em Normalidade
NHE	eletrodo normal de Hidrogênio
PET	material plástico constituído de polietileno teraftálico
PVC	material polimérico constituído de policloreto de vinilo
PVDF	material polimérico constituído de fluoreto de polivinilideno
TKN	Nitrogênio Total Kjeldahl
uv-vis	ultravioleta visível
W/m ²	Watts por metro quadrado, unidade de energia
μm	micrometro
μohm/cm ou μS	microOhm por centímetros igual a micro Simens

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Sistemas e processos oxidativos avançados	10
Quadro 2. Diferença entre processos térmicos e fotoquímicos	23
Quadro 3. Alimentação do destilador para testes com solução de NaCl 1%	47
Quadro 4. Procedimentos analíticos para solução de NaCl	47
Quadro 5. Regime de coleta de amostras para o resíduo líquido contendo Álcool ...	49
Quadro 6. Procedimentos analíticos para resíduo contendo Álcool	50
Quadro 7. Regime de coleta de amostras para o resíduo líquido contendo Metais ..	52
Quadro 8. Procedimentos analíticos para resíduo contendo Metais	53
Quadro 9. Regime de coleta de amostras para o resíduo líquido contendo Formol..	56
Quadro 10. Procedimentos analíticos para resíduo contendo Formol.....	56
Quadro 11. Procedimentos analíticos usados	57
Quadro 12. Custos para confecção de Destilador Solar tipo Convencional	77
Quadro 13. Custos de tratamentos	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Resultados de Condutividade (em $\mu\text{S}/\text{cm}$) e de Cloretos (mg/L) das amostras de Destilado (DS) e da Solução de NaCl (SS) referentes ao primeiro teste	58
Tabela 2. Resultados de Sólidos Totais (mg/L) para Resíduo Líquido Alimentado (RLA) e Resíduo Líquido Destilado (RLD) referentes ao segundo teste	60
Tabela 3. Resultados de Sólidos Sedimentáveis (mL/L) para Resíduo Líquido Alimentado (RLA) e Resíduo Líquido Destilado (RLD) referentes ao segundo teste	62
Tabela 4. Resultados de Cloretos (mg/L) para Resíduo Líquido Alimentado (RLA) e Resíduo Líquido Destilado (RLD) referentes ao segundo teste	63
Tabela 5. Resultados de Total Nitrogênio Kjeldahl - TKN (mg/L) para Resíduo Líquido Alimentado (RLA) e Resíduo Líquido Destilado (RLD) referentes ao segundo teste	64
Tabela 6. Resultados de Fósforo Total (mg/L) para Resíduo Líquido Alimentado (RLA) e Resíduo Líquido Destilado (RLD) referentes ao segundo teste	66
Tabela 7. Resultados de Álcool em Água (%) para Resíduo Líquido Alimentado (RLA) e Resíduo Líquido Destilado (RLD) referentes ao segundo teste	67
Tabela 8. Resultados de Demanda Química de Oxigênio - DQO (g/L) para Resíduo Líquido Alimentado (RLA) e Resíduo Líquido Destilado (RLD) referentes ao segundo teste	69
Tabela 9. Resultados de Óleos e Graxas (mg/L) para Resíduo Líquido Alimentado (RLA) e Resíduo Líquido Destilado (RLD) referentes ao segundo teste	70
Tabela 10. Resultados de Cromo Total, Ferro Total, Cobre Total e Zinco Total para os Resíduo Líquido Alimentado (RLA) e Resíduo Líquido Destilado (RLD) referentes ao terceiro teste	72
Tabela 11. Resultados de Condutividade e pH para os Resíduo Líquido Alimentado (RLA) e Resíduo Líquido Destilado (RLD) referentes ao terceiro teste	73
Tabela 12. Resultados de Cromo Total, Ferro Total, Cobre Total e Zinco Total para as amostras de sólidos coletadas do Destilador Solar referentes ao terceiro teste	74
Tabela 13. Resultados de Condutividade e do Teor de Formol Livre para o Resíduo Líquido Alimentado (RLA) e Resíduo Líquido Destilado (RLD) referente ao quarto teste	75

LISTA DE FIGURAS

Figura. 1. Representação esquemática da digestão anaeróbia _____	8
Figura. 2. Representação da sedimentação discreta _____	12
Figura. 3. Representação da sedimentação flocculenta _____	12
Figura. 4. Representação da sedimentação zonal _____	13
Figura. 5. Representação da sedimentação compressão _____	13
Figura 6. Destilador solar de garrafa PET _____	31
Figura 7. Destilador solar tipo chapéu de flor _____	31
Figura 8. Destilador solar tipo embalagem de concha _____	32
Figura 9. Visão frontal do equipamento – Destilador solar _____	42
Figura 10. Visão lateral do equipamento – Destilador solar _____	43
Figura 11. Visão dos recipientes de abastecimento e coleta _____	44
Figura 12. Valores de Sólidos Totais (em mg/L) para Resíduo Líquido Alimentado (RLA) e Resíduo Líquido Destilado (RLD) referentes ao segundo teste _____	61
Figura 13. Valores de Cloretos (em mg/L) para Resíduo Líquido Alimentado (RLA) e Resíduo Líquido Destilado (RLD) referentes ao segundo teste _____	63
Figura 14. Valores de TKN (em mg/L) para Resíduo Líquido Alimentado (RLA) e Resíduo Líquido Destilado (RLD) referentes ao segundo teste _____	65
Figura 15. Valores de Fósforo Total (em mg/L) para Resíduo Líquido Alimentado (RLA) e Resíduo Líquido Destilado (RLD) referentes ao segundo teste _____	66
Figura 16. Valores do percentual (%) de álcool no Resíduo Líquido Alimentado (RLA) e no Resíduo Líquido Destilado (RLD) referentes ao segundo teste _____	68
Figura 17. Valores de DQO (em g/L) para Resíduo Líquido Alimentado (RLA) e Resíduo Líquido Destilado (RLD) referentes ao segundo teste _____	69
Figura 18. Valores de Óleos e Graxas (em mg/L) para Resíduo Líquido Alimentado (RLA) e Resíduo Líquido Destilado (RLD) referentes ao segundo teste _____	71
Figura 19. Valores de Condutividade (mS/cm) para os Resíduo Líquido Alimentado (RLA) e Resíduo Líquido Destilado (RLD) referentes ao terceiro teste _____	73
Figura 20. Valores de Condutividade (mS/cm) do Resíduo Líquido Alimentado (RLA) e Resíduo Líquido Destilado (RLD) referentes ao quarto teste _____	76

1. INTRODUÇÃO

Nenhum outro solvente apresenta, reunida às temperaturas e pressões normais na superfície da Terra, as propriedades químicas, físicas e físico-químicas tão apropriadas aos processos biológicos essenciais como reconhecemos na água. Por essa razão a água é um elemento vital ao homem. Durante a última década, muitos fatores afetaram tanto o ciclo hidrológico como a qualidade da água. Também o conjunto de ações e interferência diretas e indiretas do homem sobre a qualidade da água tem gerado a poluição das águas.¹

Manahan², em 2001, justifica o aumento da escassez de água devido ao aumento populacional de mais de cem milhões de pessoas por ano em todo o mundo. Com estimativas populacionais feitas por El-Brady, 1992 em Bellia³, 1996 teremos no ano de 2025 aproximadamente 8,5 bilhões de habitantes. Isso indica um aumento no consumo de água e na apropriação dos recursos naturais vindos do meio ambiente. Com o aumento do consumo de recursos naturais houve um aumento de emissões líquidas, sólidas e gasosas. Algumas empresas apresentaram passivos ambientais bastante elevados por não terem, em algum momento, levado em consideração os custos envolvidos no descarte de resíduos de suas atividades. No Brasil, um dos casos mais conhecido é o derramamento clandestino de hexaclorobenzeno em uma lagoa nas proximidades do Parque Estadual Perequê, em São Paulo, na década de 70, realizado pela empresa Clorigyl, adquirida posteriormente pela multinacional RHODIA. Mundialmente, temos dois casos de derramamento de navios petroleiros bastante conhecidos, o Amoco Cadiz na Espanha e o Exxon Valdez no Alasca.³

Motta, 1992 em Bellia³, 1996 ressalta ser possível medir diretamente o valor dos impactos ambientais negativos, em termos de produção sacrificada ou perdas, somente quando os efeitos ambientais são localizados ou individualizados. Como nos acidentes citados no parágrafo anterior, é complexa uma estimativa financeira a respeito dos efeitos negativos causados por esses acidentes. No caso do acidente com o Exxon Valdez, estima-se que a multinacional Exxon tenha gasto mais de US\$ 2,5 bilhões para limpar o derramamento, sem contar o custo com os outros danos ambientais. Independente do custo total e real para Exxon com esse acidente, observa-se a importância de dispensar maiores cuidados quando cursos hídricos e fontes de águas estão envolvidos em operações industriais.

As atividades industriais têm sido a principal preocupação na questão de geração de resíduos líquidos. Em relação aos resíduos líquidos químicos, as indústrias são os maiores geradoras em termos de volume e periculosidade.⁴ Com o foco na geração de efluentes industriais, é possível verificar o lançamento anual de mais de cinco mil novas formulações químicas abrangendo várias áreas de atividades industriais. No meio produtivo e industrial, tem contribuído bastante para o contexto da atual poluição, uma política ambiental ineficaz baseada em instrumentos apenas de controle e comando e não em instrumentos e mecanismos de *enforcement* (fazer cumprir). Para melhorar as atuais políticas ambientais é necessário um maior rigor na fiscalização.⁵

Também é perceptível que muitas indústrias acenam para evolução do tratamento de seus resíduos líquidos, assim como para o reaproveitamento de resíduos líquidos tratados. A gestão de resíduos líquidos é muito complexa. Inicialmente foi desenvolvida a prática do *end-of-pipe* – onde as indústrias instalavam filtros e processos de tratamento na saída (final) das tubulações de produções. Porto¹ recomenda, sempre que possível, que os efluentes deveriam ser reutilizados para aproveitamento de nutrientes ou para o reúso de água, que em muitas situações pode ser escassa. Esse reúso já é executado em áreas como; agricultura, indústria e preservação ambiental. Contudo as águas de despejo contendo detritos orgânicos já poderiam ser usadas como fonte de matéria-prima. Em indústrias como a cervejeira, a de laticínios e também os matadouros, encontram-se substâncias passíveis de reaproveitamento como: gorduras, proteínas e carboidratos.

Tavares e Bendassolli⁴ relatam que a geração de resíduos não é exclusividade das indústrias, uma vez que em laboratórios de universidades e institutos de pesquisa também são gerados resíduos diversos, que podem representar 1% do total de resíduos perigosos produzidos no Brasil. A fim de propor um tratamento para os resíduos líquidos de laboratórios, empregamos a técnica de destilação solar para realização deste trabalho.

A técnica da destilação solar possui um histórico longo. É documentado o uso de destiladores solares desde o início do século XVI. Contudo, tem-se notícia de que o primeiro destilador solar de grande escala só foi construído em 1872, para fornecer água a uma comunidade no Chile. A aplicação da destilação solar geralmente se dá em áreas rurais onde o acesso à água é mais difícil.⁶ A destilação solar está

comumente relacionada ao aproveitamento da água disponível para o consumo humano.

Durante este trabalho verificamos o uso de destilação solar quase que exclusivamente para fins de dessalinização. O sistema aqui usado tem os mesmos princípios dos sistemas com finalidade de dessalinização. Contudo, este trabalho abordará uma outra finalidade para o uso dos destiladores solares: o de sistema de tratamento e recuperação de efluentes. Para minimizar o problema de tratamento dos resíduos líquidos de laboratórios na Universidade de Brasília. Assim, desenvolvemos este trabalho fazendo uso da destilação solar como processo de tratamento para efluentes químicos.

2. EFLUENTES INDUSTRIAIS

Os estudos sobre efluentes, sejam industriais, domésticos ou de outras origens, têm gerado uma infinidade de publicações e contribuído para elevar os investimentos financeiros na área. Tecnologias novas associadas às exigências cada vez maiores de cumprimento das legislações ambientais locais e mundiais têm tornado cada vez mais restritivo o descarte ou destinação inadequada de efluentes líquidos.

Nos anos 1970, publicações já traziam indicativos de como poderiam ser desastrosas as conseqüências do crescimento populacional associado a investimentos desarticulados ou insuficientes na área ambiental. Em janeiro de 1974, estimativas apontavam que somente a indústria dos Estados Unidos deveria despende US\$ 24,67 bilhões para preservação ambiental naquele ano e nos subseqüentes, de modo a adequar todas as empresas do país à altura dos padrões de controle aceitos naquela época. Em 1973, o valor investido pela indústria dos Estados Unidos foi de apenas US\$ 1,61 bilhão e em 1977 esse valor subiu para pouco mais de US\$ 2,23 bilhões. Com investimentos abaixo do necessário, percebemos que um dos maiores parques industriais nos anos 70 já carecia de recursos maiores para suprir as necessidades dos tratamentos adequados para a época.⁷

A importância da descontaminação de efluentes industriais é indiscutível, visto que o uso de novos insumos e a eficiência somente parcial da conversão de insumos em produtos inertes têm ocasionado uma geração alta de resíduos que carecem de tratamentos. No último século, os processos industriais aumentaram o consumo de água e contribuíram significativamente para um aumento desenfreado da geração de efluentes. Avaliando esse cenário, talvez um dos maiores erros com relação ao controle do descarte de efluente tenha sido a ineficaz fiscalização dos órgãos ambientais. Com uma fiscalização mais incisiva, certamente as emissões (lançamentos) com altas cargas e grandes volumes seriam reduzidas drasticamente. Para contornar essa situação crítica, alguns estudos têm usado tecnologias que podem tornar mínimos o volume e a toxicidade dos efluentes industriais.⁸

Freire e colaboradores⁸ mostram que os tratamentos de efluentes podem ser divididos em: Processos de tratamentos físicos, químicos e biológicos. Nesses três tipos de processos de tratamento podemos ter a coexistência de operações, bem

como a interposição de um processo ao outro. Assim, em uma concepção de tratamento de efluente, seja ele doméstico, industrial ou laboratorial, podemos ter vários processos unitários juntos – o que muitas vezes pode configurar um tratamento do tipo físico-químico.

2.1. Processos biológicos de tratamento de efluentes

Podem ser basicamente considerados em dois grandes grupos: Aeróbios e Anaeróbios. Os processos biológicos são largamente usados e corriqueiramente novas tecnologias surgem na área.⁸ Alguns estudos atuais sobre processos de tratamento biológicos têm dado destaque para os processos de tratamento enzimático aplicados, sobretudo, na indústria papeleira. Têm como princípio o uso de uma enzima capaz de destruir espécies tóxicas presentes nesse tipo de efluente. Os tratamentos de efluentes com enzima podem também ter aplicação em áreas como o tratamento de óleos e graxas gerados por indústrias e refinarias.⁹

No Brasil, trabalhos de grupos, como o realizado pela Escola de Química da UFRJ, têm avaliado o uso de enzimas como tratamento primário na redução de óleos e graxas (gorduras), em efluentes de laticínios e de agroindústrias. Testes com efluentes sintéticos – constituído de leite em pó acrescido de gordura proveniente de laticínio – mostraram maiores eficiências em processos de lodo ativado, quando opta-se pelo uso da hidrólise enzimática como pré-tratamento.¹⁰

2.1.1. Processos aeróbios de tratamento

Os dois principais sistemas aeróbios de tratamentos de efluentes são: os sistemas de lodo ativado e os sistemas aeróbios com biofilme. Os dois sistemas são caracterizados pela presença de bactérias aeróbicas, tendo como diferença o desenvolvimento microbiológico.

2.1.1.1. Sistemas de lodo ativado

Os sistemas de maior exposição, aperfeiçoamento, desenvolvimento e aplicação são os de lodo ativado. Esses sistemas são basicamente reatores abertos que recebem provimento de oxigênio por sistemas diferentes de aeração – aeradores mecânicos ou ar difuso – e nos quais ocorrem reações bioquímicas de remoção orgânica. As bactérias se alimentam do esgoto bruto para se

desenvolverem e, como consequência, convertem a matéria orgânica em CO₂, em um total entre 40% e 50%. Nesse tipo de sistema, a maior parte da matéria orgânica fica contida no lodo, entre 50% a 60% – o que gera um futuro problema de descarte. Contudo, a eficiência global em termos de remoção de matéria orgânica desse tipo de sistema – contabilizando o descarte do lodo – é alta, em geral ficando acima de 90%.

Os sistemas de lodo ativado podem ser basicamente divididos quanto ao fluxo contínuo ou intermitente ou quanto à idade, segundo os seguintes critérios:

Lodo ativado convencional: nos sistemas convencionais existem altas concentrações de biomassa coexistindo na recirculação de lodo decantado. Isso faz com que a massa de bactérias passe mais tempo no reator, ocasionando altas remoções de matéria orgânica – o que por sua vez leva à necessidade posterior de descarte de bactérias excedentes presentes no lodo.

Lodo ativado por aeração prolongada: diferencia-se basicamente pela maior permanência da biomassa no reator. Com isso a depuração da matéria orgânica é mais eficiente pela circunstância de existir menos alimento para mais bactérias – o que caracteriza uma relação alimento/microorganismo baixa. Outra diferença desse sistema, em decorrência do maior tempo do lodo no reator, é a estabilidade do lodo excedente retirado do sistema.

Lodo ativado de fluxo intermitente: como a própria designação já indica, esse tipo de tratamento tem uma operação intermitente, ocorrendo fases distintas em um único tanque. Primeiro é realizada a etapa de aeração e posteriormente a fase de sedimentação – que acontece no mesmo tanque com ou sem o funcionamento do sistema de aeração, seguida da retirada do efluente tratado (sobrenadante). Sistemas desse tipo apresentam menores eficiências que os sistemas contínuos, contudo podem existir como sistemas convencionais e como sistemas de aeração prolongada.

2.1.1.2. Sistemas com biofilme

Nesses sistemas as bactérias se desenvolvem em um meio suporte, com o resíduo líquido aplicado na superfície do tanque por meio de distribuidores rotativos.

Filtros de baixa carga: o resíduo líquido é aplicado na superfície do tanque, percolando por todo o meio suporte. O líquido percolado passa pelo meio suporte

onde as bactérias estão aderidas. Durante a passagem do líquido pelo meio suporte a matéria orgânica é depurada pelas bactérias aderidas ao meio suporte. Nesse sistema, os espaços livres vazios entre o material do meio suporte permitem a circulação de oxigênio.

Filtro de alta carga: Nesse tipo de filtro não ocorre decantação primária. Assim, a DBO de entrada desse sistema é bem maior quando comparada ao sistema de filtros de baixa carga (onde ocorre uma decantação primária antes da alimentação ao sistema de filtro de baixa carga). Devido à alta carga desse tipo de sistema existe a geração de lodo excedente que posteriormente necessita ser removido do sistema a fim de manter a carga biológica e hidráulica.

Biodisco: não são biofiltros, mas se assemelham a eles por apresentarem e terem o crescimento da biomassa aderida a um meio suporte. Esse meio é provido por discos que giram, expondo-se ao efluente e ao ar, respectivamente.

2.1.2. Processos anaeróbios de tratamento

Os processos anaeróbios fundamentam-se na depuração da matéria orgânica em condições de ausência de oxigênio (comumente usado como acceptor de íons inorgânicos). Nesse processo temos essencialmente duas etapas.

Na primeira delas, as bactérias facultativas e anaeróbias convertem a matéria orgânica complexa em outros compostos. Em seguida quebram também esses outros compostos e dão origem a compostos mais simples. Assim, ocorrem diversas conversões da matéria orgânica em produtos menores. Alguns autores dividem esse processo em sub-etapas, como formação de compostos orgânicos simples (como aminoácidos e peptídeos) e formação de ácidos orgânicos. Porém, a formação de orgânicos simples e de ácidos orgânicos pode ocorrer ao mesmo tempo, apenas em intensidades diferentes. (figura 1)

Na segunda etapa ocorre a conversão dos ácidos orgânicos em metano, água e gás carbônico, em presença de bactérias estritamente anaeróbias, responsáveis pela maior parte da degradação da poluição em um efluente.

Apesar de termos duas etapas bem definidas, podemos verificar que nos processos anaeróbios se apresentam três grupos de bactérias. As fermentativas transformam os polímeros em monômeros; as acetogênicas convertem os monômeros em acetatos, hidrogênio e dióxido de carbono; e as metanogênicas

usam os acetatos para conversão em metano. Dentre as bactérias usadas em todo processo, podemos apontar a existência de bactérias específicas que podem converter produtos específicos, como as metanogênicas, as acetoclasticas e as hidrogenotróficas. Um bom esquema representativo de todo o processo metabólico anaeróbio é dado por Chenicharo¹¹. (figura 1)

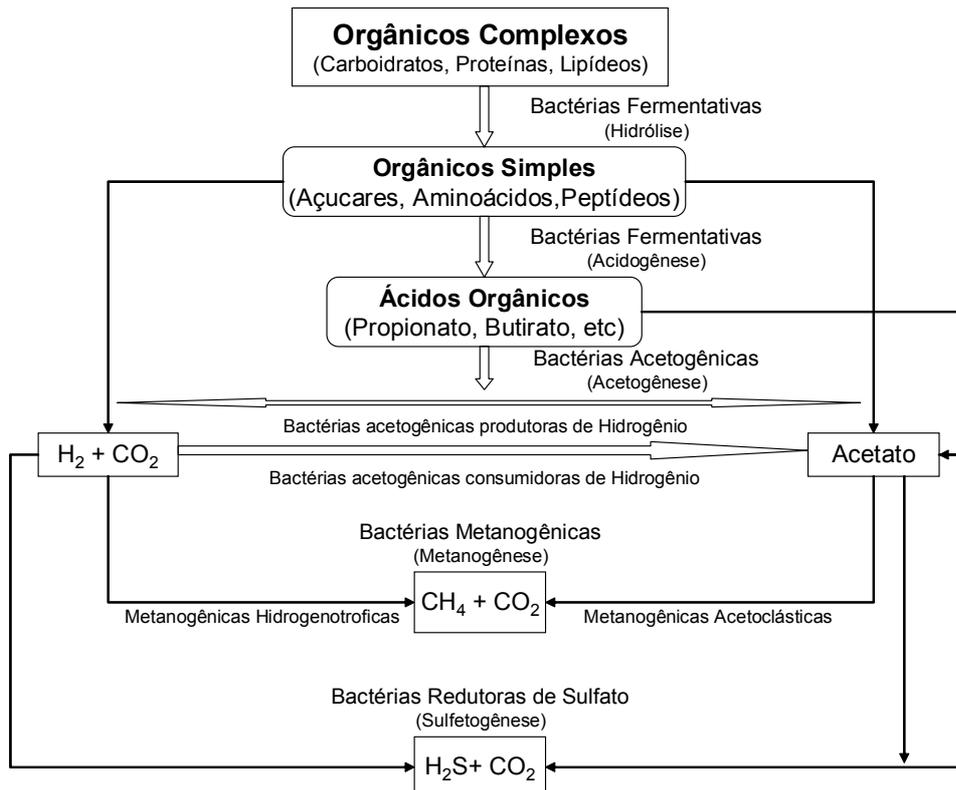


Figura. 1. Representação esquemática da digestão anaeróbia¹¹

Os processos acima apresentados acontecem, em sua maioria, em reatores de manta de lodo fechados. Tais reatores podem receber nomes diferentes, como UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor). No Brasil, o mesmo reator pode-se designar por DAFA (Digestor Anaeróbio de Fluxo Ascendente), RAFA (Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente), RALF (Reator Anaeróbio de Leito Fluidificado) e RAFAALL (Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente Através do Leito de Lodo). Esses reatores são sistemas bem consolidados e bastante estudados, com alta maturidade e com certa posição de destaque. Nesses tipos de sistemas, a geração de sólidos é considerada baixa e a conversão de matéria orgânica em biogás é da ordem de 70%.¹¹

Outro sistema anaeróbio, de menos destaque, é o sistema de filtro biológico anaeróbio. Ele se assemelha aos reatores anaeróbios, tendo como principal diferença o fato do tanque trabalhar submerso com fluxo ascendente, onde as bactérias são aderidas a um meio suporte (material melhor adequado ao tipo de efluente em questão) no interior do filtro.

2.1.3. Outros processos biológicos de tratamento de efluentes

Outros sistemas considerados de alta importância, desenvolvimento e uso para o tratamento de efluente biológico, seja industrial ou doméstico, são as lagoas de estabilização – que podem ser aeróbias, anaeróbias ou facultativas, estas últimas com funções aeróbias e anaeróbias, envolvendo diferentes processos bioquímicos e microbiológicos. As lagoas facultativas são sistemas nos quais a matéria orgânica é estabilizada por bactérias aeróbias presentes no efluente. O oxigênio fornecido às bactérias aeróbias é liberado pela respiração das algas no processo de fotossíntese. A parte sólida é sedimentada e degradada por bactérias anaeróbias. Por isso esse tipo de sistema é considerado aeróbio e anaeróbio. Nas lagoas aeradas, o mecanismo é parecido com as facultativas. Contudo, o oxigênio é fornecido por aeradores (agitadores) e não pela fotossíntese. Os sistemas de lagoas têm possibilidades de variáveis e composições diferentes, como por exemplo: lagoas aeradas facultativas, lagoas anaeróbias seguidas de lagoas facultativas, lagoas aeradas seguidas de lagoas de decantação e lagoas de altas-taxas.

Os sistemas de lagoas são operacionalmente menos complexos e também mais estáveis. Contudo, apresentam desempenho baixo de tratabilidade quando comparados a outros sistemas e por isso vêm sendo gradativamente substituídos por sistemas de lodo ativado ou pelos reatores anaeróbios.

