

UTILIZAÇÃO DE UM EVAPORADOR SOLAR NA REDUÇÃO DO VOLUME DE
UM EFLUENTE LABORATORIAL¹

Tânia Regina de Souza²

¹Aceito para Publicação no 4º Trimestre de 2016.

²Professora Dra. Na Universidade Federal do Pampa- UNIPAMPA,
tania.souza31@hotmail.com.

Resumo

O lançamento de efluentes no ambiente tem se tornado um problema para diversas empresas, pois os órgãos de controle ambiental passaram a ser muito rigorosos nos padrões e condições estabelecidos para lançar tal efluente na rede coletora ou corpos d'água. Para tanto, as empresas devem possuir um setor de tratamento de efluentes ou destiná-lo para uma empresa especializada nesse tipo de tratamento. Essas empresas especializadas cobram por litro de efluente recebido e uma alternativa para redução de custo, seria um pré-tratamento do efluente visando uma redução de volume. Uma operação unitária muito utilizada para esse fim é a evaporação, que tem por intenção concentrar soluções constituídas de solventes voláteis e solutos considerados não-voláteis, pela evaporação parcial do solvente. O objetivo deste trabalho é utilizar um evaporador solar para realizar uma redução de volume, concentrando uma solução de azul de metileno, obtida como resíduo laboratorial. A inclinação do equipamento é mantida em 20° e a vazão mássica de alimentação da solução em $1,5 \cdot 10^{-3}$ kg/s, valores esses determinados em experimentos anteriores, na obtenção de melhor resultados, com o mesmo evaporador solar. Os resultados obtidos mostram os espectros de absorvância e os valores das taxas de evaporação realizados a cada 30 minutos.

Palavras chave: Evaporação, energia solar, efluente.

USE OF A SOLAR EVAPORATOR TO REDUCE THE VOLUME OF A WASTE LABORATORY

Abstract

Effluent releases into the environment has become a problem for many companies due to strict standards and conditions set by environmental organizations regarding the discharge of effluents into collection systems or water bodies. Therefore, companies must have an effluent treatment plant or assign it to a company that specializes in this kind of treatment. These specialized companies charge per liter of effluent, hence, an alternative and cost reduction option would be a pretreatment aiming the effluent volume reduction. A unit operation widely used for this purpose is the evaporation, which is intended to concentrate solutions composed of volatile solvents and solutes considered non-volatile, through the partial evaporation of the solvent. The objective of this work is to use a solar evaporator to achieve a reduction of volume, concentrating a methylene blue solution obtained from laboratory waste. The equipment inclination is maintained at 20° and the mass flow of feed solution at $1,5 \cdot 10^{-3}$ kg/s, these values have been determined in preceding experiments and have obtained the best results with the same solar evaporator. The results present the absorbance spectra and the evaporation rate values, performed every 30 minutes.

Keyword: Evaporation, solar energy, effluent.

Introdução

A energia solar é uma boa opção na busca por alternativas menos agressivas ao meio ambiente, pois consiste numa fonte energética renovável e limpa, não emitindo poluentes (Palz, 1981).

A energia solar é abundante e pode ser utilizada de diversas maneiras, tais como: aquecimento de ar e água para fins domésticos e industriais, geração de energia elétrica, dessanilização de águas salobras, climatização de ambientes, concentração de substâncias diluídas, dentre outros (Prado, 1980).

A fim de concentrar soluções diluídas e que possuam solutos prejudiciais a saúde e ao meio ambiente, pode-se utilizar a energia solar (Macedo, 1996). Essa concentração apresenta vantagens quando comparado com o método tradicional que utiliza vapor como meio de aquecimento, uma vez que o vapor é proveniente de caldeiras que utilizam combustíveis não renováveis e emitem CO₂ na atmosfera.

Outra vantagem de concentrar tais soluções é sua redução de volume que consiste em uma etapa de pré-tratamento de efluentes industriais. Essa etapa facilita o seu tratamento final, diminuindo o tempo de operação e custo operacional. Vale a pena ressaltar que o lançamento de efluente ao meio ambiente está cada vez mais controlado e com maior fiscalização por parte dos órgãos ambientais (Aldabó, 2002).

