



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PROTÓTIPO DE UM FOTORREATOR SOLAR E USO DO PROCESSO FOTO-
FENTON NO TRATAMENTO DO LIXIVIADO DO ATERRO SANITÁRIO
METROPOLITANO DE JOÃO PESSOA/PB

NATHÁLIA AQUINO DE CARVALHO

JOÃO PESSOA – PB
AGOSTO – 2014

NATHÁLIA AQUINO DE CARVALHO

PROTÓTIPO DE UM FOTORREATOR SOLAR E USO DO
PROCESSO FOTO-FENTON NO TRATAMENTO DO LIXIVIADO DO
ATERRO SANITÁRIO METROPOLITANO DE JOÃO PESSOA/PB

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação do Curso de Graduação em
Engenharia Ambiental da Universidade
Federal da Paraíba como um dos requisitos
para a obtenção do título de Bacharela em
Engenharia Ambiental.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Elisângela Maria
Rodrigues Rocha.

JOÃO PESSOA – PB

AGOSTO – 2014

257p Carvalho, Nathália Aquino de

Protótipo de um fotorreator solar e uso do processo foto-Fenton no tratamento do lixiviado do aterro sanitário metropolitano de João Pessoa/PB. / Nathália Aquino de Carvalho. – João Pessoa, 2014.

53f. il.:

Prof^ª. Dr^ª. Elisângela Maria Rodrigues Rocha.

Monografia (Bacharelado em Engenharia Ambiental) - Campus I - UFPB / Universidade Federal da Paraíba.

1. Foto-Fenton solar 2. Fotorreator solar 3. Lixiviado de aterro sanitário I. Título.

BS/CT/UFPB

CDU: 504(043)

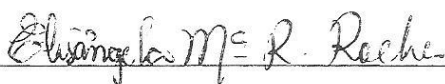
NATHÁLIA AQUINO DE CARVALHO

PROTÓTIPO DE UM FOTORREATOR SOLAR E USO DO PROCESSO FOTO-
FENTON NO TRATAMENTO DO LIXIVIADO DO ATERRO SANITÁRIO
METROPOLITANO DE JOÃO PESSOA/PB

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Coordenação do Curso de
Graduação em Engenharia Ambiental da
Universidade Federal da Paraíba como um
dos requisitos para a obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Ambiental.

Aprovada em: 22 / 08 / 2014 .

BANCA EXAMINADORA



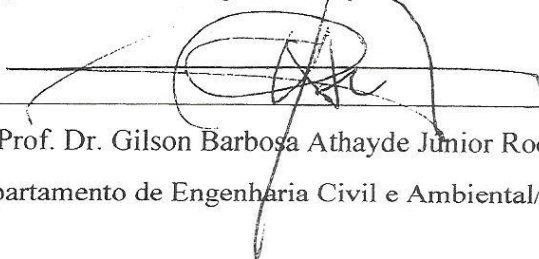
Prof.^a. Dr.^a. Elisângela Maria Rodrigues Rocha

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental/UFPB



Prof. Dr. Rênio Felix de Sena

Departamento de Engenharia Química/UFPB



Prof. Dr. Gilson Barbosa Athayde Junior Rocha

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental/UFPB

AGRADECIMENTOS

À minha mãe, Rebeca, por todo amor que tem por mim, por toda paciência que teve para me ensinar os valores da vida, e por todo o esforço despendido para me proporcionar um ambiente confortável para que eu pudesse focar nos meus estudos.

Ao meu pai, Marcus, pelo carinho e apoio.

Aos meus irmãos, Marcus e Rafael, pelos muitos momentos de descontração, risadas, conversas instigantes. Por me fazerem realizar que a curiosidade é a chave do aprendizado, e que, quanto mais buscamos entender, mais teremos o que estudar.

À minha avó, Francisca Teresa Montenegro de Aquino, por todas as histórias contadas que abriram os meus olhos para a grandeza do mundo, por todo o incentivo à minha educação, e pelo carinho e dedicação que teve por mim durante o tempo em que esteve presente em minha vida, a ela sou eternamente grata.

Agradeço às minhas queridas amigas Amanda Alves, Carla Braga, Gabrielle Patrício, Marcella Sarmento, Laryssa Maia, Rayane Vieira, Rebeca Peixoto e Fernanda Cavalcante, por me mostrarem o quão grandioso é o poder da amizade, se fazendo sempre presente ao meu lado em qualquer situação.

Agradeço especialmente às grandes amigas e companheiras de curso Lucila Araújo, Samara Fernandes e Roselane Melo, porque sem elas os meus dias na UFPB não teriam o mesmo brilho. Seguimos juntas nessa jornada acadêmica e, sem dúvidas, sem o incentivo e sorriso delas esse percurso teria sido muito mais difícil.

Ao Laboratório de Energia Solar (LES) e ao Laboratório de Saneamento da UFPB, pela parceria no projeto de estudo.

Ao professor Rodrigo Ronelli D. de Andrade – Campus Bananeiras – UFPB.

Ao CNPq pela concessão das bolsas de Iniciação Científica aos alunos do curso de Engenharia Ambiental da UFPB.

A todos os professores do curso, por me engrandecerem tanto pessoal quanto profissionalmente.

Agradeço aos amigos da universidade, que compartilharam os prazeres e dificuldades desta jornada.

Finalmente, agradeço à minha orientadora e amada amiga Prof^a. Dr^a. Elisângela Maria Rodrigues Rocha, por me acolher como pupila na vida de pesquisadora e por compartilhar suas vivências e conhecimentos. Ainda, por me querer bem como uma irmã e sempre estar disposta a me ajudar e aconselhar com todo o seu carinho quando fosse preciso.

*“Para criar deve-se existir uma força
dinâmica, e que força é mais potente que o
amor?”*

(Igor Stravinsky)

RESUMO

O presente trabalho objetivou estudar a utilização do processo foto-Fenton solar e a construção de um fotorreator para o tratamento do lixiviado do Aterro Sanitário Metropolitano de João Pessoa (ASMJP). Caracterizou-se o referido efluente e testou-se o processo foto-Fenton solar em escala de bancada, com um Jar-Test, a fim de determinar a eficiência do processo através da redução da cor por meio do espectro de absorbância e do número de cor (NC); e da remoção de matéria orgânica através da Demanda Química de Oxigênio (DQO). Experimentou-se a adição de peróxido de hidrogênio em uma única dose e em etapas, a cada 30 minutos. Além disso, dimensionou-se um fotorreator solar em escala piloto a partir das equações descritas por Oommen e Jayaraman (2001). Os resultados mostraram que, com a adição do H_2O_2 em uma só dose no início do processo, houve redução da DQO de 54-94%, com o pico ocorrendo após 1,5h do processo foto-Fenton solar; já no segundo teste, com adição de H_2O_2 a cada 30 minutos, obteve-se remoção entre 25-63%, sendo a máxima após 1h de experimento. Os melhores resultados em termos de descoloração foram obtidos após 2 h de fotocatalise, em que as amostras coletadas apresentaram bandas de absorbância variando entre 480nm a 390nm. De acordo com o cálculo do NC, os percentuais de remoção do foto-Fenton 1 variaram de 35-68%, e o do foto-Fenton 2 de 54-64%. Experimentos realizados no fotorreator solar elaborado, e que obtiveram êxito na remoção de DQO e cor, comprovam o sucesso no dimensionamento e construção do equipamento.

Palavras-chave: Foto-Fenton solar. Fotorreator solar. Lixiviado de aterro sanitário.

ABSTRACT

This study investigated the use of the solar photo-Fenton process and the construction of a photoreactor for the treatment of the leachate from the Metropolitan Sanitary Landfill of João Pessoa (ASMJP). The effluent was physico-chemically characterized, and the solar photo-Fenton method was tested in a bench scale with a Jar Test in order to determine the efficiency of the process. This was done by reducing the color of the liquid via absorbance spectrum and color number (CN), and the removal of organic material by Chemical Oxygen Demand (COD). Experimentations also included the addition of hydrogen peroxide in a single dose and in steps (every 30 minutes). Furthermore, a pilot scale solar photoreactor was dimensioned using the equations described by Jayaraman and Oommen (2001). The results showed that there was a COD removal of 54-94% when adding H_2O_2 in a single dose at the beginning of the process, with the peak occurring after 1.5h of the solar photo-Fenton process; in the second test, when H_2O_2 was added every 30 minutes, a removal between 25-63% was achieved; 63% being the maximum value obtained after 1h of experiment. The best results in terms of discoloration were attained after 2h of photocatalysis, when the collected samples showed absorption bands ranging between 480nm to 390nm. According to the CN calculation, the color percent removal ranged from 35-68% for photo-Fenton 1 and 54-64% for photo-Fenton 2. Experiments conducted in the solar photoreactor were successful in removing COD and coloration, proving the success of the equipment's dimensions and construction.

Keywords: Solar photo-Fenton. Solar photoreactor. Sanitary landfill leachate.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Remoção relativa de DQO dos experimentos feitos com radiação solar e com lâmpadas germicidas.....	24
Figura 2 – Detalhe da superfície refletora e do absorvedor tubular de um reator CPC.....	25
Figura 3 – Protótipo de CPC (100 m ²) para fotocatalise instalado em uma fábrica na Espanha.	26
Figura 4 - Equipamento Jar-Test. Amostras do lixiviado sob influência da fotocatalise homogênea por foto-Fenton (as duas primeiras, da esquerda para a direita).	31
Figura 5 – Refletor para um CPC com absorvedor tubular.	32
Figura 6 – Amostras dos testes foto-Fenton 1 e foto-Fenton 2 após as duas horas de exposição ao Sol.	40
Figura 7 – Perfil do protótipo do fotorreator dimensionado para o tratamento de efluentes recalcitrantes.....	41
Figura 8 - Fotorreator catalítico localizado na UFPB em funcionamento para o tratamento do lixiviado do ASMJP.	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características mais prováveis do lixiviado de aterros brasileiros	12
Tabela 2 – Potencial de oxidação eletroquímica de alguns oxidantes.....	20
Tabela 3 – Vantagens e Desvantagens de determinados POA	20
Tabela 4 – Eficiência do Foto-Fenton em lixiviados de aterros sanitários.....	27
Tabela 5 – Métodos utilizados para a determinação dos parâmetros físico-químicos.	29
Tabela 6 - Considerações para o dimensionamento do fotorreator.	33
Tabela 7 – Caracterização do lixiviado bruto e do tratado na lagoa facultativa II provenientes do ASMJP (Junho/2012).	34
Tabela 8 – Descoloração segundo o cálculo do Número de Cor.....	39
Tabela 9 – Orçamento dos itens para construção do protótipo do fotorreator solar (dados de 2014).....	43

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	11
1.1.	Definição do tema e do problema.....	11
1.2.	Justificativa da pesquisa	15
2.	OBJETIVOS.....	17
2.1.	Objetivo Geral	17
2.2.	Objetivos Específicos	17
3.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
3.1.	Aspectos gerais de efluentes recalcitrantes	18
3.1.1.	Características do lixiviado	18
3.1.1.1.	Problemática do lixiviado.....	18
3.2.	Tratamento de lixiviado de aterro sanitário por processos biológicos	19
3.3.	Tratamento de lixiviado de aterro sanitário por Processos Oxidativos Avançados.....	19
3.3.1.	Vantagens e desvantagens dos POA no tratamento de lixiviado de aterros sanitários.....	20
3.3.2.	Fotocatálise Homogênea	21
3.3.2.1.	Reagente Fenton	21
3.3.2.2.	Foto-Fenton	22
3.4.	Fotorreatores no tratamento de lixiviado de aterros sanitários.....	23
3.4.1.	Reatores Solares	23
4.	METODOLOGIA	28
4.1.	Características gerais da pesquisa	28
4.2.	Primeira etapa: Investigação do uso do processo foto-Fenton no lixiviado do ASMJP.....	29
4.2.1.	Coleta e caracterização do efluente recalcitrante: o lixiviado	29
4.2.2.	Experimento de Fotocatálise solar homogênea utilizando o foto-Fenton: escala laboratorial .	29
4.3.	Segunda etapa: elaboração do protótipo do fotorreator solar	32
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	34
5.1.	Primeira etapa: Investigação do uso do processo foto-Fenton no lixiviado do ASMJP.....	34
5.1.1.	Caracterização dos lixiviados bruto e tratado do ASMJP	34
5.1.2.	Experimento de Fotocatálise solar homogênea utilizando o foto-Fenton: escala laboratorial .	35
5.2.	Segunda etapa: elaboração do protótipo do fotorreator solar	40
6.	CONCLUSÃO.....	44
	REFERÊNCIAS	45
	APÊNDICE A – Perfil do CPC e cálculos realizados segundo as equações expostas por Oommen e Jayaraman (2001)	49

1. INTRODUÇÃO

1.1. Definição do tema e do problema

Com a mudança do pensamento sobre o modo de produção capitalista, entendendo o meio ambiente como fonte limitada de matéria-prima, inicia-se uma série de estudos científicos no meio acadêmico mundial a fim de melhorar a gestão dos recursos naturais. Essas pesquisas são utilizadas como importante ferramenta no desenvolvimento de novas tecnologias, que, em conjunto com mudanças na legislação e com medidas restritivas por parte dos governos, têm ajudado a melhorar o cenário mundial em relação à qualidade do meio ambiente, mesmo que a passos curtos.

Diante dessa preocupação com os recursos naturais, foi definido pela Norma Técnica NBR 8419 (ABNT, 1984) que a destinação final apropriada para os resíduos sólidos urbanos (RSU) deve ser o aterro sanitário. A norma supracitada afirma que os

aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos consiste na técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos ou riscos à saúde pública e à segurança, minimizando os impactos ambientais, método este que utiliza os princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho ou a intervalos menores se for necessário.

Já na Política Nacional de Resíduos Sólidos, instituída pela lei nº 12.305 de 2 de Agosto de 2010, esse conceito está restrito à “disposição final ambientalmente adequada.”

Apesar do aterro sanitário ser considerado atualmente como uma das melhores soluções para os RSU no Brasil (SOUTO *et al.*, 2007), a geração do lixiviado nesses locais é um problema ambiental que deve ser analisado. O lixiviado é um líquido de elevada carga orgânica e forte coloração oriundo da infiltração da água da chuva misturado ao chorume – líquido resultante da decomposição química e microbiológica dos resíduos sólidos – proveniente das células do aterro. Por apresentar substâncias altamente solúveis, se o lixiviado não for devidamente coletado, armazenado e tratado, pode contaminar corpos hídricos com os

materiais tóxicos (BERTAZZOLI E PELEGRINI, 2002), colocando em risco a saúde da população.