2.2. Processos químicos de tratamento de efluentes

Os processos considerados estritamente químicos dividem-se entre os que envolvem redução química e os que envolvem oxidação química.

Podemos mencionar as publicações dos Processos Oxidativos Avançados (POAs), que se destacam pela possibilidade de conduzir a uma completa mineralização de poluentes. Nos POAs são produzidas espécies intermediárias de alto poder oxidante reativo, como o radical OH^\bullet , que possui capacidade de oxidar

muitos compostos poluentes e obter redução de contaminação em termos de Demanda Química de Oxigênio (DQO) na casa dos 90%.¹² Algumas aplicações dos POAs são relacionadas a poluentes não-biodegradáveis como corantes, herbicidas e pesticidas. Dentre eles, o processo de geração do radical hidroxila ($E^\circ = 2,8 \text{ V vs NHE}$) mostra-se como um dos mais atraentes, já que a hidroxila possui a capacidade de gerar um potencial mais elevado que o ozônio ($E^\circ = 2,07 \text{ V vs NHE}$), o peróxido de hidrogênio ($E^\circ = 1,78 \text{ V vs NHE}$), o dióxido de cloro ($E^\circ = 1,57 \text{ V vs NHE}$) e o cloro ($E^\circ = 1,36 \text{ V vs NHE}$).¹³

Os POAs podem ser classificados ou divididos conforme Quadro 1.

Quadro 1. Sistemas e processos oxidativos avançados

SISTEMAS HOMOGÊNEOS	<u>Com Irradiação</u> O ₃ /UV H ₂ O ₂ /UV Feixe de Elétrons Ultra-som (US) H ₂ O ₂ /US UV/US
	<u>Sem Irradiação</u> O ₃ /H ₂ O ₂ O ₃ /OH ⁻ H ₂ O ₂ /Fe ²⁺ (Fenton)
SISTEMAS HETEROGÊNEOS	<u>Com Irradiação</u> TiO ₂ /O ₂ /UV TiO ₂ /H ₂ O ₂ /UV
	<u>Sem Irradiação</u> Eletro-Fenton

Fonte – Huang e colaboradores, 1993¹⁴

2.3. Processos físicos de tratamento de efluentes

Vários estudos^{15,16,17} evidenciam a baixa eficiência dos processos físicos para tratamentos de efluentes. O principal motivo para queixas é a não-degradação ou depuração das espécies tóxicas. Contudo, tais processos têm se mostrado muito

úteis, não apenas em fases preliminares (pré-tratamento) ou fases de polimento (pós-tratamento). Já existem tratamentos físicos, como os de filtração e separação molecular, de extrema importância para uso em áreas específicas. Para analisar as possibilidades dos processos físicos para tratamento de efluentes, vamos dividi-los em quatro grandes grupos, a seguir.

Com separação de fases

Sedimentação – processo físico no qual os sólidos insolúveis presentes em efluentes são removidos pela separação das fases sólidas e líquidas. A fase sólida tem maior densidade e acaba precipitando-se. A separação dos sólidos em suspensão por sedimentação (ou decantação) é adequada quando as partículas presentes no meio possuem diâmetros médios inferiores a 5mm. O processo de sedimentação pode ser considerado uma fase preliminar do tratamento de efluentes. Em alguns escopos de tratamento, a sedimentação é considerada uma etapa inicial, sendo sempre realizada em decantadores ou adensadores. A sedimentação costuma ser designada de *clarificação*, principalmente quando o interesse principal é obter um líquido sobrenadante. Esse processo também pode ser denominado *espessamento*, quando se deseja concentrar as partículas em suspensão. O processo de sedimentação é usado para remover carga orgânica insolúvel (particulada) de difícil tratabilidade, bem como para a retirada de carga inorgânica. Considerando que a maior parte da poluição de um determinado efluente é dada por DBO particulada e material não-biodegradável de espécie inorgânica, o processo de sedimentação mostra-se de suma importância. Sendo um processo tão importante, a sedimentação pode ser estudada em quatro tipos distintos.¹⁸

Sedimentação discreta – Neste tipo de sedimentação não ocorre perda da integridade do floco e os mesmos conservam suas propriedades físicas, tais como forma, tamanho e densidade. (figura 2)

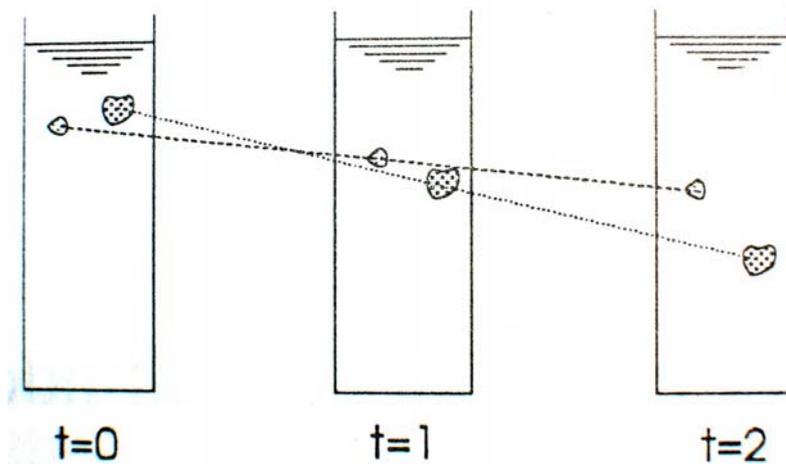


Figura. 2. Representação da sedimentação discreta¹⁸

Sedimentação floculenta – Ao se sedimentarem, as partículas se aglomeram e assim têm-se alteradas as características de tamanho do floco e da sua velocidade de sedimentação. (figura 3)

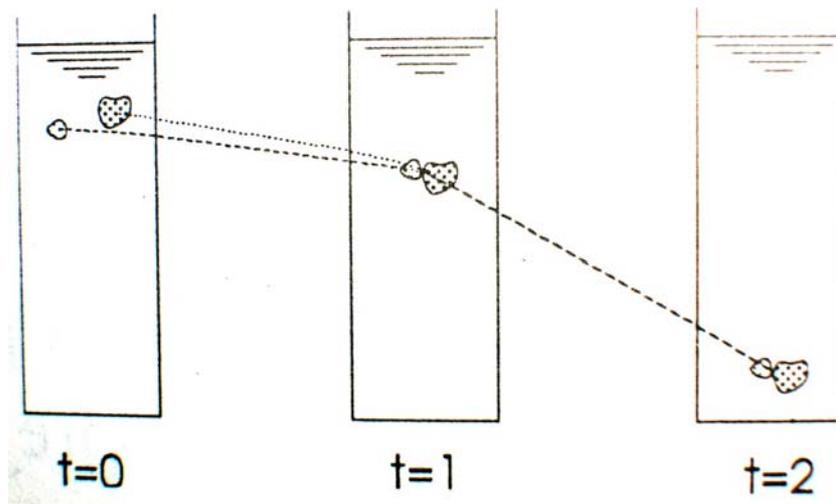


Figura. 3. Representação da sedimentação floculenta¹⁸

Sedimentação zonal – Devido às altas concentrações das partículas sólidas, é formada uma massa de partículas. As partículas tendem a se aglomerar e permanecer de forma fixa e sem mobilidade entre elas no floco, de modo a se observar um fenômeno de separação nítida das partes sólida e líquida. (figura 4)

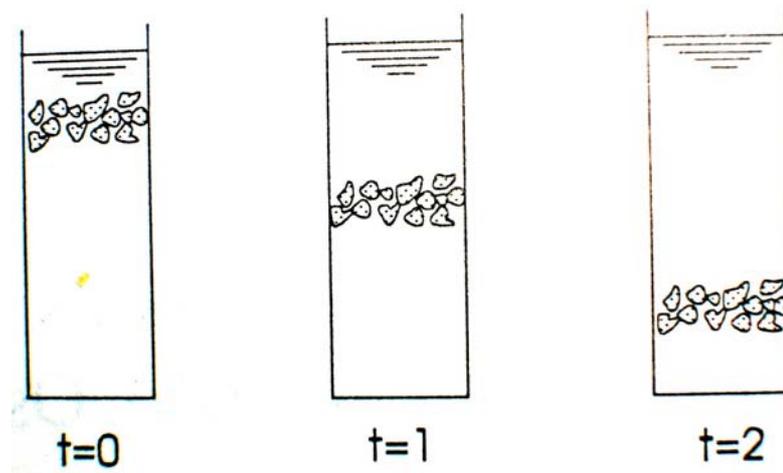


Figura. 4. Representação da sedimentação zonal¹⁸

Sedimentação de compressão – Quando a concentração de sólidos é ainda mais alta que na sedimentação zonal, temos a compressão do floco da sedimentação zonal, dando origem à sedimentação de compressão. Nesses casos, ocorre certa compressão e o floco fica mais compactado, resultando em uma sedimentação mais rápida e uma remoção de água também mais ágil, devido à eliminação de água para maior compactação. (figura 5)

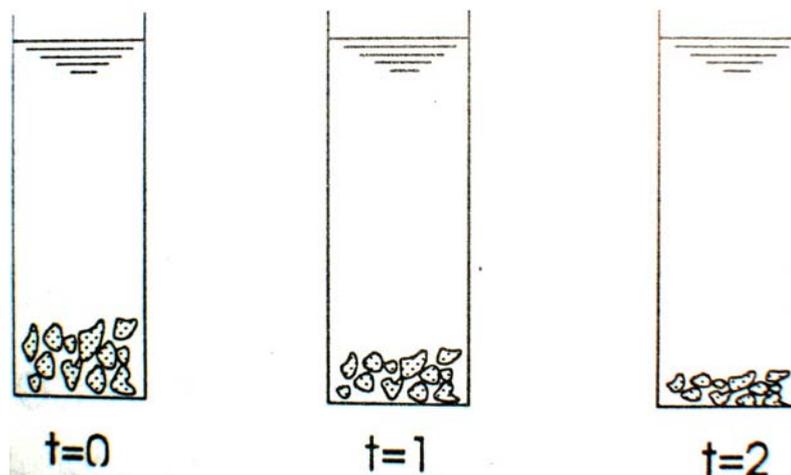


Figura. 5. Representação da sedimentação compressão¹⁸

Santos e colaboradores¹⁵ avaliam o processo de sedimentação em reatores biológicos de lodo ativado, enfocando a sedimentação zonal, e propõem modelos matemáticos para indicar o tempo ideal de sedimentação para um bom resultado operacional.

Moitinho e colaboradores¹⁶ fazem relato de estudo envolvendo processo de sedimentação em tubos para remoção de carga biológica em efluentes domésticos, mais precisamente remoção de contaminação fecal em efluentes por sedimentação em tubos.

Filtração – Processo da passagem de uma mistura sólido-líquido através de um meio poroso (filtro) que retém os sólidos em suspensão conforme a capacidade do filtro e permite a passagem da fase líquida. Os filtros podem ser classificados conforme a taxa de filtração, podendo ser de rápida ou lenta filtração. Os rápidos têm taxas de filtração entre 150 e 600 m/d. Por sua vez, os de filtração lenta têm taxas abaixo de 6m/d. Conforme a superfície de filtração, podemos classificar os filtros como sendo de profundidade ou de superfície. Os filtros de profundidade promovem a retenção de sólidos em toda a camada filtrante. Já os filtros de superfície apresentam camada filtrante uniforme, rígida e delgada, sendo o seu funcionamento semelhante ao de uma peneira. O processo de tratamento por filtração pode ser realizado no início ou ao fim do processo.¹⁷

Os tipos de filtros mais usados no processo de tratamento de efluentes são: *filtro de areia*, geralmente empregado em contextos de tratamentos biológicos e usado nas fases iniciais para reter parte da matéria orgânica insolúvel; *filtro-prensa*, muito usado em processos biológicos e bastante empregado para desidratação de lodos com a finalidade de concentração da matéria sólida. Os filtros-prensas operam em diversas pressões e são constituídos de telas filtrantes feitas de tecido (reaproveitáveis) ou de papel (descartáveis). A seleção dos tecidos ou do papel é realizada a partir de testes em filtros piloto. No caso de lodos com características conhecidas, utilizam-se como referências as informações repassadas pelos catálogos dos fabricantes. Outros materiais filtrantes podem ser usados, como o bagaço da cana de açúcar e a serragem de madeira, conforme relataram Magalhães e colaboradores¹⁹ no tratamento de efluentes de suinocultura. Nesses testes específicos, os materiais utilizados obtiveram eficiência em termos de sólidos suspensos superiores a 90%.

Centrifugação – Processo mecânico que acelera a sedimentação por meio do aumento artificial da força gravitacional. Pode ser considerada uma sedimentação acelerada. A centrifugação é normalmente utilizada para separar sólidos suspensos

em um líquido, mas pode ser usada também para separar dois líquidos imiscíveis. Todavia, no processo de centrifugação de tratamento de efluentes se faz necessária a adição de um coagulante ou aglutinante, chamado no meio industrial de *polímero* ou *polieletrólito*. Esse coagulante é usado para desestabilização dos colóides e para formação de grumos que facilitam a centrifugação. No processo de tratamento industrial os teores de sólidos no lodo seco variam na faixa de 15%.¹⁸

Flotação – Consiste em separar sólidos ou dispersões líquidas da fase líquida, usando um fluido com densidade intermediária entre eles. O sólido menos denso flutua, enquanto o sólido mais denso precipita. A flotação pode ser classificada em *flotação ar-dispersão*, *flotação ar-dissolução*, *flotação ar-vácuo*, *eletroflotação* e *flotação biológica*. Vários tipos de flotação podem ser usados para o tratamento de efluentes. O processo de flotação costuma ser muito usado no tratamento de efluentes contendo metais.²⁰

Em 2006, De Julio e colaboradores²¹ expuseram o uso de flotação por ar dissolvido, juntamente com reagente Fenton, para tratamento de efluentes contendo substâncias húmicas. Avaliando parâmetros como turbidez, o trabalho apresenta eficiência de remoção superior a 60%. Seguido de um pós-tratamento (filtração em meio poroso, como areia), essa eficiência supera os 90%.

Com transferência de fases

Adsorção – É usada como uma das técnicas alternativas para tratamento de efluentes, sobretudo para aqueles que contêm metais tóxicos²² e corantes.²³ Fundamentalmente, a adsorção é um processo de transferência de massa, em que uma determinada substância é transferida da fase líquida para uma superfície sólida onde ficará aderida. Isso acontece quando as duas fases são colocadas em contato, fazendo com que a concentração dessa determinada substância seja maior na interface que no interior das fases (líquida e sólida).²⁰ A adsorção é considerada ainda um processo de tratamento terciário, com finalidade de remover exclusivamente contaminantes de difícil degradação e que persistem mesmo depois de tratamento convencional.²⁰ Vários materiais já foram testados como adsorventes, sendo que o carvão ativo e as terras de infusórios (diatomáceas) são amplamente usados em tratamento de efluentes. O carvão ativado é preparado com o uso de

madeira em um meio oxidante e a altas temperaturas, formando uma estrutura porosa com elevada área superficial. Este tem sido um adsorvente muito utilizado após o tratamento biológico ou em tanques biológicos de lamas ativadas, quando o efluente contém produtos orgânicos não biodegradáveis. O processo de adsorção macro é realizado em colunas preenchidas com o material adsorvente e pode ter fluxos ascendente e descendente. O carvão é lavado em contracorrente e reativado pela queima da matéria orgânica aderida em sua superfície.

Babel e colaboradores²⁴ apontam uma gama de adsorventes diferentes, entre eles zeolitas, óxidos, betonitas, bioadsorventes e outros materiais, testando a capacidade de adsorção de cada um deles em relação a espécies metálicas.²¹

Otero e colaboradores²⁵ relatam o uso de adsorventes para remoção de poluentes orgânicos em lodos de estação de tratamento, mostrando o porcentual de adsorção ocorrido durante os testes e realizando comparações entre adsorventes simples e a mistura de adsorventes.

Rocha e colaboradores²⁶ avaliam o uso de carvão ativado produzido a partir de endocarpo de noz de macadâmia e sementes de goiaba – resíduos que têm alta geração pela indústria agropecuária. O carvão produzido do endocarpo de coco tem sido utilizado para remoção de cobre em efluentes, mostrando resultados satisfatórios quando comparados aos estudos com o carvão proveniente do coco.

Rodrigues e colaboradores²⁷ fazem avaliação da capacidade de uma espécie de madeira, Paraju (*Manilkara longifolia*), tratada quimicamente com ácido cítrico para auxiliar no processo de retenção. É avaliada a adsorção de dois metais, cobre e cádmio, ajustando os estudos conforme modelo de Langmuir. Os melhores rendimentos foram observados quando se dá a adsorção separada dos metais, ocorrendo competição entre os dois metais.

Em estudo realizado em 2004, Bosco e colaboradores²⁸ mostram o uso de uma zeólita natural, a escolecita, a partir da qual estudam o poder de adsorção frente a quatro metais Mn(II), Cd(II), Ni(II) e Cr(III). A escolecita apresentou alta seletividade com cátions Cr(III) e Ni(II), contudo baixo poder de adsorção com Cd(II).

Extração por solvente – Técnica fundamentada na partição seletiva de um soluto em duas fases líquidas. O solvente imiscível geralmente é orgânico e retira os componentes orgânicos presentes na solução. Se o objetivo for extrair da solução contaminantes em concentrações-traço, os solventes devem ser puros para evitar a

contaminação. Esse método tem sido usado para remover orgânicos persistentes de efluentes. Todavia, ainda é um método intermediário, visto que os orgânicos persistentes tendem a ser retidos em solventes e que esses solventes precisam ser descontaminados ou descartados de forma segura.

Com separação molecular

As separações moleculares são basicamente consideradas como *filtrações por membrana*. Esse tipo especial de filtração tem sido muito utilizado nos tratamentos de efluentes inorgânicos e de efluentes que contêm espécies orgânicas persistentes. Basicamente, as separações moleculares têm sua diferenciação no modo como a partícula, molécula, íon ou espécie é retida no sistema poroso (filtro). Pode ser designada nas formas a seguir.²⁰

Ultrafiltração – Nesse tipo de separação molecular é usada uma membrana permeável para separar macromoléculas e sólidos com porosidade de 5 a 20nm, ou seja, moléculas entre 1.000 e 100.000 Daltons. O princípio desse tipo de filtração é idêntico ao de uma filtração simples. Todavia, essas filtrações ocorrem em pressões acima das encontradas em uma filtração convencional, já que devem superar a dificuldade da solução em permear a superfície porosa (o filtro).

Brião e colaboradores²⁹ avaliam o uso da ultrafiltração para a remoção de nutrientes em efluentes de indústrias de laticínio. Para tanto, utilizam membranas tubulares e espiraladas que apresentam diferentes tamanhos de poros e são constituídas de PVDF ou de polietersulfona. Os resultados indicaram eficiência de remoção de DQO (próximo a 75%), de proteínas (acima de 90%) e de gorduras (acima de 90%).

Nanofiltração – É um processo intermediário entre a ultrafiltração e a osmose reversa. O mecanismo de separação envolve efeitos estéricos e efeitos elétricos. Nesse tipo de separação, um potencial elétrico é criado entre os íons carregados na membrana de nanofiltração e os co-íons do efluente. Um material usual desse tipo de membrana é o álcool polivinílico. Esse tipo de membrana requer menor pressão que as membranas de osmose reversa e em geral pode remover metais em concentrações de 2000mg/L.

Osmose reversa – Nesse processo, as membranas podem chegar a porosidades inferiores a 10^{-4} μm . A pressão osmótica (cerca de 5 bar) e a porosidade são suficientes para promover a separação de cátions. As membranas mais usuais para a separação de metais são as fabricadas com poliamidas. Esse tipo de tratamento tem eficiência superior a 97% para espécies iônicas. Quando comparadas às membranas de ultrafiltração, nanofiltração e osmose reversa, as membranas de osmose reversa possuem mais efetividade com relação ao tratamento de metais. Contudo sempre devem ser avaliadas as condições de uso de cada tipo de membrana, assim como a finalidade, porosidade, material, cinética e custos.

Junior e colaboradores³⁰ mostram o uso de osmose para o reaproveitamento de efluente de indústria automotiva, fazendo um comparativo entre cinco diferentes tecnologias, de forma a propiciar o reúso do efluente. Apenas a osmose reversa e a adsorção com carvão ativo tiveram resultados satisfatórios para todos os efluentes testados. Contudo, o processo de osmose reversa apresentou o custo mais elevado dentre todos.

Diálise – Uma membrana semipermeável, geralmente feita de acetato de celulose ou outro material semelhante, com poros de diâmetros entre 1nm e 5nm, é inserida entre duas soluções que contenham concentrações diferentes de espécies iônicas e/ou moleculares em água. Depois de um determinado tempo, as espécies de tamanho menor que os poros da membrana atravessam-na para equilibrar as concentrações, no chamado “princípio da difusão”. No caso da solução de diluição (diluato) ser reposta sucessivamente, a concentração das espécies menores (íons) na solução (concentrato) será tão pequena, a ponto de somente as espécies maiores (moléculas) ficarem na solução. Esse processo é bastante usado em tratamento de efluentes para remoção de espécies iônicas ou moleculares de difícil degradação.

Uma outra técnica pouco usada em tratamento de efluentes é a eletrodialise. Esse é o processo no qual os íons são transportados de uma solução para a outra por meio de uma eletromembrana permeável, sob influência de uma diferença de potencial elétrico. As cargas iônicas fazem com que os íons possam atravessar a membrana. Nesse tipo de membrana, torna-se possível fazer a separação de íons de determinada carga. Assim, pode ser feita uma separação bem específica de

cargas. Esse é um tratamento comumente usado para efluentes bem específicos, com finalidade de reúso de água.

Com transição de fases

Evaporação – Processo de separação de uma fase líquida, em geral não recuperada, frente a uma fase sólida. Nesse processo o efluente pode ser exposto ao ar, fazendo com que a fase líquida evapore, restando apenas a fase sólida. Esse método é bastante usado para tratamento de efluentes domésticos de comunidades carentes que não tem acesso ao saneamento.

Leitão e colaboradores³¹ mostram, em estudo recente realizado no Nordeste brasileiro, precisamente no estado da Paraíba, métodos de como efetuar uma avaliação matemática do processo de evaporação a partir de diferentes técnicas de cálculo. Em outro estudo, o mesmo grupo desenvolveu um software para operacionalizar, por meio de oito métodos de cálculo, o processo de evaporação nessa região.

Cristalização – É o processo de separação de substâncias solúveis, fundamentado nas diferenças das solubilidades de cada uma. Consiste na evaporação de uma solução sob condições controladas de pressão, temperatura e concentração, obtendo dessa forma a cristalização do(s) soluto(s). Via de regra, o cristal formado nesse processo resiste a pequenas variações de temperatura e pressão. Logo, sendo as condições mantidas, a separação é possível. Esse é um tipo de separação pouco usado em tratamento de efluentes, visto altas especificidades de utilização desse método.³²

Destilação – Em latim, destilação significa *gotejar*, descrevendo assim o estágio final do processo. Na indústria, a destilação em geral é usada como um processo de separação de produtos ou subprodutos, sendo raramente usada com a finalidade de separar compostos tóxicos de efluentes. Segundo Ferreira & Neto³³, os primeiros procedimentos de destilação datam de 1926. Apesar disso, processos empíricos de destilação ocorreram anteriormente a essa data.³³

No processo de destilação de um líquido, de um fluído ou de um semi-sólido, o produto é aquecido para que se produzam vapores, que serão posteriormente condensados para formar produtos intermediários ou produtos finais de destilação. Dentre os vários tipos de destilação estão:

Destilação flash: nesse tipo de destilação, a pressão na superfície, juntamente com a temperatura adequada do líquido, permite que a lâmina superficial de líquido evapore rapidamente e seja condensada logo em seguida. Em geral, o líquido é aquecido em uma câmara e posteriormente é deslocado a outra câmara, chamada de *flash*, onde a pressão interna é suficiente para vaporizar o líquido. A solução vaporizada segue para uma terceira câmara, onde é novamente vaporizada. Em um destilador flash podemos ter de quatro a mais de 50 estágios. O número de câmaras (estágios) depende da pureza que se deseja para os produtos finais. Em geral, durante as etapas de evaporação, o líquido vaporizado é condensado por superfícies trocadoras de calor.³¹

Destilação por efeito múltiplo: assim como a destilação flash, esse tipo de destilação ocorre em várias etapas – em pratos teóricos ou câmaras. Contudo, esse tipo de destilação faz uso de um gradiente de pressão negativo nas várias etapas do processo, permitindo que o líquido sofra múltiplas ebulições, sem que seja necessário o fornecimento de quantidade de calor adicional a cada etapa. Em uma evaporação assim, o líquido é aquecido de forma flamatubular, ou seja, uma quantidade de calor é fornecida por tubos aquecidos e no momento que o líquido entra em contato com os tubos aquecidos ocorre uma evaporação da fina lâmina superficial. O restante do líquido não evaporado segue para a câmara seguinte e assim sucessivamente. Em destiladores solares que usam destilação por efeitos múltiplos são encontradas plantas de 6 a 16 câmaras, com tubos horizontais ou com tubos verticais. Nesse processo, o condensado de vapor para o aquecimento é recirculado e aproveitado na caldeira.³⁴

O processo de destilação associado à energia solar tem como principal uso a dessalinização para produção de água consumível.³⁵ Sistemas de destilação solar estão mais detalhadamente descritos no capítulo seguinte.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Energia térmica solar

Em sua grande maioria, a energia que usamos tem origem direta ou indireta da energia solar – exceto a energia nuclear. Mesmo quando pensamos nas maiores fontes de origem energética, tais como os combustíveis fósseis, vale lembrar que as mesmas tiveram suas formações geomorfológicas baseadas na captura de fontes diretas de energia do sol. Assim, pode-se afirmar que a energia solar contribuiu de forma indireta para formação do petróleo. Vale ressaltar que o uso de energia solar como fonte indireta de geração de energia (como no caso dos biocombustíveis) é quase imperceptível por todos nós. O que podemos vislumbrar é sempre o uso direto de energia solar.