O trabalho apresentado por Souza et al. (2008) mostra as aplicações térmicas da energia solar na concentração de soluções diluídas (efluentes industriais) como uma forma de uso de energia alternativa. Este trabalho, realizado em São Paulo (Brasil), mostrou que a porcentagem de evaporação nos meses mais quentes do ano esteve em torno de 25% e nos meses de inverno em torno de 15%.

É interessante a aplicação dessa técnica na redução de efluentes com uma concentração elevada de corantes. Um desses corantes é o azul de metileno, um corante tóxico e cancerígeno. Esses efluentes, quando liberados em corpos aquáticos, além de alterar a cor do corpo receptor, afetam os processos fotossintéticos da flora aquática, podendo matá-la (YANG *et al.*, 2014).

A Tabela 1 apresenta a estrutura química e principais propriedades do corante azul de metileno.

Tabela 1 – Propriedades do corante Azul de Metileno.

Corante Orgânico	Azul de Metileno
Fórmula química	C ₁₆ H ₁₈ SN ₃ Cl.3H ₂ O
Comprimento de onda de máxima absorção (λ _{máx.})	650 – 700 nm
Peso molecular (g.gmol ⁻¹)	319,85 X H ₂ O
pH	≈3

Fonte: Adaptado de Labsynth, 2015

Com base em Pereira (2014), o Azul de Metileno possui anéis aromáticos, intercalados por átomos diferentes: um de enxofre e outro de nitrogênio, além deles a molécula tem dois grupamentos amino como mostrado na Figura 1. Assim torna-se resistente a processos de decomposição aeróbios, fotodegradação e oxidação química convencional.

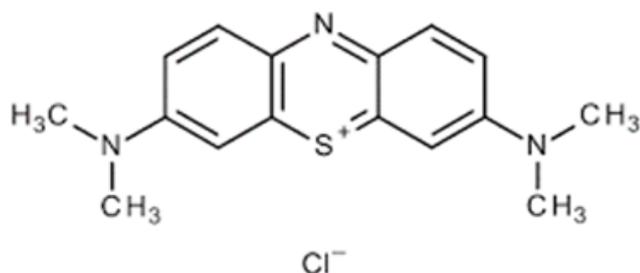


Figura 1 – Fórmula química estrutural do Azul de Metileno. Fonte: Merck Brasil, 2015

O concentrador solar também pode ser utilizado como dessanizador solar, bastando a colocação de uma superfície de vidro sobre a placa plana, onde a água evaporada será condensada e armazenada para posterior utilização como água potável. No Brasil este processo poderia ser aplicado em zonas do semi-árido, localizadas principalmente no nordeste do país, onde a escassez de água potável é grande e os níveis de radiação solar incidente são elevados, praticamente o ano todo.

O Brasil ocupa o 8º lugar mundial no número de equipamentos solares, com destinação à obtenção de energia térmica, instalados no país. Entretanto, esse número não representa uma grande utilização deste tipo de equipamento e a porcentagem de energia produzida por meio da energia solar é praticamente insignificante, quando comparada com outras fontes de obtenção de energia no país (MME, 2014).

Para se ter uma ideia do quanto o país pode ampliar o uso de equipamentos solares pode-se comparar o número de coletores solares instalados na Alemanha e no Brasil. No Brasil, com uma população de quase 184 milhões de habitantes e um clima propício para o uso da energia solar, há apenas três milhões de metros quadrados de coletores solares instalados, já na Alemanha que é um país com 80 milhões de habitantes e têm um clima

extremamente frio, existem quatro milhões de metros quadrados de coletores solares instalados (Baptista, 2006).

Observando essa tendência, o objetivo geral deste trabalho é utilizar um evaporador solar de placa plana, que já se encontra em operação no laboratório de Fenômenos de Transporte da Universidade Federal do Pampa - UNIPAMPA para concentrar uma solução de azul de metileno. Essa solução é obtida como um efluente laboratorial.

2. METODOLOGIA

A solução de azul de metileno foi escolhida por se tratar de um resíduo laboratorial, servindo de teste para redução de volume. Se a evaporação for eficiente para esse tipo de resíduo, será testada a evaporação solar de mais efluentes laboratoriais visando uma redução de custos com a destinação final de tais soluções, uma vez que os laboratórios da universidade pagam as empresas que realizam o tratamento de efluentes, por litro de solução enviada.

