

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
ENGENHARIA MECÂNICA

MATHEUS VINICIUS DE OLIVEIRA HERRERO

**ESTUDO DA VIABILIDADE DA EXTRAÇÃO DE ÁGUA ATMOSFÉRICA
UTILIZANDO DESSECANTE LÍQUIDO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO
2016

MATHEUS VINICIUS DE OLIVEIRA HERRERO

**ESTUDO DA VIABILIDADE DA EXTRAÇÃO DE ÁGUA ATMOSFÉRICA
UTILIZANDO DESSECANTE LÍQUIDO**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Antonio de Souza Lourenço

CORNÉLIO PROCÓPIO
2016



FOLHA DE APROVAÇÃO

Matheus Vinicius de Oliveira Herrero

Estudo da viabilidade da extração de água atmosférica utilizando dessecante líquido

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 09:00hs do dia 18/11/2016 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico no programa de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

Prof(a). Dr(a). Marcos Antonio de Souza Lourenço - Presidente (Orientador)

Prof(a). Dr(a). Henrique Cotait Razuk - (Membro)

Prof(a). Dr(a). Rubens Gallo - (Membro)

RESUMO

HERRERO, Matheus V. O.: **Estudo da Viabilidade da Extração de Água Atmosférica Utilizando Dessecante Líquido**. 2016. 51 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2016.

Este trabalho tem como objetivo avaliar a viabilidade do processo produção de água potável através da extração da umidade contida no ar atmosférico na presença de uma solução de cloreto de lítio. Esse material é um sal higroscópico que pode ser utilizado como um dessecante líquido com a intenção de absorver água contida no ar atmosférico com sua respectiva umidade relativa. Posteriormente, a água líquida pode ser extraída da solução fraca de cloreto de lítio através de um processo de regeneração, no qual a solução passa por uma mudança de fase e o vapor de água é coletado para posterior condensação. Para o estudo de viabilidade desse processo, foi utilizada a ferramenta computacional *AspenPlus*, que permite realizar a modelagem e análise de sistemas térmicos, químicos e dinâmicos a partir de uma interface primária com a utilização de diagramação gráfica por blocos e bibliotecas personalizáveis. Com o modelo desenvolvido, foi possível determinar valores de consumo de energia necessários para que o sistema pudesse operar oito horas por dia com o objetivo de produção diária de 10 litros de água.

Palavras-chave: Produção de água potável; Mudança de fase; Dessecante; AspenPlus.

ABSTRACT

HERRERO, Matheus V. O.: **Feasibility Study of Atmospheric Water Extraction Using Liquid Desiccant**. 2016. 51 p. Final Paper (Graduation) – Mechanical Engineering. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2016.

This work aims to evaluate the feasibility of the drinking water production process through the extraction of humidity contained in atmospheric air in the presence of a lithium chloride solution. This material is a hygroscopic salt that can be used as a liquid desiccant with the goal of absorbing water present in the atmospheric air at a given relative humidity. The drinking water can be later extracted from the weak solution of lithium chloride using a regeneration process, where the solution undergoes a phase change and the water vapor is collected for posterior condensation. For the feasibility study of this process, the computational tool *AspenPlus* was used, it allows the modeling and analysis of thermal, chemical and dynamic systems through a primary interface with the use of graphic diagrams with blocks and customizable libraries. With the developed model, it was possible to obtain values for the energy consumption needed for the system to operate eight hours a day with the goal of a daily production of 10 liters of water.

Keywords: Drinking water production; Phase change; Desiccant; AspenPlus.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - DIAGRAMA DA TUBULAÇÃO E INSTRUMENTAÇÃO DO CONCEITO BÁSICO.....	17
FIGURA 2 - INTERFACE GRÁFICA PRIMÁRIA DO <i>ASPENPLUS</i> COM SUAS BIBLIOTECAS DE BLOCOS.....	21
FIGURA 3 - ESQUEMA DE BLOCOS UTILIZADO PARA DEFINIR A UMIDADE RELATIVA DO AR.....	25
FIGURA 4 - RESUMO DA COMPOSIÇÃO DAS CORRENTES DE AR E DESSECANTE QUE PASSAM PELO ABSORVEDOR.....	26
FIGURA 5 - DIAGRAMA DE RECOMENDAÇÕES DE ERIC CARLSON.....	27
FIGURA 6 - DIAGRAMA DO MODELO NA INTERFACE DO <i>ASPENPLUS</i>	30
FIGURA 7 - BLOCO DO ABSORVEDOR DE AR.....	33
FIGURA 8 - RECHEIO #2 NUPAC USADO NA COLUNA DE ABSORÇÃO.....	36
FIGURA 9 - BLOCO DO REGENERADOR.....	37
FIGURA 10 - BLOCO DO CONDENSADOR.....	38
FIGURA 11 - RESULTADOS DA CORRENTE DE ÁGUA QUE PASSA PELO CONDENSADOR.....	39
FIGURA 12 - RESULTADOS DA TAXA DE CALOR RETIRADA DA ÁGUA PELO CONDENSADOR.....	39
FIGURA 13 - BLOCO DE PRÉ-AQUECIMENTO.....	41
FIGURA 14 - TEMPERATURAS E VAZÕES PRESENTES NO TROCADOR DE CALOR DE PRÉ-AQUECIMENTO.....	41
FIGURA 15 - INTERFACE GRÁFICA DO <i>ASPENPLUS</i> PARA A DEFINIÇÃO DO MÉTODO ATALHO.....	42
FIGURA 16 - INTERFACE GRÁFICA DO <i>ASPENPLUS</i> PARA A DEFINIÇÃO DO MÉTODO DETALHADO.....	43
FIGURA 11 - CALOR TOTAL TRANSFERIDO NO TROCADOR DE CALOR DE PRÉ-AQUECIMENTO.....	43
FIGURA 18 - BLOCO DE RECUPERAÇÃO.....	44