Souto e Povinelli (2007) reuniram dados bibliográficos acerca do lixiviado de 25 aterros de diferentes regiões do Brasil. A partir das informações obtidas, elaborou-se uma tabela que resume as características gerais do lixiviado dos locais estudados. Na Tabela 1 estão dispostos os valores estimados das características mais prováveis do lixiviado de aterros sanitários brasileiros. Os valores limite foram arredondados para facilitar a visualização, mas sempre a favor da segurança. A sigla FVMP presente na tabela significa “frequência de ocorrência dos valores mais prováveis”.

Tabela 1 – Características mais prováveis do lixiviado de aterros brasileiros

Variável	Unidade	Faixa máxima	Faixa mais provável	FVMP
pH		5,7 – 8,6	7,2 – 8,6	78%
Alcalinidade total	mg/L CaCO ₃	750 - 11 400	750 - 7 100	69%
Dureza	mg/L CaCO ₃	95 - 3 100	95 – 2 100	81%
Condutividade	µS/cm	2 950 - 25 000	2 950 - 17 660	77%
DBO	mg/L	< 20 - 30 000	< 20 - 8 600	75%
DQO	mg/L	190 – 80 000	190 - 22 300	83%
Óleos e Graxas	mg/L	10 - 480	10 - 170	63%
Fenóis	mg/L de C ₆ H ₅ OH	0,9 – 9,9	0,9 – 4,0	58%
NTK	mg/L	80 - 3 100	não há	-
N-amoniacal	mg/L	0,4 - 3 000	0,4 - 1 800	72%
N-orgânico	mg/L	5 - 1 200	400 - 1 200	80%
N-nitrito	mg/L	0 - 50	0 – 15	69%
N-nitrato	mg/L	0 - 11	0 – 3,5	69%
P-total	mg/L	0,1 - 40	0,1 – 15	63%
Sulfeto	mg/L	0 - 35	0 – 10	78%
Sulfato	mg/L	0 - 5 400	0 - 1 800	77%
Cloreto	mg/L	500 - 5 200	500 - 3 000	72%
Sólidos totais	mg/L	3 200 - 21 900	3 200 a 14 400	79%
Sólidos totais voláteis	mg/L	630 - 20 000	630 - 5 000	60%
Sólidos totais fixos	mg/L	2 100 - 14 500	2 100 - 8 300	74%

Sólidos suspensos totais	mg/L	5 - 2 800	5 - 700	68%
Sólidos suspensos voláteis	mg/L	5 - 530	5 - 200	62%
Ferro	mg/L	0,01 - 260	0,01 - 65	67%
Manganês	mg/L	0,04 - 2,6	0,04 - 2,0	79%
Cobre	mg/L	0,005 - 0,6	0,05 - 0,15	61%
Níquel	mg/L	0,03 - 1,1	0,03 - 0,5	71%
Cromo	mg/L	0,003 - 0,8	0,003 - 0,5	89%
Cádmio	mg/L	0 - 0,26	0 - 0,065	67%
Chumbo	mg/L	0,01 - 2,8	0,01 - 0,5	64%
Zinco	mg/L	0,01 - 8,0	0,01 - 1,5	70%

Fonte: SOUTO e POVINELLI, 2007.

Como pode ser visto na Tabela 1, o lixiviado é caracterizado por conter grande quantidade de matéria orgânica, nitrogênio amoniacal e sólidos totais fixos e voláteis. Vê-se ainda que a presença de alguns compostos perigosos como metais pesados, fenóis e N-amoniacal podem ser detectados em sua composição. Esse fluido precisa respeitar as condições e os padrões que não comprometem a qualidade dos corpos hídricos para uma determinada finalidade para que possa ser lançado nos corpos receptores. Atualmente existe a Resolução CONAMA nº 430 de 13 de Maio de 2011, que define os limites para lançamento de efluentes em corpos hídricos. Entretanto, alguns parâmetros ainda não foram contemplados na referida norma, como a demanda química de oxigênio (DQO), que é essencial para analisar a matéria orgânica total presente nos efluentes. Adicionalmente, é importante apontar que, no Estado da Paraíba, não é estabelecido o limite da DQO em efluentes a serem lançados nos corpos receptores, mas que o presente trabalho estuda a remoção da DQO como uma das respostas a serem observadas após o processo foto-Fenton solar, pois esse parâmetro reflete a carga de orgânica total, biodegradável e recalcitrante, de forma mais satisfatória que outros.

A determinação e contenção da carga de matéria orgânica lançada nos corpos receptores é necessária uma vez que esses poluentes afetam a biota aquática, já que ocorre a redução do oxigênio dissolvido disponível devido à ação das bactérias anaeróbias, podendo até levar à morte de seres vivos ali presentes.

O problema de descarte do lixiviado existe no Aterro Sanitário Metropolitano de João Pessoa/PB (ASMJP). Segundo Silvestre (2010), a vazão de percolado produzida nas células do aterro é de aproximadamente 102 m³/dia e não há descarte proveniente da estação de tratamento de chorume (ETC) para os corpos d'água que correm paralelos à área do aterro.

Em uma visita de campo ao ASMJP constatou-se que atualmente a ETC do aterro possui nove lagoas de estabilização dispostas em série, sendo duas de decantação, uma anaeróbia, duas facultativas, dois charcos, uma de recirculação e uma de reserva e recirculação. Porém, segundo o técnico responsável pelo monitoramento das lagoas de lixiviado do local, esse tratamento não tem sido suficiente para adequar as características do fluido aos padrões de lançamento de efluente em corpos hídricos segundo a Resolução CONAMA nº430/11. Além disso, foi informado que alternativas como o tratamento com produtos químicos, fitorremediação com a Taboa e filtração já foram testadas pela equipe responsável a fim de resolver o problema, mas, mesmo assim, parâmetros como amônia, cor e metais pesados não atingiram remoções significativas. Costa *et al.* (2010) confirmam essa realidade ao declarar que os resultados das análises do lixiviado do ASMJP apontaram para valores dos parâmetros acima dos permitidos pela legislação para o lançamento em corpos receptores.

Devido a essa situação, o lixiviado está sendo acumulado nas lagoas de estabilização, que estão servindo de reservatórios, já que o descarte desse fluido em corpos hídricos está impossibilitado. Como uma saída emergencial para minimizar a quantidade de lixiviado nas lagoas, estão regando as células através de aspersores, que é uma prática benéfica para a compactação das células do aterro, mas não é uma solução suficiente para o problema. Ainda, a situação do volume excedente de lixiviado é agravada na época de inverno, uma vez que a adição das águas pluviais faz com que as lagoas transbordem.

Diante dessa problemática, um campo de estudo que vem sendo explorado por pesquisadores de todo o mundo retrata a possibilidade do tratamento do lixiviado através da oxidação da carga orgânica recalcitrante, ou de difícil degradação, empregando os Processos Oxidativos Avançados (POA).

Os POA são novas tecnologias que se mostram vantajosas e promissoras no tratamento de efluentes refratários, pois conduzem a produtos finais mineralizados, ou seja, compostos orgânicos oxidados a CO_2 , H_2O e ânions inorgânicos. A oxidação desses compostos pode ser realizada de modo rápido e não seletivo através de reações de degradação que envolvem espécies transitórias oxidantes, principalmente os radicais hidroxila (TEIXEIRA E JARDIM, 2004). Tais processos são capazes de eliminar compostos resistentes aos tratamentos primário (floculação e sedimentação) e secundário (biológico), podendo ser aplicados a compostos inorgânicos ou orgânicos (PASCOAL, 2007).

Um dos POA que está sendo investigado para o tratamento de lixiviado de aterros sanitários é o foto-Fenton. O reagente Fenton é um POA em que há geração de radicais hidroxila (OH^\bullet) a partir da decomposição catalítica do peróxido de hidrogênio em meio ácido,

utilizando-se íons ferrosos como catalisadores (DANTAS, 2005). A combinação do reagente Fenton com a radiação ultravioleta (UV) é chamada de foto-Fenton (TRUJILLO *et al.*, 2006).

O método foto-Fenton solar pode ser executado com a utilização de fotorreatores solares, já que este apresenta a grande vantagem de utilizar-se de uma fonte de energia limpa. Segundo Rocha (2010), a tecnologia fotocatalítica solar pode ser definida como aquela que capta eficientemente os fótons solares para um reator específico, de modo a promover reações catalíticas, sendo tal equipamento denominado como coletor solar.

O processo fotocatalítico solar por foto-Fenton é uma tecnologia relativamente de baixo custo, eficiente no tratamento de efluentes recalcitrantes e eficaz na proteção dos recursos hídricos, sendo um dos POA mais escolhidos para estudo e implantação em escala real.

Nesse âmbito, surge o propósito da pesquisa: Qual a viabilidade da utilização do processo foto-Fenton solar e da construção de um fotoreator para o tratamento do lixiviado do Aterro Sanitário Metropolitano de João Pessoa/PB?

1.2. Justificativa da pesquisa

A remoção de poluentes orgânicos do meio ambiente tem sido um grande desafio tecnológico, pois, inúmeras vezes, tecnologias de tratamento convencionais não são capazes de fazê-lo eficientemente.

Os compostos orgânicos recalcitrantes são de difícil decomposição por processos biológicos. Portanto, o estudo de técnicas eficientes para a remoção dessas substâncias em águas, solos e efluentes industriais é demasiadamente importante e tem sido explorada. A oxidação desses compostos pode ser realizada pelos POA, métodos de tratamento de efluentes que ganharam espaço no meio científico nas últimas décadas (TRUJILLO *et al.*, 2006). Essas novas tecnologias se mostram atrativas no tratamento de efluentes, pois conduzem a produtos finais mineralizados (ROCHA *et al.*, 2011), fato que não ocorre com os processos convencionais de tratamento (PASCOAL *et al.*, 2007).

Os POA podem ser utilizados como processos pré ou pós tratamento biológico (VILAR *et al.*, 2011), garantindo um efluente menos recalcitrante e a redução de alguns parâmetros, como cor e DQO.

Na resolução CONAMA n°430/11, em seu parágrafo primeiro, artigo 16º, capítulo terceiro, é estabelecido que “os efluentes oriundos de sistemas de disposição final de resíduos sólidos de qualquer origem devem atender às condições e padrões definidos neste artigo.”

Além disso, em seu artigo 24 do capítulo terceiro, é definido que “os responsáveis pelas fontes poluidoras dos recursos hídricos deverão realizar o auto monitoramento para controle e acompanhamento periódico dos efluentes lançados nos corpos receptores, com base em amostragem representativa dos mesmos”.

Isso implica na responsabilidade do administrador do ASMJP de garantir que o lixiviado seja devidamente tratado até que alcance as condições necessárias para o seu lançamento no corpo hídrico.

Já que o tratamento desse lixiviado não está sendo eficaz, justifica-se a necessidade de encontrar urgentemente alternativas para o seu tratamento, pois a sua recirculação nas células do aterro ameniza o problema, mas não o resolve, já que o fluido irá voltar para as lagoas de tratamento posteriormente, além de que o volume recirculado é pequeno em relação ao total produzido. O lixiviado possui uma estrutura complexa e de difícil tratamento, portanto, pesquisas nesse campo são de grande relevância.

Nesse âmbito, o presente estudo é uma proposta para resolver um problema ambiental significativo que é o comprometimento da qualidade da água de rios devido ao despejo desse efluente recalcitrante com concentrações que poderão comprometer o equilíbrio dos corpos hídricos.

A execução deste trabalho é também um cumprimento da Resolução CES/CNE nº11 de Março de 2002, que regulamenta o currículo do Curso de Engenharia Ambiental e estabelece que o Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) é obrigatório para a integralização curricular do curso mencionado.

A pesquisa é, ainda, parte do projeto “Fotocatálise solar: aplicação no tratamento de efluentes recalcitrantes”, iniciado desde 2011 e ainda em curso na UFPB, com financiamento do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Estudar a utilização do processo foto-Fenton solar e a construção de um fotorreator solar para o tratamento do lixiviado do ASMJP.

2.2. Objetivos Específicos

- Testar o processo foto-Fenton solar para o tratamento do lixiviado do ASMJP em escala de bancada;
- Determinar a eficiência do processo foto-Fenton através da redução da cor por meio do espectro de absorbância e do cálculo do número de cor (NC); e da remoção de matéria orgânica através da Demanda Química de Oxigênio;
- Construir um fotorreator solar em escala piloto;
- Calcular os custos financeiros para construção do protótipo.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. Aspectos gerais de efluentes recalcitrantes

Compostos recalcitrantes são aqueles de difícil decomposição por tratamentos biológicos. As atividades industriais e os resíduos sólidos gerados pela população originam resíduos líquidos como produto final. Esses efluentes, se lançados diretamente nos corpos d'água sem tratamento prévio, alteram a qualidade da água, podendo comprometer o seu uso para as atividades humanas.

O efluente em foco neste trabalho é o lixiviado, contudo, a composição complexa característica desse líquido é também observada em efluentes de indústrias têxteis (KAMMRADT, 2004), de curtume (PASCOAL *et al.*, 2007), de café de coloração castanho-escura (TOKOMURA *et al.*, 2008) e de papel (GHALY *et al.*, 2011).

3.1.1. Características do lixiviado

O lixiviado é um fluido negro, de odor nauseante, caracterizado por conter grande quantidade de matéria orgânica, nitrogênio amoniacal, sais inorgânicos (KOCHANY *et al.*, 2009). Alguns compostos perigosos como metais pesados, compostos halogenados e aromáticos, fenóis, pesticidas e amônia podem ser detectados em sua composição, podendo haver também microorganismos patogênicos (PRIMO *et al.*, 2008; OMAN *et al.*, 2008)

A composição físico-química do lixiviado é extremamente variável dependendo de fatores como o tipo de resíduo depositado nas células do aterro, as condições pluviométricas e hidrogeológicas locais, idade, design e operação do aterro. (UMAR *et al.*, 2010 *apud* BAIG *et al.*, 1999).

3.1.1.1. Problemática do lixiviado

Segundo a Lei nº 12.305/10, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, até Agosto de 2014, todo o rejeito dos Municípios brasileiros deverá ser destinado a um aterro sanitário. Isso significa que os lixões ou outras formas de disposição final que não sejam ambientalmente adequadas, segundo o capítulo VI da lei supracitada, devem que ser abolidos. O resultado disso é a construção de aterros sanitários em todo o Brasil. Com isso, haverá

geração constante e em grande escala de lixiviado, que deve atender aos padrões de lançamento segundo a Resolução CONAMA 430/11 antes de ser lançado nos corpos receptores. Além disso, vale-se destacar que é necessário incluir no plano de gestão do aterro sanitário o tratamento e a destinação final do chorume produzido nas células do aterro. Sendo assim, técnicas eficientes e eficazes no tratamento desse efluente devem ser estudadas.