O esquema do evaporador solar, juntamente com uma foto do equipamento desenvolvido nesse trabalho pode ser visualizado na Figura 2. Este equipamento encontra-se no laboratório de Fenômenos de Transporte da Universidade Federal do Pampa - UNIPAMPA, campus Bagé.

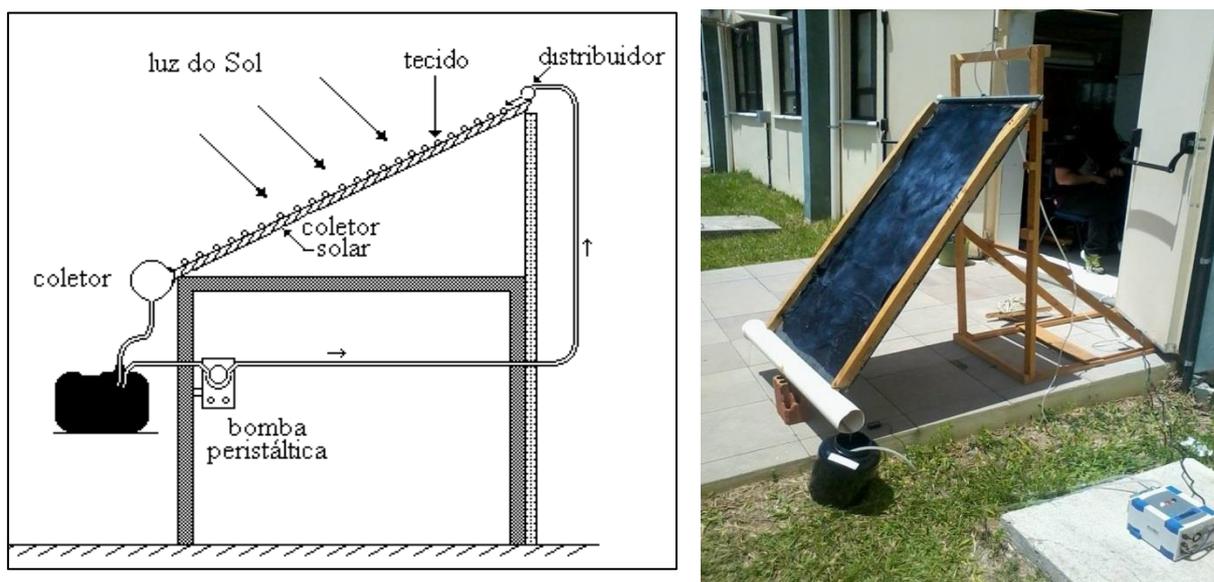


Figura 2 – Esquema e foto do evaporador solar.

Durante a realização dos experimentos, o coletor solar manteve sua superfície voltada para o norte. Este mede 150 cm x 70 cm, sendo confeccionado em madeira, pintado de preto e impermeabilizado com neutrol. Para melhorar o espalhamento do líquido sobre a placa plana é fixado sobre a mesma um tecido de malha, preto

Uma bomba peristáltica introduz a solução diluída do recipiente armazenador até o distribuidor de líquidos feito com um tubo de PVC, com 9 pequenos orifícios, com as extremidades fechadas, colocado na parte superior da placa ao longo de toda sua extensão. Ao sair dos orifícios, o fluido se espalha sobre a superfície da placa, onde troca calor e evapora parte de seu solvente. Considera-se que apenas a água evapora, sem o arraste de partículas.

Para coletar o líquido concentrado é utilizado um coletor de concentrados. O líquido sai do coletor de concentrados e é armazenado no recipiente preto da alimentação, mantendo um ciclo fechado.

Os experimentos foram realizados mantendo a inclinação da placa fixa em 20° e a vazão mássica de alimentação em 2,5 Kg/s. Esses valores foram determinados como o ponto

onde se obteve maior taxa de evaporação em trabalhos anteriores, como: Souza *et al.* (2008); Lima *et al.* (2014); Lauermann *et al.* (2015) e Bartmer *et al.* (2015).

Todos os experimentos foram realizados de forma contínua das 9:00 as 16:30 horas, para verificar como o equipamento se comporta no decorrer de todo o dia. Vale a pena ressaltar que o fluido é alimentado na parte superior da placa, escoando sobre sua superfície, é coletado na parte inferior, sendo depositado em um recipiente negro, sendo novamente succionado por uma bomba até a parte superior da placa. O fluido se mantém em um ciclo fechado.