FIGURA 19 - TEMPERATURAS E VAZÕES PRESENTES NO BLOCO UTILIZADO PARA O RESFRIAMENTO DO VAPOR DE ÁGUA.....	45
FIGURA 20 - POTÊNCIA LÍQUIDA CONSUMIDA PELO REGENERADOR APÓS O PROCESSO DE RECUPERAÇÃO.....	47

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - VALORES DA CONCENTRAÇÃO DE LICL PARA CADA VAZÃO MÁSSICA DE DESSECANTE.....	34
TABELA 2 - COMPARAÇÃO ENTRE AS CONCENTRAÇÕES DE LICL ENCONTRADAS E ESPERADAS.....	36

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 - DIAGRAMA DE OTHMER PARA SOLUÇÕES AQUOSAS DE CLORETO DE LÍTIO.....	35
---	----

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	11
2. OBJETIVOS.....	12
2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
3.1. DESPERDÍCIO E ESCASSEZ DE ÁGUA NA REGIÃO NORDESTE.....	13
3.2. EXTRAÇÃO DE ÁGUA ATMOSFÉRICA.....	15
3.3. TECNOLOGIA ATUAL	15
3.4. CONCEITO BÁSICO PARA O MODELO	16
3.5. ESTÁGIOS E SUBSISTEMAS	18
4. ABORDAGEM COMPUTACIONAL	20
4.1. ASPEN PLUS.....	21
4.2. DEFINIÇÃO DOS COMPONENTES E PROPRIEDADES	23
4.2.1. DEFINIÇÃO DA UMIDADE RELATIVA.....	23
4.3. ESCOLHA DE MÉTODOS E EQUAÇÕES.....	26
4.3.1. VANTAGENS E DESVANTAGENS DO MÉTODO DE COEFICIENTE DE ATIVIDADE	28
4.3.2. ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS BINÁRIOS	28
4.4. CRIAÇÃO DO FLOWSHEET.....	29
4.5. REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO MODELO.....	29
4.6. BLOCOS PRINCIPAIS	32
4.6.1. ABSORVEDOR DE AR	32
4.6.1.1. TESTE DE CONVERGÊNCIA DA COLUNA.....	33
4.6.2. REGENERADOR	37
4.6.3. CONDENSADOR	38
4.7. BLOCOS SECUNDÁRIOS	40
4.7.1. PRÉ-AQUECIMENTO.....	40
4.7.2. RECUPERAÇÃO.....	44
5. RESULTADOS	47
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	49
6.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	49

7. REFERÊNCIAS	51
----------------------	----

1. INTRODUÇÃO

Aproximadamente 1,2 bilhão de pessoas sofrem com a escassez de água no mundo. Estima-se que até 2030 o consumo de água potável aumentará em aproximadamente 30% (WATERORG, 2014). Muitos países da África e da Ásia já sofrem com secas e com a escassez de recursos hídricos enquanto países da América do Norte, como os Estados Unidos, preveem que estarão em uma situação similar em 2040. O Brasil, por ser um país de grande extensão territorial, possui diferentes regimes de precipitação e temperatura. A região Nordeste é uma das que mais sofrem com a falta de água potável pois possui uma estação chuvosa com baixos índices pluviométricos, caracterizando um clima semiárido.

Enquanto os problemas de uma parte das regiões que sofrem com as secas poderiam ser amenizados através de melhorias nos sistemas de distribuição de água, algumas localidades precisam de outras formas para obter água potável. Atualmente existem sistemas que utilizam compressão de vapor para condensar e filtrar água diretamente do ar atmosférico para ser distribuída para comunidades locais. Existem também sistemas mais avançados que fazem uso de dessecantes, materiais que por possuírem grande afinidade química com a água podem ser utilizados para extrai-la do ar atmosférico. No entanto, muitos sistemas atuais dependem do acesso a redes de energia ou a uma fonte de energia externa, como um gerador a diesel, tornando o sistema mais poluente e diminuindo a sua mobilidade.

2. OBJETIVOS

Esse trabalho tem por objetivo desenvolver um modelo computacional de um sistema de extração de água atmosférica através de dessecante líquido utilizando o software *Aspen Plus*. O sistema utilizará a combinação de um absorvedor de ar e um regenerador para extrair água do ar atmosférico e, posteriormente, separá-la da solução.

2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Como objetivo específico, modelo a ser desenvolvido deverá incluir todos os principais componentes do sistema e deverá fornecer como resultado o desempenho do sistema e a produção diária de água potável a partir de dados baseados nas condições atmosféricas de regiões do Nordeste brasileiro.

Adicionalmente, como objetivo secundário, procura-se verificar a possibilidade da utilização de energia solar como única fonte de energia para o sistema.

O sistema será projetado para demonstrar suas capacidades trabalhando com fluxos contínuos de dessecante e ar atmosférico.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. DESPERDÍCIO E ESCASSEZ DE ÁGUA NA REGIÃO NORDESTE

Levando-se em conta o regime de chuvas, encontra-se na região Nordeste uma alta variedade climática. No contexto semiárido do interior da região, a precipitação acumulada anual é extremamente baixa – entre 300 e 800 mm/ano, em comparação com a média anual da costa leste da região, que gira em torno de 1500 mm (KOUSKY, 1978). A parte norte da região recebe entre 1000 e 1200 mm/ano (HASTENRATH, 1977).

Além de fatores geográficos e naturais, existem outros fatores que contribuem para a situação de crise de água na região Nordeste, como:

- Crescimento rápido e desordenado da demanda de água, situação bem ilustrada pelo fato de 27% da população brasileira estar fixada na região (IBAM, 1993);
- Degradação da qualidade dos mananciais que eram normalmente utilizados. Isso é resultado do lançamento de esgotos domésticos e industriais não-tratados e das formas de disposição do lixo produzido. Em consequência, os mananciais que abastecem 2.641 cidades apresentam alguma forma de contaminação (IBGE, 1992).
- Baixa eficiência dos serviços de saneamento básico, situação caracterizada pelas grandes perdas de água tratada nas redes de distribuição (entre 25 e 60%), grandes desperdícios gerados pela cultura da abundância, pelo absolutismo nas empresas e pelo obsolescência dos equipamentos (torneiras e descargas sanitárias em especial).