Em virtude da crescente demanda de fontes energéticas para atender à demanda mundial, o desafio de consolidar novas fontes tem visado apenas à exploração em grandes escalas, sempre a partir da preocupação de sanar a chamada crise energética. O uso das energias ditas alternativas encontra justificativa diante da dependência mundial quase exclusivamente do petróleo. No caso do Brasil, dependemos das energias hidrelétrica e termelétrica, em que, o uso de energia hidroelétrica representa 73,86% e o de energia termelétrica representa 21,66% do total consumido no país. O uso de energia solar fotovoltaica no país corresponde a apenas 0,000048% (devido a sua potência ser de apenas 20 kW).³⁶

A energia do sol pode ser usada a partir de células fotovoltaicas (para captar a luz do sol e transformá-la em energia elétrica) e também para o aquecimento de água (por captação do calor solar). No Brasil, um país tropical e com altos potenciais energéticos solares, o uso de células fotovoltaicas ainda é insuficiente, resumindo-se ao que se pode encontrar em pouquíssimas comunidades isoladas ou em alguns condomínios e edifícios, como o prédio do Greenpeace e o prédio do Instituto de Eletrotécnica e Energia da USP, ambos em São Paulo. Julga-se que o custo ainda elevado de instalação seja o maior impedimento para o uso das células fotovoltaicas em maior escala – além da forma intermitente de obtenção de energia. Mesmo assim, o aquecimento de água tem sido uma área promissora para uso de energia solar no Brasil, substituindo o uso de gás, principalmente na região Sul e Sudeste, e o uso de energia elétrica no Norte, Nordeste e Centro-Oeste. Cabe ressaltar que o uso de aquecedores solares no Brasil ainda é uma iniciativa de voluntários – exceto

em Betim (MG), onde a companhia elétrica local incentivou a instalação dos equipamentos em residências, e na cidade de São Paulo, que formalizará apoio à instalação desses aquecedores nas casas, a partir da aprovação do Projeto de Lei 14.450, de 3 de julho de 2007, ainda não sancionado.³⁷

Segundo Zweibel e colaboradores³⁷, o uso de energia solar deve ser consolidado em breve. Os autores apresentaram recentemente projeto do governo dos Estados Unidos mostrando a possibilidade de no ano de 2050 69% de toda energia elétrica residencial e de 35% da energia total consumida naquele país derivar da energia solar. O plano envolve a conversão de energia solar através de células e de painéis fotovoltaicos, fornecendo aproximadamente 3 mil gigawatts por ano. Isso faria com que o consumo de petróleo caísse dos atuais 6,9 bilhões de barris anuais para 2,7 bilhões (redução superior aos 60%). Prevê ainda a redução na extração de gás natural de 0,8 para 0,4 trilhões de m³, além da queda nas emissões de dióxido de carbono, que passaria de 6,1 bilhões para 2,3 bilhões de toneladas anuais. O projeto propõe alternativas para o armazenamento de energia, na forma de ar comprimido (em cavernas pressurizadas) durante o período da noite. Para tanto, o excedente de energia bombearia o ar, para comprimi-lo dentro das estruturas ocas das cavernas. Posteriormente, esse ar seria liberado alimentando uma turbina que geraria novamente energia elétrica. Essa proposta de armazenamento e conversão já vem sendo realizada na Alemanha. A principal dificuldade para a realização desse projeto é o custo do investimento, da ordem de U\$ 500 bilhões até 2050.

Em contraste com os processos fotoquímicos, as aplicações térmicas normalmente usam quantidade de calor térmico, ou seja, usam apenas calor. Já os processos fotoquímicos usam fótons de alta energia para promover reações químicas específicas. Em alguns casos, os processos térmicos e fotoquímicos chegam a se confundir. Porém existem diferenças, conforme indica a Quadro 2.³⁸

Quadro 2. Diferença entre processos térmicos e fotoquímicos

Processo Térmico	Processo Fotocatalítico
É necessário um bom isolamento térmico.	Não é necessário isolamento térmico (a temperatura não desempenha papel primordial).
Não é relevante a posição (ângulo) de inclinação solar. Só a retenção.	O reator deve ser transparente a fótons.
Não precisa de elemento reflexivo.	O elemento reflexivo deve refletir o comprimento de onda adequado.

3.2. Destiladores solares

Destiladores solares simples ou convencionais

A destilação realizada em destilador solar do tipo tanque raso (*basin type*) é um processo bastante simplificado, proveniente do processo natural.^{39,40,41,42,43}

A radiação solar esquenta o líquido contido no tanque (ou cuba rasa de material específico) construído ou não com material escuro (a fim de reter calor). O líquido se vaporiza e o vapor se condensa na cobertura de vidro (que tem uma temperatura mais baixa). A lâmina de água destilada é então coletada em uma canaleta construída na parte interna lateral do destilador. A energia solar fica retida no equipamento devido ao vidro ter transparência alta. Quando o líquido evapora, as impurezas com menor poder de evaporação ficam retidas no fundo do equipamento.

Ao manter a cobertura de vidro inclinada, evita-se o retorno das gotas do líquido para o tanque. Os melhores materiais para a cobertura são os vidros temperado ou comum. Os plásticos não são tão apropriados porque podem gerar um efeito chamado de *wettable* – em que gotas de água não se fixam bem à cobertura e acabam por cair de volta no tanque. O destilador deve ser posicionado com sentido Norte-Sul, para aproveitar o máximo de radiação solar diária.⁴⁴

Entre as décadas de 1930 e 1950, o destilador solar convencional foi estudado e usado em pequena escala para produção de água fresca para consumo humano. Relatos dessa época mostram que áreas com abundância de águas impuras, como

o nordeste brasileiro e norte de Minas Gerais, são os melhores locais para o uso desse equipamento.³⁴

Os destiladores solares apresentam fácil manuseio e não necessitam de mão-de-obra especializada para sua utilização. Para um melhor entendimento dos destiladores solares simples descreveremos como são fabricados, como funcionam e algumas de suas características.

Composição

Os destiladores solares simples ou convencionais possuem algumas variações de composição, conforme observado nas literaturas analisadas sobre o tema.^{44, 45} Os materiais usados podem ter diferença em todas as partes ou na composição de todas essas partes. Mesmo que apresentem diferenças de um modelo para outro, os materiais usados na confecção de destiladores solares devem apresentar características fundamentais como: alta vida útil (em condições de exposição às quais serão submetidos, devem ter durabilidade e resistir às intempéries); baixo custo (de forma a manter o preço acessível para, quando da sua substituição de peças, não tenha seu custo operacional elevado); não ser tóxico e não possuir material reativo com o fluído a ser destilado; ser resistente à abrasividade e à corrosividade; ter peso e tamanho adequados para manutenção e manuseio sem complicações. Esses equipamentos compõem-se, comumente, em três partes principais e outras partes secundárias.

Tanque

Uma superfície em forma de bacia tanque raso é a base propriamente dita do destilador. Em geral essa base é pintada com uma tinta preta ou com um material impermeável preto, a fim de favorecer a absorção da maior quantidade possível de radiação solar e transformá-la em calor. O tanque possui uma profundidade entre 1,5 a 2,5cm – a depender da quantidade de efluente a ser tratada por ciclo.⁴²

No tanque ficará contido o líquido de alimentação que será destilado. O líquido pode ser alimentado continuamente ou de forma intermitente, mas a quantidade de líquido na cuba (base) deve ser mantida constante de forma a evitar perdas bruscas de quantidade de calor.⁶ A superfície do tanque deve ser lisa para facilitar a limpeza e remoção do sólido.

Os tanques devem ser construídos de acordo com as necessidades do projeto de destilação. Atualmente tem predominado a construção de destiladores com materiais não-metálicos. A fibra de vidro é usada em várias construções de destiladores, todavia é um material não tão acessível. As resinas de Polietileno e Epoxy podem ter reações com o fluido a ser destilado, o que pode ser solucionado com um revestimento específico. O acrílico tem baixo poder resistivo à radiação solar e sofre degradação rápida. Outros materiais podem ainda ser citados como: alumínio, aço inox, ligas metálicas e até mesmo o concreto.⁴⁶

Tampa

A tampa (ou cobertura) deve ser constituída de material transparente às radiações solares, para que as mesmas sejam transmitidas pela tampa e absorvidas pela base do destilador, aumentando a temperatura do líquido e a pressão do vapor.⁴⁶ O fluido vaporiza-se e perde o calor para a tampa pela evaporação, pela convecção, pela radiação e pela condução à base e às paredes do destilador solar. A água vaporizada é condensada ao longo do material da tampa e flui para baixo, ao fundo da tampa inclinada, onde está a canaleta de coleta do destilado.⁴⁷ A cobertura deve estar inclinada até as bordas ou até ao centro para que a água se condense na superfície interior e escorra por gravidade até a canaleta adjacente à periferia interna do tanque. A tampa, depois do tanque, é a parte mais crucial do destilador solar. Ela é montada sobre o tanque e deve transmitir o máximo de radiação dentro da faixa do espectro solar e manter o calor gerado dentro do destilador. Isso significa ter o melhor índice de refração e a maior transparência possível. O material da tampa deve resistir às altas exposições ultravioletas e também à pressão gerada no interior do destilador, a fim de evitar uma expansão e destruir a vedação. Deve também resistir às constantes trocas térmicas e às intempéries. O ideal é ter uma superfície com baixo índice de rugosidade, a fim de evitar a formação de gotas localizadas, bem como para facilitar a formação de uma lâmina do destilado que possa fluir de forma contínua e sem dificuldades.⁴⁸ Para que isso ocorra, aconselha-se que antes da instalação da tampa seja feita uma boa limpeza. Outros aspectos devem ser levados em consideração com relação à escolha da tampa tais como: custos, vida útil, efetividade, resistência a altas temperaturas e, principalmente, boa transmissão para a faixa do espectro solar na região do ultravioleta. Existem vários materiais sendo aplicados para confecção de tampas de cobertura de destiladores solares,

entre eles os materiais plásticos laminados como polietileno de alta densidade, polipropileno e policarbonato. Os materiais plásticos têm menores custos, exceto o policarbonato. Porém, degradam-se mais facilmente a altas temperaturas contínuas e também estão sujeitos ao efeito da formação de bolhas – o que prejudica a formação de lâmina de destilado. O material mais usado é o vidro comum ⁴⁶, que apresenta custo competitivo e boa performance com relação à produção de destilado. Contudo, a melhor de opção de todas é o vidro temperado, que resiste a altas temperaturas e produz mais destilado.⁴⁸ Contudo, seu custo é bem mais elevado e a tampa apresenta-se um pouco mais pesada, já que costuma ser fabricado apenas em espessuras acima de 5mm.

Canaleta de Coleta e Recipiente de Coleta

A canaleta de coleta poderia ser considerada como parte integrante do tanque, já que nos destiladores simples está logo abaixo da superfície inferior do destilador, na base da cobertura de vidro, e tem como finalidade única a coleta do líquido destilado e seu envio para um recipiente apropriado: o recipiente de coleta. A canaleta deve ser construída com o mesmo material do tanque, podendo variar conforme necessidades ou custos. Sua dimensão não pode ser exagerada, a fim de evitar que uma região grande do destilador seja sombreada.⁴⁶

O recipiente de coleta deve ser constituído de material que não interaja com as propriedades do destilado. Deve também estar devidamente limpo para evitar contaminação. O tamanho e volume do recipiente devem ser definidos conforme necessidade do projeto. Deve-se possibilitar a ideal vedação do recipiente para evitar perdas por evaporação além de contaminações. Porém, a vedação deve ser feita com material de fácil remoção para facilitar a manutenção.⁴⁶

Outras Partes

Ao tratar da composição de um destilador solar não se pode deixar de tratar do *isolamento térmico*. Sem o isolamento adequado, as perdas de calor aumentam e ocasionam a diminuição da eficiência em cerca de 14% para tanques com profundidades curtas (até 20cm).⁶ O isolamento térmico é feito por baixo do tanque, externamente. Os materiais de isolamento podem variar bastante. São relatados os usos de madeira⁶, plástico⁴⁴, palha de coco⁴⁴, lã de vidro⁴⁴, areia^{33, 44} e fibra de agave⁴⁴. O custo do isolamento é elevado, podendo representar até 16% do custo

total de construção do destilador⁴⁵. A utilização da areia como isolante barateia o custo e diminui as perdas em relação à inexistência de isolamento. A areia funciona como um armazenador, acumulando calor e fornecendo-o ao tanque, equilibrando a quantidade de calor do sistema e podendo manter o processo de destilação mesmo na ausência de calor (à noite).⁴⁴

Outra parte importante a ser citada é a vedação entre o tanque e a tampa. Quando a vedação é perfeita, não há possibilidade de perda de vapor do líquido destilado. Para ocorrer uma melhor vedação são usados os selantes (vedantes). Os vedantes devem ser de materiais resistentes à abrasividade e à corrosividade do vapor do líquido e devem resistir às pressões de ar quente, além de serem flexíveis às expansões térmicas que ocorram. A vedação deve ser realizada de forma cuidadosa, para evitar a possível formação de zonas de perda de destilado. O material mais usado como vedante é a borracha de silicone acético, que após a aplicação adquire um caráter emborrachado. Cabe salientar que apesar da qualidade de vedação, esse material está sujeito a fungos e pode sofrer degradação com a radiação.⁴⁵

Outros componentes secundários também devem ser citados. As tubulações e válvulas devem ser construídas com material similar ao tanque ou com material específico que melhor se adapte as características do fluído. O material mais usado é o PVC, não isentando o uso de tubulações de inox e ferro galvanizado – essas com custo mais elevado. As tubulações são importantes para alimentação do líquido, para coleta do destilado e para remoção do material sólido ou concentrado restante no equipamento.⁴⁵

Funcionamento

Também o funcionamento de um destilador solar se aproxima do funcionamento de um destilador simples ou convencional. Mais significativas são as diferenças na forma de alimentação e de recepção do destilado. A alimentação pode ser feita de forma manual ou de forma automatizada, por bóia, otimizando dessa forma a lamina de água presente no tanque. A fim de evitar a formação de sais, deve ser colocado um fator de reserva no nível de alimentação de um destilador, ou seja, se a altura do líquido for de 5mm deve haver uma tolerância de pelo menos 2 a 3mm de altura para precipitação dos sólidos.⁶

Deve-se tomar bastante cuidado com o recipiente na hora do funcionamento, para evitar que corpos estranhos (insetos, folhas ou outros) adentrem ao equipamento. Aconselha-se a instalação em um local protegido.

O funcionamento de um destilador solar simples inicia-se quando a radiação solar atravessa a tampa transparente, aquecendo a água e o tanque com uma temperatura superior a da tampa. A partir desse momento, um gradiente de temperatura é gerado, aumentando a pressão no interior do recipiente e provocando a condensação do vapor do líquido sobre a superfície interna da tampa. A fina camada de condensado aderida à tampa é carregada por gravidade até a canaleta e em seguida enviada para o recipiente específico. As perdas ocorrem devido a vários fatores, a saber: perdas por convecção e radiação tanto da água como do tanque, que estão quentes, como também da tampa, que tem uma temperatura mais baixa. Também existem perdas devido a uma fina camada que se forma no fundo do tanque e precisa ser posteriormente removida. Outra perda menor ocorre pela presença da borda da canaleta que gera uma sombra.^{6, 43, 44}

O processo se procede e tem, também, continuidade devido à transferência térmica da cobertura para o meio ambiente exterior. O funcionamento de um destilador solar é essencialmente dinâmico devido às trocas que ocorrem, além das variações de direção e intensidade de radiação solar incidente sobre o sistema, podendo, a quantidade de radiação solar ser bem distinta, em diferentes horas do dia.

Balanco de Energia

O maior objetivo de um destilador solar, quando em funcionamento, é maximizar a quantidade de calor e o transporte de radiação solar absorvida para a condensação do líquido em vapor.

O balanço energético pode ser definido de uma forma simplificada, conforme descreve Duffie⁴¹, como uma malha de resistências térmicas, ligadas em série e em paralelo. A transferência de calor, do tanque do destilador até a tampa, é feita pelos processos de evaporação, condensação, convecção, e radiação. A dissipação de temperatura na parte exterior do tanque é contabilizada conforme influência da profundidade do tanque, ou seja, quanto maior a profundidade menor essas perdas.

Construção dos destiladores

As dimensões de um destilador solar não devem ser grandes, mesmo que seja necessário tratar grandes quantidades de efluente. O ideal é a construção de vários pequenos destiladores. Dessa forma fica garantida a produtividade, além de facilitar a operação, a manutenção, a limpeza e transporte dos equipamentos. Os destiladores construídos em módulos são unidades fáceis de serem adicionadas ou subtraídas de um conjunto, sendo assim possível realizar paradas nos módulos específicos sem interromper todo o processo. Apesar de terem menor capacidade térmica, os destiladores menores possuem maior eficiência por área. Os tamanhos mais comuns desses equipamentos variam entre 0,50m a 2,50m de largura e têm comprimento de até 100m, podendo perfazer uma área superior a 60m².^{44, 49} O maior comprimento deve-se ao maior aproveitamento de radiação na direção norte-sul, para maximizar o ganho de energia solar. Os mais usuais podem ter 0,65m a 0,90m de largura por comprimentos na faixa de 2m ou 3m. A profundidade da água, em geral, varia entre 1,5cm e 2,5cm. Nessa faixa, conforme Al-Hayek⁴², obtém-se melhor eficiência de calor. Tanques com grandes profundidades acabam acumulando energia que poderia ser usada para aumentar a produção.⁴² Observa-se que dentre destiladores de mesma largura, mas com profundidades diferentes, o de menor profundidade tem maior eficiência. O aumento da lâmina de água, indicado por δ , por vezes pode dificultar a produtividade de um destilador. Ao iniciar um processo de destilação deve-se recorrer a dados experimentais anteriores para definir qual lâmina de água deve ser usada em cada tipo de destilador solar e em cada região.⁴³

A distância entre o vidro e a superfície da água não deve ser maior que 5cm ou 6cm, de modo que o destilador opere com maior eficiência. À medida que a distância entre o vidro e a água aumenta, as perdas térmicas por convecção também aumentam e a eficiência do destilador diminui.

O ângulo de inclinação da cobertura de vidro tem influência na quantidade de radiação solar que entra no destilador. Quanto mais ortogonal à superfície do vidro for esse ângulo de incidência, melhor. Se para ângulos de incidência de 90° cerca de 90% da radiação é transmitida, para ângulos de 20° quase nenhuma radiação direta atravessa o vidro. Mas como as latitudes brasileiras vão de 0° a cerca de 35°, esse problema é minimizado. Não é necessário haver uma inclinação muito grande do

vidro para que a água esorra por ele.⁴⁴ Um exemplo esquemático desse tipo de destilador pode ser visto na figura 6.

Outros destiladores solares

Abu-Arabi e Zurigat⁴³ mostram três tipos de destiladores com concepções diferentes. O *destilador solar simples* ou também chamado de *destilador solar convencional* é bastante conhecido por ter design, operação, construção e manutenção simples, bem como por ter baixo custo de confecção. Porém, sua produtividade é baixa – o que leva a constantes estudos para identificar formas de aumentar sua eficiência. Dentre os métodos mais comuns está o de resfriar a estrutura superior (tampa), de forma a garantir a liberação do calor latente na tampa do vidro, enquanto o vapor de água se condensa na superfície da tampa, fazendo com que aumente a temperatura do vidro.

O *destilador solar regenerativo* tem finalidade de melhorar a produção de destilado. Diversas aproximações foram usadas para resfriar a tampa de vidro e usar o calor latente de condensação liberado na tampa. Dois métodos que podemos chamar de regenerativos podem ser descritos. O primeiro é a refrigeração do vidro fazendo com que uma película de água flua do alto da tampa de vidro. O segundo método descrito é o uso de um destilador de duplo vidro com água resfriando a superfície entre os dois vidros.⁴³

Os chamados de *destiladores de bacia única* ou *destiladores de único efeito*, descritos por Tanaka e Nakatake⁵⁰, são destiladores que fazem uso de energia solar apenas uma vez, isto é, o calor latente de condensação é perdido para o ambiente quando dissipado na tampa de vidro. Quando os destiladores são de múltiplo efeito, existe a recuperação do calor latente de condensação do primeiro estágio – o que gera uma evaporação adicional no segundo estágio.

Toyama e Murase⁵¹ mostram três tipos de destiladores solares usados construídos em Tóquio, Japão. O primeiro é um *destilador solar de garrafas PET*, projetado por uma equipe de estudantes de Engenharia Química da Universidade de Chuo. Foi construído basicamente por garrafas PET transparentes instaladas em uma bacia na parte inferior do recipiente. A concepção pode ser vista na figura 6. O segundo é um *destilador solar tipo chapéu de flor*, projetado com uma cobertura em forma de flor e constituída de material plástico transparente, possuindo uma bandeja com calha lateral onde o destilado é condensado e posteriormente removido do

sistema, como mostrado na figura 7. Esse destilador solar foi concebido para escala industrial a partir de desenvolvimento da Akasaka Co. O terceiro destilador⁵¹, *destilador solar tipo embalagem de concha*, é composto de uma bacia de polipropileno e envolvido por uma película de polietileno, de modo a formar dois cones – um superior e um inferior. Na parte do cone inferior está localizado uma recipiente para coletar o destilado, conforme a figura 8.

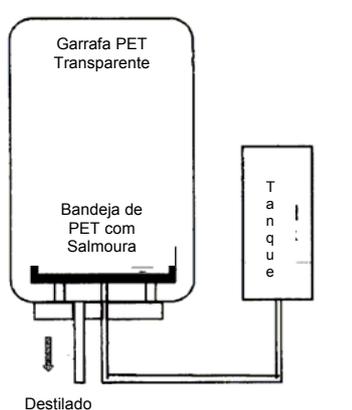


Figura 6. Destilador solar de garrafa PET⁵¹



Figura 7. Destilador solar tipo chapéu de flor⁵¹

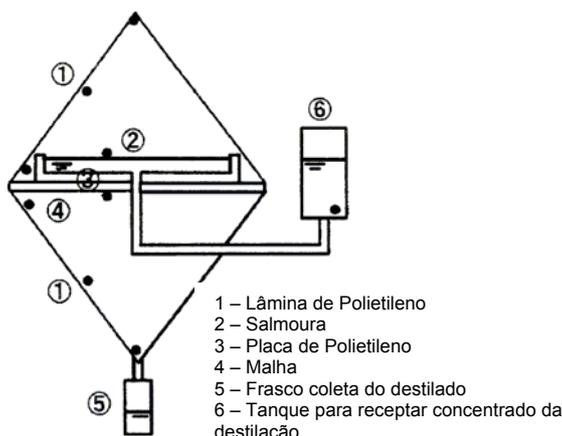


Figura 8. Destilador solar tipo embalagem de concha⁵¹

3.3. Variáveis de um destilador solar

Superfície refletora e isolamento térmico

O isolamento térmico de um destilador é um dos parâmetros mais importantes de um processo que usa energia solar, visto que muita energia é dissipada ao longo do destilador. Dessa forma, o uso do coeficiente de perda de calor da base pode estar presente em muitos estudos e ser determinante para a maior produção ou não de destilados.^{40,41,42,43,44}

O uso de superfícies refletoras para aumentar a eficiência de destilação é relatado por Tanaka e Nakatake⁵⁰ como uma opção de baixo custo e de alto aproveitamento energético. Os destiladores que fazem uso de superfícies refletoras apresentam, basicamente, estruturas recobertas de materiais altamente reflexivos capazes de captar as radiações diretas, difusa e radiações refletidas. No caso da radiação solar difusa total absorvida na base do destilador, a mesma pode ser determinada supondo-se que a radiação difusa é uniforme em todos os sentidos. Desse modo, a radiação solar difusa é a soma de todas as radiações solares difusas em todas as direções. Quando os destiladores apresentam superfícies refletoras, existe um incremento na quantidade de calor total do destilador. As quantidades de calor refletidas e enviadas para a base do destilador são altas, fazendo com que se perceba um aumento de cerca de 41% na quantidade de calor absorvida.⁵⁰ Em outro artigo⁵², os mesmos autores propõem um destilador solar de múltiplo efeito, cujo

projeto apresenta uma placa refletora lisa externa. O citado artigo traz os cálculos da quantidade de radiação direta, difusa e refletida absorvidas pelo destilador.

Tamimi⁵³ relata o aumento de eficiência entre 20-30% para os destiladores tipo bacia simples quando todos os lados internos (lados e parede traseira) foram cobertos com os refletores.

Al-Hayek e Badran⁴² pesquisaram, experimentalmente, destiladores solares do tipo dupla bacia, usando um destilador com superfície refletora interna e outro sem superfície refletora interna, ambos mantendo uma única inclinação. O destilador com superfície refletora apresentou-se aproximadamente 20% mais produtivo do que o destilador solar sem a superfície refletora.

El-Swify e Metias⁵⁴ destacam experiências ao ar livre com destiladores de dupla bacia, mantendo uma única inclinação e com as paredes laterais internas e a superfície exterior da parede traseira cobertas com material altamente reflexivo. Considerando-se o período de inverno e de verão, as produtividades de destilado eram respectivamente 83% e 22% maiores para o destilador com superfície reflexiva do que para o destilador solar simples sem material reflexivo. É apresentado um método geométrico útil para calcular a radiação solar refletida pelas superfícies internas (dois lados e parede traseira) e absorvida na base do destilador. Pode-se prever, teoricamente, que o aumento na radiação solar absorvida na base do destilador é causado pelo uso dos refletores internos.