A realização dos experimentos ocorreu em dias parecidos, em dias de sol pleno (sem nuvens), para manter a quantidade de radiação solar incidente o mais similar possível, em todos os dias que se realizaram os experimentos, atenuando os efeitos da diferença de incidência da radiação solar.

É necessário lembrar que as variáveis meteorológicas também interferem na taxa de evaporação, sendo constantemente monitoradas.

As medições dos dados experimentais, tais como: temperatura ambiente, umidade relativa, pressão atmosférica, temperatura do fluido (na entrada e na saída da placa) e vazão mássica do fluido (na entrada e na saída da placa) foram realizadas a cada 30 minutos.

Também foram realizadas medidas de absorvância, com a utilização de um espectrofotômetro tipo UV visível. Foram realizadas a cada 30 minutos as leituras de absorvância para as amostras coletadas na saída do evaporador solar, com o intuito de verificar a concentração da mesma.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As medições dos dados ambientais a cada 30 minutos, podem ser visualizadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Valores das variáveis meteorológicas.

HORA	Temperatura Ambiente	Velocidade do Vento	Umidade Relativa	Irradiância
------	----------------------	---------------------	------------------	-------------

	(°C)	(Km/h)	(%)	Difusa (MJ/m ²)	Direta (MJ/m ²)	Global (MJ/m ²)
09:00	21,4	0,04	58	0,360	0,504	0,864
09:30	21,5	0	60	0,31	0,765	1,075
10:00	21,6	0	62	0,220	1,001	1,221
10:30	21,5	2	63	0,155	1,222	1,377
11:00	22	6	61	0,109	1,466	1,575
11:30	22,9	0	59	0,0905	1,7535	1,844
12:00	23,8	0,01	58	0,103	1,914	2,017
12:30	24,3	4	56	0,122	1,985	2,107
13:00	24,3	3	54	0,130	2,025	2,155
13:30	25,1	6	52	0,146	2,1215	2,2675
14:00	26,2	5,9	49	0,132	2,171	2,303
14:30	26,4	11,3	49	0,085	2,2605	2,3455
15:00	26,6	7,3	46	0,113	2,185	2,298
15:30	26,4	8,7	46	0,16	1,923	2,083
16:00	26,5	6	45	0,220	1,312	1,532
16:30	26,8	5,3	44	0,27	0,884	1,154
Média	24,2±2,2	4,1±3,5	53,9±6,6	0,17±0,08	1,59±0,57	1,76±0,5

Na Tabela pode-se observar que os valores da temperatura ambiente aumentam gradativamente ao longo do dia, apresentando um pico de 26,8 °C as 16:30 horas, enquanto os valores de umidade relativa diminuem. A velocidade do vento apresentou valores baixos ao longo de todo o dia. Os autores Furman *et al.* (2015) encontraram em experimento realizado na mesma estação do ano (primavera) e na mesma cidade os valores de temperatura ambiente de 21,5±2,3⁰C, velocidade do vento de 11,3±3,2 km/h e umidade relativa de 62,8±6,8%. Então nota-se que os valores são parecidos para dias diferentes.

Os valores de radiação solar global e difusa, utilizados nesse trabalho, foram obtidos na Estação Meteorológica da Universidade de Santa Maria – RS, pois Bagé não dispõe desses dados. Mesmo com a distância de 250 km entre Bagé e Santa Maria, os valores de radiação podem ser utilizados com uma boa aproximação, segundo dados do Atlas de Irradiação Solar no Brasil, 2010.

Os valores de temperatura da solução dentro do reservatório, vazão de entrada e vazão de saída do fluido no equipamento, podem ser visualizadas na Tabela 3 a seguir, juntamente com os valores de porcentagem de evaporação.

Tabela 3 – Resultados da porcentagem de evaporação.