Na agricultura a situação é ainda mais precária, à medida que predomina o uso de métodos de irrigação de superfície é de apenas 30% (FAO, 1988). Efetivamente, a crise da água no Brasil, especialmente na região Nordeste, resulta da intervenção altamente predatória nesse espaço, levando ao efeito perverso de aplicar, a um

fenômeno marcadamente estrutural, políticas seladas pela visão conjuntural que induzem o cultivo do problema (REBOUÇAS, 1997).

A importância desse trabalho se dá pela necessidade de amenizar as consequências socioeconômicas e ambientais decorrentes do uso irracional dessa riqueza.

3.2. EXTRAÇÃO DE ÁGUA ATMOSFÉRICA

A água carregada pelo ar atmosférico ainda é uma das fontes de água potável menos exploradas. Companhias como a *Watair* e a *Sciperio* estão realizando esforços para tornar a extração de água da atmosfera em uma alternativa viável mesmo em regiões de clima muito árido. O desafio está em começar a utilizar sais deliquescentes, chamados dessecantes, ao invés de ciclos de compressão de vapor, já que esses não funcionam bem em condições com umidades relativas baixas.

Dessecantes são materiais porosos que possuem afinidade por substâncias polares e são comumente utilizados para remover umidade de um espaço fechado ou de uma corrente de ar. A principal característica desses materiais é a baixa pressão de vapor em sua superfície em relação ao ar úmido, ou a mistura gasosa, fazendo com que a umidade seja absorvida pelo dessecante (MIRANDA, 2012, p.1).

3.3. TECNOLOGIA ATUAL

A *Aqua Sciences Inc.* possui a patente de um sistema que expõe um fluxo de ar a um dessecante líquido para a extração de água antes de expor essa solução de dessecante diluído a um segundo fluxo de ar, que evapora a água contida na solução para que ela possa assim ser condensada e coletada. É uma das poucas soluções existentes que podem operar em condições de baixa umidade relativa. A patente afirma que aplicar a corrente de ar resfriado sobre o dessecante encoraja a absorção de água para a solução de dessecante diluído, enquanto aplicar a segunda corrente de ar, dessa vez aquecido, ajuda a reconcentrar a solução antes de circulá-la novamente através do absorvedor. Essa característica do dessecante líquido faz com que a temperatura necessária para o estágio de absorção seja mais baixa mas cria a necessidade de temperaturas mais altas durante o estágio de regeneração.

3.4. CONCEITO BÁSICO PARA O MODELO

O modelo criado foi feito com base no sistema de extração de água atmosférica projetado por alunos da Bucknell University com supervisão do professor de engenharia mecânica Nate Siegel. O projeto foi realizado durante o segundo semestre de 2015 e o primeiro semestre de 2016 e tinha como objetivo criar um conceito para um sistema de produção de água para usos militares que pudesse competir em preço com o serviço de transporte de água para regiões ocupadas.

Nessa configuração, apresentada na Figura 1, o absorvedor de ar seria alimentado por um ventilador onde o dessecante, uma solução de água com 40% de LiCl, seria dispersado, a solução com uma nova concentração seria então coletada e seguiria para o regenerador. A pressão nessa câmara seria reduzida através do uso de uma bomba de vácuo e, em seguida, a solução seria aquecida para que a água fosse evaporada e extraída da solução de dessecante. O processo seria finalizado com o dessecante concentrado sendo enviado de volta ao absorvedor e com a água sendo exposta a uma lâmpada de luz ultravioleta, como forma de eliminar microrganismos que possam estar presentes.