El-Bahi e Inan⁵⁵ examinaram um destilador solar convencional com refletor externo. O destilador era composto por uma tampa de vidro paralela e um condensador externo colocado atrás do destilador. Tinha também um isolamento para a base. Um refletor externo foi usado para aumentar a incidência solar da radiação na tampa de vidro e fazer uma sombra para o condensador. Esse mesmo refletor mantinha a refletividade mais elevada, de modo que a condensação não chegava a interferir na superfície externa do vidro, evitando assim a diminuição de refletividade.

Um destilador solar do tipo simples, com refletores internos e externos, foi estudado por Malik e colaboradores⁵⁶, que relataram aumento apreciável do destilado com a presença de refletores. Todavia, não apontaram maiores detalhes a respeito do tipo de refletor e do percentual de aumento de produtividade.

Para um destilador solar do tipo simples ou convencional, um refletor externo ou interno pode representar uma modificação útil para aumentar a radiação solar. Obviamente, o objetivo principal de superfícies refletoras é encontrar a melhor configuração para os refletores internos e externos aumentarem ao máximo as quantidades de radiação solar absorvidas em um destilador solar e, conseqüentemente, aumentarem a produtividade de destilado.

Eficiência da destilação solar

Um destilador solar cujo tanque é considerado muito raso, com lâmina de água abaixo de 1cm, pode ser considerado um sistema em regime estacionário. Contudo, quando os destiladores têm profundidades de tanques maiores e tamanhos maiores, fica difícil definir se o destilador solar é também um tanque em regime estacionário.⁴¹

Para efeito de simplificação de cálculo, trabalhar com regimes estacionários e homogêneos é importante, visto que o desenvolvimento matemático é simplificado, desde que as aproximações não sejam grosseiras.

Desempenho de um Destilador Solar

Podemos plotar o gráfico de q_e (quantidade de energia devido ao processo de evaporação do líquido, em W/m^2) por T_g (temperatura da tampa, em K), para valores fixados de T_b (temperatura da base, em K). Esse gráfico de q_e x T_g pode mostrar de forma simplificada o desempenho de um destilador solar.

Produtividade de Destilado

A produtividade de líquido destilado é mostrado por Toyama e Murase⁵¹. Eles determinam a taxa de produção de água (D), em $Kg.m^2/s$, partindo da equação 1.

$$D = q_e / \lambda \quad (1)$$

sendo:

q_e – quantidade de energia devido ao processo de evaporação do líquido, em W/m^2 .

λ - calor latente do líquido, em kJ/kg .

Algumas produtividades de destilação solar são mostradas por alguns autores.

Singh e Tiwari⁵⁷ demonstraram em estudo realizado em Nova Deli, Índia, sistemas solares diferentes de destilação: destilador solar de bacia dupla conectado a um coletor solar, destilador solar convencional de bacia dupla, destilador solar convencional e destilador solar de bacia dupla com múltiplas mechas. Os pesquisadores verificaram que o destilador de dupla bacia tem melhor eficiência que o de bacia única, apresentando produção entre 7 e 18 kg/m².d, dependendo do mês do ano.

Al-Hinai e colaboradores⁵⁸ realizaram análise de parâmetros – ângulo de inclinação da tampa, espessura do isolante, efeito da profundidade da água – em destiladores solares em Oman, Jordânia. Relataram, sob circunstâncias otimizadas, que a produção de destiladores de duplo efeito pode atingir 6,0 kg/m².d, dependendo do dia e mês do ano.

Abu-Arabi e Zurigat⁴³ conduziram trabalho para testar três tipos de destilador diferentes – regenerativo, duplo vidro e convencional – em Oman, Jordânia. Mostram que o destilador do tipo regenerativo chega a apresentar até 70% mais de produtividade que o destilador convencional.

Eficiência

A eficiência (η)^{34,51}, adimensional, de um destilador é definida como sendo a relação entre a quantidade de calor transferido pela evaporação (q_e), em W/m², e a quantidade de energia global (G), em W/m², conforme equação 2.

$$\eta = q_e / (G) \quad (2)$$

A partir das equações apresentadas, podemos afirmar que o aumento de eficiência de um destilador solar simples pode ser obtido a partir de alguns ajustes no sistema, tais como: redução do coeficiente de perda de temperatura, redução da profundidade da água^{34,58}, uso de condensadores externos e internos, uso de isolamento térmico^{34,44,46}, uso de pintura para reter calor, uso de refrigeração na tampa e uso de superfícies refletoras^{40,50} ao destilador.

3.4. Uso de destilação solar para tratamento de efluentes

Scrivani e colaboradores⁵⁹ defendem que os projetos que fazem uso de tratamento com destilação solar deveriam ser divulgados como opções viáveis, pois

fazem uso de tecnologias maduras e simplificadas. A partir desse indicativo, fizemos um levantamento bibliográfico sobre o uso de energia solar para uso de destilação e outros usos. No que se refere ao tratamento de efluentes a partir do uso de destiladores solares, poucos estudos foram publicados. Vários artigos^{40,41,42,43,43} referem-se ao uso de destilação solar com finalidade única de obter água consumível para populações de pequenas regiões, porém o uso de destiladores solares para tratamento de efluentes é quase um processo sem publicações.

A exceção fica por conta de Potoglou e colaboradores⁶⁰, que publicaram artigo sobre a eficiência do processo de destilação solar para tratamento de efluentes derivados da produção e extração de azeite de oliva, na Grécia. Os testes foram realizados em um período de nove dias, em escala de batelada, visto que o processo de extração de azeite de oliva de moinho varia conforme período da coleta. Conforme relatado, o volume de efluente de azeite de oliva nessa região da Grécia chega a ser de 5,5 milhões de m³/ano. Esse tipo de efluente caracteriza-se por ser um líquido marrom escuro, ácido, com concentração elevada de DQO (em torno de 10 a 60 mg/L), alta DBO e altas quantidades de orgânicos. Por essas características, mostra-se um típico efluente com alto poder de contaminação e com poucas possibilidades de tratamento, visto que apresenta perfil anti-bactericida – o que inviabiliza o tratamento via processo biológico. Para tratar esse efluente foi proposto o tratamento com destilação solar. Para tanto, foi construído um destilador solar convencional que recebeu a alimentação do efluente. Após nove dias de experimento, foram analisados parâmetros como: sólidos totais, sólidos voláteis, DQO e TKN. Para os cálculos, foi construído um modelo matemático a fim de fundamentar o estudo. Após a análise das amostras coletadas, foi verificada a eficiência de redução de quase 100% em termos de sólidos, de mais de 80% em termos de DQO e de mais de 90% em termos de Nitrogênio Total.

A partir dos resultados de Potoglou e colaboradores⁶⁰ e diante da lacuna bibliográfica existente, nos propusemos seguir adiante com a pesquisa, propondo alternativas de tratamento para alguns tipos de efluentes de alguns laboratórios de pesquisa da Universidade de Brasília.

4. EXECUÇÃO DO TRABALHO

4.1. Concepção do trabalho

A pesquisa proposta por este projeto teve, por objetivo, propor alternativas viáveis para a redução quantitativa e/ou possível descontaminação de resíduos líquidos cujos volumes acarretam despesas excessivas para a Comissão para Gestão de Resíduos Químicos da Universidade de Brasília.

Breve histórico da Comissão para Gestão de Resíduos Químicos da Universidade de Brasília

Em 2006, Imbroisi e colaboradores⁶¹ descrevem o início do funcionamento da CGRQ - UnB, designada em novembro de 2002 com objetivos claros de: implementação de um sistema de gerenciamento de resíduos químicos; destinação, de forma ambientalmente correta do passivo acumulado, referente a resíduos químicos e implementação de uma central de tratamento de resíduos químicos.

Àquela época, a CGRQ - UnB identificou uma grande variedade de resíduos produzidos, de vários laboratórios da UnB. Surgiu então a necessidade de orientar uma gestão de resíduos, de forma a implementar rapidamente uma central de tratamento. A única atividade possível realizada pela CGRQ - UnB foi diagnosticar a situação do depósito de resíduos químicos da UnB, para então verificar a monta do passivo. No início de 2003 foi entregue à Reitoria da universidade um relatório desse diagnóstico. No documento constam questões como: ausência total de gerenciamento, armazenamento precário sem a mínima identificação e, principalmente, a ausência de efetiva destinação final e de tratamento adequado para os possíveis resíduos gerados. Imbroisi e colaboradores⁶¹ diagnosticaram um contingente de quase 100% dos geradores (de um total de 174) fazendo descarte inadequado de resíduos. A partir de então, propuseram uma mudança nos costumes, evitando-se, logo de início, o descarte inadequado de resíduos líquidos na rede pública de esgoto. Nos anos que se seguiram, e até a presente data, existiram avanços com relação à catalogação, coleta, armazenamento – cujo espaço físico inclusive passou por reforma recente, cadastro de geradores e destinação final. Assim, os laboratórios e geradores de resíduos líquidos químicos na UnB iniciaram um processo no aumento das coletas. Com esses problemas e com o aumento de geração devido ao maior esclarecimento e ao maior volume de

laboratórios propensos a realizar de forma correta um gerenciamento de seus resíduos, surgiu a preocupação de possíveis tratamentos de alguns resíduos enviados para a CGRQ - UnB. Cabe ressaltar que por conta do alto custo de destinação, mostra-se vantajosa a redução do volume de resíduos líquidos destinados por terceiros.

A princípio as solicitações de tratamentos de resíduos enviados à Comissão davam conta, basicamente, de resíduos de solventes que poderiam ser reaproveitados com finalidade menos nobres pelos mesmos laboratórios geradores. Desse contexto surgiu a idéia deste trabalho.

O primeiro passo foi verificar, junto ao pessoal de catalogação da Comissão de Resíduo, quais eram os maiores geradores de resíduos durante aquele ano de 2006. Em seguida foi feita a verificação da quantidade desses resíduos, para então elaborar uma proposta de tratamento para os mesmos.

Escolha dos resíduos líquidos a tratar

Partimos do levantamento realizado sobre a utilização de substâncias químicas nos diversos laboratórios e setores da UnB, bem como dos resíduos produzidos, no ano de 2006. Na ocasião foram investigados cerca de 90% dos laboratórios cadastrados. Verificamos a existência de resíduos com expressiva geração e também a existência de resíduos com alto poder tóxico. A idéia inicial era empregar esse tipo de tratamento para substâncias que fossem consideradas persistentes – metais tóxicos – e de difícil tratamento. Porém, durante o levantamento dos resíduos líquidos e de suas características, optamos por começar com laboratórios que geravam um volume acentuado de resíduos líquidos, mesmo que com outras características – caso do Laboratório de Herpetologia. Armazenados na Comissão de Resíduos, havia algo em torno de 200 L de um resíduo contendo formol (utilizado para conservar espécies durante o processo de captura e catalogação) e mais 200 L de outro resíduo contendo álcool (usado para lavagem de espécies). Somando-se os dois efluentes, tínhamos um total de aproximadamente 400 kg de resíduos coletados no início 2007, referentes ao ano de 2006.

Um outro laboratório produtor de resíduos em grande quantidade é o Hospital Veterinário, também gerador de uma solução de formol, usada para assepsia dos locais onde ocorrem intervenções em animais. Esse gerador enviou durante 2006, 4

bombonas de aproximadamente 200 L, contabilizando um total aproximado de 800 L.

O último resíduo alvo deste trabalho foi proveniente de vários laboratórios do Instituto de Química. O resíduo era caracterizado, basicamente, como resíduo de análise de matéria orgânica e resíduo de demanda química de oxigênio. Esse material foi escolhido por ter um volume de aproximadamente 90 L e por conter metais tóxicos.

Características e constituições dos efluentes

Resíduo contendo Álcool

O Laboratório de Herpetologia trabalha com espécies de anfíbios e répteis, realizando conservação e catalogação dessas espécies. Durante a catalogação dos animais, é usada uma solução preparada com água, fosfato monobásico de sódio ou de potássio e álcool etílico comercial. Essa solução é usada para limpeza e posterior conservação de espécies na biblioteca de espécies. Essa mistura poderia ser considerada de fácil tratamento – apesar de conter uma alta quantidade de álcool etílico comercial e, conseqüentemente, uma alta DQO. Porém outros elementos passam a integrar essa mistura, pois a mesma é usada para servir de suporte para os animais. Por conta do contato deles com a mistura, a mesma passa a adquirir uma grande quantidade de material orgânico, como gordura, nitrogênio, fósforo e sólidos.

Para lançamento desse resíduo líquido direta ou indiretamente no corpo receptor ele deve obedecer às condições, padrões e exigências do CONAMA 357/2005 de capítulo IV artigo 34 § 4º,⁶² que indica valores máximos de óleos minerais até 20 mg/L, materiais sedimentáveis até 1mL/L e nitrogênio total até 20 mg/L. Portanto, esse resíduo líquido não pode ser lançado nos corpos receptores, uma vez que todos os parâmetros apresentam valores acima dos padrões máximos permitidos pelo CONAMA 357/2005.

Conforme indica Decreto Distrital nº 18.328/1997 artigo 161 tabela I ⁶³, o lançamento de resíduos líquidos deve respeitar concentrações máximas de óleos e graxas até 540mg/L, nitrogênio total até 90mg/L, DQO até 810 mg/L, fósforo total até 11 mg/L, sólidos totais até 810 mg/L e cloretos até 90 mg/L. Portanto, esse resíduo não pode ser lançado na rede coletora de esgoto sanitário do Distrito Federal por

apresentar parâmetros com valores acima dos valores máximos permitido pelo decreto citado.

Resíduo contendo Formol

O resíduo de formol usado tanto no Laboratório de Herpetologia como no Hospital de Veterinária é, basicamente, uma solução contendo traços de álcool, traços de sais e formol em concentração inferior a 4%. Podemos ainda relatar a presença de grande quantidade de matéria orgânica, proveniente do contato com animais e das concentrações de sólidos e de gordura.

Para lançamento desse resíduo líquido direta ou indiretamente no corpo receptor ele deve obedecer às condições, padrões e exigências do CONAMA 357/2005 capítulo IV artigo 35 I, ⁶² em que os lançamentos não podem acarretar efeitos tóxicos agudos aos organismos aquáticos. Dessa forma, esse resíduo líquido não pode ser lançado em corpo receptor por possuir efeitos tóxicos aos organismos aquáticos.

O Decreto Distrital nº 18.328/1997 artigo 147c ⁶³ indica ser proibido o lançamento de substâncias que interfiram em processos biológicos de tratamentos de esgotos e prejudiquem a manutenção da vida aquática. Pelos motivos anteriores é vedado o lançamento desse tipo de resíduo líquido na rede coletora de esgoto sanitário do Distrito Federal.

Resíduo contendo Metais

O resíduo de DQO e de matéria orgânica é basicamente um resíduo que contém espécies de cromo – cromo III e cromo VI – proveniente da solução de dicromato de potássio; ferro, proveniente do sulfato ferroso amoniacal usado em titulação; caráter ácido, pela presença de ácido sulfúrico; além de outras espécies que podem estar presentes devido à presença e as características das amostras desconhecidas de cada laboratório.

Para lançamento desse efluente direta ou indiretamente no corpo receptor, ele deve obedecer às condições, padrões e exigências do CONAMA 357/2005 capítulo IV artigo 34 § 5º, ⁶² que indica valores máximos de cobre dissolvido até 1,0mg/L, cromo total até 0,5 mg/L, ferro dissolvido até 15,0mg/L e zinco total até 5,0mg/L.

O Decreto Distrital nº 18.328/1997 artigo 161 tabela II ⁶³ permite lançamento de resíduos líquidos com concentrações máximas de cromo total até 5,0mg/L, ferro total

até 15,0mg/L, cobre total até 1,5mg/L e zinco total até 5,0mg/L. Dessa forma, esse resíduo líquido não pode ser lançado na rede coletora de esgoto sanitário do Distrito Federal, por apresentar parâmetros com valores acima dos valores máximos permitido pelo decreto citado.

A partir da escolha desses três tipos de resíduos, foi possível planejar tratamentos distintos para os mesmos, bem como definir parâmetros para análise, de modo a testar a efetividade da destilação solar como alternativa para tratamento de resíduos líquidos.

4.2. Concepção e montagem do destilador solar usado no projeto

Como já era de intuito da comissão de resíduos, o tratamento dos resíduos líquidos deveria ser realizado de forma a criar o menor impacto ambiental, além de resultar em uma quantidade menor de resíduo final. Os resultados indicariam a viabilidade futura de instalação e operacionalização do projeto estudado. Assim, foi sugerido o trabalho com o uso de destilação solar para os três resíduos escolhidos. Para realização deste estudo, fez-se necessário o uso de um destilador solar simples (simple “conventional” solar still), com design, construção, operação e manutenção simples. Esse equipamento foi concebido, desenvolvido, construído e cedido pelo Prof. Dr. João Pimenta, do Departamento de Engenharia Mecânica da UnB.

Composição

Tanque

Foi construído em fibra de vidro, com espessura de aproximadamente de 2mm e dimensões de 830 x 1260 x 220-340 mm. A base foi pintada internamente com tinta esmalte sintético alto brilho (para aumentar a reflexão) na cor preta (cuja finalidade é reter a maior quantidade possível de calor). A altura do volume de líquido (altura útil) foi definida pela pintura com tinta preta em 20 mm de altura partindo da base. O resto da caixa foi mantido sem pintura, indicando que a área útil de abastecimento do equipamento deveria ser apenas a área pintada. A base possui um desnível de aproximadamente 30° entre a parte frontal e a parte traseira, com a parte frontal de 220 mm e a parte traseira de 340 mm. As bordas possuem uma curvatura, a fim de possibilitar a colocação do vidro sobre a caixa. O tanque

apresentava um dreno na parte central, constituído por uma válvula de fundo com um *cap* (tampão rosqueável). Também apresentava um dreno na área da região da canaleta a fim de drenar o destilado.

Tampa

A tampa (ou cobertura) constituiu-se de uma placa de vidro comum com transparência máxima de 98% e com espessura de 0,005m. Possui os mesmos comprimentos do tanque, já que recobre perfeitamente toda a superfície, conforme pode ser visto nas figuras 9 e 10.

Inicialmente optou-se por um vidro comum, pelo melhor custo benefício no momento inicial de testes. Durante o processo, o vidro teve que ser removido do tanque e foi possível analisar a dificuldade de retirada do mesmo por conta das vedações de silicone acético. Assim, a remoção ocasionou rachaduras na tampa, devido a fragilidade do material. Dessa forma, o vidro passou a ter eficiências menores. Daí surgiu a decisão, baseada em literatura e na maior durabilidade, da compra de um vidro temperado com medidas iguais, porém com espessura um pouco superior. A espessura encontrada no comércio de um vidro temperado nunca era inferior a 0,006m, fator determinante para a escolha do vidro com essa espessura. Encomendar uma tampa com espessura menor implicaria em custos mais altos – custos extras desnecessários, pois não havia razões para não experimentar a eficiência do vidro mais grosso.



Figura 9. Visão frontal do equipamento – Destilador solar



Figura 10. Visão lateral do equipamento – Destilador solar

Canaleta de coleta e recipiente de coleta

A canaleta de coleta foi construída em fibra de vidro, na estrutura interna do tanque, ficando logo abaixo da superfície inferior do destilador, na base da cobertura de vidro. O recipiente de coleta foi uma bombona de PVC com capacidade de 20 L. O recipiente de alimentação e o recipiente de coleta apresentam mesma capacidade (20L) e são feitos do mesmo material (PVC).

Conforme figura 11, os recipientes foram colocados no sistema e sofreram vedações junto às tubulações de alimentação, a fim de evitar contaminações. Também para evitar contaminação, os mesmos sempre foram lavados durante a troca do material a ser destilado ou material destilado.



Figura 11. Visão dos recipientes de abastecimento e coleta

Outras partes

O *sistema de isolamento térmico* é composto basicamente por uma caixa de madeira de dimensões um pouco maiores que o equipamento, de forma a possibilitar seu transporte e remoção, em separado. Essa caixa de madeira recebeu uma pintura de verniz e nela foi colocada, internamente, uma camada de lã de vidro. Essa camada de lã foi devidamente distribuída de modo uniforme e consistente, a fim de minimizar perdas de calor em todo o equipamento. Apenas a área delimitada como *altura útil interna* foi protegida com a lã de vidro. Esta é a área que deve manter a mínima dissipação de calor, pois manterá a temperatura necessária para que o equipamento funcione em condições satisfatórias.

As *vedações* entre o tanque e a tampa, bem como as vedações das conexões e de outras partes necessárias, foram realizadas com borracha de silicone acético. O maior problema com relação à vedação se dá nos momentos de manutenção e limpeza do tanque. Depois de aplicado, o silicone adere de tal forma que se torna quase impossível a remoção do vidro – dificultando os trabalhos de manutenção. A partir de tal situação, surgiu a idéia de colocar um barbante entre o vidro e o tanque vedado com silicone, para que em futuras remoções do vidro, fosse necessário

somente retirar o barbante para que, em consequência disso, o vidro fosse deslocado do tanque sem maiores dificuldades. Esse artifício facilitou muito a manutenção e em nada prejudicou a vedação, já que o silicone revestia de forma ideal o barbante e ficava bem aderido, sem possibilidade de vazamentos e perdas.

Funcionamento

A alimentação foi feita manualmente, por meio de um grande funil. O resíduo líquido a ser tratado era conduzido pelo funil e chegava ao recipiente de alimentação e, por meio de um sistema de bóia, alimentado ao destilador – otimizando desta forma a lâmina de água presente no tanque. Com o passar do tempo, o sistema de bóia foi se tornando de difícil uso, pois entupia constantemente devido à grande quantidade de sólidos presentes no resíduo líquido. Assim, a bóia foi removida e em seu lugar foi colocada uma válvula de esfera, fabricada em PVC, que permitia controlar o volume de alimentação. A partir deste momento a alimentação passou a ser periódica e manual.

Instalação do destilador solar

A instalação do destilador foi feita no depósito da Comissão de Resíduos da Universidade de Brasília, com a finalidade de acessar os efluentes mais facilmente, pois os mesmos encontravam-se armazenados no citado local. A instalação foi feita em Brasília, Distrito Federal, nas coordenadas geográficas 15°44'58.28''S 47°52'40.26''O.

4.3. Execução dos testes com os resíduos líquidos

Antes de realizar os testes com os três resíduos líquidos acima mencionados, foi executado um teste de destilação com uma solução de cloreto de sódio, a fim de verificar realmente o poder de dessalinização do destilador solar usado, bem como avaliar previamente outras características do mesmo.

Procedimento de limpeza dos recipientes usados para condicionamento dos efluentes e amostras

Todos os recipientes usados para armazenamento dos resíduos líquidos e usados para armazenamento das amostras coletadas foram previamente lavados

com solução alcoólica de hidróxido de potássio 5% e depois enxaguados por três vezes com água corrente, para em seguida serem novamente enxaguados três vezes com água destilada. Os recipientes foram armazenados no depósito da CGRQ - UnB, em temperatura ambiente, em local arejado e sem possíveis contaminantes.

4.3.1. Teste com solução de NaCl

Para o primeiro teste, foi preparada uma solução (40L) 1% de NaCl (VETEC) em água destilada. Que foi usada para verificar a eficiência do destilador solar em relação à literatura estudada e também verificar se o mesmo atendia ao tratamento de soluções com presença de sais inorgânicos.

Coleta de amostras

Foram coletadas amostras da solução de NaCl 1% usada para alimentar o destilador solar e também amostras do destilado. Amostra da água destilada que foi usada para preparação da solução de NaCl 1% também foi coletada.

As amostras coletadas foram identificadas conforme Quadro 3 e os parâmetros avaliados constam no Quadro 4.

Quadro 3. Alimentação do destilador para testes com solução de NaCl 1%

Data da coleta da amostra	Natureza da amostra	Quantidade de amostra	Nomenclatura das amostras
23/05	Água Destilada	3 amostras	AD1, AD2, AD3
23/05	Solução NaCl 1%	1 amostra	SS1
24/05	Destilado	1 amostra	DS1
25/05	Destilado	1 amostra	DS2
26/05	Solução NaCl 1%	1 amostra	SS2
26/05	Destilado	1 amostra	DS3
27/05	Destilado	1 amostra	DS4
28/05	Solução NaCl 1%	1 amostra	SS3
28/05	Destilado	1 amostra	DS5
29/05	Destilado	1 amostra	DS6
30/05	Solução NaCl 1%	1 amostra	SS4
30/05	Destilado	1 amostra	DS7

Parâmetros estudados**Quadro 4. Procedimentos analíticos para solução de NaCl**

Parâmetro	Método
Condutividade	Condutimetria
Cloretos	Titulometria (Nitrato de Prata)

4.3.2. Teste com solução contendo Álcool

Após os testes iniciais com solução de NaCl a 1%, partimos para as análises com os resíduos líquidos propriamente ditos. A primeira batelada de análises foi feita com o resíduo contendo álcool (200 L), descrito no item *Características e constituição dos efluentes*.

Para a alimentação desta solução ao destilador, foi feita a limpeza de todo o sistema de destilação, assim como a limpeza dos recipientes de alimentação e de coleta do destilado.

Método usado para o teste

A finalidade do teste foi verificar o poder de recuperação da solução alcoólica, que inicialmente continha grande quantidade de gordura e de material orgânico proveniente dos animais do Laboratório de Herpetologia.

A princípio foi feita uma alimentação inicial de 20L, definida conforme a necessidade do destilador em ser alimentado somente até a medida da altura útil de destilação. Nos dias posteriores, o abastecimento seguiu o critério de quantidade de destilado. Ou seja, a medida do volume de destilado retirado do destilador corresponderia a exata fração a ser realimentada.

