

ESTUDO DA EVAPORAÇÃO SOLAR DA SALMOURA NO PROCESSO DE CONCENTRAÇÃO DO LÍTIO DO SALAR DE UYUNI-BOLÍVIA

A. A. S. MENDOZA¹, J. L. Z. ESCALANTE², C. F. M. MOREJON¹, A. C. ARAYA²

¹Universidade Estadual do Oeste de Paraná - UNIOESTE, Programa de Pós-Graduação de Engenharia Química

²Facultad Nacional de Ingeniería/Universidad Técnica de Oruro – FNI/UTO
*e-mail: camilo_freddy@hotmail.com

RESUMO

Na América do Sul se encontra o maior deserto de sal do mundo (salar de Uyuni-Bolívia com 10.000 km² de superfície), metade da reserva mundial do lítio está disponível para diversas aplicações. Na atualidade o Lítio é obtido na forma de Carbonato, cuja etapa preliminar, visando o aumento da concentração do lítio na salmoura (Solução composta de Li, K, Na, SO₄, Cl, e Mg), utiliza processos de separação por evaporação solar a céu aberto. No presente trabalho se apresenta resultados da influência das variáveis operacionais no fluxo de evaporação da salmoura do salar de Uyuni-Bolívia. A metodologia contemplou: a) o projeto/construção do módulo experimental; b) o monitoramento transiente do fluxo de evaporação, temperatura ambiente, umidade relativa e radiação solar; e c) o estudo da composição química dos elementos presentes na salmoura em função da porcentagem de evaporação. Para as condições reais de operação o fluxo de evaporação da salmoura, numa superfície de contato de convecção natural de 0,018m², foi de 0,63 kg_{água}m⁻²h⁻¹. A evaporação global correspondeu a 51% da salmoura original, no qual a umidade relativa teve uma maior influência quando comparado com a temperatura ambiente e a radiação solar.

1 INTRODUÇÃO

Segundo EVANS (2008) e United States Geological Survey (2011), conforme Tabela 1, as principais reservas de Lítio na América do Sul são encontrados num local subterrâneo de 30 a 50 m de profundidade e em estado líquido nos desertos de sal da Bolívia, Chile e Argentina.

Segundo COCHILCO (2009), a concentração de lítio na Salmoura da Argentina, Bolívia e Chile, variam num intervalo de 350 a 1500 mg/l. Na Tabela 2 se

apresenta a concentração média dessas salmouras.

Tabela 1 – Reservas de Lítio na América do Sul.

Pais	Local	T de Li
Bolívia	Salar de Uyuni	9.500.000
Chile	Salar de Atacama	6.900. 000
	Salar do Homem	
Argentina	Morto	850.000

Fonte: Evans (2008) e United States Geological Survey (2011).

Tabela 2 – Concentração de Lítio na Salmoura.

Pais	Local	Concentração de Lítio mg/l
Chile	Salar de Atacama	1500
Argentina	Salar do Homem Morto	692
Bolívia	Salar de Uyuni	350

Fonte: COCHILCO (2009).

1.1 Composição Química da Salmoura

Segundo RODRIGUEZ (1994), em geral a salmoura é composta de Li, Na, K, Mg, SO₄ e Cl. Na Tabela 3 se apresenta a composição da salmoura na América do Sul (MILLAS, 2000).

Tabela 3 – Composição da Salmoura na América do Sul medida em porcentagem em peso.

Salmouras de lítio	Li	Na	K	Mg	SO ₄	Cl
Bolívia:						
Salar de Uyuni	0,025	8,8	0,7	0,65	0,046	15,7
Chile:						
Salar de Atacama	0,14	7,6	1,9	0,93	0,03	16
EEUU.						
Great Salt Lake, Utah	0,004	8	0,7	1	0,016	14

Fonte: Millas (2000)

1.2 Evaporação Solar das Salmouras

Segundo GARZÓN (1999) nos processos de evaporação solar de salmouras, devido a separação da água, acontece o aumento da concentração do lítio e simultaneamente a cristalização do cloreto de sódio (NaCl) e do cloreto de potássio (KCl). Segundo CONDORETTI (2010), a cristalização do cloreto de sódio e do cloreto de potássio influencia na eficiência de recuperação do Lítio.