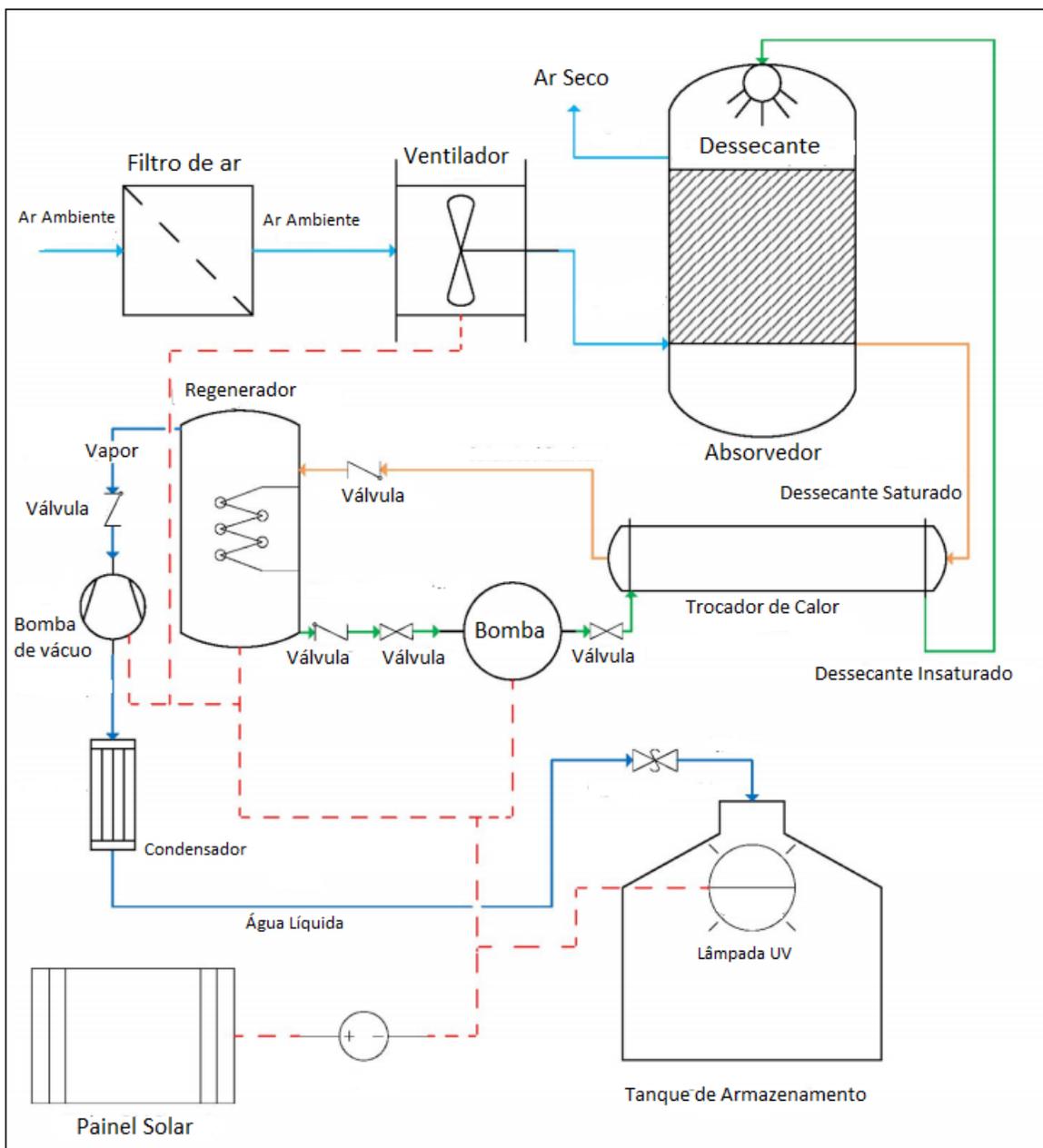


Figura 1 - Diagrama da tubulação e instrumentação do conceito básico.
Fonte: (DEVINEY, 2016).

Esse dispositivo requereria pouca manutenção, seria de fácil operação e poderia ser alimentado somente com energia gerada através de painéis solares, eliminando assim a dependência de acesso a redes de energia locais. A utilização de dessecante líquido permitiria que o dispositivo operasse em diversos níveis de umidade

relativa. A temperatura de operação seria baixa devido ao vácuo parcial na câmara de regeneração, permitindo que materiais mais simples e baratos fossem escolhidos para a construção do dispositivo. O sistema foi projetado com o objetivo de poder ser produzido em diferentes escalas, podendo abastecer diferentes demandas de produção de água.

3.5. ESTÁGIOS E SUBSISTEMAS

O primeiro estágio do sistema é constituído pela entrada de ar. Embora convecção natural e uma chaminé tenham sido consideradas, decidiu-se por um ventilador, já que assim a vazão de ar poderia ser controlada de acordo com as condições necessárias, caracterizando um processo de tiragem forçada.

O segundo estágio do sistema compreende o absorvedor de ar, que funciona como uma câmara preenchida com recheio, *packing material*, para aumentar a área de contato entre os reagentes. O dessecante entra pelo topo da câmara, enquanto o ar, com uma determinada umidade relativa, entra em contracorrente pelo fundo do absorvedor. A água é absorvida pelo dessecante e a solução é coletada por uma saída na parte inferior do absorvedor. Durante esse processo, o dessecante é resfriado pelo ar, que deixa o sistema e é liberado de volta para a atmosfera com umidade relativa mais baixa.

Antes de chegar ao regenerador, a solução é pré-aquecida através de um trocador de calor que utiliza como lado quente o dessecante reconcentrado que está sendo circulado de volta ao absorvedor, diminuindo assim a quantidade de calor necessária para aquecer a solução quando ela chegar ao regenerador.

No terceiro estágio, a solução é introduzida na câmara do regenerador, que devido a uma bomba de vácuo, se encontra a uma pressão de aproximadamente 25,6 kPa e é então aquecida até que a água contida na solução evapore. Essa água é capturada e o dessecante reconcentrado retorna ao absorvedor para ser reutilizado.

Após o processo de coleta, o vapor de água obtido passa por um condensador e depois é armazenado em um tanque onde será exposto a luz ultravioleta para purificação e eliminação de microrganismos.

4. ABORDAGEM COMPUTACIONAL

Modelos computacionais podem ser utilizados para representar o comportamento termodinâmico de inúmeros tipos de sistemas e dispositivos relacionados à engenharia. Apesar de medições reais poderem oferecer valores muito mais precisos e confiáveis, a necessidade de investimentos financeiros para a realização de experimentos torna esse método, muitas vezes, inviável. Dessa forma, a possibilidade de prever o comportamento de sistemas e processos utilizando métodos computacionais vem tornando-se cada vez mais interessante para o setor industrial, tendo em vista que esses métodos são relativamente mais baratos. Essas técnicas envolvem modelos matemáticos, correlações empíricas e ferramentas de simulação de processos auxiliadas por computador (EDEN, 2012).

Como poucos problemas de interesse prático são simples o suficiente para que possam ser solucionados e estudados apenas com o uso de equações teóricas idealizadas, se faz necessária a aplicação de sistemas de equações diferenciais e interações numéricas para a obtenção de resultados satisfatórios.

A opção de observar fenômenos de transferência de calor, mecânica de fluidos e, até mesmo, reações químicas cada vez mais complexas através de simulações e testes computacionais criou a necessidade de modelos que apresentem maior confiabilidade e sofisticação. Modelos matemáticos mais confiáveis permitem que valores de saída e parâmetros de funcionamento de sistemas sejam determinados, diminuindo a necessidade de realização de testes físicos e o acontecimento de falhas.

4.1. ASPEN PLUS

Engenheiros devem constantemente prever o comportamento de sistemas, sejam eles, termodinâmicos, químicos ou mecânicos. Sistemas como esses possuem inúmeras variáveis e parâmetros necessários para a compreensão dos processos que influenciam no seu funcionamento, isso faz com que muitos desses fenômenos sejam difíceis de ser acompanhados. O *AspenPlus*, desenvolvido pela AspenTech é uma ferramenta de modelagem que permite a construção de modelos de processos para a realização de simulação e análise de sistemas térmicos, químicos e dinâmicos através de uma interface primária, mostrado na Figura 2, com a utilização de diagramação gráfica por blocos e bibliotecas customizáveis.