Nessa etapa do trabalho, a alimentação do destilador solar seguiu conforme quadro 5. Durante 34 dias foram tomadas vazões e medidas as alimentações ao destilador solar. As vazões eram sempre tomadas às 17 horas do dia em questão e a medida do volume feita com o auxílio de uma proveta graduada de 1000mL. Esse período foi compreendido entre 01/07/2007 a 03/08/2007. Os resultados constam da tabela 5.

Coleta de amostras

Foram coletadas amostras do Resíduo Líquido Alimentado (RLA) ao destilador, bem como do Resíduo Líquido Destilado (RLD). Para efeitos de análise, foram coletadas amostras de 1L, acondicionadas em recipiente de vidro âmbar. Antes de utilizados, esses frascos foram lavados conforme descrito no item lavagem de recipientes.

As amostras coletadas seguiram a Quadro 5.

**Quadro 5. Regime de coleta de amostras para o resíduo líquido contendo
Alcool**

Tambor	Data da coleta do destilado	Volume destilado (Litros)	Volume coletado (Litros)	Volume armazenado (Litros)
Tambor 1	01/07/2007	1,2	1,0	0,2
	02/07/2007	5,8	1,0	4,8
	03/07/2007	5,0	1,0	4,0
	04/07/2007	5,0	1,0	4,0
	05/07/2007	4,3	1,0	3,3
	06/07/2007	4,0	1,0	3,0
	07/07/2007	4,8	1,0	3,8
Tambor 2	08/07/2007	4,7	1,0	3,7
	09/07/2007	5,7	1,0	4,7
	10/07/2007	5,0	1,0	4,0
	11/07/2007	4,8	1,0	3,8
	12/07/2007	5,0	1,0	4,0
	13/07/2007	4,3	1,0	3,3
	14/07/2007	4,6	1,0	3,6
	15/07/2007	4,5	1,0	3,5
	16/07/2007	5,0	1,0	4,0
	17/07/2007	5,0	1,0	4,0
Tambor 3	18/07/2007	4,8	1,0	3,8
	19/07/2007	4,4	1,0	3,4
	20/07/2007	4,6	1,0	3,6
	21/07/2007	4,0	1,0	3,0
	22/07/2007	4,0	1,0	3,0
	23/07/2007	4,5	1,0	3,5
	24/07/2007	5,0	1,0	4,0
	25/07/2007	5,0	1,0	4,0
	26/07/2007	5,0	1,0	4,0
Tambor	27/07/2007*	5,2	1,0	4,2

4	28/07/2007	5,0	1,0	4,0
	29/07/2007	5,8	1,0	4,8
	30/07/2007	5,8	1,0	4,8
	31/07/2007	5,7	1,0	4,7
	01/08/2007	5,3	1,0	4,3
	02/08/2007	4,8	1,0	3,8
	03/08/2007	4,7	1,0	4,7

Parâmetros estudados

Os parâmetros escolhidos para analisar as amostras de resíduo contendo álcool constam no quadro 6.

Quadro 6. Procedimentos analíticos para resíduo contendo Álcool

Parâmetro	Método
Sólidos Totais	Gravimetria
Sólidos Sedimentáveis	Cone de Imhoff
Cloretos	Titulometria
Nitrogênio Total Kjeldahl – TKN	Titulometria
Fósforo Total	Colorimetria (uv-vis)
DQO	Colorimetria (uv-vis)
Álcool em Água*	Espectroscopia (I.R.)
Óleos e Graxas	Extração por Solvente e Gravimetria

* Análise realizada no Laboratório de Materiais e Combustíveis da UnB.

4.3.3. Teste com solução contendo Metais

Na segunda bateria de testes foi usado o resíduo contendo metais (90 L), proveniente dos laboratórios de química da Universidade de Brasília, conforme relatado no item *Características e constituição dos efluentes*. Esse resíduo apresentava-se bastante ácido, com pH abaixo de 2.

Antes da alimentação deste resíduo ao destilador, foi feita a limpeza de todo o sistema de destilação, assim como a limpeza dos recipientes de alimentação e de coleta do destilado.

Método usado para o teste

A finalidade do teste seria verificar a possibilidade do Resíduo Líquido Destilado (RLD) não apresentar mais a presença de metais, de modo que pudesse ser encaminhado para reúso. Sendo assim, estaria reduzida a contaminação do resíduo líquido em questão e, caso fosse gerado uma parte sólida proveniente dos sais metálicos presentes na solução, esse teria um volume diminuto em relação ao montante inicial de 90 L.

Optou-se, inicialmente, por alimentar o destilador solar com 20L do resíduo contendo metais, de modo que o volume atingisse a altura útil de destilação. O abastecimento nos dias posteriores seguiu, basicamente, a mesma forma do teste anterior. Ou seja, quanto de Resíduo Líquido Destilado (RLD) fosse retirado do destilador, a mesma fração seria alimentada de Resíduo Líquido (RLA).

Nessa etapa do trabalho, o destilador solar foi alimentado conforme tabela 7. Durante 17 dias foram tomadas vazões. As vazões eram sempre medidas às 17 horas do dia em questão (podendo haver variações de poucos minutos) e a medida era feita em uma proveta graduada de 1000mL. O período deste teste foi compreendido entre 09/08/2007 a 25/08/2007.

Quadro 7. Regime de coleta de amostras para o resíduo líquido contendo Metais

Composta do Resíduo Líquido Alimentado	Data da coleta do resíduo líquido	Volume destilado (Litros)	Composta do Resíduo Líquido Destilado
RLA 1	09/08	-	-
RLA 2	10/08	3,9	RLD 2
	11/08	3,2	
	12/08	3,3	
RLA 3	13/08	4,0	RLD 3
	14/08	3,7	
	15/08	3,9	
RLA 4	16/08	4,2	RLD 4
	17/08	4,4	
	18/08	4,5	
RLA 5	19/08	4,3	RLD 5
	20/08	3,9	
	21/08	4,2	
RLA 6	22/08	4,0	RLD 6
	23/08	3,6	
	24/08	3,7	
	25/08	3,4	

Coleta de Amostras

Durante o teste foram coletadas amostras do Resíduo Líquido Alimentado (RLA) e do Destilado (RLD). Com o grande volume de amostra gerado no teste anterior e como os resultados do teste anterior variavam pouco, já de imediato tomamos a decisão de reduzir o volume de material coletado diariamente, tanto das amostras RLA e RLD. Assim, em vez de coletarmos 1L de cada amostra, passamos a coletar um volume de aproximadamente 100 mL de cada. As amostras foram coletadas em frascos de vidro de aproximadamente 200 mL, previamente lavados conforme lavagem de recipientes.

As amostras do RLD foram tomadas como *composta*, de três em três dias, conforme quadro 7. O mesmo se deu no caso das amostras do Resíduo Líquido Alimentado (RLA) no destilador, com exceção da primeira coleta, feita em separado, gerando dessa forma uma amostra a mais de RLA. (quadro 7)

Além das amostras de RLA e RLD, foram coletadas amostras do material sólido que restou no destilador solar. Assim, realizamos a coleta de duas amostras compostas sólidas conforme indicado na norma ABNT-NBR 10007 – 2004.⁶⁴

Essas amostras foram analisadas conforme os parâmetros indicados no quadro 8 – excetuando-se a análise de condutividade e pH, por se mostrar pouco pertinente a amostras de sólidos.

Parâmetros estudados

Para esse teste, os parâmetros avaliados estão listados no quadro 8.

Quadro 8. Procedimentos analíticos para resíduo contendo Metais

Parâmetro	Método
Ferro Total	Espectroscopia de Absorção Atômica
Cromo Total	
Cobre Total	
Zinco Total	
Condutividade	Condutimetria
pH	Potenciometria

4.3.4. Teste com solução contendo Formol

Nesse teste foi usado o resíduo contendo formol provenientes do Laboratório de Herpetologia (IB) e do Hospital Veterinário (FAV). Essas amostras foram descritas previamente conforme o item *Características e constituição dos efluentes*. Tais resíduos apresentavam alta toxicidade, pois emanavam vapores de formol bastante irritantes, o que tornava o manuseio e a operação desgastantes. Assim, optou-se por fazer um teste representativo, com apenas 100L do resíduo, o que equivaleria a apenas 2 bombonas de 50L ou apenas 10% do volume total do resíduo existente no depósito da CGRQ - UnB. Para esse teste foram retirados,

separadamente, 50 L de uma bombona de 200 L do material proveniente do Hospital Veterinário e mais 50 L do material proveniente do Laboratório de Herpetologia.

Para a alimentação do destilador foi feita a limpeza de todo o sistema de destilação – limpeza essa que demorou certo tempo e apresentou alguma dificuldade, devido ao fato do processo anterior ter gerado uma parte sólida em quantidade razoável e que ficou depositada no fundo do destilador. A limpeza dos recipientes de alimentação e de coleta do destilado foi realizada conforme exposto no item de lavagem dos recipientes.

O Resíduo Líquido Alimentado (RLA) foi transferido para o recipiente de alimentação através de um funil, previamente lavado de forma semelhante aos recipientes de alimentação e coleta. Os recipientes contendo esse resíduo líquido contendo formol foram armazenados na área de resíduos da UnB, em temperatura ambiente, local arejado, sem possíveis contaminantes.

Método usado para o teste

Esse resíduo apresenta alta volatilidade. Por esse motivo as vedações dos sistema foram reforçadas. O intuito básico era remover a contaminação gerada pela presença de sólidos e gorduras, de modo que o Resíduo Líquido Destilado (RLD) pudesse ser reutilizado pelo Laboratório de Herpetologia, assim como no caso da resíduo contendo álcool. Outra intenção foi verificar a possibilidade de redução do volume deste resíduo, já que o montante gerado pela UnB anualmente é de mais de 1000 L.

Partindo dos testes realizados anteriormente, a alimentação do destilador com o resíduo contendo formol iniciou-se com 20 L. O abastecimento nos dias posteriores seguiu basicamente a mesma forma adotada nos testes anteriores. Ou seja, quanto de Resíduo Líquido Destilado (RLD) fosse retirado do destilador, seria a mesma fração alimentada de Resíduo Líquido (RLA).

Nessa etapa do trabalho, o destilador solar foi alimentado, conforme quadro 9.

O processo se repetiu por 18 dias. As vazões eram sempre tomadas às 17 horas do dia em questão e a medida era feita em uma proveta graduada de 1000mL, podendo haver variações de poucos minutos. Esse período foi compreendido entre 29/08/2007 a 14/09/2007.

Coleta de Amostras

Foram coletadas amostras compostas de 100mL de RLA e RLD, para cada dia, em frascos de vidro âmbar, conforme quadro 9.

Quadro 9. Regime de coleta de amostras para o resíduo líquido contendo Formol

Composta do Resíduo Líquido Alimentado	Data da coleta resíduo líquido	Volume destilado (Litro)	Composta do Resíduo Líquido Destilado
RLA A1	29/08	3,8	RLD A1
	30/08	4,9	
	31/09	4,7	
RLA A2	01/09	4,3	RLD A2
	02/09	4,0	
	03/09	4,1	
RLA A3	04/09	3,9	RLD A3
	05/09	3,9	
	06/09	4,0	
RLA B1	07/09	4,1	RLD B1
	08/09	3,7	
	09/09	3,9	
RLA B2	10/09	3,7	RLD B2
	11/09	3,5	
	12/09	3,8	
RLA B3	13/09	3,3	RLD B3
	14/09	3,5	

Parâmetros estudados

Os parâmetros avaliados nesse teste estão listados no quadro 10.

Quadro 10. Procedimentos analíticos para resíduo contendo Formol

Parâmetro	Método
Teor de Formol Livre	Titulometria
Condutividade	Condutimetria

5. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Nesse capítulo são referenciados os métodos usados para execução dos procedimentos analíticos. Os métodos usados constam no quadro 11.

Quadro 11. Procedimentos analíticos usados

Parâmetros estudados	Métodos usados	Referência do método usado
Álcool em Água	Espectroscopia (I.R.)	Standard Methods. ⁶⁵
Cobre Total	Espectroscopia de Absorção Atômica	Standard Methods 3111. ⁶⁵
Condutividade	Condutimetria	Standard Methods 2510. ⁶⁵
Cloretos	Titulometria (Nitrato de Prata)	Standard Methods 4500 Cl. B. ⁶⁵
Cromo Total	Espectroscopia de Absorção Atômica	Standard Methods 3111. ⁶⁵
Demanda Química de Oxigênio - DQO	Colorimetria (uv-vis)	Standard Methods 5220 D. ⁶⁵
Fósforo Total	Colorimetria (uv-vis)	Standard Methods 4500 P. D. ⁶⁵
Ferro Total	Espectroscopia de Absorção Atômica	Standard Methods 3111. ⁶⁵
Nitrogênio Total Kjeldahl –TKN	Titulometria	Standard Methods 4500 N. B. ⁶⁵
Óleos e Graxas	Extração por Solvente e Gravimetria	Standard Methods 5520 D. ⁶⁵
pH	Potenciometria	Standard Methods 4500 H. A. ⁶⁵
Sólidos Sedimentáveis	Cone de Imhoff	Standard Methods 2540 F. ⁶⁵
Sólidos Totais	Gravimetria	Standard Methods 2540 B. ⁶⁵
Teor de Formol	Titulometria	ABNT NBR – 9765. ⁶⁶
Zinco Total	Espectroscopia de Absorção Atômica	Standard Methods 3111. ⁶⁵

O método ABNT NBR – 9765 teve a etapa de solubilidade da amostra suprimida, haja vista que a amostra já era solúvel.⁶⁶

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse trabalho de pesquisa, a principal finalidade é propor um tratamento para minimizar os resíduos da CGRQ - UnB. O estudo de quatro efluentes distintos serve para checar a efetividade do tratamento para efluentes diferentes e comprovar a viabilidade desse projeto com possibilidade de posterior uso.

Relataremos a seguir os resultados obtidos para cada parâmetro analisado, bem como a eficiência do processo para cada efluente usado.

6.1. Teste com solução de NaCl

A condutividade e cloreto foram determinados para todas as amostras coletadas no primeiro teste, sendo obtidos os resultados conforme tabela 1. Os resultados de cloretos da tabela 1 são referentes às médias dos ensaios realizados em triplicata (n=3), o intervalo de confiança apresentado é de 90%.

Tabela 1. Resultados de Condutividade (em $\mu\text{S/cm}$) e de Cloretos (mg/L) das amostras de Destilado (DS) e da Solução de NaCl (SS) referentes ao primeiro teste

Amostras	Condutividade Inicial ($\mu\text{S/cm}$) Amostras SS	Condutividade Final ($\mu\text{S/cm}$) Amostras DS	Eficiência em Condutividade (%)	Cloreto Inicial (mg/L) Amostras SS	Cloreto Final (mg/L) Amostras DS	Eficiência em Cloretos (%)
Amostra 1	10520	4,31	99,96	1394 \pm 40,93	2,32 \pm 0,80	99,83
Amostra 2	10440	4,67	99,96	1513 \pm 54,15	2,78 \pm 1,39	99,82
Amostra 3	10490	3,36	99,97	1371 \pm 20,47	2,32 \pm 0,80	99,83
Amostra 4	10370	3,43	99,97	1418 \pm 61,40	2,32 \pm 0,80	99,84
Amostra 5	-	3,90	-	-	1,85 \pm 0,80	-
Amostra 6	-	3,52	-	-	2,78 \pm 0,00	-
Amostra 7	-	3,78	-	-	2,78 \pm 1,39	-

Os resultados de Cloreto (tabela 1) das amostras da solução sintética de NaCl apresentaram alta concentração em cloretos (acima de 1000 mg/L). Já as amostras do destilado possuíram baixa concentração (abaixo de 5,0 mg/L).

No teste executado com a solução sintética de cloreto de sódio fica evidente que os resultados sempre obtiveram eficiências acima de 99%, comparativo entre a solução de NaCl (amostras SS) e o destilado (amostras DS), tanto na redução de condutividade como na redução de cloreto.

Fica constatado também que o processo de destilação solar, usando destilador convencional, é realmente eficiente para a dessalinização de água salobra ou salgada.

Faz-se necessário a verificação da eficiência desse método de tratamento aplicado a resíduos mais complexos e de maior potencial de poluição. O que fica demonstrado a seguir.

6.2. Teste com solução contendo Álcool

Para essa solução foram analisados os parâmetros de Sólidos Totais, Sólidos Sedimentáveis, Cloretos, Nitrogênio Total Kjeldahl (TKN), Fósforo Total, Demanda Química de Oxigênio (DQO), Água em Álcool e Óleos e Graxas. Todos os resultados mostrados para esse teste são referentes às médias das triplicatas (n=3) realizadas para cada parâmetro, exceto no parâmetro sólidos sedimentáveis. O intervalo de confiança apresentado é de 90%.

i. Sólidos Totais

Os resultados de Sólidos Totais, antes e depois do tratamento de destilação solar, são mostrados na tabela 2. As amostras de 01 a 07 são referentes às coletas dos dias 01 ao dia 07 de junho (tambor 1), a amostra 08 corresponde à composta do tambor 2, a amostra 09 corresponde à composta do tambor 3 e a amostra 10 corresponde à composta do tambor 4.

Pode ser verificado, na tabela 2, uma redução na quantidade de sólidos totais acima de 98%. Partindo desses dados, plotamos um gráfico no origin 7.0 para mostrar a eficiência desse processo na redução de sólidos totais no resíduo líquido estudado, como mostrado na figura 12. É importante apontar um comportamento

semelhante entre as curvas do Resíduo Líquido Alimentado (RLA) e Resíduo Líquido Destilado (RLD).

Tabela 2. Resultados de Sólidos Totais (mg/L) para Resíduo Líquido Alimentado (RLA) e Resíduo Líquido Destilado (RLD) referentes ao segundo teste

Amostras	Sólidos Totais (mg/L) RLA	Sólidos Totais (mg/L) RLD	Eficiência de Redução (%)
Amostra 1	2763 ± 55	8,00 ± 2,00	99,71
Amostra 2	3107 ± 119	13,33 ± 1,15	99,57
Amostra 3	2887 ± 155	12,67 ± 5,03	99,56
Amostra 4	4603 ± 49	28,00 ± 2,00	99,39
Amostra 5	4640 ± 30	36,67 ± 22,30	99,21
Amostra 6	5300 ± 227	54,00 ± 8,72	98,98
Amostra 7	4850 ± 131	59,33 ± 10,07	98,78
Amostra 8	3773 ± 32	40,00 ± 5,29	98,94
Amostra 9	3370 ± 131	30,67 ± 3,06	99,09
Amostra 10	3610 ± 207	30, 67 ± 4,16	99,15

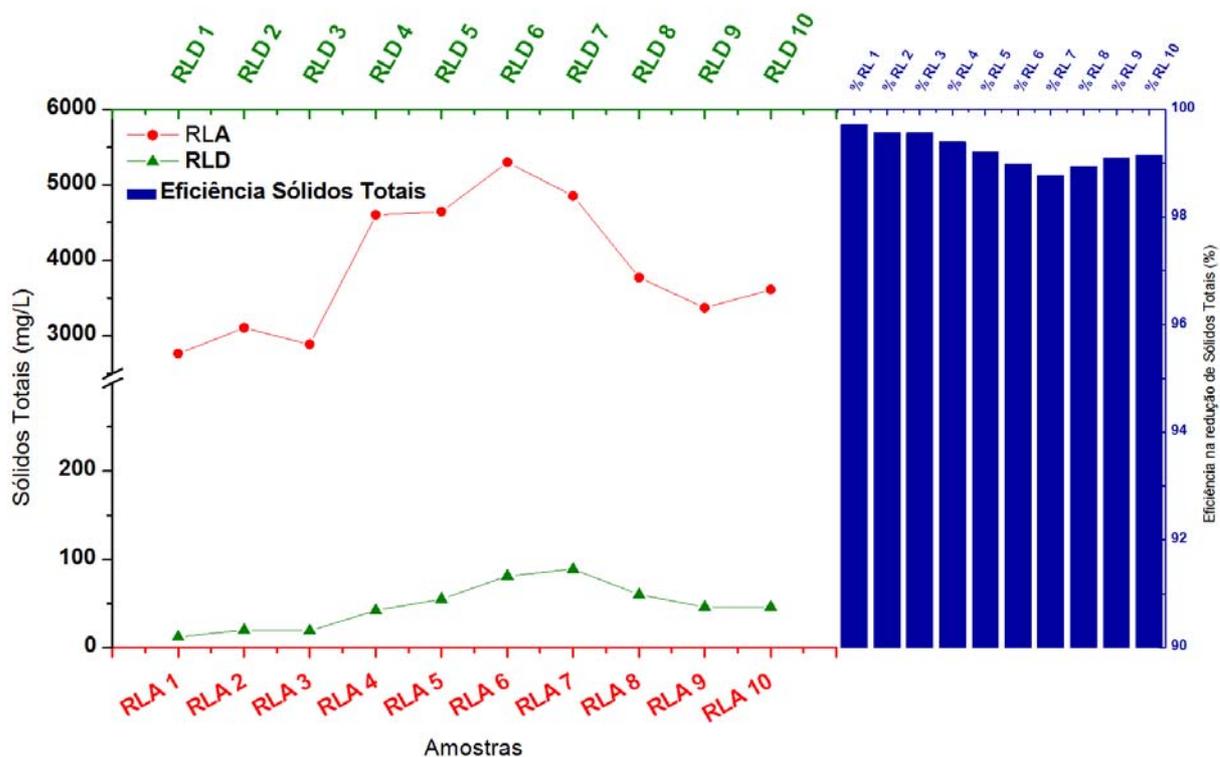


Figura 12. Valores de Sólidos Totais (em mg/L) para Resíduo Líquido Alimentado (RLA) e Resíduo Líquido Destilado (RLD) referentes ao segundo teste

ii. Sólidos Sedimentáveis

Na tabela 3 são apresentados os resultados de sólidos sedimentáveis para as amostras de RLA e RLD. Os resultados de sólidos sedimentáveis são importantes como parâmetro de controle, visto que o CONAMA 357/2005 capítulo IV artigo 34 § 4º III,⁶² indica valores máximos de sólidos sedimentáveis até 1,0 mL/L para efluentes. Na tabela 3 observamos valores sempre abaixo de 1,0 mL/L para o Resíduo Líquido Destilado (RLD), indicando assim que o tratamento de destilação solar, usando destilador solar convencional, foi eficiente e atendeu a legislação para esse parâmetro estudado.

Tabela 3. Resultados de Sólidos Sedimentáveis (mL/L) para Resíduo Líquido Alimentado (RLA) e Resíduo Líquido Destilado (RLD) referentes ao segundo teste

Amostras	Sólidos Sedimentáveis (mL/L) RLA	Sólidos Sedimentáveis (mL/L) RLD
Amostra 1	< 0,1	< 0,1
Amostra 2	3,0	< 0,1
Amostra 3	22,0	< 0,1
Amostra 4	< 0,1	< 0,1
Amostra 5	3,5	< 0,1
Amostra 6	3,0	< 0,1
Amostra 7	< 0,1	< 0,1
Amostra 8	4,0	< 0,1
Amostra 9	3,5	< 0,1
Amostra 10	4,5	< 0,1

iii. Cloretos

Os resultados de cloretos para os resíduos líquidos, antes e depois do tratamento executado, são mostrados na tabela 4.

A redução da remoção de quantidade de cloretos superou sempre os 96%.

As concentrações de cloretos encontradas para o resíduo líquido destilados podem ser consideradas muito boas, quando as comparamos ao que indica o CONAMA 357/2005 seção 2 art. 14 tabela 1⁶² em que é aceito concentrações de cloretos de até 250 mg/L para corpos de água doce de classe I.

Podem ser observados na figura 13 os valores de cloretos para os resíduos líquidos e para a eficiência do processo com relação a esse parâmetro. Nesse gráfico é possível perceber a redução na concentração de cloreto inicial superior a 96% – assim como é possível notar um comportamento semelhante obtido com relação ao parâmetro de sólidos totais, uma tendência de crescimento na concentração de cloretos ao longo das amostras de resíduo líquido alimentado. Ainda na figura 13 é evidenciado que o comportamento do resíduo líquido destilado fica praticamente inalterado durante todo o teste, indicando que a concentração de saída varia muito pouco.