No presente trabalho estudaram-se: a) o fluxo de evaporação solar da água presente na salmoura; b) a influência da umidade relativa, temperatura ambiente, e da radiação solar na eficiência da evaporação; e c) o estudo da composição química da salmoura em função da porcentagem de evaporação.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia de estudo contemplou a realização de 3 etapas: 1) Projeto/Construção do módulo experimental; 2) Monitoramento transiente das variáveis e parâmetros operacionais, entre eles: o fluxo de evaporação da água ($\text{kg}_{\text{água}}\text{m}^{-2}\text{h}^{-1}$), a temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$), a umidade relativa (%), a radiação solar (Langley) e a composição química dos elementos presentes na salmoura em função da porcentagem de evaporação; e 3) Análise e consolidação dos resultados.

2.1 Etapa 1 - Projeto/Construção do módulo experimental

O projeto construção do módulo experimental contemplou o estudo do arranjo experimental, características geométricas dos elementos constitutivos e escolha dos materiais apropriados. De modo geral o módulo experimental possui um recipiente para conter a salmoura, uma carcaça transparente, multifuncional, para avaliar a influencia da radiação e da convecção, bem como dos instrumentos de medição. Para a construção do recipiente que contém a salmoura, foi utilizado chapas de ferro galvanizado revestidos com pintura anti-corrosiva. A geometria escolhida foi o volume retangular de 540ml, com superfície constante de 0,018m² e altura de 0,03m.

2.2 Etapa 2 - Monitoramento das Variáveis e Parâmetros Operacionais

Para realizar o monitoramento em regime transiente do fluxo de evaporação da água ($\text{kg}_{\text{água}}\text{m}^{-2}\text{h}^{-1}$), da temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$), da umidade relativa (%), da radiação solar (Langley), e a determinação química dos elementos presentes na salmoura, foram utilizados: uma balança com uma precisão de duas caixas decimais, um termômetro eletrônico, um higrômetro, um medidor de radiação solar, um cronômetro, e

metodologias de análise química. O monitoramento de cada uma das variáveis foi registrado de hora em hora entre 8h00 e 18h00.

2.3 Etapa 3 - Análise e Consolidação de Resultados

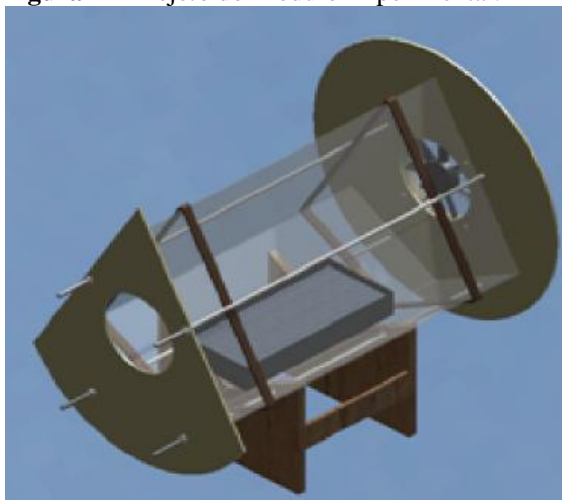
A análise e a consolidação dos resultados foi realizado com ajuda de planilhas eletrônicas e os resultados foram apresentados por meio de gráficos.

3 RESULTADOS

3.1 Resultados da Etapa 1 - Projeto/Construção do módulo experimental

O resultado do projeto e construção do módulo experimental se apresenta na Figura 1. O módulo experimental contemplou um recipiente retangular, provido de balança para monitorar a diminuição do peso da salmoura, carga de vidro e dispositivos de medição.

Figura 1 – Projeto do Modulo Experimental.



Na Figura 2 se apresenta o resultado do efeito corrosivo da salmoura o que justificou a necessidade da aplicação de revestimento a base de laca e nitrocelulose, cujo resultado se mostra na Figura 3.

Figura 2 – Corrosão no Recipiente.



Figura 3 – Recipiente revestido com uma Pintura a Base de Laca e Nitrocelulose.



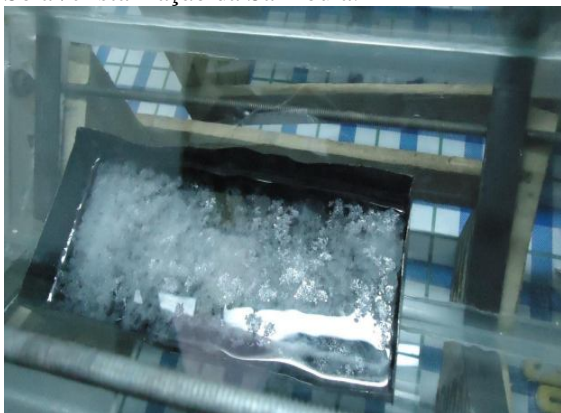
Após aplicação do revestimento os testes experimentais ocorridos durante 10 dias mostrou que o revestimento utilizado inibe a corrosão da chapa de ferro e facilita também a retirada dos cristais, os quais não tiveram aderência na superfície do recipiente.