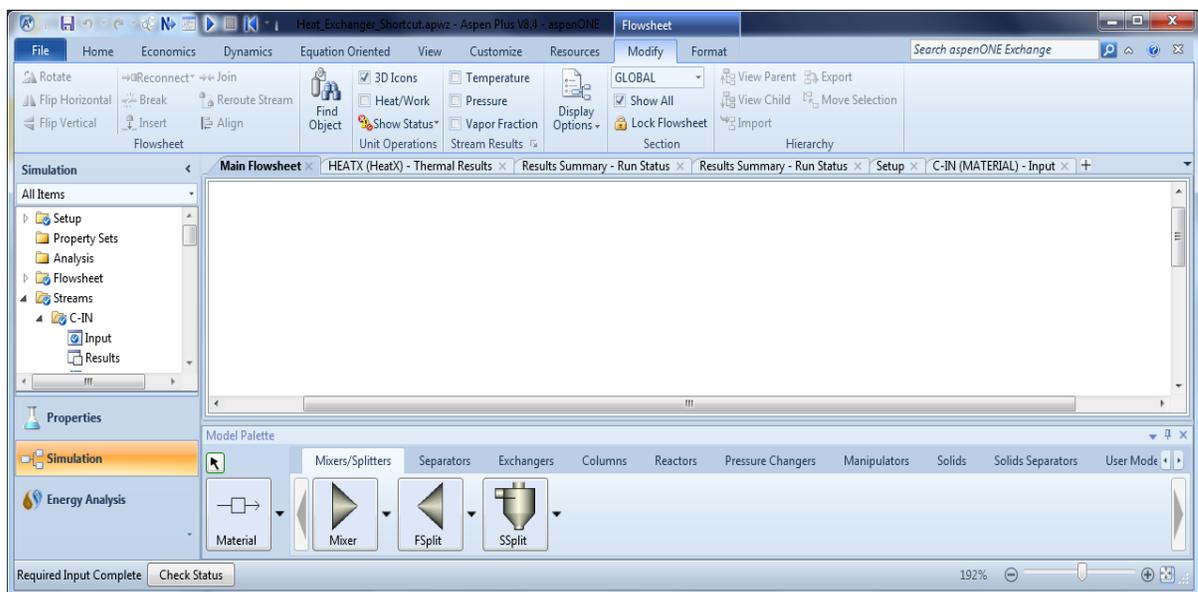


Figura 2 - Interface gráfica primária do *AspenPlus* com suas bibliotecas de blocos
Fonte: (ASPEN TECHNOLOGY, 2006).

Esse simulador de processos fornece vários blocos de modelo embutidos que podem ser diretamente aplicados na simulação de processos. Adicionalmente, esse simulador de processos possui um extenso banco de dados de propriedades onde as

propriedades das correntes requeridas para modelar as correntes de material de uma planta estão disponíveis (QUEIROZ, 2012).

Uma das vantagens apresentadas pelo *AspenPlus* é a possibilidade de estruturar inteiramente o processo que será modelado, construindo um diagrama (“Flowsheet”) que compreende todos os componentes do sistema, como trocadores de calor, compressores, colunas de destilação, etc. O diagrama também mapeia os fluxos de energia e massa contidos nele, esses servirão como correntes de entrada para os componentes do sistema (“inlet streams”).

Existem bibliotecas com variados componentes químicos, desde água até sais e hidrocarbonetos. A composição das correntes de entrada podem ser definidas, permitindo que sejam criadas misturas de componentes através de frações e vazões molares ou de massa. Deve-se definir também parâmetros como pressão e temperatura da corrente para que possam ser calculadas as propriedades dos componentes nos respectivos estados em que eles se encontram. São presentes no *AspenPlus* diversos métodos e conjuntos de equações de estado para diversos tipos de componentes químicos, servindo para definir suas propriedades e, também, prever as reações que devem ocorrer devido a interação entre determinadas substâncias.

As condições de operação dos blocos contidos na biblioteca gráfica podem ser introduzidas, sendo possível fixar temperaturas, pressões e dimensões dos blocos. Caso seja necessário uma avaliação de projeto, o próprio *AspenPlus* possui ferramentas de dimensionamento de unidades, como reatores, bombas e trocadores de calor.

O “flowsheet” deverá conter todos parâmetros de entrada necessários para a obtenção dos valores de saída do sistema.

4.2. DEFINIÇÃO DOS COMPONENTES E PROPRIEDADES

Os compostos químicos que foram usados no modelo de extração de água atmosférica foram: água, cloreto de lítio e ar. O cloreto de lítio (LiCl) foi escolhido pois é um sal com propriedades higroscópicas, permitindo que o composto absorva com facilidade a umidade presente no ar.

Apesar o *AspenPlus* possuir ar em sua biblioteca de componentes, a corrente de ar que entra no sistema foi definida como uma mistura de gases contendo gás nitrogênio, gás oxigênio e vapor de água. Essa escolha foi feita pois o *AspenPlus* não possui uma forma de definir a umidade relativa diretamente para o componente padrão existente para o ar.

4.2.1. DEFINIÇÃO DA UMIDADE RELATIVA

Como não é possível definir diretamente a umidade relativa de uma corrente de ar úmido dentro do *AspenPlus*, foi necessário modelar o ar atmosférico como uma mistura de gases. Ar úmido pode ser modelado como uma mistura binária de ar seco e vapor de água já que nenhum dos componentes do ar seco é altamente solúvel em água líquida (MARTINEZ, 1992). Para estimar as vazões molares dos gases contidos na mistura, foi necessário ativar a opção Design Specs, essa ferramenta permite definir especificações necessárias para o projeto que deve ser realizado. Essa ferramenta permite a utilização de Property Sets, bibliotecas de propriedades que podem ser estimadas através do programa.

Propriedades como umidade relativa estão incluídas nos Property Sets contidos no *AspenPlus*. É necessário definir qual seria o valor de umidade relativa desejada, além da tolerância para esse valor. Após a ativação dos Property Sets e Design

Specs, é possível criar um bloco de cálculos, Calculator Block, para que nele sejam inseridos alguns comandos básicos em Assembly para que os valores de vazão molar para cada um dos componentes da corrente de ar úmido sejam estimados. Os Design Specs adicionam ou retiram água da corrente de ar para que ela alcance a umidade relativa desejada, assim, essa sub-rotina faz compensações nas mudanças que podem ocorrer na vazão total de ar.