3.2. Tratamento de lixiviado de aterro sanitário por processos biológicos

Os tratamentos biológicos, como os lodos ativados e as lagoas anaeróbias, são comumente aplicados para remover compostos orgânicos biodegradáveis devido ao seu baixo custo e à possibilidade de tratar grandes volumes (PRIMO *et al.*, 2008). Contudo, o uso desse tipo de tratamento em lixiviados é inviável devido à alta variabilidade da vazão e carga orgânica desse fluido, da necessidade de uma ampla área para a implantação do processo (FARIAS *et al.*, 2008) e da baixa eficiência do processo em lixiviados antigos devido à presença de compostos biorefratários (HERMOSILLA *et al.*, 2009). Além disso, um sistema biológico pode ser comprometido por uma pequena variação na estrutura de um composto poluente (BERTAZZOLI *et al.*, 2002).

Visto isso, pode-se afirmar que os processos biológicos podem ser insuficientes para o tratamento de lixiviado, já que nem todos os poluentes orgânicos são biodegradáveis e existe uma classe de produtos biorecalcitrantes.

3.3. Tratamento de lixiviado de aterro sanitário por Processos Oxidativos Avançados

Entre os POA pode-se citar: $\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$, O_3/UV , $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$, $\text{TiO}_2/\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$, Fenton e foto-Fenton além de outros processos combinados. Esses processos podem ser divididos em dois grupos: heterogêneos – os que contam com a presença de catalisadores sólidos – e homogêneos – os demais (TEIXEIRA E JARDIM, 2004).

Os POA funcionam com base na oxidação química, que é o processo de remoção de elétrons de um reagente, resultando no aumento do seu potencial de reação. Como pode ser observado na Tabela 2, o potencial de oxidação padrão dos radicais hidroxila é de 2,80 V – sendo inferior apenas ao do flúor, que é de 3,03 V (TEIXEIRA E JARDIM, 2004). Sendo assim, é interessante introduzir radicais hidroxila em uma reação a fim de fazê-los reagir com

compostos recalcitrantes. Entretanto, por serem extremamente reativos, esses radicais são altamente instáveis (DANTAS, 2005).

Tabela 2 – Potencial de oxidação eletroquímica de alguns oxidantes

Agente Oxidante	Potencial de Oxidação (eV)
Flúor	3
Radical Hidroxila, OH[•]	2,8
Oxigênio Atômico, O (¹ D)	2,42
Ozônio, O ₃	2,07
Peróxido de Hidrogênio, H ₂ O ₂	1,78
Íon Permanganato	1,67
Dióxido de Cloro	1,5
Cloro	1,36
Oxigênio Molecular, O ₂	1,23

Fonte: TEIXEIRA & JARDIM (2004) e DANTAS (2005).

3.3.1. Vantagens e desvantagens dos POA no tratamento de lixiviado de aterros sanitários

Existe uma variedade de POA sendo estudado no mundo atualmente, cada um com suas vantagens e desvantagens para a utilização no tratamento de efluentes de difícil degradação. Analisando a Tabela 3, é possível observar que o processo foto-Fenton é uma tecnologia relativamente de baixo custo, eficiente no tratamento de efluentes e eficaz na proteção dos recursos hídricos.

Uma grande vantagem de se trabalhar com o foto-Fenton é a possibilidade de aproveitamento da radiação solar no tratamento do lixiviado de aterro sanitário. Essa proposta tem sido amplamente estudada, tendo em vista seu baixo custo, principalmente em países com elevado grau de insolação, como o Brasil.

Tabela 3 – Vantagens e Desvantagens de determinados POA

POA	Vantagens	Desvantagens
Fenton	Alta redução de DQO, cor e toxicidade; baixo custo.	Geração de lodo; formação de sais de ferro; pH limitado entre 2 e 4.

Foto-Fenton	Mais eficiente que o Fenton por ser mais rápido e produzir menos lodo; baixo custo.	Geração de lodo; formação de sais de ferro; pH limitado entre 2 e 4.
Ozonização	Muito eficiente na redução de matéria orgânica.	Alto custo já que é produzido por descarga elétrica no ar ou oxigênio puro.
O₃/UV	Muito eficiente na redução de matéria orgânica.	Restrições no meio, que não pode ser turvo ou conter sólidos em suspensão.
Dióxido de titânio	Baixo custo, não toxicidade, atua em ampla faixa de pH, estabilidade química.	Remoção do dióxido de titânio quando o mesmo é usado em suspensão no processo.

Fonte : TEIXEIRA & JARDIM (2004), DANTAS (2005), KAMMRADT (2004).

3.3.2. Fotocatálise Homogênea

3.3.2.1. Reagente Fenton

Um exemplo de POA é o reagente Fenton, processo em que há geração de radicais hidroxila a partir da decomposição catalítica do peróxido de hidrogênio em meio ácido, utilizando-se íons ferrosos como catalisador. É um processo vantajoso, pois tanto o peróxido de hidrogênio quanto os íons ferrosos são reagentes baratos e seguros (UMAR *et al.*, 2010).

Sendo esses reagentes os principais para que ocorra o processo, eles determinam a eficiência e o custo da operação, por isso é importante estudar as quantidades ótimas desses compostos a serem utilizadas no tratamento do lixiviado do ASMJP.

As principais variáveis do processo Fenton são as condições dos reagentes – as relações entre Fe^{+2} , Fe^{+3} e H_2O_2 – e as características da reação – pH, temperatura e quantidade de constituintes orgânicos e inorgânicos (NEYENS E BAEYENS, 2003). Portanto, para que haja uma produção ótima de radicais hidroxila, é necessário que a relação mútua entre estes parâmetros seja compreendida.

Em relação à dose de peróxido de hidrogênio, Nogueira *et al.* (2007) relatam que uma concentração baixa de H_2O_2 não gera quantidade suficiente de $\text{OH} \cdot$ na solução. Esses autores acrescentam que o aumento da concentração de H_2O_2 tem dois efeitos opostos no rendimento da reação: uma maior concentração de H_2O_2 inicial aprimora o processo de oxidação, levando

a um aumento de OH^\bullet até uma certa concentração. Contudo, quando o H_2O_2 começa a reagir com o OH^\bullet , ocorre a diminuição da concentração desses radicais e geração de radicais hidroperoxila (HO_2^\bullet), que são muito menos reativos que os primeiros. Assim, conclui-se que existe uma concentração ideal de H_2O_2 para alcançar a eficiência máxima do processo Fenton, embora a definição da faixa dessa concentração varie com as características do lixiviado do aterro sanitário a ser tratado.

Em termos de matéria orgânica, deve-se destacar que a remoção de DQO varia dependendo da dose de H_2O_2 , e que a quantidade total de matéria orgânica removida aumenta com a adição do reagente em etapas. Isso pode ocorrer devido ao efeito de eliminação de radicais hidroxilas por H_2O_2 quando aplicada uma alta dosagem do mesmo na etapa inicial do tratamento (PRIMO *et al.*, 2008).

3.3.2.2. Foto-Fenton

A combinação do reagente Fenton com a radiação UV é chamada de foto-Fenton, que se mostra mais eficiente que o método Fenton ou o da irradiação UV agindo separadamente. Essa eficiência é devido à degradação do peróxido de hidrogênio tanto por fotólise quanto por íons Fe^{2+} , acelerando assim a produção de radicais hidroxila (TRUJILLO *et al.*, 2006). Este efeito positivo da luz sobre a reação de degradação foi atribuído à regeneração de Fe^{2+} conseguida da fotólise dos hidróxidos de Fe^{3+} sintetizados, como também pelas reações fotoquímicas dos complexos formados com os íons férricos e intermediários da degradação ou substratos orgânicos (DANTAS, 2005).

Nogueira *et al.* (2007) afirmam que a formação de espécies hidroxiladas tem relação com o pH e que, uma vez que essas espécies apresentam maior absorção na região do visível, a absorbância de íons férricos pode se estender até essa região do espectro. Ainda segundo esses autores, “a espécie $\text{Fe}(\text{OH})^{2+}$ apresenta máximo de absorbância em comprimento de onda de 300nm, estendendo-se até aproximadamente 400nm, o que permite que a irradiação solar seja utilizada na reação foto-Fenton”. Eles ainda declaram que o pH do meio afeta a velocidade com a qual os compostos orgânicos são decompostos, pois, com valores maiores que 3, ocorre a precipitação de $\text{Fe}(\text{III})$, e, abaixo de 2,5, pode ocorrer o sequestro de radicais hidroxila pelo acúmulo de H^+ .

Apesar das vantagens da utilização do foto-Fenton no tratamento do lixiviado, deve-se salientar que há grande produção de lodo contendo ferro (HERMOSILLA *et al.*, 2009),

necessitando assim de um tratamento posterior para esse efluente. Primo *et al.* (2008) e Hermosilla *et al.* (2009) apontam que a principal vantagem do método foto-Fenton em relação ao Fenton é que o primeiro consome menos ferro e produz menos lodo que o segundo, atingindo os mesmos resultados de remoção de DQO.

3.4. Fotorreatores no tratamento de lixiviado de aterros sanitários

3.4.1. Reatores Solares

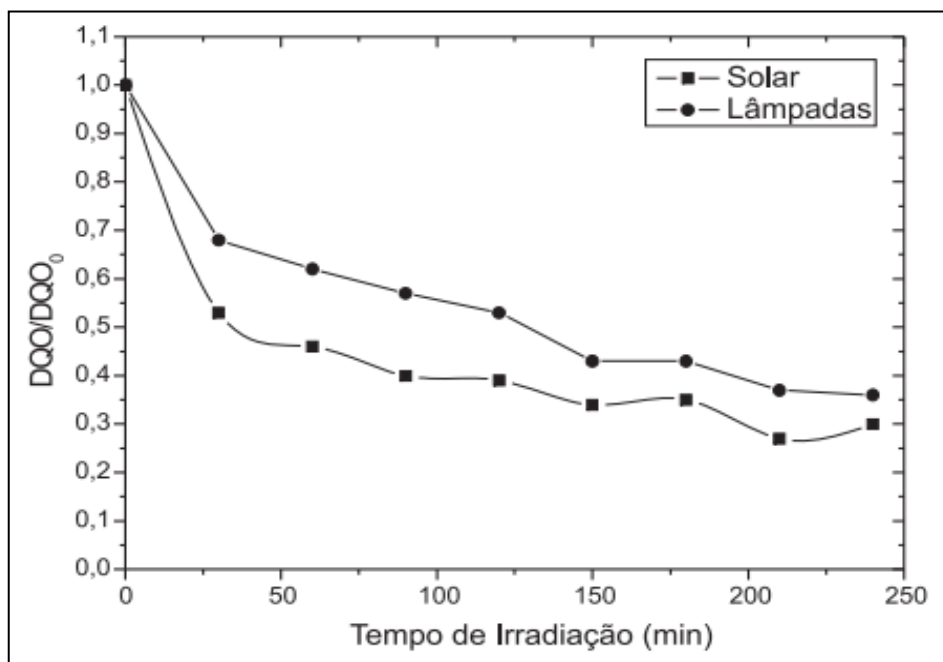
A literatura estudada apresentada a existência de dois tipos de fotorreatores: os que utilizam-se da radiação UV proveniente de fontes artificiais, e os abastecidos pela fonte natural, o Sol. Sobre a radiação solar, Martins *et al.* (2004) relatam que

A radiação solar constitui a principal força motriz para processos térmicos, dinâmicos e químicos em nosso planeta. A energia proveniente do Sol chega até a superfície propagando-se como energia radiante ou, simplesmente, radiação. A principal característica de um campo de radiação é a radiância (ou intensidade de radiação). Essa grandeza se refere à quantidade de energia radiante num intervalo unitário de comprimento de onda que atravessa uma unidade de área tomada perpendicularmente à direção considerada, na unidade de tempo.

Ao contrário de países localizados longe da linha do Equador, onde a insolação anual é bastante irregular, no Brasil, é vantajoso trabalhar-se com a radiação natural do Sol já que a maior parte do país localiza-se em uma faixa de latitude onde é intensa a incidência de radiação quase todo o ano. Além disso, entende-se que a radiação proveniente do Sol é de menor custo, além de ser renovável, quando comparado às fontes artificiais de UV, como lâmpadas.

Pascoal *et al.* (2007) relatam que a energia proveniente do Sol mostra-se mais eficiente que a energia das luzes artificiais em relação a todos os parâmetros analisados em seu trabalho (DQO, turbidez, SST e SSV). Focando-se na DQO, como pode ser visto na Figura 1, a utilização da radiação solar foi não somente favorável à redução desse parâmetro como se deu de forma mais rápida e chegou a resultados melhores quando comparada às lâmpadas.

Figura 1 – Remoção relativa de DQO dos experimentos feitos com radiação solar e com lâmpadas germicidas.



Fonte: PASCOAL *et al.* (2007).

Neste projeto estudou-se e construiu-se um reator fotocatalítico. Segundo Malato-Rodriguez *et al.* (2004), algumas considerações devem ser feitas em se tratando desse tipo de reator: ele deve conter o fluido e o catalisador, suportar pressões moderadas e transmitir a luz UV eficientemente; o material do reator deve ser inerte, tendo em consideração os químicos agressivos (principalmente os radicais hidroxila) que circulam no seu interior – dentre vários fatores, incluindo o fator econômico, o material mais indicado é o vidro com baixo teor de ferro, que é o caso do vidro de borossilicato.

Dependendo do grau de concentração, que está diretamente relacionada com a temperatura atingida pelo sistema, os coletores são classificados por Malato-Rodriguez *et al.* (2004) nos três seguintes grupos:

- I - Coletores não concentradores, de baixa concentração ou de baixa temperatura;
- II - Coletores de média concentração ou média temperatura;
- III - Coletores de elevada concentração ou elevada temperatura.

Coletores solares não concentradores são estáticos e não possuem mecanismos de procura do sol, possuindo assim, vantagens como a simplicidade e o baixo custo. Já os coletores de média concentração necessitam de sistemas de procura de sol, sendo mais caros que os coletores não concentradores (MALATO-RODRIGUEZ *et al.*, 2004).

Dentre os coletores de baixa concentração estão os coletores parabólicos compostos (CPC), que combinam as características dos concentradores parabólicos e dos sistemas estacionários, uma vez que concentram a radiação, conservam as propriedades dos coletores estáticos e utilizam a radiação difusa. Desta forma, os CPC possuem as vantagens de ambas as tecnologias, sendo considerados como a melhor opção para a aplicação de processos fotocatalíticos baseados no uso da radiação solar (MALATO *et al.*, 2009).

O CPC é um tipo especial de coletor solar disposto na forma de duas parábolas que se encontram no eixo Y localizado no centro do absorvedor tubular, como pode ser observado na Figura 2. Essa forma possibilita que o coletor seja estacionário e, ainda assim, haja o máximo de energia solar concentrada entregue e transferida para o tubo absorvedor de energia.