3.2 Resultados da Etapa 2 - Monitoramento das Variáveis e Parâmetros Operacionais

O monitoramento das variáveis e parâmetros operacionais foi realizado no mês de fevereiro. Os experimentos e o monitoramento das variáveis foram realizadas na Faculdade Nacional de Engenharia da Universidade Técnica de Oruro localizada na cidade de Oruro-Bolívia, onde a pressão atmosférica é de 476mmHg e se encontra a 3.735 metros sobre o nível do mar. Para o estudo foi utilizado salmoura proveniente do Salar de Uyuni-Bolívia. O resultado do processo de evaporação solar da salmoura e a formação de cristais no recipiente se mostra na Figura 4. Para o estudo do processo de evaporação foram considerados condições naturais de temperatura, umidade relativa e

presença de vento máximo, médio e mínimo reportados no mês de fevereiro.

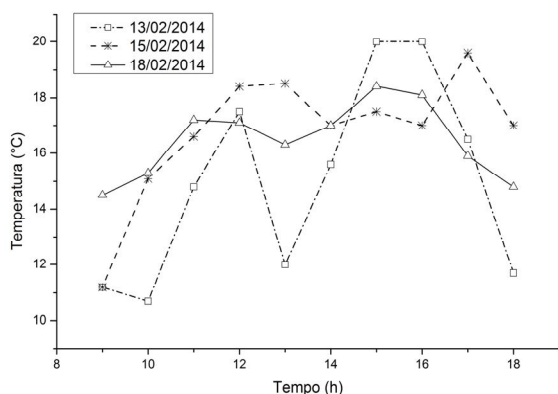
Figura 4 – Resultado do processo de Evaporação Solar/cristalização da Salmoura.



3.3 Análise e Consolidação de Resultados

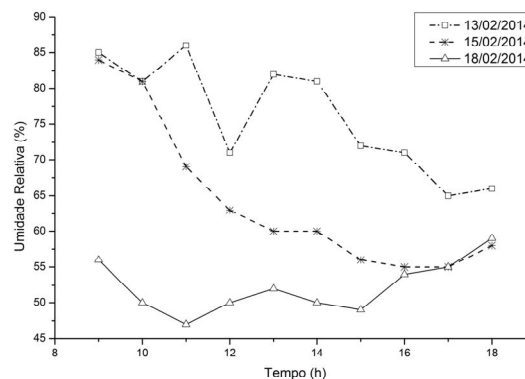
Na Figura 5 se apresenta a variação da temperatura ambiente em função do tempo para os dias 13, 15 e 18 de fevereiro 2014. Com base do monitoramento foi constatado que: no dia 13 de fevereiro a temperatura média foi de 15°C, tendo como mínimo 10,7°C e um máximo de 17,5°C; no dia 15 de fevereiro a temperatura média foi de 16,79°C, tendo como mínimo 15,1°C e um máximo de 19,6°C; e no dia 18 de fevereiro a temperatura média foi de 16,46°C, tendo como mínimo 14,5°C e um máximo de 18,4°C.

Figura 5 – Representação da Variação da Temperatura em função do Tempo nos dias 13, 15 e 18 de Fevereiro de 2014.



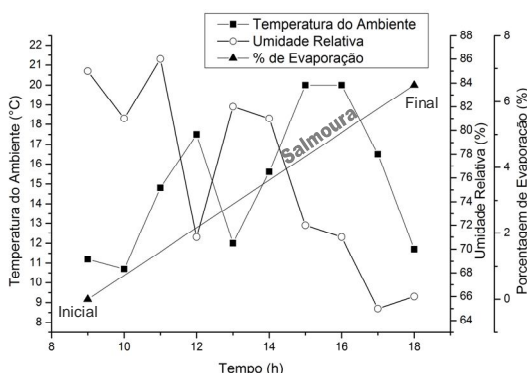
Na Figura 6 se apresenta a variação da umidade relativa em função do tempo para os dias 13, 15 e 18 de fevereiro de 2014. Com base do monitoramento foi constatado que: no dia 13 de fevereiro a umidade relativa média foi de 76%, tendo como mínimo 65% e valor máximo de 86%; no dia 15 de fevereiro a umidade relativa média foi de 64,1%, tendo como mínimo 55% e valor máximo de 84%; e no dia 18 de fevereiro a umidade relativa média foi de 52,2%, tendo como mínimo 47% e valor máximo de 59%. A umidade relativa maior do dia 13/02 foi devido às precipitações pluviais ocorridas nesse dia, o qual teve repercussão até o dia 15/02. Os resultados da umidade relativa do dia 18/02 correspondem ao dia ensolarado sem precipitação pluvial.