A sub-rotina abaixo calcula o fator de normalização para um bloco de multiplicação, Multiplier Block, que retorna a vazão total de ar ao seu valor original enquanto mantém a razão de ar para água calculada pelos Design Specs. O bloco de multiplicação foi posicionado antes da entrada no absorvedor de ar, para que a vazão fosse normalizada antes de entrar em contato com o dessecante, como mostrado na Figura 13.

```

c  This subroutine compensates for the total air flow rate
c  changes made by the design-spec, DS-1. The design-spec
c  adds or removes water from the air flow to achieve the
c  humidity specification - this also changes the total
c  air flow. The below equations calculate a
c  normalization factor for the Multiplier Block - which
c  returns the total air flow back to its original value
c  but while maintaining the air/water ratio calculated by
c  the design spec.
C
F      FTOTAL=FN2+FO2+FH2O
F      MULT=100/FTOTAL
C
      READ-VARS FN2 Fo2 FH2O
      WRITE-VARS MULT

```

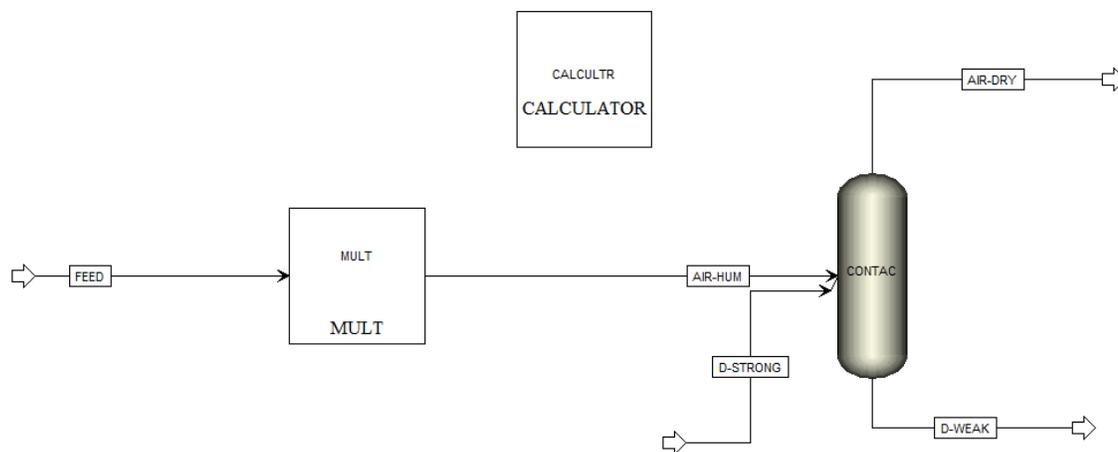


Figura 3 - Esquema de blocos utilizado para definir a umidade relativa do ar

Fonte: Autoria própria.

Devido a problemas de processamento, essa seção do modelo não foi mantida na configuração final. A sub-rotina, com os blocos de cálculo e multiplicação, foi implementada em um arquivo separado e os resultados de vazões molares para cada componente foram introduzidos no modelo principal. Dessa forma, a simulação do modelo principal podia ser executada de forma mais rápida e sem a possibilidade de travamento do programa devido ao grande número de blocos lógicos inseridos. Os valores de vazão molar encontrados através da sub-rotina estão apresentados na Figura 14. Observa-se que como o LiCl se é um sal, acontece, em pequena escala, a dissociação do composto em alguns cátions e ânions após o contato com a água presente no ar atmosférico.

	AIR-DRY	AIR-HUM	D-STRONG	D-WEAK
▶ Substream: MIXED				
▶ Mole Flow kmol/hr				
▶ NITROGEN	15.6999	15.7	0	5.89551e-05
▶ OXYGEN	4.19997	4.2	0	3.11332e-05
▶ WATER	0.20373	0.233547	0.119898	0.149715
▶ LITHI-01	0	0	0	0
▶ H3O+	0	0	0	0
▶ LI+	0	0	0.0339673	0.0339673
▶ HCL	0	0	0	0
▶ LIOH	0	0	0	0
▶ OH-	0	0	0	0
▶ CL-	0	0	0.0339673	0.0339673

Figura 4 - Resumo da composição das correntes de ar e dessecante que passam pelo absorvedor.

Fonte: Autoria própria.

4.3. ESCOLHA DE MÉTODOS E EQUAÇÕES

Existem diversos métodos para cálculo e estimativa de propriedades de compostos químicos já inclusos em uma biblioteca no *AspenPlus*. É necessário um método de propriedade adequado para cada tipo de aplicação para assegurar o sucesso dos seus cálculos (ASPEN TECHNOLOGY, 2006). Como o LiCl é um sal, ou seja, um composto iônico e se dissocia na quando em contato com a água, foi necessário realizar de escolha de um método de propriedades que pudesse prever o comportamento da solução formada por água e íons livres. As características do processo foram avaliadas utilizando um diagrama, como visto na Figura 3.