HORA	Temperatura da Solução (°C)	Vazão de Entrada (Kg/s)	Vazão de Saída (Kg/s)	% Evaporação
09:00	19,6	0,0026	0,0023	9,37
09:30	19,6	0,0025	0,0023	7,42
10:00	19,8	0,0026	0,0023	13,87
10:30	19,4	0,0026	0,0022	17,79
11:00	20,5	0,0026	0,0022	15,78
11:30	23,3	0,0026	0,0022	15,72
12:00	24,4	0,0027	0,0023	14,31
12:30	26,1	0,0026	0,0022	17,70
13:00	26,3	0,0027	0,0022	18,49
13:30	28,5	0,0026	0,0021	18,79
14:00	25,2	0,0026	0,0024	8,87
14:30	28,2	0,0026	0,0020	21,07
15:00	28	0,0026	0,0023	11,40
15:30	27,1	0,0026	0,0020	21,99
16:00	27,6	0,0026	0,0020	23,40
16:30	30,4	0,0026	0,0019	25,68

Na Tabela 3, verifica-se que dentre todos os experimentos realizados, o que apresentou maiores valores de porcentagem de evaporação, ao longo de todo o dia foi o realizado as 16:30 horas. Este resultado seria esperado por análise física, uma vez que, nesse horário o ambiente apresentou maiores valores de temperatura ambiente e velocidade do vento e menores valores de umidade relativa. O fluido se mantém em um ciclo fechado e por isso a temperatura da solução vai aumentando ao longo do dia, favorecendo a evaporação. Esse favorecimento é verificado nos valores de taxa de evaporação, que se eleva durante todo o dia, mesmo o ambiente apresentando valores de radiação solar mais elevados por volta das 12:00 até as 15:00 horas e diminuindo depois.

O gráfico referente a curva de calibração do espectrofotômetro tipo ultra violeta visível (UV-Vísivel), para o azul de metileno encontra-se na Figura 3.

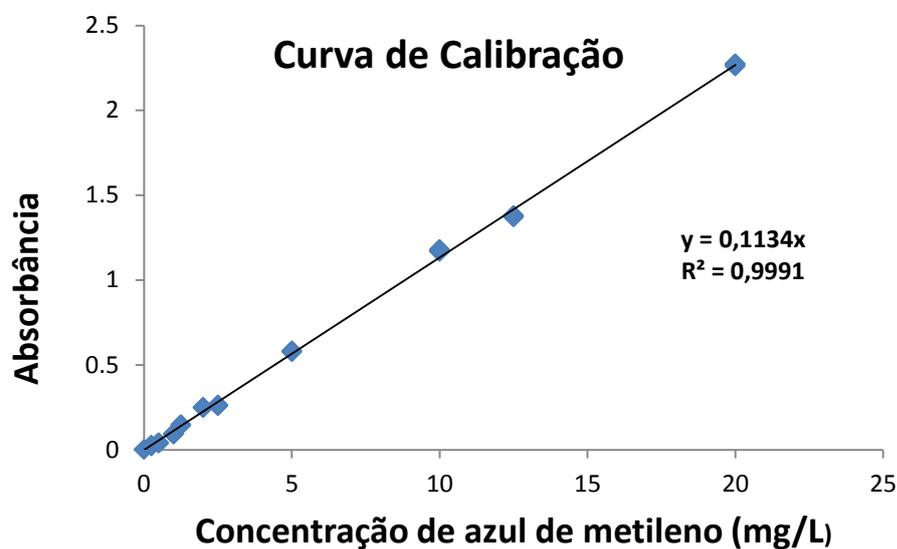


Figura 3 – Curva de calibração do azul de metileno.

A Figura 3 relaciona a absorbância e a concentração e identifica a máxima concentração de corante, lida no espectrofotômetro, para a qual se obtêm um comportamento linear. A importância da curva de calibração deve-se ao fato de que através dela, ajustando-se os dados experimentais, obtêm-se uma equação que descreve esta curva e com esta equação a absorbância é convertida em concentração de corante. Assim sendo a curva de calibração fornece a faixa de concentração de corante com a qual pode-se trabalhar.

Na referida figura, observa-se ainda que o coeficiente de determinação obtido foi $R^2 = 0,9991$ comprovando um bom ajuste linear e a equação de reta pode ser visualizada na Equação 1.

$$y = 0,1134 x \quad (1)$$

Também foram realizadas medidas de absorbância, com a utilização do mesmo espectrofotômetro, a cada 30 minutos das amostras coletadas na saída do evaporador solar,

com o intuito de verificar a concentração da mesma. A Tabela 3 mostra os resultados de absorvância, juntamente com a concentração dessas amostras.

Tabela 4 – Valores de absorvância e concentração ao longo do dia.