Figura 6 – Representação da Variação da Umidade Relativa em função do tempo nos dias 13, 15 e 18 de Fevereiro de 2014.



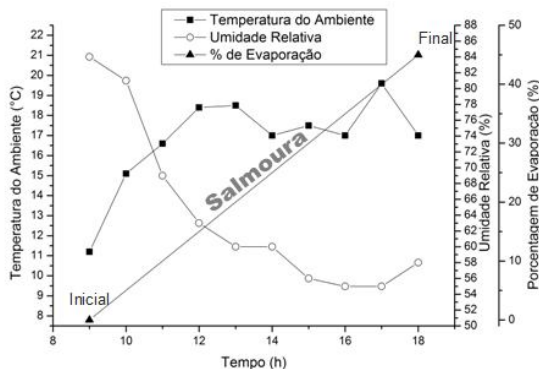
Na Figura 7 se apresenta a variação da temperatura do ambiente (°C), umidade relativa (%) e o porcentagem de evaporação (%) em função do tempo, para o período diurno do dia 13 de fevereiro de 2014 (dia com precipitação, e com uma velocidade média do vento igual a 0,66m/s). Com base no monitoramento foi constatado que a porcentagem global de evaporação, nesse período, atingiu 6,1% e o fluxo de evaporação alcançou 0,073kg_{água}m⁻²h⁻¹.

Figura 7 – Representação da Variação Diurna da Temperatura Ambiente, Umidade Relativa e o Porcentagem da Evaporação em Função do Tempo no dia 13 de fevereiro de 2014



Na Figura 8 se apresenta a variação da temperatura do ambiente (°C), umidade relativa (%) e a porcentagem de evaporação (%) em função do tempo, para o período diurno do dia 15 de fevereiro de 2014 (Dia ensolarado sem precipitação pluvial, e com uma velocidade média do vento igual a 2,08m/s). Com base no monitoramento foi constatado que a porcentagem global de evaporação, nesse período, atingiu 45% e o fluxo de evaporação na salmoura alcançou $0,55\text{kg}_{\text{água}}\text{m}^{-2}\text{h}^{-1}$.

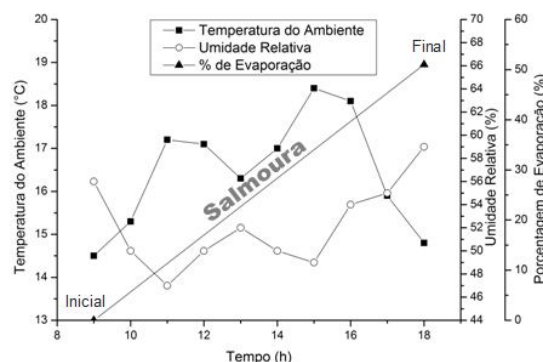
Figura 8 – Representação da Variação Diurna da Temperatura Ambiente, Umidade Relativa e o Porcentagem da Evaporação em Função do Tempo no dia 15 de fevereiro de 2014.



Na Figura 9 se apresenta a variação da temperatura do ambiente (°C), umidade

relativa (%) e o porcentagem de evaporação (%) em função do tempo, para o período diurno do dia 18 de fevereiro de 2014 (dia ensolarado sem precipitação pluvial, e com uma velocidade média do vento igual a 1,6m/s). Com base no monitoramento foi constatado que a porcentagem global de evaporação, nesse período, atingiu 51% e o fluxo de evaporação alcançou $0,63\text{kg}_{\text{água}}\text{m}^{-2}\text{h}^{-1}$.