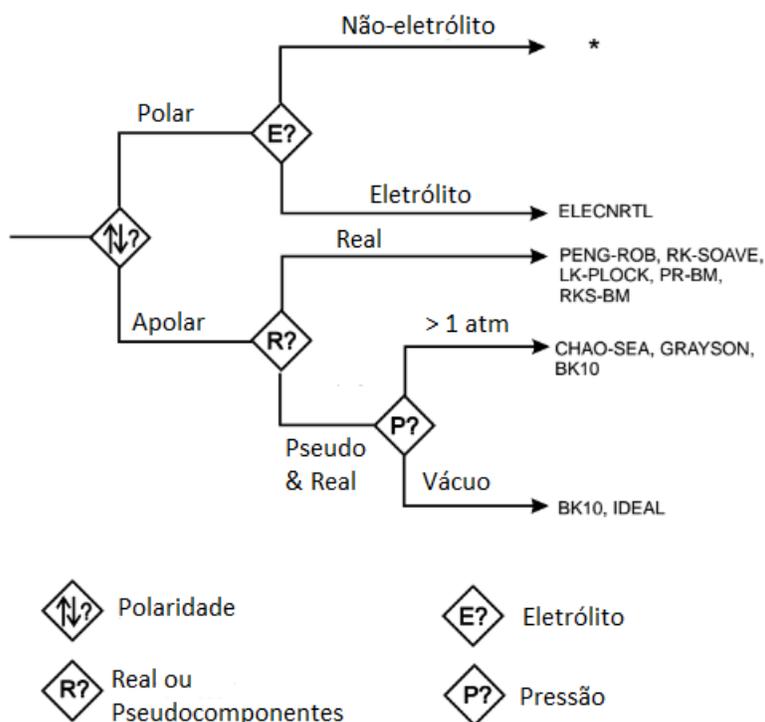


Figura 5 - Diagrama de recomendações de Eric Carlson.

Fonte: (ASPEN TECHNOLOGY, 2006).

O método selecionado foi o *Electrolyte Non-Random Two Liquid* (ELECNRTL), que pode ser usado para calcular coeficientes de atividade para líquidos contendo eletrólitos. Esse método é recomendado para sistemas não ideais onde os parâmetros binários de interação entre os componentes possam ser obtidos através de regressão de dados. O Aspen Physical Property System possui um vasto número de parâmetros que podem ser utilizados para modelos de Non-Random Two Liquids (NRTL).

4.3.1. VANTAGENS E DESVANTAGENS DO MÉTODO DE COEFICIENTE DE ATIVIDADE

O Método de Coeficiente de Atividade é a maneira mais eficaz de representar misturas líquidas altamente não ideais em baixa pressão. É possível estimar ou obter a partir de dados experimentais, como gráficos de equilíbrio de fase.

Por outro lado, parâmetros binários obtidos através de regressão de dados são válidos apenas dentro das faixas de temperatura e pressão contidos nos dados experimentais (ASPEN TECHNOLOGY, 2006). Deve-se lembrar também que esse método pode ser utilizado apenas para baixas pressões, se restringindo a faixas de pressão abaixo de 10 atm.

4.3.2. ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS BINÁRIOS

Os parâmetros binários necessários para descrever o comportamento da solução de dessecante quando em contato com a água contida no ar atmosférico foram obtidos através da ferramenta Elec Wizard. Esse recurso estima coeficientes de interação entre compostos iônicos, permitindo que seja avaliada a possibilidade de reação entre todos os compostos químicos contidos no modelo. Pode-se observar que após o uso dessa ferramenta, a lista de componentes apresentada na interface do *AspenPlus* aumenta, devido a inclusão de novos compostos que podem estar presentes no modelo.

Após a definição de todos os componentes e dos coeficientes que serão utilizados no método, se faz necessária uma análise de propriedades, que pode ser realizada rapidamente através do próprio *AspenPlus*.

4.4. CRIAÇÃO DO FLOWSHEET

Para a realização da simulação de processos no *AspenPlus*, é necessária a criação de um flowsheet, esse diagrama serve para mapear o caminho dos componentes químicos através dos blocos lógicos onde os processos termoquímicos ocorrem. Na sessão da interface que compreende o Simulation Environment, é possível inserir diversos blocos lógicos com diferentes características e finalidades, além das streams, que podem representar os fluxos de massa e calor que entram e saem dos blocos lógicos. Condições como vazão, composição, pressão e temperatura podem ser especificadas para cada uma das correntes de entrada.

Em relação aos blocos lógicos, a quantidade e o tipo das especificações irá variar de acordo com a natureza do bloco. Podem ser requisitados detalhes de geometria ou condições de operação de acordo com a função e a composição química dos materiais presentes no processo realizado.

4.5. REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO MODELO

A representação gráfica do modelo final, já com todos os blocos principais e secundários, está apresentado na Figura 4. Esta é a configuração final usada para a coleta de dados analisados. O sistema completo possui ao todo 14 elementos, incluindo blocos e correntes de massa e calor.

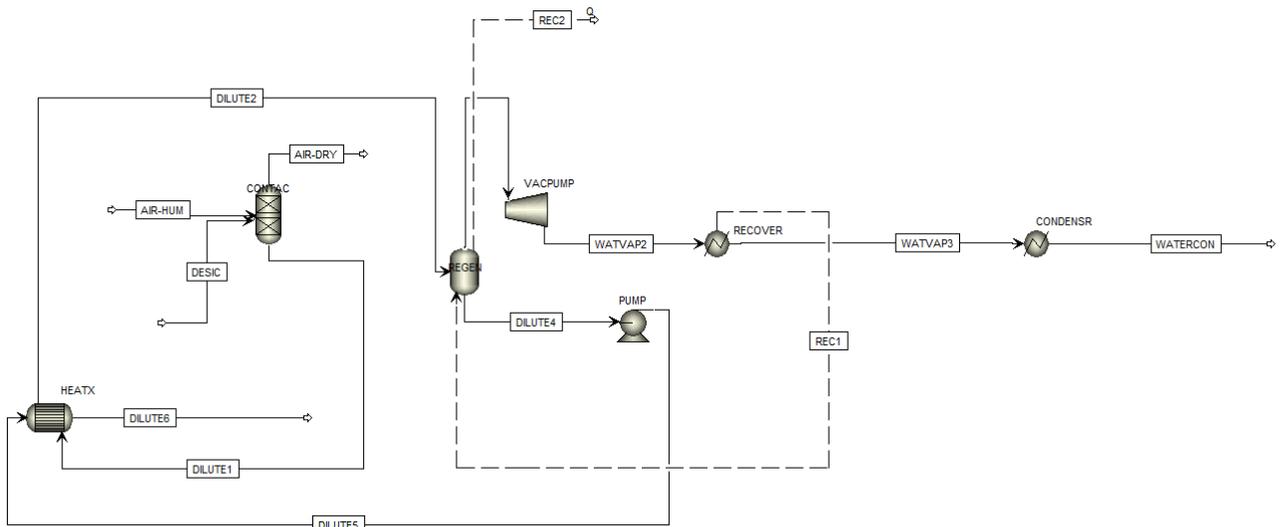


Figura 6 - Diagrama do modelo na interface do *AspenPlus*.