Tabela 4. Resultados de Cloretos (mg/L) para Resíduo Líquido Alimentado (RLA) e Resíduo Líquido Destilado (RLD) referentes ao segundo teste

Amostras	Cloretos (mg/L) RLA	Cloretos (mg/L) RLD	Eficiência de Redução (%)
Amostra 1	180,86 ± 6,25	5,25 ± 0,57	97,10
Amostra 2	184,47 ± 1,14	6,24 ± 0,57	96,62
Amostra 3	150,17 ± 6,51	4,60 ± 0,57	96,94
Amostra 4	289,66 ± 3,76	4,60 ± 0,57	98,41
Amostra 5	330,69 ± 13,56	5,25 ± 0,57	98,41
Amostra 6	297,05 ± 2,84	4,60 ± 0,57	98,45
Amostra 7	244,53 ± 18,64	5,25 ± 0,57	97,85
Amostra 8	246,17 ± 4,92	4,60 ± 0,57	98,13
Amostra 9	298,69 ± 7,52	5,25 ± 1,50	98,24
Amostra 10	292,13 ± 10,25	6,24 ± 0,57	97,86

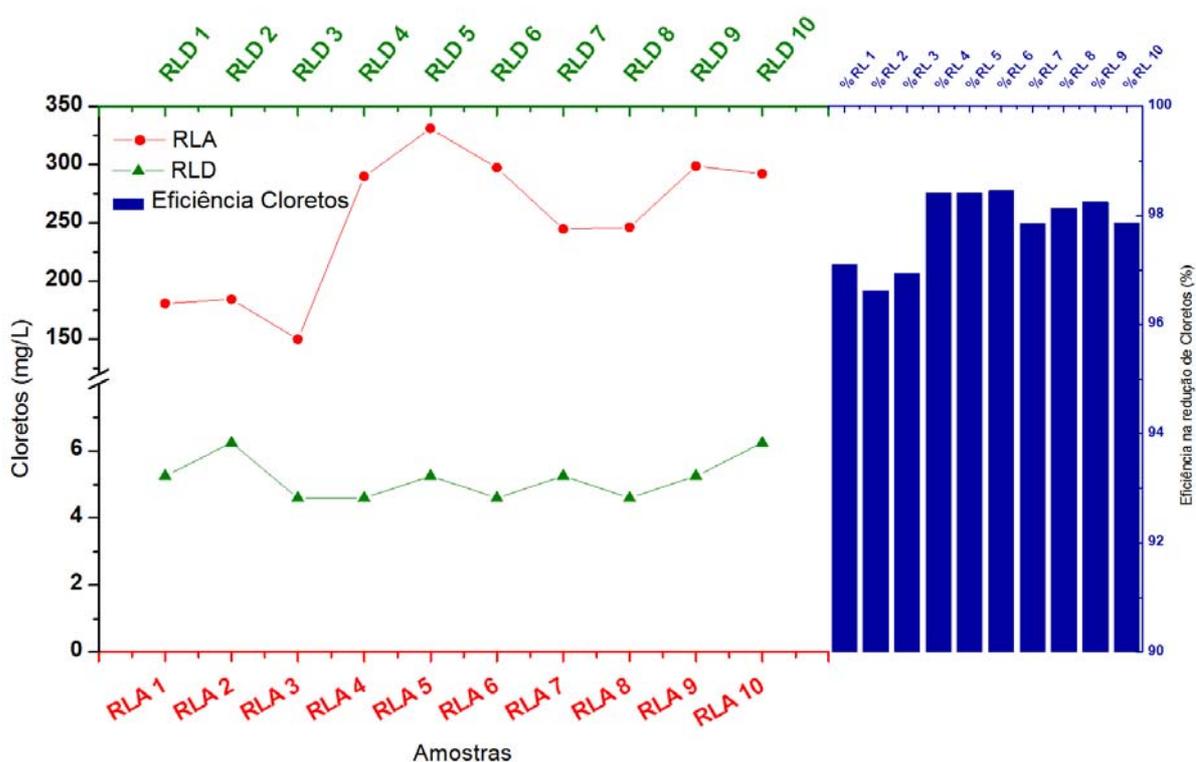


Figura 13. Valores de Cloretos (em mg/L) para Resíduo Líquido Alimentado (RLA) e Resíduo Líquido Destilado (RLD) referentes ao segundo teste

iv. Total Nitrogênio Kjeldahl - TKN

Os resultados de Nitrogênio Total são mostrados na tabela 5. Esses resultados de TKN, usados no estudo de tratabilidade para o resíduo líquido em questão, podem ser considerados, assim como os testes de óleos e graxas e o de fósforo total, os ensaios mais importantes. Isso porque o resíduo líquido em estudo provém do contato com animais e, portanto, está sujeito a grandes quantidades de Nitrogênio, Fósforo e Gordura.

Após a destilação fica confirmada uma eficiência acima de 97% para o parâmetro TKN, como mostrado na tabela 5 e na figura 14. Vale apontar que, assim como nos ensaios de cloreto, os valores de TKN para os resíduos líquidos destilados têm valores muito baixos quando comparados aos resíduos líquidos alimentados. Tal constatação nos obrigou a fazer uma redução na escala da concentração das amostras, a fim de termos uma comparação visual, na figura 14, melhor entre Resíduo Líquido Alimentado (RLA) e Resíduo Líquido Destilado (RLD).

Outra observação com relação aos resultados obtidos está relacionada ao fato de termos sempre TKN com valores inferiores a 20,0 mg/L - quantidade limite de lançamento de efluentes estipulado pelo CONAMA 357/2005 Art. 34 Tabela X.⁶²

Tabela 5. Resultados de Total Nitrogênio Kjeldahl - TKN (mg/L) para Resíduo Líquido Alimentado (RLA) e Resíduo Líquido Destilado (RLD) referentes ao segundo teste

Amostras	TKN (mg/L) RLA	TKN (mg/L) RLD	Eficiência de Redução (%)
Amostra 1	232,50 ± 5,63	4,46 ± 2,34	98,08
Amostra 2	252,78 ± 13,27	1,76 ± 0,00	99,30
Amostra 3	272,60 ± 28,05	1,76 ± 0,00	99,35
Amostra 4	297,84 ± 4,06	1,76 ± 0,00	99,41
Amostra 5	282,52 ± 12,19	2,66 ± 0,78	99,06
Amostra 6	310,01 ± 4,68	2,43 ± 0,68	99,22
Amostra 7	308,21 ± 11,50	1,53 ± 0,39	99,50
Amostra 8	246,02 ± 4,75	2,66 ± 0,78	98,92
Amostra 9	248,72 ± 3,40	1,53 ± 0,39	99,38
Amostra 10	252,32 ± 5,12	2,21 ± 0,39	99,12

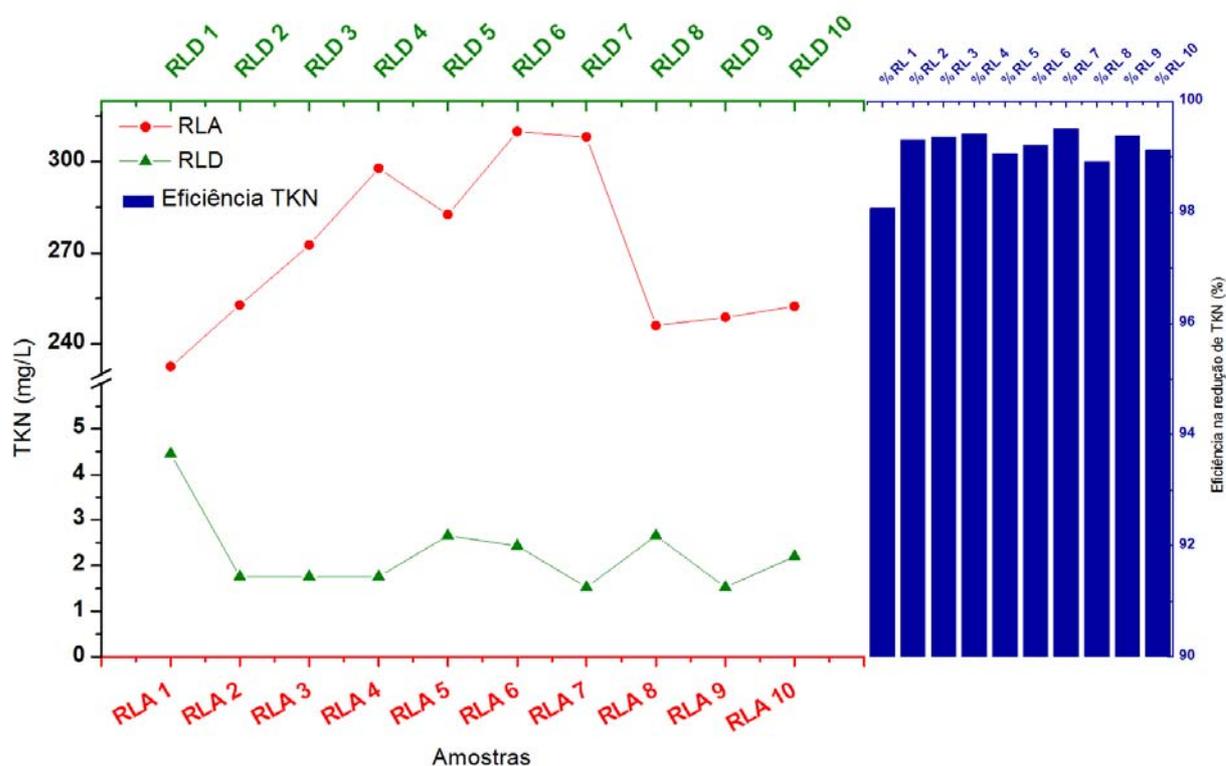


Figura 14. Valores de TKN (em mg/L) para Resíduo Líquido Alimentado (RLA) e Resíduo Líquido Destilado (RLD) referentes ao segundo teste

v. Fósforo Total

Os dados de fósforo total para esse teste constam na tabela 6, referente aos resultados dos Resíduos Líquidos Alimentados e Destilados. Na tabela 6 é mostrada uma redução na quantidade de fósforo total acima de 93%, em comparação à concentração inicial de fósforo. Podemos observar as concentrações de fósforo para o destilado em torno de 10 mg/L. Com resultados de fósforo total inferiores a 11mg/L o Decreto Distrital nº 18.328/1997 artigo 161 tabela I ⁶³ indica que pode ser feito o lançamento de resíduos líquidos em redes coletoras de tratamento, mostrando a possibilidade de descarte desse resíduo na rede coletora de esgotos do Distrito Federal. Outro comportamento observado na figura 15 é o aumento da concentração nas amostras de fósforo referente ao Resíduo Líquido Alimentado (RLA) do dia 01/07 ao dia 07/07, com posterior decréscimo durante o processo de compostagem.

Tabela 6. Resultados de Fósforo Total (mg/L) para Resíduo Líquido Alimentado (RLA) e Resíduo Líquido Destilado (RLD) referentes ao segundo teste

Amostras	Fósforo Total (mg/L) RLA	Fósforo Total (mg/L) RLD	Eficiência de Redução (%)
Amostra 1	355 ± 4,25	24,26 ± 3,95	93,17
Amostra 2	346 ± 19,45	15,25 ± 2,27	95,59
Amostra 3	324 ± 25,47	10,29 ± 0,32	96,82
Amostra 4	2225 ± 16,98	10,81 ± 0,45	99,51
Amostra 5	2282 ± 48,96	10,54 ± 0,11	99,54
Amostra 6	2199 ± 13,42	9,68 ± 0,21	99,56
Amostra 7	2184 ± 7,35	9,93 ± 0,83	99,55
Amostra 8	1824 ± 118,33	12,84 ± 0,42	99,30
Amostra 9	1529 ± 97,27	11,79 ± 0,49	99,23
Amostra 10	1792 ± 93,10	12,13 ± 0,51	99,32

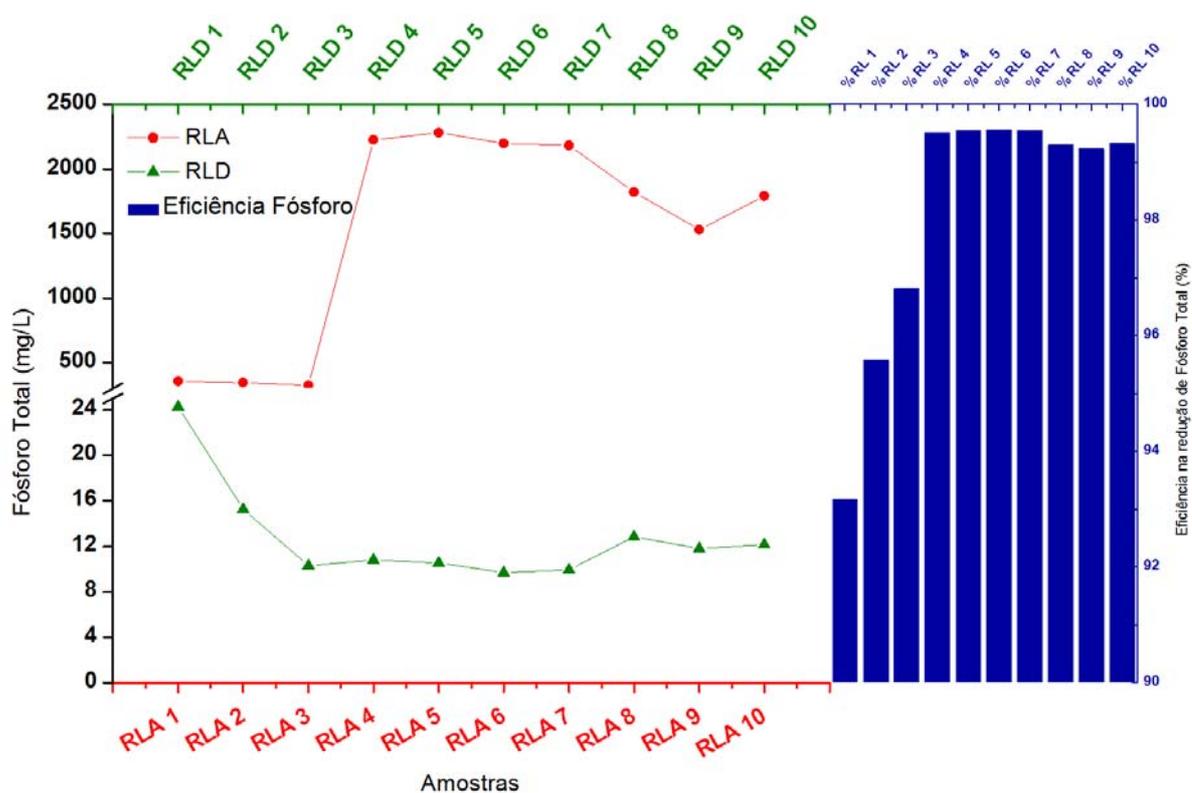


Figura 15. Valores de Fósforo Total (em mg/L) para Resíduo Líquido Alimentado (RLA) e Resíduo Líquido Destilado (RLD) referentes ao segundo teste

vi. Álcool em Água

Na tabela 7 constam os resultados relacionados ao teor de álcool em água para as amostras referentes ao segundo teste. Observamos, durante a realização dos ensaios desse parâmetro, o aumento na quantidade percentual de álcool quando comparamos as amostras de RLA e RLD, tabela 7. O aumento da quantidade de álcool varia entre 5 e 30%, conforme figura 16. Esse aumento pode ser explicado devido ao fato da amostra conter muitas impurezas sólidas e gorduras. Assim que esses valores de gordura e de sólidos diminuem na solução, a mesma fica mais concentrada em álcool.

Conforme espera-se do tratamento proposto é ideal o aumento na concentração de álcool, visto que para finalidade de reaproveitamento desse resíduo líquido é de essencial importância que a solução contenha uma quantidade maior de álcool que a inicial.

Tabela 7. Resultados de Álcool em Água (%) para Resíduo Líquido Alimentado (RLA) e Resíduo Líquido Destilado (RLD) referentes ao segundo teste

Amostras	Álcool em Água (mg/L) RLA	Álcool em Água (mg/L) RLD	Aumento na quantidade (%) de Álcool
Amostra 1	42,71 ± 0,19	57,79 ± 0,09	36,73
Amostra 2	43,16 ± 0,20	53,50 ± 0,17	23,24
Amostra 3	43,06 ± 0,18	47,50 ± 0,12	9,46
Amostra 4	42,92 ± 0,17	51,70 ± 0,16	19,18
Amostra 5	42,64 ± 0,12	45,06 ± 0,12	5,40
Amostra 6	42,69 ± 0,13	48,88 ± 0,22	13,11
Amostra 7	42,35 ± 0,20	45,69 ± 0,17	7,15
Amostra 8	41,84 ± 0,13	49,85 ± 0,12	16,97
Amostra 9	41,02 ± 0,13	48,62 ± 0,26	15,79
Amostra 10	39,99 ± 0,10	49,33 ± 0,25	19,43

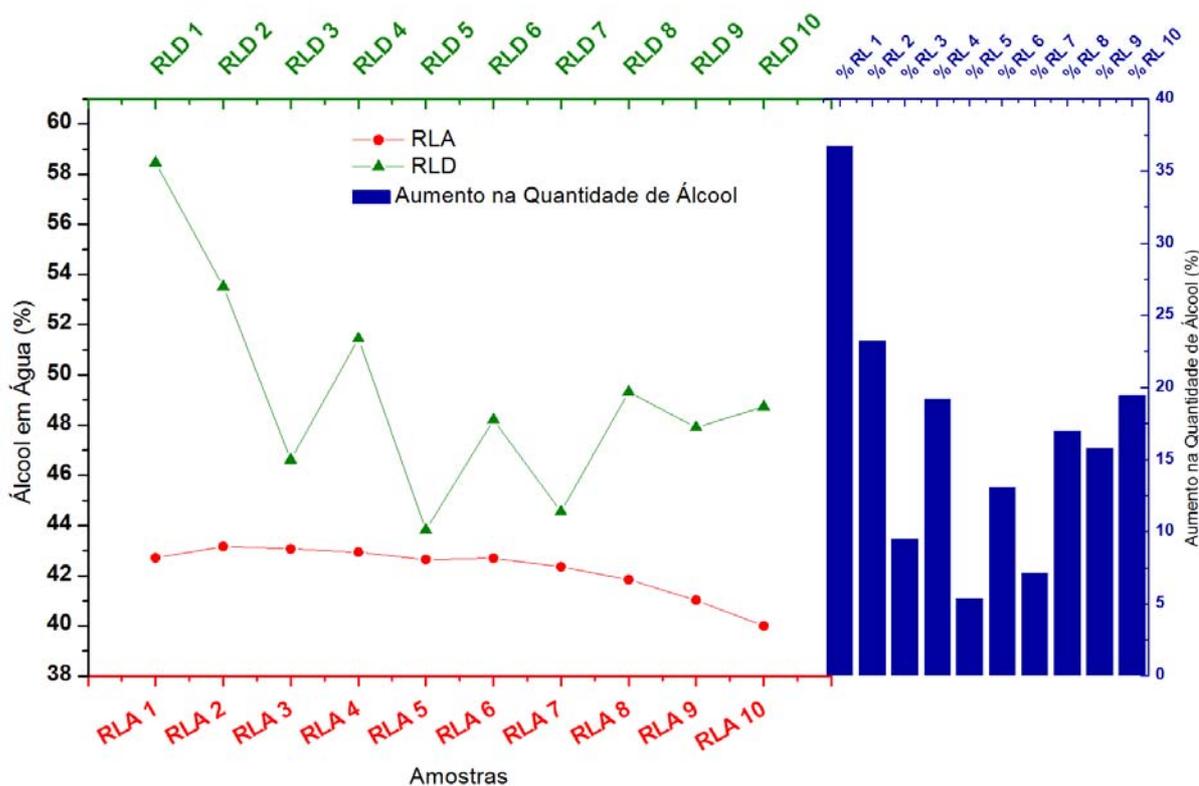


Figura 16. Valores do percentual (%) de álcool no Resíduo Líquido Alimentado (RLA) e no Resíduo Líquido Destilado (RLD) referentes ao segundo teste

vii. Demanda Química de Oxigênio

Os resultados de DQO são mostrados na tabela 8 e na figura 17. Nessa tabela é mostrado o aumento de DQO do Resíduo Líquido Destilado. É de se perguntar: como tratamos um resíduo líquido e ele tem uma DQO maior depois de tratado? Isso se deve ao aumento da concentração de álcool. Os resultados de DQO são bem consistentes quando comparados aos resultados de álcool em água. A princípio, podemos pensar que a solução obtida tem um potencial poluidor maior. Porém se a finalidade do tratamento for o reaproveitamento desse resíduo líquido, é ideal que o mesmo seja mais concentrado em álcool e acabe, por consequência, possuindo maior DQO.

Tabela 8. Resultados de Demanda Química de Oxigênio - DQO (g/L) para Resíduo Líquido Alimentado (RLA) e Resíduo Líquido Destilado (RLD) referentes ao segundo teste

Amostras	DQO (g/L) RLA	DQO (g/L) RLD	Aumento na quantidade (%) de DQO
Amostra 1	693,7 ± 9,43	1065,3 ± 2,36	53,57
Amostra 2	683,7 ± 9,43	995,3 ± 16,50	45,58
Amostra 3	755,3 ± 7,07	1007,0 ± 47,14	33,32
Amostra 4	715,3 ± 11,79	1073,7 ± 14,14	50,10
Amostra 5	763,7 ± 33,00	982,0 ± 30,64	28,58
Amostra 6	797,0 ± 42,43	992,0 ± 35,36	24,47
Amostra 7	797,0 ± 37,71	982,0 ± 2,36	23,21
Amostra 8	783,7 ± 9,43	1012,0 ± 11,79	29,13
Amostra 9	745,3 ± 11,79	1063,7 ± 18,86	42,72
Amostra 10	807,0 ± 14,14	995,3 ± 16,50	23,33

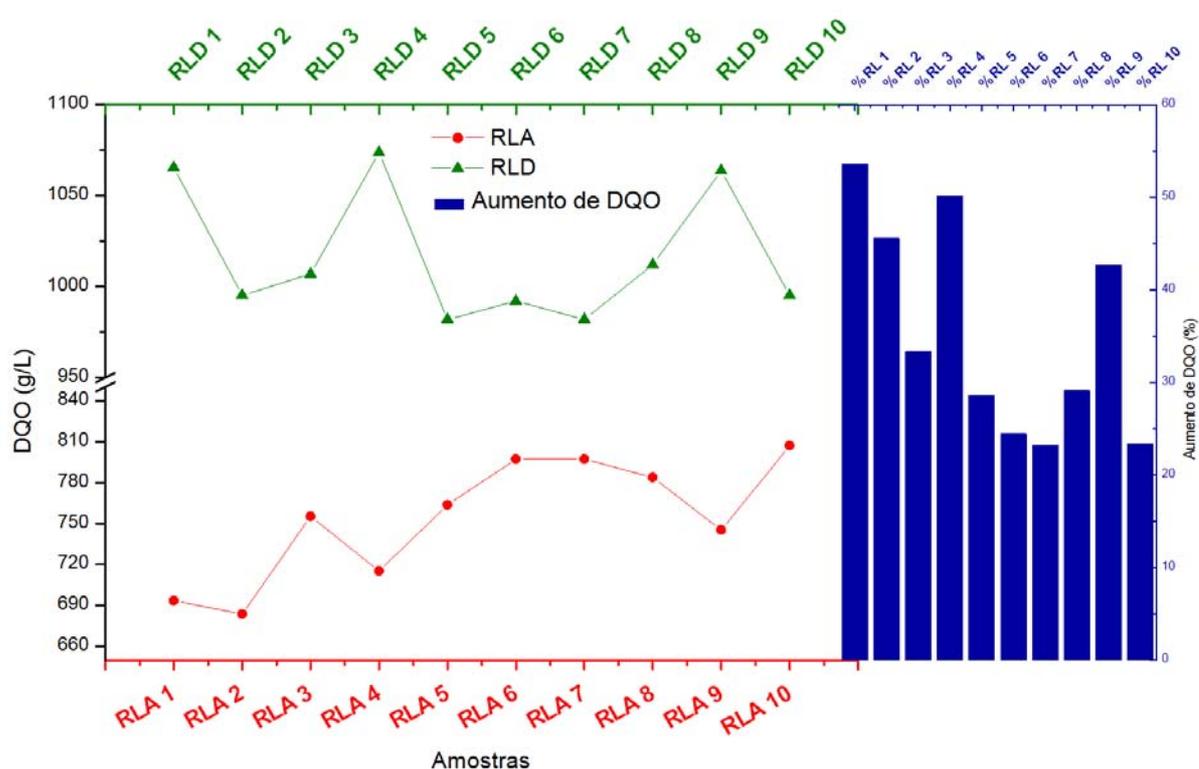


Figura 17. Valores de DQO (em g/L) para Resíduo Líquido Alimentado (RLA) e Resíduo Líquido Destilado (RLD) referentes ao segundo teste

viii. Óleos e Graxas

Os resultados de óleos e graxas constam na tabela 9. De posse desses resultados, é possível dizer que a destilação solar ocasionou alta redução de óleos e graxas, sempre superiores a 90%, como mostrado na figura 18. Percebemos, na figura 18, um comportamento idêntico tanto para o RLA como para o RLD.

Na tabela 9 verificamos valores inferiores a 50 mg/L para RLD, indicando ser esse resíduo passível de lançamento como efluente conforme CONAMA 357/2005 capítulo IV artigo 34 § 4º V.⁶²

Esse resíduo também se enquadra nas regras de descartes em redes coletoras de esgoto do Distrito Federal conforme Decreto Distrital nº 18.328/1997 artigo 161 tabela I ⁶³ que indica valores inferiores a 200 mg/L para lançamento de óleos e graxas.