Figura 2 – Detalhe da superfície refletora e do absorvedor tubular de um reator CPC.



Fonte: DUARTE *et al.* (2005).

Duarte *et al.* (2005) também citam os reatores CPC em seu trabalho afirmando que

embora não concentrem a radiação solar incidente, sobressaem-se pelo seu baixo custo, por não necessitarem de partes móveis, serem de fácil instalação e manutenção, e apresentarem bom aproveitamento da radiação solar incidente, inclusive das componentes difusas.

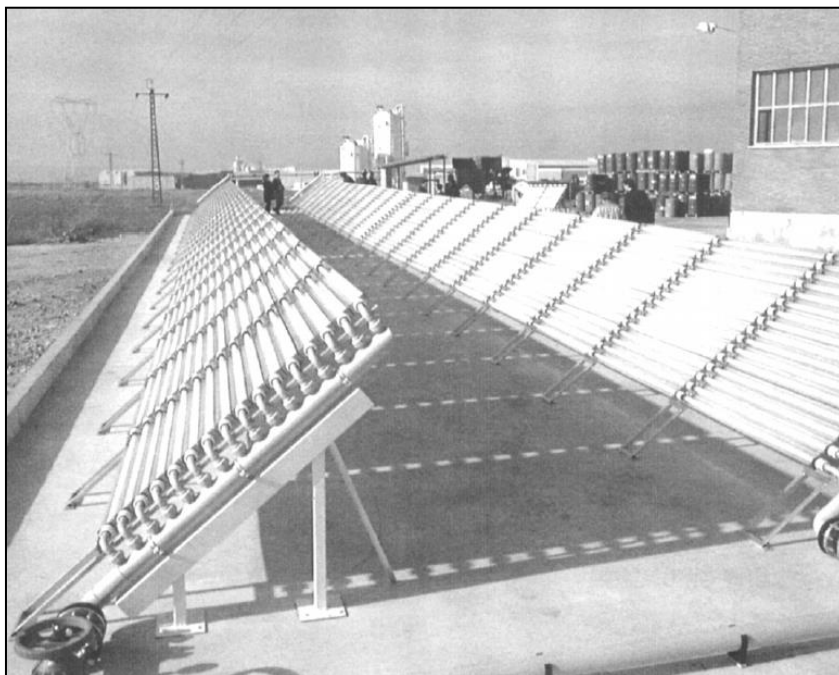
Bandala *et al.* (2004) e Duarte *et al.* (2005) afirmam que o CPC apresenta o melhor desempenho quando se trata de acumulação de energia quando comparado ao concentrador parabólico (CP), ao coletor tubular (CT) e ao coletor de calha em formato de “V” (CV).

Segundo Welford e Winston (1978), o CPC é um dos coletores que tem a concentração mais elevada possível (1,8) admitida por limite termodinâmico para um dado ângulo de aceitação. Esses mesmos autores afirmam que o uso do ângulo de aceitação (θ_a) de $33,75^\circ$ é pertinente para a construção de um CPC estacionário posicionado na direção leste-oeste, garantindo uma razão de concentração de 1,6.

Devido às vantagens citadas, decidiu-se que o protótipo do fotorreator solar construído como objetivo deste trabalho seria do tipo CPC.

A Figura 3 abaixo mostra a utilização deste mesmo tipo de fotorreator solar em larga escala em uma fábrica na Espanha.

Figura 3 – Protótipo de CPC (100 m^2) para fotocatalise instalado em uma fábrica na Espanha.



Fonte: ROBERT e MALATO (2002).

Sobre a radiação solar no Nordeste brasileiro, Funari *et al.* (1984) afirmam que

os índices elevados de insolação (3000h/ano) são explicados pela baixa nebulosidade, principalmente no sertão. A radiação solar global e a radiação líquida apresentam também valores máximos de 450 e 250 ly/dia, respectivamente.

Dessa forma, fica evidente a possibilidade da aplicação de fotorreatores solares no tratamento de lixiviado de aterro sanitário em João Pessoa.

3.4.2. Aplicação de foto-Fenton com a utilização de fotorreatores solares

Experiências utilizando o Foto-Fenton foram realizadas em diversos aterros sanitários no mundo a fim de analisar a eficiência do processo. Na Tabela 4, estão expostos os trabalhos de alguns autores com seus respectivos resultados quanto à eficiência na redução da DQO e, consequentemente, melhoria da qualidade do efluente em questão. Os três primeiros estudos apresentados foram desenvolvidos com a utilização da radiação UV proveniente do Sol, os demais testaram o processo com radiação artificial.

Tabela 4 – Eficiência do Foto-Fenton em lixiviados de aterros sanitários.

Autor	Eficiência de remoção da DQO
SANTOS, A. B. <i>et al.</i> (2009) <i>apud</i>	
PETEAN (2005)	83%
SANTOS, A. B. <i>et al.</i> (2009)	80-88%
ROCHA, E. <i>et al.</i> (2011)	86%
MORAIS, J. L.; ZAMORA, P. P. (2005)	57.5%
PRIMO <i>et al.</i> (2008)	78%
FARIAS, D. O. de. <i>et al.</i> (2008)	88%

Fonte: Elaborada pelo autor.

Por essas pesquisas, pode-se concluir que o processo foto-Fenton é eficiente na remoção de compostos recalcitrantes no lixiviado de aterros sanitários, e que a utilização da radiação solar leva a resultados finais satisfatórios.

4. METODOLOGIA

4.1. Características gerais da pesquisa

A pesquisa é de natureza aplicada já que, segundo Barros e Lehfeld (2000), a base da pesquisa aplicada é a produção do saber com a finalidade de por em prática os seus resultados, visando à obtenção rápida da solução do problema estudado.

Do ponto de vista da abordagem do problema, a pesquisa é do tipo quantitativa, o que significa traduzir em números opiniões e informações para classificá-las e analisá-las.

As técnicas de pesquisa adotadas são a documentação indireta através do levantamento de dados por pesquisa bibliográfica, ou seja, fontes secundárias – teses, monografias, livros, revistas, jornais –, e a documentação direta por pesquisa de laboratório, que, segundo Marconi e Lakatos (2003), é aquela que

Descreve e analisa o que será ou ocorrerá em situações controladas. Exige instrumental específico, preciso, e ambientes adequados. O objetivo da pesquisa de laboratório depende daquilo que se propôs alcançar; deve ser previamente estabelecido e relacionado com determinada ciência ou ramo de estudo. As técnicas utilizadas também variam de acordo com o estudo a ser feito.

Existem quatro aterros sanitários no estado da Paraíba, mas o escolhido como sujeito de estudo deste trabalho foi o ASMJP, pois é o mais próximo à UFPB e, portanto, de mais fácil acesso para os fins desta pesquisa. O objeto de estudo são as amostras de lixiviado do aterro supracitado, que foram coletadas do sistema de lagoas de estabilização.

O ASMJP, denominado CEDRES – Centro de Destinação de Resíduos Sólidos, possui uma área de 100 hectares e está localizado no Município de João Pessoa, na Paraíba, a 25km do centro da cidade, com acesso pelo km 23 da BR-101 e ramal de 5km em estrada de terra. Esse aterro foi inaugurado em 05 de Agosto de 2003, a fim de servir como destinação final dos resíduos sólidos gerados nos municípios que formam o CONDIAM – Consórcio de Desenvolvimento Intermunicipal da Área Metropolitana de João Pessoa (João Pessoa, Cabedelo, Bayeux, Santa Rita, Conde, Cruz do Espírito Santo e Lucena) (SILVESTRE e SILVESTRE FILHO, 2010). Ainda de acordo com esses autores, gera-se uma vazão de 102 m³/dia de lixiviado no aterro, derivados da chuva e da decomposição de aproximadamente 446 mil toneladas de resíduos sólidos por ano, como informa Costa *et al.* (2010). É importante

destacar que essa vazão é maior que a real já que existe a contribuição do volume de lixiviado que é recirculado para as células do aterro.

Quanto aos elementos de investigação, definiu-se como sendo a remoção da cor e da DQO do lixiviado do ASMJP.

4.2. Primeira etapa: Investigação do uso do processo foto-Fenton no lixiviado do ASMJP

4.2.1. Coleta e caracterização do efluente recalcitrante: o lixiviado

A coleta da amostra de lixiviado foi feita em Junho de 2012, por amostragem simples, as 9 h da manhã, no Aterro Sanitário Metropolitano de João Pessoa. A primeira amostra foi retirada no local de imediata entrada do lixiviado no sistema de tratamento por lagoas de estabilização. A amostra foi coletada no vertedor de entrada da lagoa anaeróbia, ou seja, o lixiviado bruto; a segunda foi coletada na saída da lagoa facultativa II, considerado aqui como lixiviado tratado. Os métodos utilizados para a determinação dos parâmetros físico-químicos estão dispostos na Tabela 5.

Tabela 5 – Métodos utilizados para a determinação dos parâmetros físico-químicos.

Parâmetro físico-químico	Método
pH	Método Eletrométrico
OD	Método Eletrométrico
Condutividade	Método Eletrométrico
Turbidez	Método Nefelométrico
Alcalinidade total	Método da Titulação Potenciométrica
Amônia	Método Fotométrico da Nesslerização Direta
DQO	Método da Refluxação Fechada e Método Titulométrico

Fonte: Elaborada pelo autor.

4.2.2. Experimento de Fotocatálise solar homogênea utilizando o foto-Fenton: escala laboratorial

Para análise do processo foto-Fenton foi realizado um teste no equipamento Jar-test.

Duas situações foram consideradas a fim de constatar a afirmação de Primo *et al.* (2008) sobre o aumento da eficiência do processo foto-Fenton quando o H_2O_2 é adicionado em etapas:

- a) Adição do H_2O_2 em uma única dosagem de 5000mg/L, mantendo uma razão $\text{H}_2\text{O}_2:\text{Fe} = 5:1$, no início do processo (foto-Fenton 1).
- b) Adição de H_2O_2 em dosagens menores, 1250mg/L, a cada 30 minutos (foto-Fenton 2).

As amostras passaram por etapas preliminares de preparo, ainda no laboratório, para a posterior análise com o foto-Fenton. Primeiramente, 250mL de lixiviado foi homogeneizado por cinco minutos, depois disso, a amostra foi acidificada com ácido sulfúrico para que o pH de aproximadamente 2,8 pudesse ser atingido. Isso feito, adicionou-se 2,5g de sulfato ferroso, correspondente 1g/L de Fe^{2+} . Homogeneizou-se a solução por mais ou menos 5 minutos. Adicionou-se o H_2O_2 na capela antes de expor a amostra ao sol, e homogeneizou-se por 10 minutos, concluindo a etapa de reação Fenton.

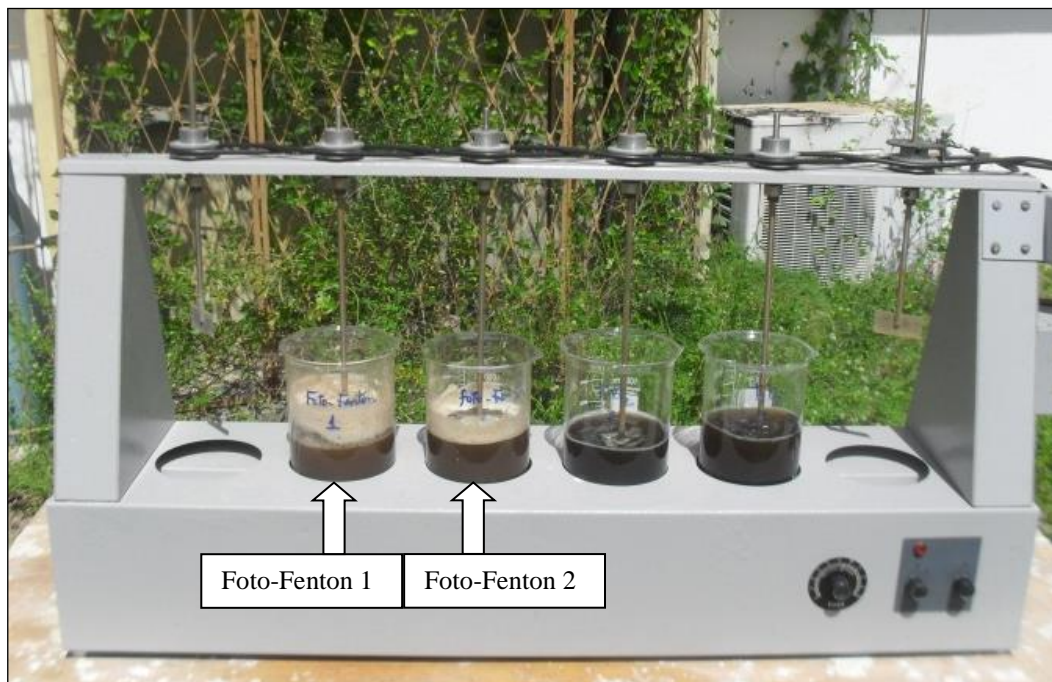
A porção do experimento de tratamento do lixiviado pelo processo de foto-Fenton foi realizado na parte exterior ao Laboratório de Saneamento do Centro de Tecnologia da UFPB. O Jar-Test (Figura 4) foi posicionado ao ar livre, onde a incidência de radiação solar era constante. As amostras foram colocadas ao sol por um período de duas horas, sob agitação constante e moderada para evitar a decantação do catalisador. Alíquotas do lixiviado foram retiradas a cada 30 minutos do Jar-Test. A exposição à radiação solar se iniciou exatamente ao meio dia, para que uma incidência maior de raios solares fosse aproveitada.

O peróxido residual das alíquotas retiradas foram determinadas pelo teste de permanganometria, já que o H_2O_2 , quando introduzido no processo, libera o oxigênio, que reage com o dicromato e, conseqüentemente, superestima os valores da DQO das amostras. Essa interferência exercida pelo H_2O_2 nas análises de DQO foi eliminada por meio da subtração da DQO do peróxido de hidrogênio residual na amostra pelo valor total de DQO obtido.

A DQO foi determinada pelo método da refluxação fechada disposto no Manual de Análises Físico-Químicas de Águas de Abastecimento de Residuárias, que é um método titulométrico (SILVA E OLIVEIRA, 2001).

A varredura da banda de absorbância na região visível (350nm - 600nm) foi realizada em um Espectrofotômetro Visível Digital Microprocessado - Q798DRM.

Figura 4 - Equipamento Jar-Test. Amostras do lixiviado sob influência da fotocatalise homogênea por foto-Fenton (as duas primeiras, da esquerda para a direita).