HORA	Absorvância	Concentração do Azul de Metileno (mg/L)
09:00	0,084	0,74
09:30	0,071	0,62
10:00	0,068	0,57
10:30	0,063	0,55
11:00	0,044	0,40
11:30	0,046	0,40
12:00	0,049	0,43
12:30	0,054	0,47
13:00	0,054	0,48
13:30	0,059	0,52
14:00	0,070	0,62
14:30	0,089	0,79
15:00	0,112	0,99
15:30	0,124	1,09
16:00	0,150	1,31
16:30	0,184	1,63

Na Tabela 4 observa-se que houve um decréscimo inicial nos valores de absorvância e da concentração, devido ao equipamento não estar saturado com a solução, sendo assim a cobertura da placa solar (tecido) comportou-se como um adsorvente. Logo após a saturação, por volta das 11:00 horas, os valores da absorvância da concentração começaram a se elevar. Pode-se observar que o valor da concentração inicial que era de 0,74 mg/L chegou ao final do experimento as 16:30 com uma concentração de 1,62 mg/L, atingindo o objetivo inicial deste trabalho. Vale a pena ressaltar que o volume inicial de solução era de 7 litros sendo reduzido para 0,2 litros.

Para obter uma equação que relacione os valores de absorvância das amostras retiradas durante o experimento ao longo do dia, com o horário em que foram coletadas, foi determinada a Figura 4.

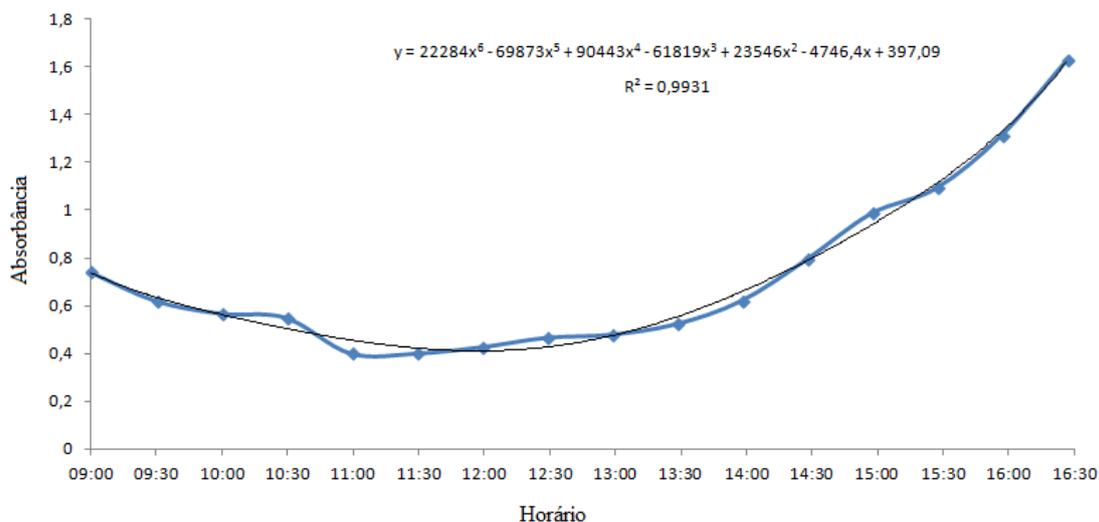


Figura 4 – Valores de Absorbância *versus* tempo.

Na referida figura, observa-se que o coeficiente de determinação obtido foi $R^2 = 0,9931$ comprovando um bom ajuste ao polinômio, cuja equação pode ser visualizada na Equação 2.

$$y = 22284x^6 - 69873x^5 + 90443x^4 - 61819x^3 + 23546x^2 - 4746,4x + 397,09 \quad (2)$$

4. CONCLUSÕES

O principal resultado foi à obtenção de taxas de evaporação consideráveis, o que nos leva a acreditar num futuro promissor para uso desse equipamento, não só nas cidades de teste como em todo o território nacional, uma vez que trata-se de um equipamento barato, de fácil instalação e manutenção e ecologicamente correto para evaporar efluentes a partir da energia solar.

Verificou-se um aumento dos valores de concentração de 220% e uma redução de volume de 7 litros para 0,2 litros, ou seja, uma redução de 3500%. Esses resultados comprovam a eficácia do uso de evaporador solar para concentrar soluções.