Tabela 9. Resultados de Óleos e Graxas (mg/L) para Resíduo Líquido Alimentado (RLA) e Resíduo Líquido Destilado (RLD) referentes ao segundo teste

Amostras	Óleos e Graxas (mg/L) RLA	Óleos e Graxas (mg/L) RLD	Eficiência de Redução (%)
Amostra 1	270 ± 23	23,67 ± 4,51	91,23
Amostra 2	359 ± 54	21,67 ± 4,62	93,96
Amostra 3	433 ± 28	33,00 ± 5,29	92,38
Amostra 4	501 ± 7	39,00 ± 6,56	92,22
Amostra 5	646 ± 60	43,00 ± 11,79	93,34
Amostra 6	804 ± 63	43,33 ± 7,77	94,61
Amostra 7	1206 ± 149	65,00 ± 7,00	94,61
Amostra 8	290 ± 15	24,67 ± 4,51	91,49
Amostra 9	542 ± 60	16,67 ± 3,79	96,82
Amostra 10	428 ± 33	13,67 ± 2,08	96,81

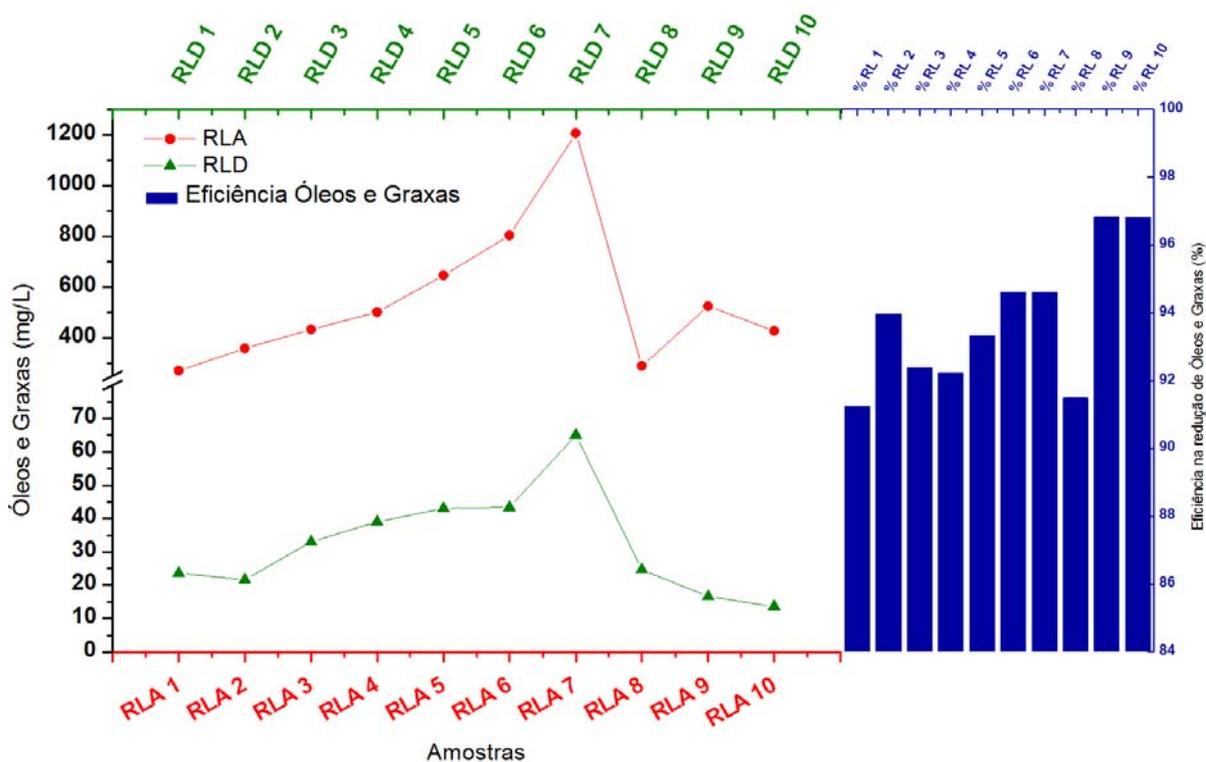


Figura 18. Valores de Óleos e Graxas (em mg/L) para Resíduo Líquido Alimentado (RLA) e Resíduo Líquido Destilado (RLD) referentes ao segundo teste

6.3. Teste com solução contendo Metais

6.3.1. Para efluentes líquidos

Para esse teste foram determinados os parâmetros de Cromo Total, Ferro Total, Cobre Total, Zinco Total, Condutividade e pH, conforme mostrado os resultados nas tabelas 10 e 11. Todos os resultados mostrados são as médias das triplicatas (n=3) realizadas para cada parâmetro, exceto nos parâmetros de condutividade e pH. O intervalo de confiança apresentado é de 90%.

i. Cromo Total, Ferro Total, Cobre Total e Zinco Total

Verificamos valores sempre acima de: 2000 mg/L de cromo e de cobre, 200 mg/L de ferro e 70 mg/L de zinco para os RLA, conforme tabela 10. Já para os RLD obtivemos valores sempre abaixo do limite de detecção para todos os ensaios de metais – o que comprova assim uma eficiência máxima, uma vez que os efluentes sempre apresentaram concentrações não-mensuráveis. Como as eficiências foram

máximas, não houve a necessidade de plotarmos um gráfico comparativo mostrando os resultados dos RLA e RLD e a eficiência do processo.

Tabela 10. Resultados de Cromo Total, Ferro Total, Cobre Total e Zinco Total para os Resíduo Líquido Alimentado (RLA) e Resíduo Líquido Destilado (RLD) referentes ao terceiro teste

Amostras	Cromo Total (mg/L) RLA	Cromo Total (mg/L) RLD	Ferro Total (mg/L) RLA	Ferro Total (mg/L) RLD	Cobre Total (mg/L) RLA	Cobre Total (mg/L) RLD	Zinco Total (mg/L) RLA	Zinco Total (mg/L) RLD
Amostra 1	2220 ± 16	-	234,14 ± 0,34	-	2358 ± 9	-	74,88 ± 0,44	-
Amostra 2	2129 ± 38	< L.D.	210,60 ± 0,90	< L.D.	2535 ± 5	< L.D.	74,25 ± 2,36	< L.D.
Amostra 3	2046 ± 28	< L.D.	202,36 ± 0,90	< L.D.	2239 ± 17	< L.D.	75,73 ± 0,63	< L.D.
Amostra 4	2486 ± 19	< L.D.	209,42 ± 1,89	< L.D.	2750 ± 13	< L.D.	74,67 ± 0,24	< L.D.
Amostra 5	2688 ± 27	< L.D.	205,89 ± 0,68	< L.D.	2230 ± 11	< L.D.	70,44 ± 0,65	< L.D.
Amostra 6	2449 ± 19	< L.D.	207,07 ± 0,34	< L.D.	2346 ± 11	< L.D.	80,81 ± 0,37	< L.D.

L.D. – Limite de detecção dos métodos. Valor de 0,05 mg/L para todos os metais estudados.

ii. Condutividade e pH

Para os resultados de condutividade, conforme tabela 11, observamos um comportamento bem parecido com os parâmetros analisados anteriormente, em que foi comprovada alta eficiência na redução de condutividade entre os RLA e RLD, redução superior a 90% (figura 19). Quando comparamos a condutividade do primeiro teste (com solução sintética de NaCl) com o resultado desse, verificamos que a condutividade ainda se mantém alta. Isso se deve a característica do resíduo líquido testado (resíduo de experimentos de titulações de DQO) ser bastante ácido e ter a presença de ácido sulfúrico, ácido volátil, que no processo de destilação se volatiliza e é arrastado junto com o destilado.

Pela tabela 11 verificamos uma pequena variação no pH entre o RLA e RLD. Isso ocorre devido ao ácido sulfúrico (ácido volátil) presente, ter sido destilado. Para evitar o pH baixo no RLD foi preciso realizar uma neutralização, etapa executada posteriormente ao término dos ensaios.

Tabela 11. Resultados de Condutividade e pH para os Resíduo Líquido Alimentado (RLA) e Resíduo Líquido Destilado (RLD) referentes ao terceiro teste

Amostras	Condutividade ($\mu\text{S/cm}$) RLA	Condutividade ($\mu\text{S/cm}$) RLD	Eficiência de Redução (%)	pH RLA	pH RLD
Amostra 1	20810	-	-	1,38	-
Amostra 2	18980	172,80	99,09	1,51	2,18
Amostra 3	19390	174,70	99,10	1,47	2,14
Amostra 4	19500	173,90	99,11	1,42	2,07
Amostra 5	19500	157,30	99,20	1,33	2,12
Amostra 6	19500	168,40	99,14	1,45	2,11

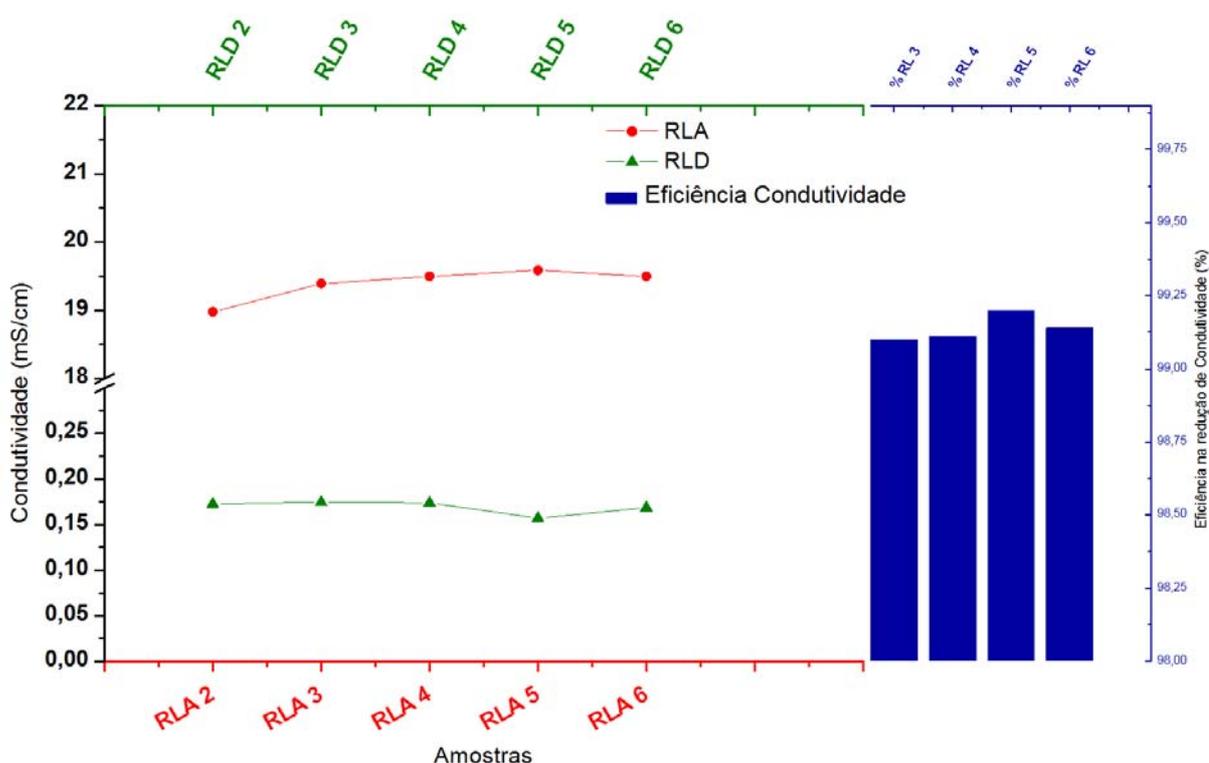


Figura 19. Valores de Condutividade (mS/cm) para os Resíduo Líquido Alimentado (RLA) e Resíduo Líquido Destilado (RLD) referentes ao terceiro teste

6.3.2. Para amostras sólidas

Para as amostras sólidas, extraídas do interior do destilador solar, foram executados os mesmos ensaios realizados para os resíduos líquidos, exceto pH e condutividade. Os resultados mostrados na tabela 12 são as médias das triplicatas (n=3) realizadas para cada parâmetro. O intervalo de confiança apresentado é de 90%. A alta concentração de metais na parte sólida confirma a alta remoção da fase líquida.

Tabela 12. Resultados de Cromo Total, Ferro Total, Cobre Total e Zinco Total para as amostras de sólidos coletadas do Destilador Solar referentes ao terceiro teste

Amostras	Cromo Total (mg/g)	Ferro Total (mg/g)	Cobre Total (mg/g)	Zinco Total (mg/g)
Sólido 1A	80,39 ± 3,33	125,34 ± 1,31	196,34 ± 0,28	113,96 ± 0,78
Sólido 2A	102,21 ± 0,73	126,19 ± 1,49	190,01 ± 0,39	113,51 ± 0,68
Sólido 3A	93,73 ± 0,92	133,91 ± 0,00	193,73 ± 0,97	110,82 ± 1,37
Sólido 4A	91,54 ± 1,15	135,63 ± 0,50	190,57 ± 1,73	111,27 ± 1,35
Sólido 5A	85,00 ± 1,61	141,63 ± 1,49	190,57 ± 0,28	109,93 ± 2,69
Sólido 1B	91,62 ± 1,57	175,03 ± 1,28	206,59 ± 1,94	137,80 ± 0,00
Sólido 2B	96,62 ± 1,88	177,24 ± 1,28	209,47 ± 1,47	172,49 ± 2,00
Sólido 3B	101,63 ± 0,36	166,18 ± 0,00	203,71 ± 0,73	136,64 ± 5,21
Sólido 4B	106,63 ± 4,69	163,97 ± 1,28	205,15 ± 1,94	147,05 ± 1,34
Sólido 5B	99,75 ± 0,36	163,97 ± 1,28	201,79 ± 0,28	143,58 ± 7,07

6.4. Teste com solução contendo Formol

Para esse teste foram determinados os parâmetros de Condutividade e Teor de Formol Livre, conforme mostrado na tabela 13. Para o parâmetro *teor de formol* são mostrados os resultados referentes às médias das triplicatas (n=3). O intervalo de confiança apresentado é de 90%.

Tabela 13. Resultados de Condutividade e do Teor de Formol Livre para o Resíduo Líquido Alimentado (RLA) e Resíduo Líquido Destilado (RLD) referente ao quarto teste

Amostras	Condutividade (μS/cm) RLA	Condutividade (μS/cm) RLD	Eficiência Redução (%)	Teor de Formol Livre (%) RLA	Teor de Formol Livre (%) RLD
Amostra A1	4240	72,50	98,29	3,28 ± 0,13	3,19 ± 0,06
Amostra A2	4210	71,90	98,29	3,40 ± 0,06	3,21 ± 0,02
Amostra A3	4280	87,20	97,96	3,48 ± 0,07	3,30 ± 0,04
Amostra B1	4490	80,90	98,20	3,12 ± 0,00	2,77 ± 0,04
Amostra B2	4450	75,90	98,29	3,06 ± 0,03	2,68 ± 0,04
Amostra B3	4430	94,10	97,88	3,08 ± 0,04	2,79 ± 0,02

i. Condutividade

Os resultados de condutividade observados na tabela 13 apresentam uma redução da ordem de mais de 97% – o que comprova que o tratamento empregado para esse tipo de resíduo possui alto poder de redução do material constituído contaminante (gordura, nitrogênio e fósforo). Na figura 20 fica demonstrado um comparativo entre os resultados de condutividade dos Resíduos Líquidos Alimentados e dos Resíduos Líquidos Destilados para esse teste.

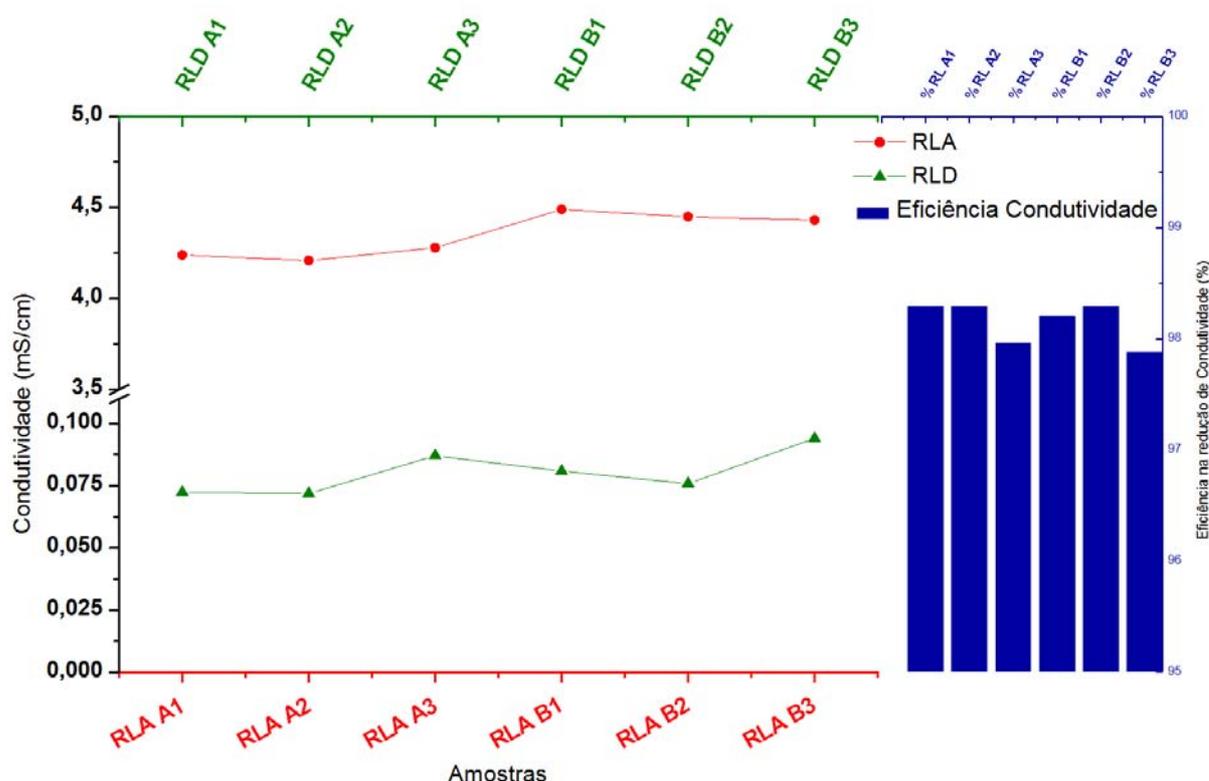


Figura 20. Valores de Condutividade (mS/cm) do Resíduo Líquido Alimentado (RLA) e Resíduo Líquido Destilado (RLD) referentes ao quarto teste

ii. Formol Livre

Os resultados do teor de formol livre presentes da tabela 13, evidenciam pouca variação na concentração de formol entre o RLA e o RLD. Os resultados dos RLD tiveram um pequeno decréscimo com relação aos resultados dos RLA. Essa pequena redução de concentração deve-se a hipótese do formol ser volátil - e ter se volatilizado. Apesar do recipiente de alimentação do resíduo líquido e do recipiente de coleta do destilado estarem vedados, assim como o destilador solar, são possíveis pequenas perdas, por evaporação, para o ambiente, durante o processo de destilação - o que pode ter acarretado esse pequeno decréscimo na quantidade do formol.

Em termos de proposta do trabalho, a solução obtida no final da destilação apresenta concentração em formol livre semelhante à concentração inicial do resíduo líquido que estava na CGRQ – UnB, indicando ser essa solução passível de ser reaproveitada pelo laboratório gerador.

7. CUSTOS DO PROCESSO

Como todo e qualquer processo ambiental, se faz necessário demonstrar custos relativos à sua realização. No processo usado neste trabalho, os maiores custos envolvidos para a realização do projeto estão atrelados à confecção do destilador. Para construção de um destilador do modelo convencional o custo é estimado no quadro 12.

Quadro 12. Custos para confecção de Destilador Solar tipo Convencional
CUSTO DA CONSTRUÇÃO DO DESTILADOR SOLAR (R\$)

Material	Quantidade	Custo Unitário (R\$)	Custo Total (R\$)
MATERIAL PARA O MOLDE			
Madeira compensado de 10mm tamanho 1,60x2,20m	1 peça	65	65
Pregos	200 gramas	2	2
Cola para madeira	500 gramas	9	9
Arco de serra	1 peça	11	11
Lâmina de serra	1 peça	3,8	3,8
Lixa	10 folhas	1,2	12
MATERIAL PARA CONFECÇÃO DA CAIXA			
Manta de Vidro de 450 g/m	9 metros	12	108
Resina + catalisador	4 kg	41	164
Diluyente	4 litros	23	92
Talco Industrial	5 kg	3,9	19,5
Desmoldante	500 mL	12	12
Solvente	1 Litro	5,4	5,4
Espátula	1 peça	8,9	8,9
Rolo antibolhas	1 peça	23,9	23,9
Tinta	1/4 de galão	7,9	7,9
VIDRO PLANO TEMPRADO DE 6mm e 1m			
	1 peça	140	140
CUSTO TOTAL (R\$)			684,4

Como é de praxe, o custo de efluente tratado é dado por m^3 , ou seja, R\$/ m^3 , ou ainda R\$/Litro. Os destiladores solares tipo convencional têm uma vida útil elevada, de 20 anos, e podem tratar um volume grande de efluentes.⁴⁶

Conforme Maluf⁴⁶, um destilador solar usado, em um período de 6 meses ao ano, tem produção aproximada de 5 L por dia. E soma-se a isso um gasto aproximado de 20%, relativos aos custos de manutenção. Podemos indicar um custo de R\$684,40 – mais 20% – resultando em um custo total de R\$ 821,28.

Como poderemos usá-lo por aproximadamente 20 anos, ou seja 3.600 dias (contando apenas 6 meses em cada um dos 20 anos), com média de 5 L por dia de efluente tratado, temos um total de 18.000 L. Isso gera um custo de R\$ 0,05 por L de resíduo líquido tratado ou ainda R\$ 45,60 por m^3 tratado.

Cabe ressaltar que nesse trabalho foram tratados aproximadamente 390 L de resíduos líquidos, somando-se os três diferentes tipos de amostra, com um custo de R\$ 17,78 para todo esse volume tratado. No entanto, se o mesmo volume fosse destinado, para aterro industrial, pela CGRQ - UnB, teria um custo de R\$ 7,00 por kg. Como temos 200 L de solução aquosa com densidade próxima de 0,8, isso perfaz, numa conta grosseira, cerca de 160 kg, mais 190 kg dos outros resíduos, cuja densidade se aproxima da água. Num total teríamos 350 kg de resíduos que seriam destinados a um custo total aproximado de R\$ 2.450,00.

Há de se considerar que mesmo após o processo de tratamento, tivemos ainda uma geração de sólido, para todos os resíduos líquidos, de aproximadamente 6 kg. Os custos para a destinação final desses 6 kg seriam de aproximadamente R\$ 42,00. No total, os custos com o tratamento dos 390 L de resíduos líquidos a partir da destilação solar somariam R\$ 59,78 – o que evidencia uma redução de custos acima de 97% no custo total do tratamento destes resíduos, quadro 13.

Quadro 13. Custos de tratamentos

Custos	Tratamento atual CGRQ –UnB (apenas destinação do resíduo)	Tratamento com destilação solar
Custo com confecção	-	R\$ 684,40
Custo com manutenção	-	R\$ 136,88
Custo para tratar 1 kg de resíduo líquido	R\$ 7,00	R\$ 0,05
Custo extra para tratar 1 kg de resíduo sólido	R\$ 7,00	R\$ 7,00
Custo total para tratar os 350kg deste trabalho	R\$ 2450,00	R\$ 59,78
Redução de custos	97%	

Depois de realizado o tratamento com destilação solar foi possível o reuso de dois dos resíduos estudados: o resíduo contendo álcool e o resíduo contendo formol. Esse reaproveitamento foi comprovado devido à realização de testes pelo Laboratório de Herpetologia (laboratório gerador desse resíduo), seguido de posterior aprovação para reuso.

Já o resíduo contendo metais, após neutralização, pode ser descartado na rede coletora de esgotos domésticos do Distrito Federal.

Com o reaproveitamento dos dois resíduos, álcool e formol, existe um lucro financeiro, com a economia de novas aquisições desses materiais pelo Laboratório de Herpetologia. Isso indica ser ainda menor o custo total do processo de tratamento com uso de destilação solar.

8. CONCLUSÕES

Com relação ao teste inicial, usando uma solução sintética de cloreto de sódio, concluímos que a destilação solar é um processo bastante eficiente para a produção de água para consumo, indicando também ser eficiente na remoção de sais em soluções de resíduos líquidos. Concluímos também que esse teste inicial evidenciou o bom funcionamento do destilador usado.

8.1. Teste com solução contendo Álcool

Concluímos que o tratamento proposto para essa solução, a partir do uso do destilador solar, é eficiente. E o destilado obtido pode ser reaproveitado. Também podemos concluir que esse processo é útil para o tratamento de efluentes que contenham altas concentrações de óleos e graxas, nitrogênio, fósforo e sólidos.

8.2. Teste com solução contendo Metais

As análises para verificar os percentuais de metais nas soluções destiladas mostraram que o processo proposto foi excelente para a remoção de poluentes metálicos. Isso indica que soluções contendo metais são facilmente tratadas por esse processo. Porém, pode-se questionar sobre o material sólido (concentrado) gerado no destilador solar. Na maior parte dos processos que envolvem tratamento de soluções metálicas, é corriqueiro o transporte de fase desse tipo de material – em geral por processos adsortivos. Portanto a destilação solar é muito mais eficiente do que processos adsortivos ou filtrantes, uma vez que o volume de resíduo sólido é mínimo se comparado ao produzido em processos adsortivos ou filtrantes, e que esse resíduo mínimo pode ser mais facilmente reaproveitado para posteriores tratamentos, uma vez que o resíduo gerado contém apenas o metal em estudo, não incorporando outros resíduos (como os materiais adsortivos).

8.3. Teste com solução contendo Formol

As conclusões sobre a efetividade da destilação solar em termos da proposta de tratamento deste resíduo líquido é de grande valia para recuperação desse material, já que o formol (bactericida) pode ser reusado, diminuindo o volume de destinação final desse resíduo líquido e garantindo que ele não seja lançado na rede coletora de esgotos sanitários do Distrito Federal.

8.4. Considerações Finais

Partindo de todos os dados já apresentados, podemos concluir a respeito do processo de tratamento usado neste trabalho:

- O processo de tratamento usado apresentou boa eficiência para tratamento, recuperação e/ou descontaminação dos efluentes escolhidos para estudo;

- O processo tem viabilidade técnica devido à simplicidade do sistema, tanto com relação à montagem, confecção e uso como pela não-necessidade de mão de obra especializada;

- A partir dos resultados, consideramos que é possível tratar uma gama variada de efluentes, assim como uma quantidade apreciável de resíduos líquidos;

- Podemos verificar aqui a possibilidade de esse processo tratar de forma eficiente e adequada os efluentes contendo metais, sem a necessidade do gasto de materiais adsorventes e sem o incremento de produtos químicos;

- Existem perspectivas de viabilidade quanto à tratabilidade de efluentes contendo óleos e graxas, que são considerados materiais de difícil remoção em sistemas convencionais, como os processos biológicos;

- A maior importância com relação a essa técnica está no fato dela ter baixíssimo poder poluidor, já que o impacto desse tipo de tratamento provém, basicamente, do consumo dos materiais para construção do destilador solar;

- O processo é viável para execução em praticamente todo o Brasil, devido ao fato do país ter intensidades de radiações elevadas em todo seu território e de existir poucas diferenças de desempenho da evapotranspiração comparando Brasília e a média de radiação global brasileira;⁶⁷

- O processo é de fácil adequação a outros processos de tratamento de efluentes, além de ser muito apropriado para uso acoplado, sem problemas de compatibilidade nem de maiores adaptações;

- Outro aspecto relevante é o uso seguro do equipamento, sem maiores danos à saúde de quem manuseia o destilador ou de quem executa o processo.