Figura 9 – Representação da Variação Diurna da Temperatura Ambiente, Umidade Relativa e o Porcentagem da Evaporação em Função do Tempo no dia 18 de fevereiro de 2014

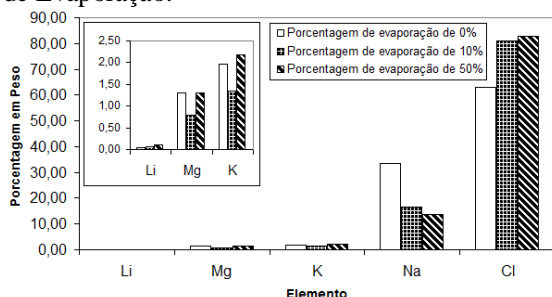


Conforme Figuras 7, 8 e 9 a maior porcentagem de evaporação encontrado no monitoramento foi do dia 18 de fevereiro, na qual a porcentagem global de evaporação atingiu 51% equivalente a um fluxo de evaporação de $0,63\text{kg}_{\text{água}}\text{m}^{-2}\text{h}^{-1}$. no período diurno, este resultado se atribui principalmente pela diminuição da umidade relativa do meio ambiente e o aumento da temperatura do ambiente.

Por meio da Figura 10, pode-se constatar que o comportamento químico dos elementos é altamente influenciado pela variação da porcentagem de evaporação num processo de convecção natural, podendo-se identificar o seguinte: A porcentagem em peso do sódio, na salmoura, diminui com o aumento da porcentagem de evaporação, este fenômeno acontece porque a solução fica num estado de

sobre-saturação produzindo dessa forma um produto sólido na forma de cristais cúbicos de cloreto de sódio NaCl; a porcentagem em peso do cloro, na salmoura, aumenta proporcionalmente com o aumento da porcentagem de evaporação; para o caso da composição em peso do magnésio e do potássio foi constatado uma diminuição considerável no volume de evaporação igual a 10%; e para o caso do lítio conseguiu-se verificar que a porcentagem em peso, desse elemento, aumenta proporcionalmente com o aumento da fluxo de evaporação.

Figura 10 – Representação Gráfica da Composição em Peso dos Elementos Presentes na Solução (Salmoura) em Função da Porcentagem de Evaporação.



4 CONCLUSÃO

Por meio dos resultados apresentados pode-se evidenciar que a fluxo de evaporação solar apresenta valores significativos quando a umidade relativa atinge a valores menores que 52%, sendo que o fluxo de evaporação da salmoura, nessas condições ambientais, alcançou $0,63 \text{ kg}_{\text{água}} \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$.

Com base nos testes experimentais feitos na escala laboratorial do sistema de evaporação solar foi constatada que a radiação é inversamente proporcional a umidade relativa, e este último possui uma influência maior no fluxo de evaporação solar da salmoura do salar de Uyuni-Bolívia.

Com relação ao estudo da análise química pode-se concluir que o processo de evaporação solar afeta diretamente: no

aumento da concentração do lítio na solução concentrada; na separação do sódio (por meio da cristalização) e em pequenas quantidades também na formação de cristais de potássio e magnésio.

REFERÊNCIAS

COCHILCO. **Antecedentes para una Política Pública en Minerales Estratégicos: Lítio**. 2009. Disponível em: <http://ciperchile.cl/pdfs/litio/estudio_cochilco.pdf> Acesso em: 11 jun. 2015

CONDORETTI. **Cinética de Cristalización del Cloruro de sodio**. 2010, Universidad Técnica de Oruro, Oruro, Bolivia, 2010.

EVANS, R. K. **An Abundance of Lithium**. 2008. Disponível em: <http://www.che.ncsu.edu/ILEET/phevs/lithium-availability/An_Abundance_of_Lithium.pdf> Acesso em: 11 jun. 2015

GRUBER P. W., Medina P. A., Keoleian G. A., et al. **Global Lithium Availability**. 2011. Disponível em: <http://www.eenews.net/assets/2011/07/27/document_gw_02.pdf> Acesso em: 11 jun. 2015

MILLAS I. J. **La Industria Del Litio en Chile**. 2000. Disponível em: <<http://www.uantof.cl/salares/Litio%20y%20derivados.pdf>> Acesso em 9 jun. 2015.

GARZÓN M. M. S. **Estudio de la Velocidad de Evaporación y Cristalización**. 1999. 118 p, Universidad Técnica de Oruro, Oruro, Bolivia, 1999.

RODRIGUES F. J. Z. **Recuperación del KCl por Cristalización a Partir de Salmueras**. 1994. 164 p, Universidad Técnica de Oruro, Oruro, Bolivia, 1994.