Fonte: Acervo do autor (2012).

Para caracterizar a cor, foi realizado o teste de número de cor (NC) descrito em Primo *et al.* (2008) de acordo com as equações 1, 2 e 3 abaixo. Segundo os mesmos autores, tal método baseia-se na medição do coeficiente de absorção espectral (*Spectral Absorption Coeficiente* - SAC) na faixa do visível nos comprimentos de onda de 436 nm, 525 nm e 620 nm (equação 1). O coeficiente SAC é determinado pelo valor da absorbância (Abs) de uma célula de espessura l (equação 2). Para o presente trabalho foi feita uma adaptação da equação 1, adotando todas as absorbâncias obtidas na varredura, ou seja, de 390nm a 480nm.

Calculou-se então a porcentagem da remoção da cor das amostras brutas e após os tempos definidos para o processo foto-Fenton (equação 3).

$$NC = \frac{SAC_{436}^2 + SAC_{525}^2 + SAC_{620}^2}{SAC_{436} + SAC_{525} + SAC_{620}} \quad (1)$$

$$SAC_i = \frac{Abs_i}{l} \quad (2)$$

$$Remoção(\%) = \left(\frac{NC_{inicial} - NC_{final}}{NC_{inicial}} \right) \times 100 \quad (3)$$

4.3. Segunda etapa: elaboração do protótipo do fotorreator solar

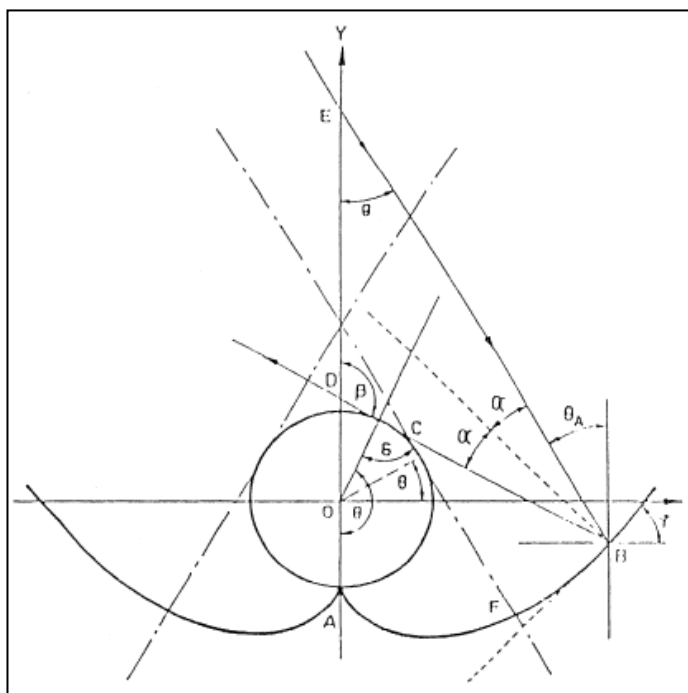
O dimensionamento do fotorreator solar do tipo CPC, que é objetivo deste trabalho, foi realizado de acordo com o demonstrado por Oommen e Jayaraman (2001) conforme a Figura 5. O ângulo de aceitação θ_a adotado foi de $33,75^\circ$, que é pertinente para a construção de um CPC estacionário posicionado na direção leste-oeste, garantindo uma razão de concentração de 1,6, conforme (WELFORD E WINSTON, 1978). A razão de concentração é calculada pela divisão entre o comprimento da abertura da superfície refletora (C_{ab}) e o perímetro do absorvedor tubular (P_{abs}).

Um absorvedor tubular (raio r) requer um refletor em forma de cúspide. O desenho do refletor (para um ângulo de aceitação θ_a) é determinado por uma equação diferencial de primeira ordem (OOMMEN E JAYARAMAN, 2001 *apud* Rabl, A. 1976).

É mister apontar que as instruções a seguir sobre como dimensionar um CPC foram integralmente expressas por Oommen e Jayaraman (2001, tradução nossa).

O absorvedor é descrito pelas coordenadas polares (r, θ). Qualquer ponto B (Figura 5) no refletor é dado por sua distância $\rho = BC$ a partir do ponto C na qual a tangente de CB toca o absorvedor, e BC é igual ao comprimento do arco AC ao longo da circunferência do absorvedor.

Figura 5 – Refletor para um CPC com absorvedor tubular.



Fonte: OOMMEN e JAYARAMAN (2001).

A forma do refletor é fixada por dois requisitos:

- I. Para $|\theta| \leq \theta_a + \pi/2$, qualquer raio emitido tangencialmente a partir de um ponto C (r, θ) do absorvedor para o refletor deve ser refletido de volta para si.
- II. Para $(\theta_a + \pi/2) \leq \theta \leq (3\pi/2 - \theta_a)$, qualquer raio emitido tangencialmente a partir de um ponto C (r, θ) do absorvedor para o refletor deve ser refletido de tal modo a formar um ângulo θ_a com o eixo y. As coordenadas de B são representadas pelas equações 4, 5, 6 e 7:

$$x = r \sin \theta - \rho \cos \theta \quad (4)$$

$$y = -r \cos \theta - \rho \sin \theta \quad (5)$$

onde:

$$\rho = r \theta; \text{ para } \theta \leq \theta_a + \pi/2 \quad (6)$$

$$\rho = r [\theta + \theta_a + \pi/2 - \cos(\theta - \theta_a)] / [1 + \sin(\theta - \theta_a)]; \text{ para } (\theta_a + \pi/2) \leq \theta \leq (3\pi/2 - \theta_a) \quad (7)$$

Baseando-se em Rocha *et al.* (2011), considerou-se a vazão e as dimensões do tubo para a construção do protótipo segundo a Tabela 6. Foram necessárias adaptações das medidas devido à disponibilidade comercial dos materiais.

Tabela 6 - Considerações para o dimensionamento do fotorreator.

Comprimento do absorvedor cilíndrico borossilicato	1500mm
Espessura do tubo de borossilicato (e_t)	1,6mm
Raio do absorvedor (r)	24cm
Vazão adotada (Q)	1,5m ³ /h

Fonte: Elaborada pelo autor.

O custo para construção desse protótipo de fotorreator solar no tratamento de efluentes também foi calculado e está relatado nos resultados.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Primeira etapa: Investigação do uso do processo foto-Fenton no lixiviado do ASMJP

5.1.1. Caracterização dos lixiviados bruto e tratado do ASMJP

Na Tabela 7, estão dispostos os valores obtidos nas análises da caracterização do lixiviado bruto e do tratado pelo sistema de lagoas de estabilização do ASMJP. A amostra retirada da Lagoa Facultativa II (LFII) passou por todas as etapas do tratamento biológico existente no ASMJP.

Tabela 7 – Caracterização do lixiviado bruto e do tratado na lagoa facultativa II provenientes do ASMJP (Junho/2012).

Parâmetros	Unidade	Bruto	tratado LF II
pH	-	7.87	8.30
OD	mg/L	1.60	1.79
Temperatura	°C	32.2	29.0
Turbidez	NTU	88.50	57.53
Condutividade	mS/cm	15.29	11.91
Alcalinidade Total	mgCaCO ₃ /L	4770	4820
ST	mg/L	196.37	215.59
STV	mg/L	38.06	40.02
STF	mg/L	158.31	175.57
SST	mg/L	125	213
SSV	mg/L	111	168
SSF	mg/L	14	45
STD	mg/L	7.32	6.09
N-amoniaco total	mg/L	330.00	150.00
DQO total	mgO ₂ /L	4452.83	3974.84
DQO filtrada	mgO ₂ /L	3622.64	3270.44

Fonte: Elaborada pelo autor.

Comparando os valores mostrados na Tabela 7, pode-se perceber que o efluente da lagoa LFII não apresenta resultados de remoção de carga orgânica significativamente menores em relação ao lixiviado bruto, isso pode ser observado na análise da DQO, por exemplo. Ainda, deve-se destacar que os valores que DQO são maiores que os apontados por Renou *et al.* (2008) *apud* Silva *et al.* (2004) para lixiviado de aterros sanitários no Brasil, que seria de 3460mg/L.

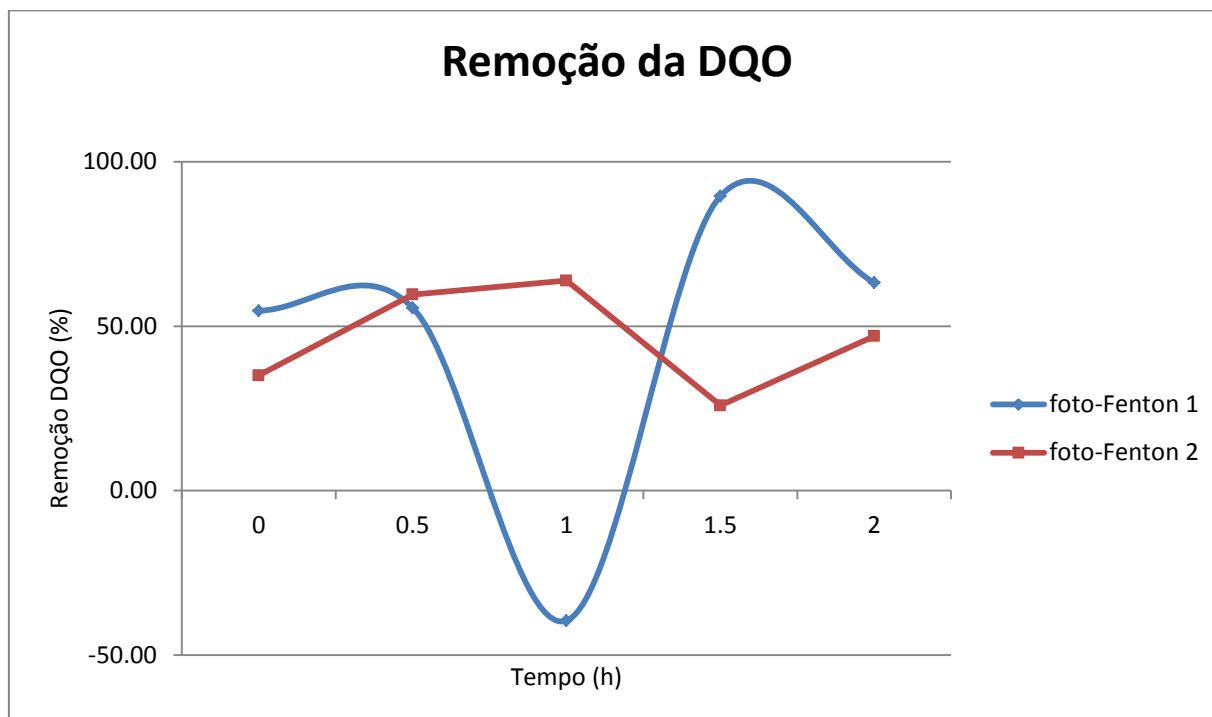
A DQO, a amônia e os SST ainda estão presentes em grandes quantidades no lixiviado tratado pelo sistema de lagoas, indicando que o processo de tratamento biológico utilizado atualmente no ASMJP não é eficaz na remoção dos compostos relacionados a esses parâmetros, o que é indesejável por representar contaminação remanescente no efluente que será lançado no corpo receptor.

5.1.2. Experimento de Fotocatálise solar homogênea utilizando o foto-Fenton: escala laboratorial

a) Remoção de DQO

O Gráfico 1 apresenta os valores da DQO ao longo do tempo de atuação do processo foto-Fenton, que foi de duas horas. Esses valores são os corrigidos após a determinação do peróxido residual. Verificou-se que no primeiro experimento, com a adição do H_2O_2 em uma só dose no início do processo, houve redução da DQO de 54-94%, com o pico ocorrendo após 1,5h do processo foto-Fenton; já o segundo teste, com adição de H_2O_2 a cada 30 minutos, obteve-se remoção entre 25-63%, sendo a máxima após 1h de experimento.

Gráfico 1 – Remoção da DQO do lixiviado do ASMJP em função do tempo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Era esperado que ocorresse uma redução acentuada da DQO durante todo o processo, semelhantes aos testes de foto-Fenton verificados por Rocha *et al.* (2011), que obtiveram redução de 86%. No entanto, como observado no Gráfico 1, a DQO, em alguns momentos sofreu aumento. Esses resultados inesperados de aumento de DQO em algumas etapas do processo em escala de laboratório podem ter ocorrido por vários fatores: o Jar-Test não era tão eficiente para o aproveitamento da energia solar; o aparecimento de nuvens durante o experimento, que reduziu a incidência de radiação UV, causando, consequentemente, a baixa conversão do H_2O_2 , que deve ter permanecido na amostra na hora da coleta; interferências na análise de DQO; demora na determinação do peróxido residual.

Ressalta-se que este teste foi preliminar, e que os resultados podem ter sofrido interferências de um sistema de absorção da radiação UV ineficiente e das reações do H_2O_2 com o $OH\bullet$, ocorrendo a diminuição da concentração desses radicais e geração de radicais hidroperoxila ($HO_2\bullet$), que são muito menos reativos que os primeiros, como afirmado por Primo *et al.* (2008).

Obteve-se, ainda, um valor negativo de remoção nos resultados, que significaria que matéria orgânica teria sido “criada” no processo. Porém, por se tratar de um sistema fechado, esse evento é impossível. Nesse caso, pode-se considerar que houve recombinação de

compostos que consumiram o dicromato durante a análise de DQO, mascarando o valor real, além da dificuldade de determinação do H_2O_2 .