9. PERSPECTIVAS E PROPOSIÇÕES DE ESTUDOS FUTUROS

Durante a realização do projeto surgiram novas idéias e novas possibilidades viáveis de continuidade da pesquisa e do uso deste trabalho como parte integrante de outras pesquisas. Podemos citar as seguintes perspectivas e proposições para estudos futuros:

- O desenvolvimento de uma escala mais ampla para tratamento de vários resíduos líquidos que são enviados a CGRQ - UnB, de modo que os custos de destinação sejam minimizados.

- A confecção de outros destiladores que possam ser mais eficientes e possam demandar maior poder de tratabilidade, tendo vistas ao tratamento do volume de efluentes recebido pela CGRQ - UnB. Para tanto, estudo futuro deve verificar quais os tipos de resíduos catalogados por geradores que podem fazer uso desse método para tratamento. A CGRQ - UnB, em conjunto com o Departamento de Engenharia Mecânica, está desenvolvendo um projeto para construção de destiladores mais eficientes.

- Reaproveitamento do resíduo sólido gerado. No caso de efluentes contendo óleos e graxas, seria importante o reaproveitamento desse material em outros projetos, como fabricação de saponificantes. No caso de efluentes que contenham metais, os mesmos são passíveis de sub-processos para que possam ser reaproveitados, de modo a retornar à forma inicial de sal ou do metal na forma metálica, podendo esses metais ser recuperados e reusados.

- Em casos de efluentes líquidos contendo alta quantidade de sólidos, a perspectiva é adequá-los para o tratamento com destilação solar, realizando um processo preliminar de precipitação com a finalidade de diminuir as concentrações altas de sólidos. Já que altas concentrações de sólidos podem causar perdas de eficiências do processo de tratamento.

- O uso de destiladores solares em série também pode ser considerado uma oportunidade de trabalho futuro. Em casos de tratamentos de resíduos líquidos que necessitem de mais de uma etapa de destilação pode ser desenvolvido o uso de reatores em série.

REFERÊNCIAS

1. Porto, R.L.L.; *Hidrologia Ambiental*, 1ª ed., Editora da Universidade de São Paulo: São Paulo, 1991.
2. Manaham, S. E.; *Environmental Chemistry*, 7ª ed., CRC Press LLC: Boca Raton, 2001.
3. Bellia, V.; *Introdução à Economia do Meio Ambiente*, 1ª ed., Editora IBAMA: Brasília, 1996.
4. Tavares, G.A.; Bendassolli, J.A.; *Quím. Nova* **2005**, 28, 732.
5. Fellenberg, G.; *Introdução aos problemas da poluição ambiental*, 1ª ed., Editora da Universidade de São Paulo: São Paulo, 1980.
6. Samee, M. A.; Mirza, U. K.; Majeed, T.; Ahmad, N.; *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **2007**, 11, 543.
7. Shereve, R. N.; Brink J. A.; *Indústrias de Processos Químicos*, 4ª ed., Editora Guanabara: São Paulo, 1997.
8. Freire, R.S.; Pelegrini, R.; Kubota, L.T.; Duran, N.; *Quím. Nova* **2000**, 23, 504.
9. Mendes, A. A.; Castro, H. F.; *Brazilian Archives of Biology and Technology* **2005**, 48, 135.
10. Ribeiro, A. C. P.; Conceição, J. C.; *Resumos^{um} do VI Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica*, Campinas, Brasil, 2005.
11. Chernicharo, C. A. L.; *Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias. Vol. 5: Reatores Anaeróbios*, 1ª ed., DESA-UFMG: Minas Gerais, 1997.
12. Georgiou, D.; Melidis, P.; Aivasidis, A.; Gimoubhopoulos, K.; *Dyes Pigm.* **2002**, 52, 69.
13. http://www.idswater.co.in/water/india/all_region_paper_directory.html, acessada em novembro de **2007**.
14. Huang, C. P.; Dong, C.; Tang, Z.; *Waste Management* **1993**, 13, 361.
15. Santos, R. C. O.; Filho, O. B.; Giordano, G.; *Engenharia Sanitária Ambiental* **2005**, 10, 185.
16. Moitinho, M. L. R.; Ferreira, C. S.; *Revista do Instituto de Medicina Tropical de São Paulo* **1994**, 36, 153.
17. Di Bernardo, L.; Brandão, C.C.S.; Heller, L.; *Tratamento de águas de abastecimento por filtração em múltiplas etapas. Prosab – Programa de Pesquisa em Saneamento Básico*, 1ª ed., Editora ABES: Rio de Janeiro, 1999.
18. Von Sperling, M.; *Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias. Vol. 4: Lodos Ativados*, 1ª ed., DESA-UFMG: Minas Gerais, 1996.
19. Magalhães, M. A.; Matos, A. T.; Denículti, W.; Tinoco, I. F. F.; *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* **2006**, 10, 472.
20. Kurniawan, T.A.; Chan, G.Y.S.; Lo, W.H.; Babel, S.; *Chem. Eng. J.* **2006**, 118, 83.
21. De Julio, M.; Neves, E. F. A.; Trofino, J. C.; Di Bernardo, L.; *Engenharia Sanitária Ambiental* **2006**, 11, 260.
22. Basílio, M. S.; Friese, K.; Lena, J.C.; Júnior, H.A.N.; Roeser, H.M.P.; *Quim. Nova* **2005**, 28, 822.
23. Kunz, A.; Peralta-Zamora, P.; Moraes, S. G.; Duran, N.; *Quim. Nova* **2002**, 25, 78.
24. Babel, S.; Kurniawan, T. A. *J. Hazard. Mater. B* **2003**, 97, 219.
25. Otero, M.; Rozada, F.; Calvo, L.F.; García, A.I.; Morán, A.; *Dyes Pigm.* **2003**, 57, 55.

26. Rocha, W. D.; Luz, J. A. M.; Lena, J. C.; Romero, O. B.; *Revista Escola de Minas* **2006**, 59, 409.
27. Rodrigues, R.F.; Trevenzoli, R.L.; Santos, L.R.G.; Leão, V.A.; Botaro, V.R.; *Engenharia Sanitária Ambiental* **2006**, 11, 21.
28. Dal Bosco, S. M.; Jimenez, R. S.; Carvalho, W. A.; *Eclética Química* **2004**, 29,47.
29. Brião, V. B.; Tavares, C. R. G.; *Engenharia Sanitária Ambiental* **2007**, 12, 134.
30. Junior, A.O.; Owsky, U.P.; *Engenharia Sanitária Ambiental* **2007**, 12, 305.
31. Leitão, M. M. V. B. R.; Oliveira, G. M.; Leitão, T. J. V.; *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* **2007**, 11, 585.
32. Nunes, I. L.; Mercadante, A. Z.; *Ciência e Tecnologia de Alimentos* **2004**, 24, 440.
33. Ferreira, A. A.; Neto, F. R. A.; *Quim. Nova* **2005**, 28, 478.
34. Vaz de Pina, A.V.; *Esp. Monografia*, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil, 2004.
35. Nassar, Y. F.; Yousif, S. A.; Salem, A. A.; *Desalination* **2007**, 209, 177.
36. <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.asp>, acessada em julho de 2008.
37. Zweibel, K.; Manson, J.; Fthenakis, V.; *Scientific American Brasil* **2008**, 69, 34.
38. Rodríguez, S. M.; Gálvez, J. B.; Rubio, M. I. M.; Ibáñez, P. F.; Padilha, D. A.; Pereira, M. C.; Mendes, J. F.; Oliveira, J. C.; *Solar Energy* **2004**, 77, 513.
39. Abdel-Rehim, Z. S.; Lasheen, A.; *Renewable Energy* **2005**, 30, 1955.
40. Ayav, P. I.; Atagündüz, G.; *Desalination* **2007**, 208, 169.
41. Duffie, J. A.; Beckman, W. A.; *Solar Engineering of Thermal Processes*, Editora J. Wiley: New York, 1980.
42. Al-Hayek, I.; Badran, O. O.; *Desalination* **2004**, 169, 121.
43. Abu-Arabi, M.; Zurigat, Y.; *Desalination* **2005**, 172, 137.
44. Bezerra, A. M.; *Aplicações Térmicas da Energia Solar*, 3ª ed., Editora Universitária: João Pessoa, **1998**.
45. <http://www.builditsolar.com/Projects/Cooking/SOLRSTIL.HTM>, acessada em janeiro de 2008.
46. Maluf, A. P.; *Esp. Monografia*, Universidade Federal de Lavras, Brasil, 2005.
47. Voropoulos, K.; Mathioulakis, E.; Belessiotis, V.; *Desalination* **2001**, 138, 103.
48. Ghoneyem, A.; Ileri, A.; *Desalination* **1997**, 114, 37.
49. Pereira, M. C.; Mendes, J. F.; Horta, P.; Korovessis, N.; *Desalination* **2007**, 211, 222.
50. Tanaka, H.; Nakatake, Y.; *Desalination* **2006**, 197, 205.
51. Toyama, S.; Murase, K.; *Desalination* **2004**, 169, 61.
52. Tanaka, H.; Nakatake, Y.; *Desalination* **2006**, 186, 299.
53. Tamimi, A.; *Solar and Wind Technology* **1987**, 4, 443.
54. El-Swify, M. E.; Metias, M. Z.; *Renewable Energy* **2002**, 26, 531.
55. El-Bahi, A.; Iran, D.; *Renewable Energy* **1999**, 17, 509.
56. Malik, M. A. S.; Tiwari, G. N.; Kumar, A.; Sodha, M. S.; *Solar Distillation*, Pergamon Press Ltd., UK, **1982**.
57. Singh, A. K.; Tiwari, G. N.; *Applied Thermal Engineering*. **1993**, 18, 1161.
58. Al-Hinai, H.; Al-Nassri, M. S.; Jubran, B. A.; *Desalination* **2002**, 150, 75.
59. Scrivani, A.; El Asmaar, T.; Bardi, U.; *Desalination* **2007**, 206, 485.
60. Potoglou, D.; Kouzeli-Katsiri, A.; Haralambopoulos, D.; *Renewable Energy* **2003**, 29, 569.

61. Imbroisi, D.; Guarita-Santos, A. J. M.; Barbosa, S. S.; Shintaku, S. F.; Monteiro, H. J.; Ponce, G. A. E.; Furtado, J. G.; Tinoco, C. J.; Mello, D. C.; Machado, P. F. L.; *Quim. Nova* **2006**, 29, 404.
62. Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA número 357, de 17 de março de 2005.
63. Decreto Distrital número 18.328 de 18 de junho de 1997.
64. Norma Brasileira ABNT – NBR – 1007 – Amostragem de Resíduos Sólidos, de 30 de novembro de 2004.
65. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 20th Edition.
66. Norma Brasileira ABNT – NBR – 9765 – Determinação do Teor de Formol Livre em Resinas Fenólicas para Fundição, de março 1987.
67. Dornelas, K.D.S; Silva, C.L.; Oliveira, C.A.S.; *Pesquisa Agropecuária Brasileira* **2006**, 41, 8.

ANEXO 1 – Resolução CONAMA 357/2005

...

CAPÍTULO III

DAS CONDIÇÕES E PADRÕES DE QUALIDADE DAS ÁGUAS

Seção I

Das Disposições Gerais

Art. 7º Os padrões de qualidade das águas determinados nesta Resolução estabelecem limites individuais para cada substância em cada classe.

Parágrafo único. Eventuais interações entre substâncias, especificadas ou não nesta Resolução, não poderão conferir às águas características capazes de causar efeitos letais ou alteração de comportamento, reprodução ou fisiologia da vida, bem como de restringir os usos preponderantes previstos, ressalvado o disposto no § 3º do art. 34, desta Resolução.

Art. 8º O conjunto de parâmetros de qualidade de água selecionado para subsidiar a proposta de enquadramento deverá ser monitorado periodicamente pelo Poder Público.

§ 1º Também deverão ser monitorados os parâmetros para os quais haja suspeita da sua presença ou não conformidade.

§ 2º Os resultados do monitoramento deverão ser analisados estatisticamente e as incertezas de medição consideradas.

§ 3º A qualidade dos ambientes aquáticos poderá ser avaliada por indicadores biológicos, quando apropriado, utilizando-se organismos e/ou comunidades aquáticas.

§ 4º As possíveis interações entre as substâncias e a presença de contaminantes não listados nesta Resolução, passíveis de causar danos aos seres vivos, deverão ser investigadas utilizando-se ensaios ecotoxicológicos, toxicológicos, ou outros métodos cientificamente reconhecidos.

§ 5º Na hipótese dos estudos referidos no parágrafo anterior tornarem-se necessários em decorrência da atuação de empreendedores identificados, as despesas da investigação correrão as suas expensas.

§ 6º Para corpos de água salobras continentais, onde a salinidade não se dê por influência direta marinha, os valores dos grupos químicos de nitrogênio e fósforo serão os estabelecidos nas classes correspondentes de água doce.

Art. 9º A análise e avaliação dos valores dos parâmetros de qualidade de água de que trata esta Resolução serão realizadas pelo Poder Público, podendo ser utilizado laboratório próprio, conveniado ou contratado, que deverá adotar os procedimentos de controle de qualidade analítica necessários ao atendimento das condições exigíveis.

§ 1º Os laboratórios dos órgãos competentes deverão estruturar-se para atenderem ao disposto nesta Resolução.

§ 2º Nos casos onde a metodologia analítica disponível for insuficiente para quantificar as concentrações dessas substâncias nas águas, os sedimentos e/ou biota aquática poderão ser investigados quanto à presença eventual dessas substâncias.

Art. 10. Os valores máximos estabelecidos para os parâmetros relacionados em cada uma das classes de enquadramento deverão ser obedecidos nas condições de vazão de referência.

§ 1º Os limites de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), estabelecidos para as águas doces de classes 2 e 3, poderão ser elevados, caso o estudo da capacidade de autodepuração do corpo receptor demonstre que as concentrações mínimas de oxigênio dissolvido (OD) previstas não serão desobedecidas, nas condições de vazão de referência, com exceção da zona de mistura.

§ 2º Os valores máximos admissíveis dos parâmetros relativos às formas químicas de nitrogênio e fósforo, nas condições de vazão de referência, poderão ser alterados em decorrência de condições naturais, ou quando estudos ambientais específicos, que considerem também a poluição difusa, comprovem que esses novos limites não acarretarão prejuízos para os usos previstos no enquadramento do corpo de água.

§ 3º Para águas doces de classes 1 e 2, quando o nitrogênio for fator limitante para eutrofização, nas condições estabelecidas pelo órgão ambiental competente, o valor de nitrogênio total (após oxidação) não deverá ultrapassar 1,27 mg/L para ambientes lênticos e 2,18 mg/L para ambientes lóticos, na vazão de referência.

§ 4º O disposto nos §§ 2º e 3º não se aplica às baías de águas salinas ou salobras, ou outros corpos de água em que não seja aplicável a vazão de referência, para os quais deverão ser elaborados estudos específicos sobre a dispersão e assimilação de poluentes no meio hídrico.

Art. 11. O Poder Público poderá, a qualquer momento, acrescentar outras condições e padrões de qualidade, para um determinado corpo de água, ou torná-los mais restritivos, tendo em vista as condições locais, mediante fundamentação técnica.

Art. 12. O Poder Público poderá estabelecer restrições e medidas adicionais, de caráter excepcional e temporário, quando a vazão do corpo de água estiver abaixo da vazão de referência.

Art. 13. Nas águas de classe especial deverão ser mantidas as condições naturais do corpo de água.

Seção II

Das Águas Doces

Art. 14. As águas doces de classe 1 observarão as seguintes condições e padrões:

I - condições de qualidade de água:

- a) não verificação de efeito tóxico crônico a organismos, de acordo com os critérios estabelecidos pelo órgão ambiental competente, ou, na sua ausência, por instituições nacionais ou internacionais renomadas, comprovado pela realização de ensaio ecotoxicológico padronizado ou outro método cientificamente reconhecido.
- b) materiais flutuantes, inclusive espumas não naturais: virtualmente ausentes;
- c) óleos e graxas: virtualmente ausentes;
- d) substâncias que comuniquem gosto ou odor: virtualmente ausentes;
- e) corantes provenientes de fontes antrópicas: virtualmente ausentes;
- f) resíduos sólidos objetáveis: virtualmente ausentes;
- g) coliformes termotolerantes: para o uso de recreação de contato primário deverão ser obedecidos os padrões de qualidade de balneabilidade, previstos na Resolução CONAMA no 274, de 2000. Para os demais usos, não deverá ser excedido um limite de 200 coliformes termotolerantes por 100 mililitros em 80% ou mais, de pelo menos 6 amostras, coletadas durante o período de um ano, com frequência bimestral. A E. Coli poderá ser determinada em substituição ao parâmetro coliformes termotolerantes de acordo com limites estabelecidos pelo órgão ambiental competente;
- h) DBO 5 dias a 20°C até 3 mg/L O₂;
- i) OD, em qualquer amostra, não inferior a 6 mg/L O₂;
- j) turbidez até 40 unidades nefelométrica de turbidez (UNT);
- l) cor verdadeira: nível de cor natural do corpo de água em mg Pt/L; e
- m) pH: 6,0 a 9,0.

II - Padrões de qualidade de água:

III - Nas águas doces onde ocorrer pesca ou cultivo de organismos, para fins de consumo intensivo, além dos padrões estabelecidos no inciso II deste artigo, aplicam-se os seguintes padrões em substituição ou adicionalmente:

Art 15. Aplicam-se às águas doces de classe 2 as condições e padrões da classe 1 previstos no artigo anterior, à exceção do seguinte:

I - não será permitida a presença de corantes provenientes de fontes antrópicas que não sejam removíveis por processo de coagulação, sedimentação e filtração convencionais;

II - coliformes termotolerantes: para uso de recreação de contato primário deverá ser obedecida a Resolução CONAMA no 274, de 2000. Para os demais usos, não deverá ser excedido um limite de 1.000 coliformes termotolerantes por 100 mililitros em 80% ou mais de pelo menos 6 (seis) amostras coletadas durante o período de um ano, com frequência bimestral. A E. coli poderá ser determinada em substituição ao parâmetro coliformes termotolerantes de acordo com limites estabelecidos pelo órgão ambiental competente;

III - cor verdadeira: até 75 mg Pt/L;

IV - turbidez: até 100 UNT;

V - DBO 5 dias a 20°C até 5 mg/L O₂;

VI - OD, em qualquer amostra, não inferior a 5 mg/L O₂;

VII - clorofila a: até 30 µg/L;

VIII - densidade de cianobactérias: até 50000 cel/mL ou 5 mm³/L; e,

IX - fósforo total:

a) até 0,030 mg/L, em ambientes lênticos; e,

b) até 0,050 mg/L, em ambientes intermediários, com tempo de residência entre 2 e 40 dias, e tributários diretos de ambiente lêntico.

Art. 16. As águas doces de classe 3 observarão as seguintes condições e padrões:

I - condições de qualidade de água:

a) não verificação de efeito tóxico agudo a organismos, de acordo com os critérios estabelecidos pelo órgão ambiental competente, ou, na sua ausência, por instituições nacionais ou internacionais renomadas, comprovado pela realização de ensaio ecotoxicológico padronizado ou outro método cientificamente reconhecido;

b) materiais flutuantes, inclusive espumas não naturais: virtualmente ausentes;

c) óleos e graxas: virtualmente ausentes;

- d) substâncias que comuniquem gosto ou odor: virtualmente ausentes;
- e) não será permitida a presença de corantes provenientes de fontes antrópicas que não sejam removíveis por processo de coagulação, sedimentação e filtração convencionais;
- f) resíduos sólidos objetáveis: virtualmente ausentes;
- g) coliformes termotolerantes: para o uso de recreação de contato secundário não deverá ser excedido um limite de 2500 coliformes termotolerantes por 100 mililitros em 80% ou mais de pelo menos 6 amostras, coletadas durante o período de um ano, com frequência bimestral.

Para dessedentação de animais criados confinados não deverá ser excedido o limite de 1000 coliformes termotolerantes por 100 mililitros em 80% ou mais de pelo menos 6 amostras, coletadas durante o período de um ano, com frequência bimestral. Para os demais usos, não deverá ser excedido um limite de 4000 coliformes termotolerantes por 100 mililitros em 80% ou mais de pelo menos 6 amostras coletadas durante o período de um ano, com periodicidade bimestral. A E. Coli poderá ser determinada em substituição ao parâmetro coliformes termotolerantes de acordo com limites estabelecidos pelo órgão ambiental competente;

- h) cianobactérias para dessedentação de animais: os valores de densidade de cianobactérias não deverão exceder 50.000 cel/mL, ou 5mm³/L;
- i) DBO 5 dias a 20°C até 10 mg/L O₂;
- j) OD, em qualquer amostra, não inferior a 4 mg/L O₂;
- l) turbidez até 100 UNT;
- m) cor verdadeira: até 75 mg Pt/L; e,
- n) pH: 6,0 a 9,0.

II - Padrões de qualidade de água:

Art. 17. As águas doces de classe 4 observarão as seguintes condições e padrões:

- I - materiais flutuantes, inclusive espumas não naturais: virtualmente ausentes;
- II - odor e aspecto: não objetáveis;
- III - óleos e graxas: toleram-se iridescências;
- IV - substâncias facilmente sedimentáveis que contribuam para o assoreamento de canais de navegação: virtualmente ausentes;
- V - fenóis totais (substâncias que reagem com 4 - aminoantipirina) até 1,0 mg/L de C₆H₅OH;

VI - OD, superior a 2,0 mg/L O₂ em qualquer amostra; e,

VII - pH: 6,0 a 9,0.

...

ANEXO 2 – Decreto Distrital nº 18.328/1997

...

SEÇÃO 1

DOS PADRÕES DE EMISSÃO EM COLETORES PÚBLICOS

Art. 147 – É proibido o lançamento no sistema coletor público de esgotos sanitários de:

- a) substâncias que, em razão de sua qualidade ou quantidade, são capazes de causar incêndio ou explosão, ou serem nocivas de qualquer outra maneira na operação e manutenção dos sistemas de esgoto como, por exemplo: gasolina, óleos, solventes e tintas;
- b) substâncias que, por si ou por interação com outros despejos, causem prejuízo ao bem público, risco à vida ou prejudiquem a operação e manutenção dos sistemas de esgotos;
- c) substâncias tóxicas, em quantidades que interfiram em processos biológicos de tratamentos de esgotos ou que prejudiquem a manutenção da vida aquática e os usos previsto para o corpo receptor;
- d) materiais que causem obstrução na rede coletora ou outra interferência na própria operação do sistema de esgotos como, por exemplo: cinza, areia, metais, vidro, madeira, pano, lixo, asfalto, cera e estopa;
- e) águas pluviais em qualquer quantidade.

Parágrafo Único: As águas pluviais deverão ser canalizadas para as galerias coletoras específicas ou lançadas na via pública.

Art. 148 – Os despejos de qualquer fonte poluidora somente poderão ser lançados no sistema coletor público de esgotos, se obedecerem, além das características do esgoto doméstico apresentadas na Tabela I e o disposto no Art. 147, os limites estabelecidos pela tabela II bem como as disposições da Resolução nº 357, de 2005, do CONAMA.

TABELA I – CARACTERÍSTICAS DO ESGOTO DOMÉSTICO PARA O DISTRITO FEDERAL

Constituintes	Concentração (mg/L)	
	Média	Máxima
Sólidos Totais	450	810
Sólidos Dissolvidos	150	270
Sólidos Suspensos	300	540
Sólidos Suspensos Voláteis	250	450
DBO	300	540
DQO	450	810
Nitrogênio Total	50	90
Nitrogênio Orgânico	15	27
Nitrogênio Amoniacal	35	63
Nitrito	0	0
Nitrato	0	0
Fósforo Total	6	11
Cloreto	50	90
Graxas	300	540

TABELA II – EFLUENTES LÍQUIDOS INDUSTRIAIS – PARÂMETROS BÁSICOS

Parâmetro	Unidade de Medida	Limite Máximo
pH	-	6 a 10
Temperatura	°C	40
Sólidos Sedimentáveis	mL/L	20
Óleos e Graxas	mg/L	150
Vazão Máxima	L/s	1,5 Vazão Média Horária
Arsênio Total	mg/L	1,5
Cádmio Total	mg/L	1,5
Chumbo Total	mg/L	1,5
Cianeto	mg/L	0,2
Cobre Total	mg/L	1,5
Cromo Hexavalente	mg/L	0,5
Cromo Total	mg/L	5,0
Surfactantes	mg/L	5,0
Estanho Total	mg/L	4,0
Fenol	mg/L	5,0
Ferro Solúvel (Fe ²⁺)	mg/L	15,0
Fluoreto	mg/L	10,0
Mercúrio Total	mg/L	1,5
Níquel Total	mg/L	2,0
Prata Total	mg/L	1,5
Selênio Total	mg/L	1,5
Sulfato	mg/L	1000,0
Sulfeto	mg/L	1,0
Zinco Total	mg/L	5,0

...