Um fato interessante a ser destacado é que alguns autores não recomendam a instalação de equipamentos solares em cidades localizadas no sul do Brasil e esse trabalho mostra exatamente o contrário.

5. REFERÊNCIAS

ALDABÓ, R. **Energia solar**. São Paulo: Artliber, 2002.

Atlas de Irradiação Solar no Brasil, Energia Solar. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/energia_solar/3_3.htm> Acesso em: 25 de outubro de 2016

BAPTISTA, A. S. C. **Análise da viabilidade econômica da utilização de aquecedores solares de água em resorts no nordeste do Brasil**. 2006.171f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Planejamento Energético). – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.

BARTMER, L.; LAUERMANN, B.; WOHLEMBERG, J. C.; RODRIGUES, L. M.; SOUZA, T. R. . Obtenção de Valores de Taxa de Evaporação em um Evaporador Solar. In: VII SIMPÓSIO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE, 7., 2015, Pelotas. **Anais do VII Simpósio de Energia e Meio Ambiente**, Rio Grande, Furg, 2015. p. 45.

FURMAN, L. P.; BARTMER, L.; LAUERMANN, B.; MESSA, A.; MELO, P. F. S.; RODRIGUES, L. M.; SOUZA, T. R. Otimização do funcionamento de um evaporador solar,. In: II Encontro de Ciências e Tecnológica do IF Sul Campus Bagé, 2, 2015, Bagé. **Anais do II Encontro de Ciências e Tecnológica do IF Sul Campus Bagé**, 2015.

LABSYNTH Ficha de informações de segurança de produtos químicos. Disponível em: <<http://integritta.com.br/wpcontent/uploads/2015/03/AZUL-DE-METILENO.pdf> >. Acesso em: 03 maio 2015

LAUERMANN, B.; BARTMER, L.; ANDRADE, L.; SOUZA, T. R. Construção de um evaporador água por energia solar a partir de material reciclado incorporando o conceito de economia verde. In: III Mostra de Iniciação Científica de Engenharias - MICE, 2015, Bagé. **Anais da III Mostra de Iniciação Científica de Engenharias - MICE**, 2015.

LIMA, F. R. M. ; VARGAS, A. C. G. ; RODRIGUES, F. C. A. ; ALVES, G. V.; SOUZA, T. R. . MONTAGEM DE UM EVAPORADOR SOLAR PARA CONCENTRAR SOLUÇÕES DILUÍDAS NA CIDADE DE BAGÉ - RS,. In: VI SEMA Simpósio de Energia e Meio Ambiente, 2014, Bagé. **Anais do VI SEMA Simpósio de Energia e Meio Ambiente**, 2014.

MACEDO, H. **Tratamento de águas com altas concentrações de cloretos**. 1996. 79f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Sanitária) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1996.

MERCK BRASIL . Informações sobre o azul de metileno Disponível em: <[http://www.merckmillipore.com/BR/pt/product/Azul-de-metileno-\(C.I.-2015\),MDA_CHEM-159270](http://www.merckmillipore.com/BR/pt/product/Azul-de-metileno-(C.I.-2015),MDA_CHEM-159270)>. Acesso em: 21 jun. 2015.

MME - Ministério de Minas e Energia, Modelo Institucional do setor elétrico. Disponível em: < <http://www.mme.gov.br> > Acesso em: 10 jan. 2007.

PALZ, W. **Energia Solar e fontes alternativas**. São Paulo: Hemus, 1980.

PEREIRA, A. R. **Avaliação das espécies reativas do oxigênio na oxidação de substância recalcitrante**. 2014. 97 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

PRADO, L. C. O Sol Como Fonte de Energia. **Revista Mensal de Cultura**, São Paulo, v. 1, p. 1-34, 1980.

SOUZA, T. R., SALVAGNINI, W. M., CAMACHO, J. L. P., TAQUEDA, M. E. S. Performance Of A Solar Energy Powered Falling Film Evaporator With Film Promoter. **Energy Conversion and Management**, v. 49, n. 12, p. 3550 – 3559, 2008.

YANG L.; ZHANG Y.; LIU X.; JIANG X.; ZHANG Z.; ZHANG T.; ZHANG L. The investigation of synergistic and competitive interaction between dye Congo red and methyl blue on magnetic MnFe₂O₄. **Chemical Engineering Journal**, v. 246 , p. 88-96, 2014.