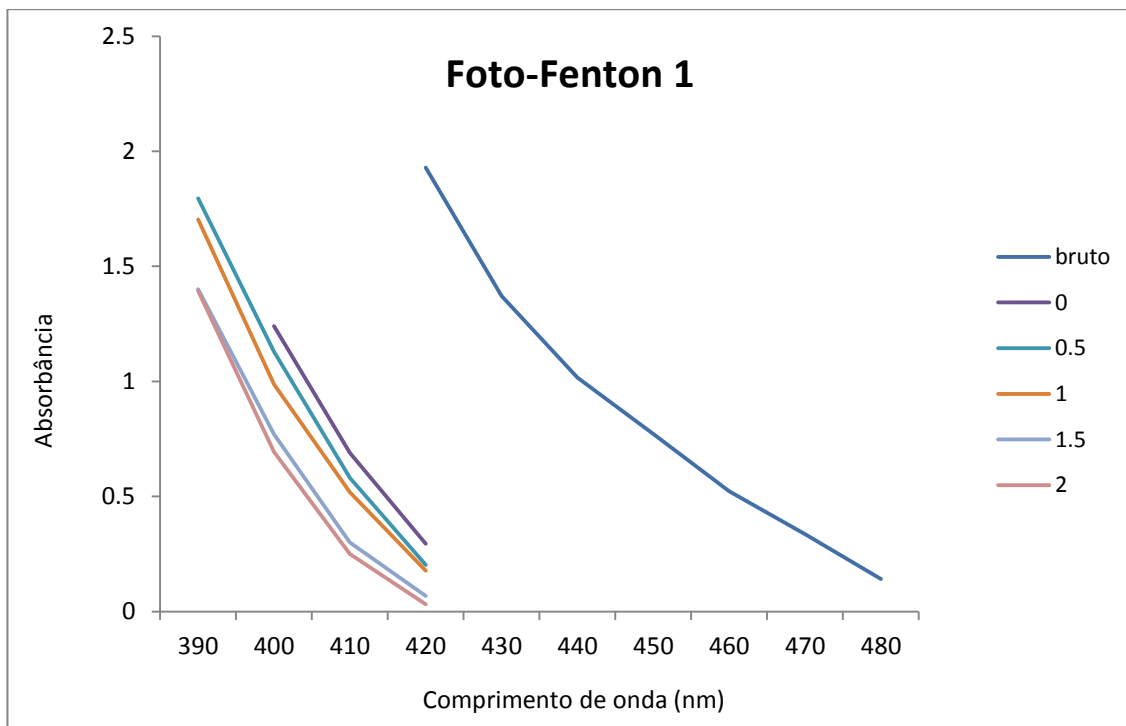
Observou-se que, nos testes realizados no presente trabalho, ao contrário do que Primo *et al.* (2008) relataram, a adição do peróxido de hidrogênio em etapas não aumentou a eficiência do processo. No entanto, é importante apontar que, mesmo com a homogeneização contínua do fluido no Jar-Test, os resultados de DQO tanto da amostra quanto do peróxido de hidrogênio foram discrepantes no segundo experimento, mostrando a dificuldade da análise do processo foto-Fenton com a adição do H_2O_2 em etapas devido às rápidas reações ocorridas no sistema na presença desse composto. Além disso, Primo *et al.* (2008) utilizaram o método de refluxo fechado colorimétrico para a determinação da DQO e a iodometria para o monitoramento da concentração do peróxido de hidrogênio, enquanto no presente trabalho utilizou-se o método da refluxação fechada titulométrico para quantificar a DQO e a permanganometria para o H_2O_2 residual. Para evitar a interferência do H_2O_2 na análise da DQO, sugere-se que futuros experimentos da mesma natureza sejam executados com métodos alternativos. Deng (2007), por exemplo, utilizou-se do método de aquecimento da amostra em banho maria a 50°C por 30 minutos para que todo o peróxido residual fosse volatilizado da solução antes de ser medido.

b) Descoloração

A remoção da cor do lixiviado é proporcional à redução de compostos que conferem a cor – grupos de aromáticos e outros que são recalcitrantes. A diminuição na absorbância indica que o efluente submetido ao processo foto-Fenton tende a reduzir sua recalcitrância.

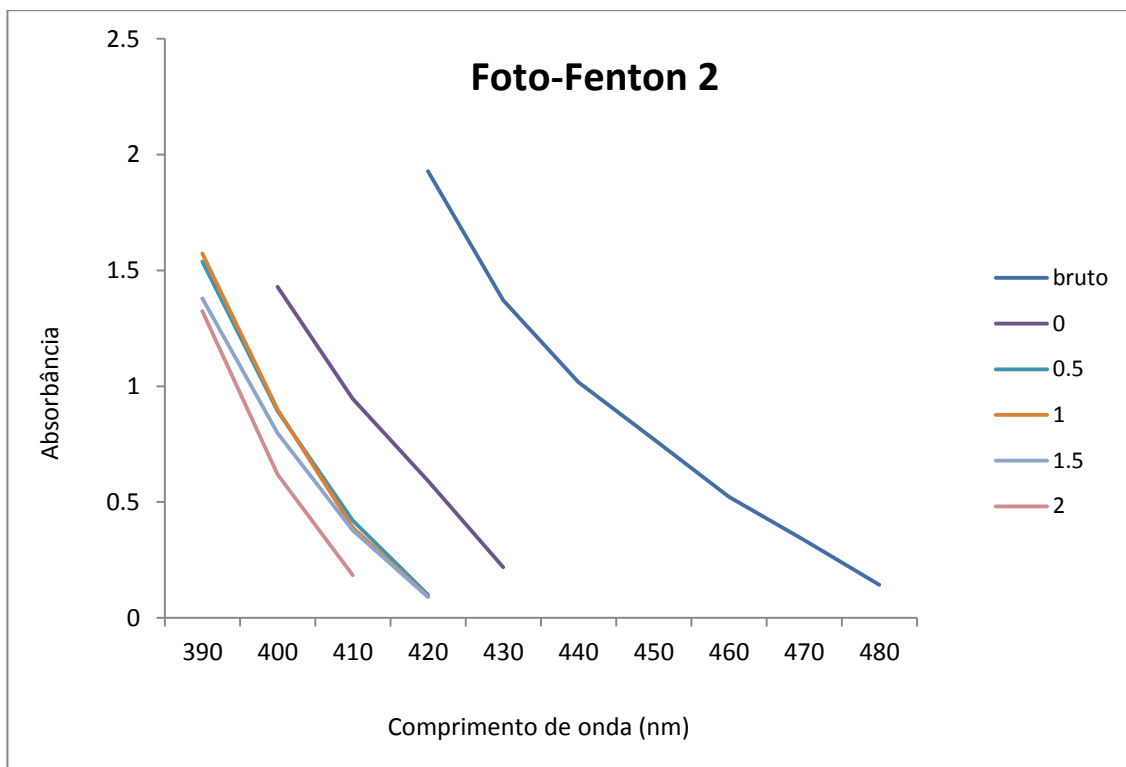
A análise dos Gráficos 2 e 3 mostram os espectros dos dois processos de foto-Fenton investigados na região visível (390 a 480 nm). Observou-se que houve uma redução considerável da absorbância do lixiviado bruto para a última amostra analisada de ambos os experimentos, após duas horas de exposição ao sol, indicando que houve diminuição dos compostos presentes no lixiviado na faixa visível analisada.

Gráfico 2 – Absorbância das amostras tratadas de lixiviado, por meio da fotocatalíse homogênea por foto-Fenton 1.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 3 – Absorbância das amostras tratadas de lixiviado, por meio da fotocatalíse homogênea por foto-Fenton 2.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os melhores resultados em termos de descoloração foram obtidos após 2h de fotocatalise, em que as amostras coletadas apresentaram bandas de absorbância variando entre 480nm a 390nm. Pode-se afirmar que certos compostos transformaram-se em outros que absorvem em faixa menor. É importante destacar que o experimento foi investigado apenas na região do visível, pois não houve acesso a um equipamento que fizesse a varredura da absorbância na faixa do UV. Mas, como pode ser visto pelos Gráficos 2 e 3, ainda poderia existir absorbância em comprimentos de onda menores que 290nm. Sendo assim, um intervalo maior do espectro pode ser analisado em um futuro trabalho.

Por ter sido realizado no inverno, algumas nuvens apareceram e sombrearam as amostras, reduzindo a passagem dos raios UV que chegava aos béqueres do Jar-Test.

O cálculo do NC foi realizado para mensurar a descoloração, e os resultados são mostrados na Tabela 8.

Tabela 8 – Descoloração segundo o cálculo do Número de Cor.

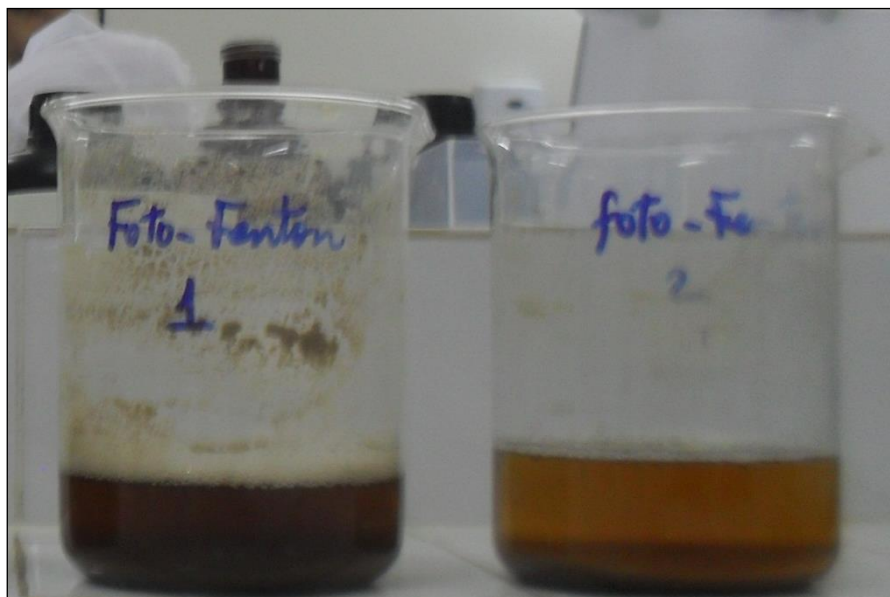
Tempo (h)	%Remoção	
	foto-Fenton 1	foto-Fenton 2
0,5	-	55,033
1	35,294	55,817
1,5	44,575	54,771
2	65,221	64,575

Fonte: Elaborada pelo autor.

Esses percentuais de remoção variando de 35-68% (foto-Fenton 1) e de 54-64% (foto-Fenton 2) indicam que o processo reduziu os compostos presentes no lixiviado que conferem cor ao mesmo.

Adicionalmente, por meios visuais, no laboratório, observou-se claramente a redução da cor do lixiviado bruto quando comparado às amostras submetidas ao processo foto-Fenton 1 e 2 (Figura 6), o que indica que esse método pode realmente eliminar compostos que conferem cor neste tipo de efluente.

Figura 6 – Amostras dos testes foto-Fenton 1 e foto-Fenton 2 após as duas horas de exposição ao Sol.



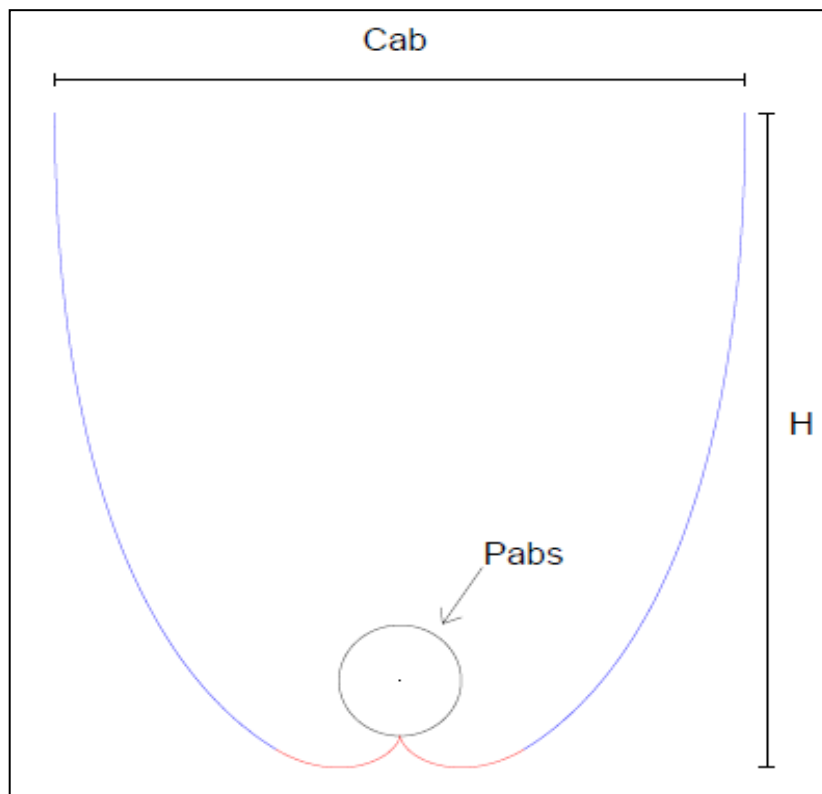
Fonte: Acervo do autor (2012).

5.2. Segunda etapa: elaboração do protótipo do fotorreator solar

As equações expostas por Oommen e Jayaraman (2001) levaram ao perfil do CPC mostrado na Figura 7, que foi produzida com a utilização do AutoCAD. A razão de concentração (R_c) encontrada é igual a 1,8; o comprimento da abertura (C_{ab}) é de 0,2714m; o perímetro do tubo (P_{abs}) equivale a 0,1508m; e a altura (H) do refletor igual a 0,2839m.

Os cálculos foram realizados no Excel seguindo as equações 4, 5, 6 e 7 supracitadas e estão descritos no Apêndice A. Com o perfil obtido, pode-se executar a construção do fotorreator solar proposto neste trabalho, que foi montado sobre uma plataforma refletora de alumínio fixa e inclinada 7° (latitude local).

Figura 7 – Perfil do protótipo do fotorreator dimensionado para o tratamento de efluentes recalcitrantes.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Figura 8 está o CPC construído e em funcionamento na UFPB, localizado no LES. Este fotorreator funciona com uma área de superfície coletora de $1,36\text{m}^2$ e volume de $0,016\text{m}^3$. A velocidade do sistema verificada pela equipe do laboratório equivale a $1,059\text{m/s}$, a vazão é de $1,872\text{m}^3/\text{h}$, e a temperatura do lixiviado no fotorreator se encontra na faixa de 35°C a 40°C . Posteriormente, a equipe calculou a potência da bomba, que foi de $0,12\text{CV}$ e, portanto, adquiriu-se uma bomba com potência comercial de $1/4\text{CV}$. Para o cálculo do orçamento, utilizou-se a bomba de potência $1/3\text{CV}$, pois a de $1/4\text{CV}$ estava fora do mercado em 2014.

Figura 8 - Fotorreator catalítico localizado na UFPB em funcionamento para o tratamento do lixiviado do ASMJP.



Fonte: Acervo do autor (2014).

Vilar *et al.* (2011) fez o uso de um fotorreator solar como o da Figura 8 acima e observou que o processo de fotocatalise solar por foto-Fenton é muito eficiente no tratamento de lixiviado, pois proporciona o aumento da biodegradabilidade do líquido, tornando possível a combinação desse método com um posterior tratamento biológico.

Além disso, este equipamento é atualmente utilizado no desenvolvimento de pesquisas com POA, como o TiO_2 , o Foto-Fenton e o $\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$, para o tratamento do lixiviado do ASMJP. Lucena *et al.* (2014) utilizaram o fotorreator construído com o método foto-Fenton e conseguiram resultados positivos em relação à remoção de DQO, 85%, e cor, 86,42%, do lixiviado em questão. Esse fato confirma o sucesso do dimensionamento e execução do equipamento e expressa a importância deste TCC para futuras pesquisas na área de tratamento de efluentes utilizando-se POA na UFPB.

Os custos para construção do protótipo foram levantados em 2014 e estão expressos na Tabela 9. A compra em escala industrial poderá reduzir tais valores.

Tabela 9 – Orçamento dos itens para construção do protótipo do fotorreator solar (dados de 2014).

Item	Quantidade	Preço unitário
Tubo de Vidro Borosilicato ØE 48mm x 1,6mm esp. x 1500mm	6	248,52
Chapa 304 A240 2000mm x 1220mm x 0,60mm BA/PVC	2	237,60
Mão de obra, conexões, madeira (ano 2013)		500,00
Bombona de plástico 70L	1	40,00
Schneider Motorbomba (BC-98 1/3CV monofásico 220V 60H)	1	295,00
Valor total:		2.801,32

Fonte: Elaborada pelo autor.

6. CONCLUSÃO

Como foi visto, nesta pesquisa, estudou-se primeiramente a potencialidade da utilização do processo foto-Fenton no tratamento do lixiviado do ASMJP. Já que resultados positivos foram encontrados no teste de bancada realizado em laboratório, ou seja, houve significativa remoção de DQO e cor, resolveu-se então dimensionar e construir um fotorreator solar.

É importante apontar que o fotorreator construído e os resultados obtidos no teste preliminar realizado podem ser utilizados para projetos posteriores objetivando o aperfeiçoamento do processo foto-Fenton ou de outros POA. Assim, tornar-se-á possível a utilização desses métodos em escala real no tratamento do lixiviado do ASMJP ou de outro tipo de efluente com características semelhantes.

Nesse âmbito, sugere-se que pesquisas visando à otimização das variáveis interferentes no processo foto-Fenton no fotorreator sejam executadas a fim de melhorar os resultados de remoção de compostos orgânicos e outros poluentes que conferem recalcitrância ao efluente em questão.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos - Procedimento.** NBR-8419/84. São Paulo, 13p, 1984.
- BANDALA, E. R. *et al.* **Solar photoreactors comparison based on oxalic acid photocatalytic degradation.** Solar Energy, Vol. 77, 503–512p, 2004.
- BARROS, A. J. S.; LEHFELD, N. A. S. **Fundamentos de metodologia Científica: um guia para a iniciação científica.** 2. ed. São Paulo: Makron Books, 2000.
- BERTAZZOLI, R.; PELEGRINI, R. **Descoloração e degradação de poluentes orgânicos em soluções aquosas através do processo fotoeletroquímico.** Quim. Nova, Vol. 25, No. 3, 477-482p, 2002.
- BRASIL. **Política Nacional do Meio Ambiente: Lei nº 6938 de 31 de agosto de 1981.** Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L6938.htm>. Acesso em 10 de março de 2014.
- COSTA, D. M.; SOBRAL, M. C. M.; OLIVEIRA, A. G. de; MELO, I. V. de. **Avaliação dos instrumentos de gestão ambiental do Aterro Sanitário Metropolitano de João Pessoa – PB.** In: 3º Simpósio Iberoamericano de Ingeniería de Resíduos, 2º Seminário da Região Nordeste sobre Resíduos Sólidos. João Pessoa, 2010.
- DANTAS, T. L. P. **Decomposição de peróxido de hidrogênio em um catalisador híbrido e oxidação avançada de efluente têxtil por reagente Fenton modificado.** Dissertação do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Química, UFSC, Florianópolis, 2005.
- DENG, Y. **Physical and oxidative removal of organics during Fenton treatment of mature municipal landfill leachate.** Journal of hazardous materials, Vol. 146, No. 1-2, 334–40p, 2007.
- DUARTE, E. T. F. M.; XAVIER, T. P.; SOUZA, D. R. de; MIRANDA, J. A. de; MACHADO, E. da H.; JUNG, C.; OLIVEIRA, L. de; SATTTLER, C. **Construção e estudos de performance de um reator fotoquímico tipo CPC (“Compound Parabolic Concentrator”).** Química Nova, Vol. 28, No. 5, 921-926p, 2005.
- FARIAS, D. O. de.; VIEIRA, F. F.; ROSAS, J. F.; LIMA, G. G. C. de.; LIMA, C. A. P. de. **Tratamento de lixiviado de aterro sanitário, usando os processos Fenton e foto-Fenton: Avaliação de parâmetros operacionais.** In: XIII Silubesa – Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Belém, 2008.

FUNARI, F. L.; TARIFA, J. R. **Insolação, Radiação Solar Global e Radiação Líquida no Brasil**. Anais Congressos Brasileiros de Meteorologia, 1984. Disponível em: <http://www.cbmet.com/edicoes.php?pageNum_Recordset_busca=1&totalRows_Recordset_busca=84&cgid=17>. Acesso em 17 de novembro de 2011 às 15h22min.

GHALY, M. Y.; JAMIL, T. S.; EL-SEESY, I. E.; SOUAYA, E. R.; NASR, R. A. **Treatment of highly polluted paper mill wastewater by solar photocatalytic oxidation with synthesized nano TiO₂**. Chemical Engineering Journal 168, 446-454p, 2011.

HERMOSILLA, D.; CORTIJO, M.; HUANG, C. P. **Optimizing the treatment of landfill leachate by conventional Fenton and photo-Fenton processes**. Science of the Total Environment 407, 3473-3481p, 2009.

KAMMRADT, P. B. **Remoção de cor de efluentes de tinturarias industriais através de processo de oxidação avançada**. Dissertação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, UFPR, Curitiba, 2004.

KANG, Y. W.; CHO, M. J.; HWANG, K. Y. **Correction of hydrogen peroxide interference on standard chemical oxygen demand test**. Water Research, 33 (5), 1247-1251p, 1999.

KOCHANY, J.; LIPCZYNSKA-KOCHANY, E. **Utilization of landfill leachate parameters for pretreatment by Fenton reaction and struvite precipitation – A comparative study**. Journal of Hazardous Materials 166, 248-254p, 2009.

LUCENA, L. G.; MELO, M. M. M.; ROCHA, E. M. R.; ANJOS JUNIOR, R. H. dos.; SILVA, E. S. da. **Uso da fotocatalise solar homogênea (Fe²⁺/H₂O₂/UV) na descoloração de lixiviados de aterro sanitário**. In: XII Sibesa e XII Simpósio Ítalo-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Natal, 2014.

MALATO, S.; FERNÁNDEZ-IBÁÑEZ, P.; MALDONADO, M.I.; BLANCO, J.; GERNJAK, W. **Decontamination and disinfection of water by solar photocatalysis: Recent overview and trends**. Catalysis Today 147, 1-59p, 2009.

MALATO-RODRIGUEZ, S.; GÁLVEZ, J. B.; RUBIO, M. I. M.; FERNÁNDEZ-IBÁÑEZ, P. D.; PADILLA, A.; PERREIRA, M. C.; MENDES, J. F.; OLIVEIRA, J. C. **Engineering of solar photocatalytic Collectors**. Solar Energy 77, 513-524p, 2004.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. **Fundamentos de metodologia científica**. 5 ed. São Paulo: Atlas, 2003.

MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B.; ECHER, M. P. de S. **Levantamento dos recursos de energia solar no Brasil com o emprego de satélite geoestacionário – o Projeto Swera**. Revista Brasileira de Ensino de Física, Vol. 26, No. 2, 145 – 159p, 2004.

MENDHAM, J.; DENNEY, R. C.; BARNES, J. D.; THOMAS, M. J. K. Vogel, **Análise de Química Analítica**. 6ª edição. LTC Editora, 2006.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, Resolução nº 430, de 13 de Maio de 2011. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=646>>. Acesso em 10 de março de 2014.

MORAIS, J. L.; ZAMORA, P. P. **Use of advanced oxidation processes to improve the biodegradability of mature landfill leachates.** Journal of Hazardous Materials B123, 181-186p, 2005.

NEYENS, E.; BAEYENS, J. **A review of classic Fenton's peroxidation as an advanced oxidation technique.** Journal of Hazardous Materials b98. 33-50p, 2003.

NOGUEIRA, R.; TROVÓ, A.; SILVA, M.; VILLA, R.; OLIVEIRA, C. **Fundamentos e aplicações ambientais dos processos Fenton e foto-Fenton.** Quim. Nova, Vol. 30, No. 2, 400-408p, 2007.

OMAN, C. B.; JUNESTEDT, C. **Chemical characterization of landfill leachates – 400 parameters and compounds.** Waste Management 28, 1876-1891p, 2008.

OOMMEN, R.; JAYARAMAN, S. **Development and performance analysis of compound parabolic solar concentrators with reduced gap losses – oversized reflector.** Energy Conversion and Management 42, 1379-1399p, 2001.

PASCOAL, S. A.; LIMA, C. A. P.; SOUSA, J. T.; LIMA, G. G. C.; VIEIRA, F. F. **Aplicação de radiação uv artificial e solar no tratamento fotocatalítico de efluentes de curtume.** Quim. Nova, Vol. 30, No. 5, 1082-1087p, 2007.

PRIMO, O.; RIVERO, M.J.; ORTIZ, I. **Photo-Fenton process as an efficient alternative to the treatment of landfill leachates.** Journal of Hazardous Materials 153, 834–842p, 2008.

RENOU, S.; GIVAUDAN, J.G.; PULAIN, S.; DIRASSOUYAN, F.; MOULIN, P. **Landfill leachate treatment: Review and opportunity.** Journal of Hazardous Materials. 48-493p, 2008.

ROBERT, D; MALATO, S. **Solar photocatalysis: a clean process for water detoxification.** The Science of the Total Environment 291, 85-97p, 2002.

ROCHA, E.; VILAR, V.; FONSECA, A.; SARAIVA, I.; BOAVENTURA, R. **Landfill leachate treatment by solar-driven AOPs.** Solar Energy 85, 46-56p, 2011.

ROCHA, E. M. R. **Avaliação de sistemas de pós-tratamentos de lixiviados por processos biológicos e oxidativos avançados e o desenvolvimento analítico para detecção e quantificação de compostos recalcitrantes.** Fortaleza, Universidade Federal do Ceará, 2010.

SANTOS, A. B. dos.; SILVA, A. D. G.; COELHO, M. G.; CARDOSO, V. L. **Tratamento de líquido percolado gerado em aterro sanitário por processo oxidativo avançado – processo foto-Fenton combinado ao processo biológico anaeróbio: eficiência do reator CPC “compound parabolic concentrator”**. In: VIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica. Uberlândia, 2009.

SILVA, S. A.; OLIVEIRA, R. de. **Manual de Análises Físico-Químicas de Águas de Abastecimento e Residuárias**. Paraíba: Campina Grande, 266p, 2001.

SILVA, S. A.; OLIVEIRA, R. de. **Manual de Análises Físico-Químicas de Águas de Abastecimento e Residuárias**. Paraíba: Campina Grande, 266p, 2001.

SILVESTRE, G.D.; SILVESTRE FILHO, G.D. **Apresentação e monitoramento das atividades operacionais no Aterro Sanitário Metropolitano de João Pessoa – ASMJP**. In: 3º Simposio Iberoamericano de Ingenieria de Residuos e 2º Seminário da Região Nordeste sobre Resíduos Sólidos. João Pessoa, 2010.

SOUTO, G.D.B.; POVINELLI, J. **Características do lixiviado de aterros sanitários no Brasil**. In: 24º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Belo Horizonte, 2007.

TEIXEIRA, C.P.A.B.; JARDIM, W.F. **Caderno Temático Volume 3 – Processos Oxidativos Avançados**. Campinas: UNICAMP, 2004.

TOKOMURA, M.; ZNAD, H.; KAWASE, Y. **Decolorization of dark brown colored coffee effluent by solarphoto-Fenton reaction: Effect of solar light dose on decolorization kinetics**. Water Research 42, 4665-4673p, 2008.

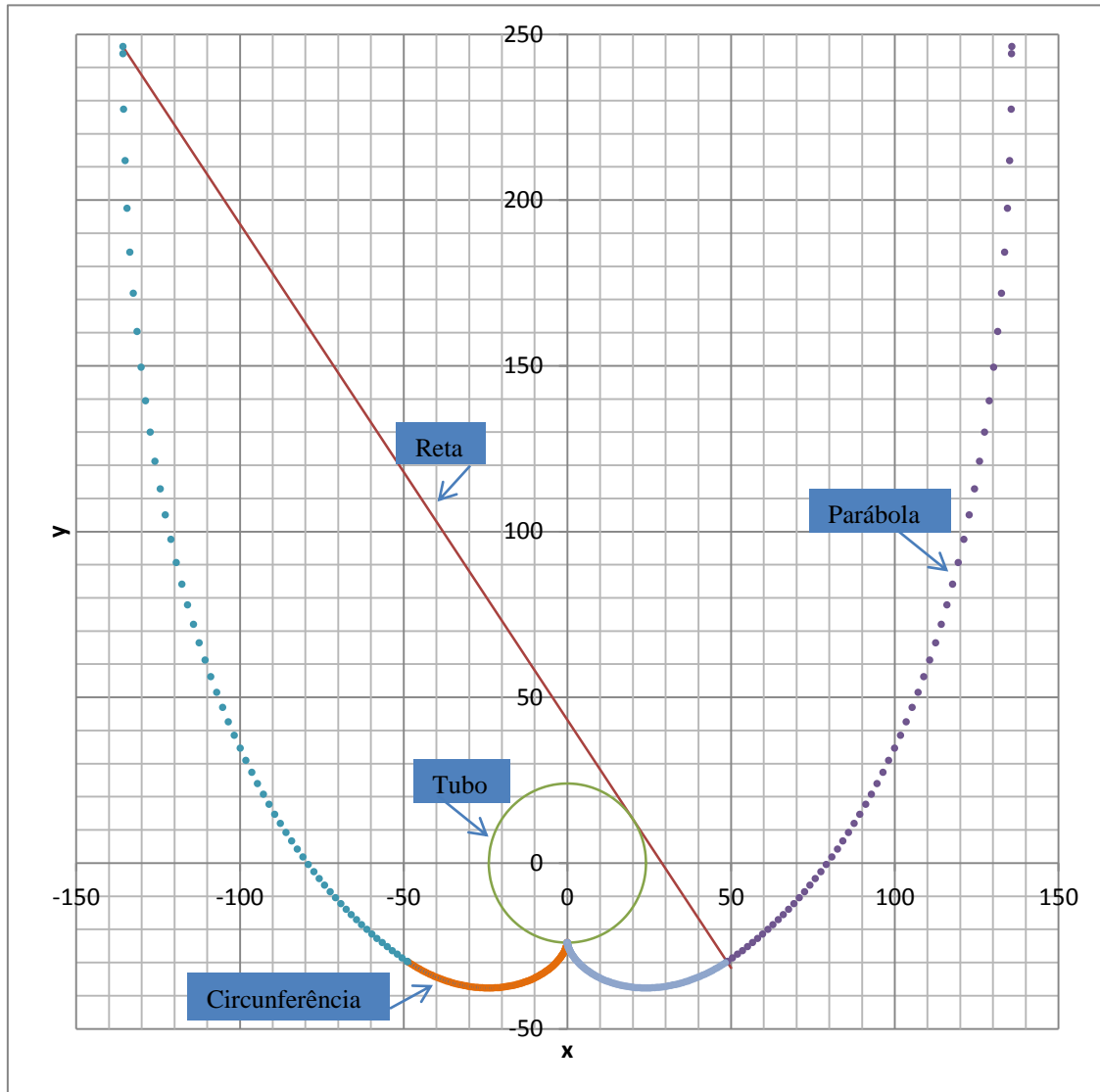
TRUJILLO, D.; FONT, X.; SÁNCHEZ, A. **Use of Fenton reaction for the treatment of leachate from composting of different wastes**. Journal of Hazardous Materials B138, 201-204p, 2006.

UMAR, M.; AZIZ, H.; YUSOFF, M. **Trends in the use of Fenton, electro-Fenton and photo-Fenton for the treatment of landfill leachate**. Waste Management 30, 2113-2121p, 2010.

VILAR, V. J. P.; CAPELO, S. M. S.; SILVA, T. F. C.; BOAVENTURA, R. A. **Solar photo-Fenton as a pre-oxidation step for biological treatment of landfill leachate in a pilot plant with CPCs**. Catalysis Today 161, 228-234p, 2011.

WELFORD, W.T., WINSTON, R. **The Optics of Nonimaging Concentrators: Light and Solar Energy**. Academic Press, 1978.

APÊNDICE A – Perfil do CPC e cálculos realizados segundo as equações expostas por Oommen e Jayaraman (2001)



Circunferência – Requisito I														
Θ	ρ	x	y	(- x)	Θ	ρ	x	y	(- x)	Θ	ρ	x	y	(- x)
123,75	51,84	48,75	-29,77	-48,75	99,00	41,47	30,19	-37,20	-30,19	74,00	31,00	14,53	-36,41	-14,53
123,00	51,52	48,19	-30,14	-48,19	98,00	41,05	29,48	-37,31	-29,48	73,00	30,58	14,01	-36,26	-14,01
122,00	51,10	47,43	-30,62	-47,43	97,00	40,63	28,77	-37,40	-28,77	72,00	30,16	13,51	-36,10	-13,51
121,00	50,68	46,68	-31,08	-46,68	96,00	40,21	28,07	-37,48	-28,07	71,00	29,74	13,01	-35,93	-13,01
120,00	50,27	45,92	-31,53	-45,92	95,00	39,79	27,38	-37,55	-27,38	70,00	29,32	12,52	-35,76	-12,52
119,00	49,85	45,16	-31,96	-45,16	94,00	39,37	26,69	-37,60	-26,69	69,00	28,90	12,05	-35,58	-12,05
118,00	49,43	44,40	-32,37	-44,40	93,00	38,96	26,01	-37,65	-26,01	68,00	28,48	11,58	-35,40	-11,58
117,00	49,01	43,63	-32,77	-43,63	92,00	38,54	25,33	-37,68	-25,33	67,00	28,06	11,13	-35,21	-11,13
116,00	48,59	42,87	-33,15	-42,87	91,00	38,12	24,66	-37,69	-24,66	66,00	27,65	0,68	-35,02	-10,68
115,00	48,17	42,11	-33,51	-42,11	90,00	37,70	24,00	-37,70	-24,00	65,00	27,23	10,24	-34,82	-10,24
114,00	47,75	41,35	-33,86	-41,35	89,00	37,28	23,35	-37,69	-23,35	64,00	26,81	9,82	-34,62	-9,82
113,00	47,33	40,59	-34,19	-40,59	88,00	36,86	22,70	-37,68	-22,70	63,00	26,39	9,40	-34,41	-9,40
112,00	46,91	39,83	-34,51	-39,83	87,00	36,44	22,06	-37,65	-22,06	62,00	25,97	9,00	-34,20	-9,00
111,00	46,50	39,07	-34,81	-39,07	86,00	36,02	21,43	-37,61	-21,43	61,00	25,55	8,60	-33,98	-8,60
110,00	46,08	38,31	-35,09	-38,31	85,00	35,60	20,81	-37,56	-20,81	60,00	25,13	8,22	-33,77	-8,22
109,00	45,66	37,56	-35,36	-37,56	84,00	35,19	20,19	-37,50	-20,19	59,00	24,71	7,84	-33,54	-7,84
108,00	45,24	36,80	-35,61	-36,80	83,00	34,77	19,58	-37,43	-19,58	58,00	24,29	7,48	-33,32	-7,48
107,00	44,82	36,06	-35,84	-36,06	82,00	34,35	18,99	-37,35	-18,99	57,00	23,88	7,12	-33,10	-7,12
106,00	44,40	35,31	-36,07	-35,31	81,00	33,93	18,40	-37,27	-18,40	56,00	23,46	6,78	-32,87	-6,78
105,00	43,98	34,57	-36,27	-34,57	80,00	33,51	17,82	-37,17	-17,82	55,00	23,04	6,45	-32,64	-6,45
104,00	43,56	33,83	-36,46	-33,83	79,00	33,09	17,24	-37,06	-17,24	54,00	22,62	6,12	-32,41	-6,12
103,00	43,14	33,09	-36,64	-33,09	78,00	32,67	16,68	-36,95	-16,68	53,00	22,20	5,81	-32,17	-5,81
102,00	42,73	32,36	-36,80	-32,36	77,00	32,25	16,13	-36,83	-16,13	52,00	21,78	5,50	-31,94	-5,50
101,00	42,31	31,63	-36,95	-31,63	76,00	31,83	15,59	-36,70	-15,59	51,00	21,36	5,21	-31,71	-5,21
100,00	41,89	30,91	-37,08	-30,91	75,00	31,42	15,05	-36,56	-15,05	50,00	20,94	4,92	-31,47	-4,92

Circunferência (cont.) – Requisito I														
Θ	ρ	x	y	(- x)	Θ	ρ	x	y	(- x)	Θ	ρ	x	y	(- x)
49,00	20,53	4,65	-31,24	-4,65	31,00	12,99	1,23	-27,26	-1,23	13,00	5,45	0,09	-24,61	-0,09
48,00	20,11	4,38	-31,00	-4,38	30,00	12,57	1,12	-27,07	-1,12	12,00	5,03	0,07	-24,52	-0,07
47,00	19,69	4,13	-30,77	-4,13	29,00	12,15	1,01	-26,88	-1,01	11,00	4,61	0,06	-24,44	-0,06
46,00	19,27	3,88	-30,53	-3,88	28,00	11,73	0,91	-26,70	-0,91	10,00	4,19	0,04	-24,36	-0,04
45,00	18,85	3,64	-30,30	-3,64	27,00	11,31	0,82	-26,52	-0,82	9,00	3,77	0,03	-24,29	-0,03
44,00	18,43	3,41	-30,07	-3,41	26,00	10,89	0,73	-26,35	-0,73	8,00	3,35	0,02	-24,23	-0,02
43,00	18,01	3,19	-29,84	-3,19	25,00	10,47	0,65	-26,18	-0,65	7,00	2,93	0,01	-24,18	-0,01
42,00	17,59	2,99	-29,61	-2,99	24,00	10,05	0,58	-26,01	-0,58	6,00	2,51	0,01	-24,13	-0,01
41,00	17,17	2,78	-29,38	-2,78	23,00	9,63	0,51	-25,86	-0,51	5,00	2,09	0,01	-24,09	-0,01
40,00	16,76	2,59	-29,16	-2,59	22,00	9,22	0,45	-25,70	-0,45	4,00	1,68	0,00	-24,06	0,00
39,00	16,34	2,41	-28,93	-2,41	21,00	8,80	0,39	-25,56	-0,39	3,00	1,26	0,00	-24,03	0,00
38,00	15,92	2,23	-28,71	-2,23	20,00	8,38	0,34	-25,42	-0,34	2,00	0,84	0,00	-24,01	0,00
37,00	15,50	2,07	-28,49	-2,07	19,00	7,96	0,29	-25,28	-0,29	1,00	0,42	0,00	-24,00	0,00
36,00	15,08	1,91	-28,28	-1,91	18,00	7,54	0,25	-25,16	-0,25	0,00	0,00	0,00	-24,00	0,00
35,00	14,66	1,76	-28,07	-1,76	17,00	7,12	0,21	-25,03	-0,21					
34,00	14,24	1,61	-27,86	-1,61	16,00	6,70	0,17	-24,92	-0,17					
33,00	13,82	1,48	-27,66	-1,48	15,00	6,28	0,14	-24,81	-0,14					
32,00	13,40	1,35	-27,46	-1,35	14,00	5,86	0,12	-24,71	-0,12					

Parábola – Requisito II														
Θ	ρ	x	y	$(-x)$	Θ	ρ	x	y	$(-x)$	Θ	ρ	x	y	$(-x)$
123,75	51,84	48,75	-29,77	-48,75	172,00	85,11	87,63	11,92	-87,63	222,00	196,82	130,21	149,53	-130,21
124,00	51,94	48,94	-29,64	-48,94	174,00	87,33	89,36	14,74	-89,36	224,00	205,93	131,46	160,31	-131,46
126,00	52,80	50,45	-28,61	-50,45	176,00	89,65	91,11	17,69	-91,11	226,00	215,73	132,59	171,85	-132,59
128,00	53,69	51,97	-27,53	-51,97	178,00	92,08	92,86	20,77	-92,86	228,00	226,31	133,59	184,24	-133,59
130,00	54,61	53,49	-26,41	-53,49	180,00	94,62	94,62	24,00	-94,62	230,00	237,75	134,44	197,55	-134,44
132,00	55,57	55,02	-25,24	-55,02	182,00	97,29	96,39	27,38	-96,39	232,00	250,15	135,09	211,89	-135,09
134,00	56,57	56,56	-24,02	-56,56	184,00	100,08	98,17	30,92	-98,17	234,00	263,61	135,53	227,37	-135,53
136,00	57,60	58,11	-22,75	-58,11	186,00	103,02	99,95	34,64	-99,95	236,00	278,27	135,71	244,12	-135,71
138,00	58,68	59,66	-21,43	-59,66	188,00	106,11	101,73	38,53	-101,73	236,25	280,20	135,71	246,31	-135,71
140,00	59,79	61,23	-20,05	-61,23	190,00	109,35	103,52	42,62	-103,52					
142,00	60,95	62,80	-18,61	-62,80	192,00	112,77	105,31	46,92	-105,31					
144,00	62,15	64,39	-17,12	-64,39	194,00	116,37	107,10	51,44	-107,10					
146,00	63,40	65,98	-15,56	-65,98	196,00	120,16	108,89	56,19	-108,89					
148,00	64,70	67,59	-13,93	-67,59	198,00	124,17	110,68	61,20	-110,68					
150,00	66,05	69,20	-12,24	-69,20	200,00	128,40	112,45	66,47	-112,45					
152,00	67,45	70,82	-10,47	-70,82	202,00	132,89	114,22	72,03	-114,22					
154,00	68,91	72,46	-8,64	-72,46	204,00	137,63	115,97	77,91	-115,97					
156,00	70,43	74,10	-6,72	-74,10	206,00	142,67	117,71	84,11	-117,71					
158,00	72,01	75,75	-4,72	-75,75	208,00	148,01	119,42	90,68	-119,42					
160,00	73,65	77,42	-2,64	-77,42	210,00	153,70	121,11	97,63	-121,11					
162,00	75,37	79,09	-0,46	-79,09	212,00	159,75	122,76	105,01	-122,76					
164,00	77,15	80,78	1,80	-80,78	214,00	166,20	124,37	112,84	-124,37					
166,00	79,02	82,48	4,17	-82,48	216,00	173,09	125,93	121,16	-125,93					
168,00	80,96	84,18	6,64	-84,18	218,00	180,46	127,43	130,01	-127,43					
170,00	82,99	85,90	9,22	-85,90	220,00	188,35	128,86	139,46	-128,86					

Tubo					
Θ	x	y	Θ	x	y
0,0	24,0	0,0	3,2	-24,0	-1,4
0,1	23,9	2,4	3,3	-23,7	-3,8
0,2	23,5	4,8	3,4	-23,2	-6,1
0,3	22,9	7,1	3,5	-22,5	-8,4
0,4	22,1	9,3	3,6	-21,5	-10,6
0,5	21,1	11,5	3,7	-20,4	-12,7
0,6	19,8	13,6	3,8	-19,0	-14,7
0,7	18,4	15,5	3,9	-17,4	-16,5
0,8	16,7	17,2	4,0	-15,7	-18,2
0,9	14,9	18,8	4,1	-13,8	-19,6
1,0	13,0	20,2	4,2	-11,8	-20,9
1,1	10,9	21,4	4,3	-9,6	-22,0
1,2	8,7	22,4	4,4	-7,4	-22,8
1,3	6,4	23,1	4,5	-5,1	-23,5
1,4	4,1	23,7	4,6	-2,7	-23,8
1,5	1,7	23,9	4,7	-0,3	-24,0
1,6	-0,7	24,0	4,8	2,1	-23,9
1,7	-3,1	23,8	4,9	4,5	-23,6
1,8	-5,5	23,4	5,0	6,8	-23,0
1,9	-7,8	22,7	5,1	9,1	-22,2
2,0	-10,0	21,8	5,2	11,2	-21,2
2,1	-12,1	20,7	5,3	13,3	-20,0
2,2	-14,1	19,4	5,4	15,2	-18,5
2,3	-16,0	17,9	5,5	17,0	-16,9
2,4	-17,7	16,2	5,6	18,6	-15,2
2,5	-19,2	14,4	5,7	20,0	-13,2
2,6	-20,6	12,4	5,8	21,3	-11,2
2,7	-21,7	10,3	5,9	22,3	-9,0
2,8	-22,6	8,0	6,0	23,0	-6,7
2,9	-23,3	5,7	6,1	23,6	-4,4
3,0	-23,8	3,4	6,2	23,9	-2,0
3,1	-24,0	0,0	6,3	24,0	0,0

Reta	
x	y
50	-31.62
40	-16.66
30	-1.7
0	13.26
10	28.22
0	43.18
-10	58.14
-20	73.1
-30	88.06
-40	103.02
-50	117.98
-60	132.94
-70	147.9
-80	162.86
-90	177.82
-100	192.78
-110	207.74
-120	222.7
-135.713	246.2065