Fonte: Autoria própria.

Os blocos representados nesse modelo são:

1. **CONTAC:** Absorvedor de ar
2. **REGEN:** Regenerador
3. **HEATX:** Trocador de calor de pré-aquecimento
4. **RECOVER:** Condensador de recuperação
5. **CONDENSER:** Condensador de água
6. **VACPUMP:** Bomba de vácuo
7. **PUMP:** Bomba

E as correntes representadas nesse modelos são:

8. **AIR-HUM:** Ar úmido
9. **AIR-DRY:** Ar seco
10. **DESIC:** Dessecante
11. **DILUTE_:** Solução de água-dessecante
12. **WATVAP_:** Vapor de água
13. **WATERCON:** Água condensada
14. **REC_:** Corrente de calor de recuperação

Como o *AspenPlus* considera cada seção de uma corrente que passa por um bloco lógico de processos como um elemento individual, optou-se por numerar algumas correntes ao invés de alterar o seu nome, já que existia o objetivo de observar a variação na concentração de LiCl, no caso da solução de água-dessecante, e a temperatura no caso do vapor de água. Portanto, as correntes indicadas com um sublinhado na lista de elementos representam as correntes numeradas na representação gráfica do modelo.

4.6. BLOCOS PRINCIPAIS

Na sua forma mais simples, o sistema precisa de apenas três blocos básicos para o seu funcionamento. Primeiro, um absorvedor de ar, onde a água seria absorvida do ar através do dessecante líquido. Segundo, um regenerador, onde a água seria separada da solução enfraquecida de LiCl que sairia do absorvedor. E por fim, um condensador, que resfriaria o vapor de água obtido através do aquecimento realizado no regenerador.

Apesar de ser possível o desenvolvimento de um modelo para um sistema como esse, ele seria pouco eficiente em termos energéticos, sendo necessária a inserção de um grande quantidade de energia elétrica para alimentar o regenerador. Além disso, grande parte dessa energia seria simplesmente perdida para o ambiente durante os processos de resfriamento. Para tornar o sistema mais viável, foram introduzidos blocos secundários com o objetivo de promover a recuperação dessa energia que seria desperdiçada.

4.6.1. ABSORVEDOR DE AR

O processo de absorção da água contida no ar atmosférico foi modelado utilizando um bloco RadFrac existente na biblioteca do *AspenPlus*, como visto na Figura 7. Para isso, o bloco foi configurado como sendo uma coluna de absorção de dois estágios, não possuindo condensador e caldeira de reaquecimento. Nessa configuração, as correntes de ar e de dessecante inseridas no bloco podem entrar em contato entre si para reagir sem a necessidade de aquecimento ou resfriamento dos reagentes. O calor gerado que pode ser observado no balanço de energia desse bloco é resultado apenas da reação exotérmica que ocorre quando o dessecante absorve a umidade do ar.

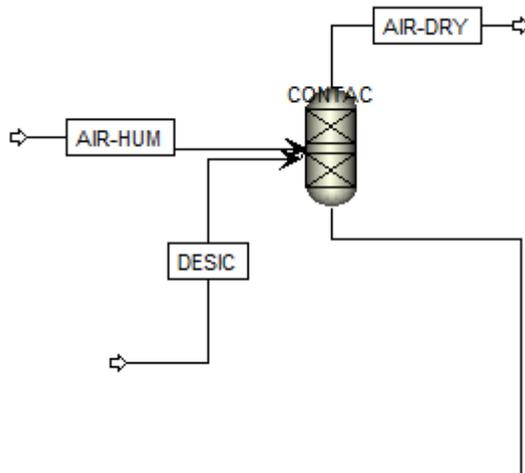


Figura 7 – Bloco do absorvedor de ar.

Fonte: Autoria própria.

Já que no semiárido brasileiro a umidade relativa média do ar gira em torno de 50%, fez-se necessário a definição de um recheio para a coluna. O recheio tem como função o aumento da área interna da coluna, permitindo o aumento da superfície de contato entre a fase líquida e a gasosa e maximizando a transferência de massa entre os fluxos de ar e de dessecante. A eficiência dessa coluna é associada ao recheio, levando-se em consideração a área superficial que pode ser obtida em relação ao volume ocupado pelo material.

4.6.1.1. TESTE DE CONVERGÊNCIA DA COLUNA

Para o desenvolvimento da coluna, foi necessário verificar se as interações entre a água e o LiCl estavam ocorrendo de maneira correta. Assim, foi executado um teste de convergência para verificar se as duas substâncias estariam em um ponto em que a reação ocorreria próxima ao equilíbrio. Mantendo-se a temperatura a 293,15 K e a

pressão a 1 atm, a altura da coluna foi aumentada para 340" e a vazão de dessecante foi gradualmente reduzida como visto na Tabela 1.

Tabela 1 - Valores da concentração de LiCl para cada vazão mássica de dessecante

Vazão mássica de dessecante (kg/s)	Concentração (%)
0.02	39.60
0.002	36.75
0.0002	31.39
0.0001	30.90
0.00005	30.70
0.00001	30.67
0.000005	30.67
0.000001	30.67

Fonte: Autoria própria.

Através do primeiro teste, observou-se que a reação de higroscopia estava ocorrendo de forma correta, já que o valor encontrado para a concentração estava convergindo para o valor esperado de 30% ao passo em que a solução alcançava o equilíbrio.

Após analisar-se a qualidade da reação que ocorria na coluna, um segundo teste foi realizado para averiguar se a coluna em si estaria funcionando de maneira correta. Seis casos com diferentes temperaturas e umidades relativas foram definidos. A alteração dessas propriedades causou mudanças na pressão de vapor da solução de água e LiCl, sendo assim possível observar se a concentração de LiCl estava próxima da concentração esperada através do gráfico de Othmer, apresentado no Gráfico 1. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 2.

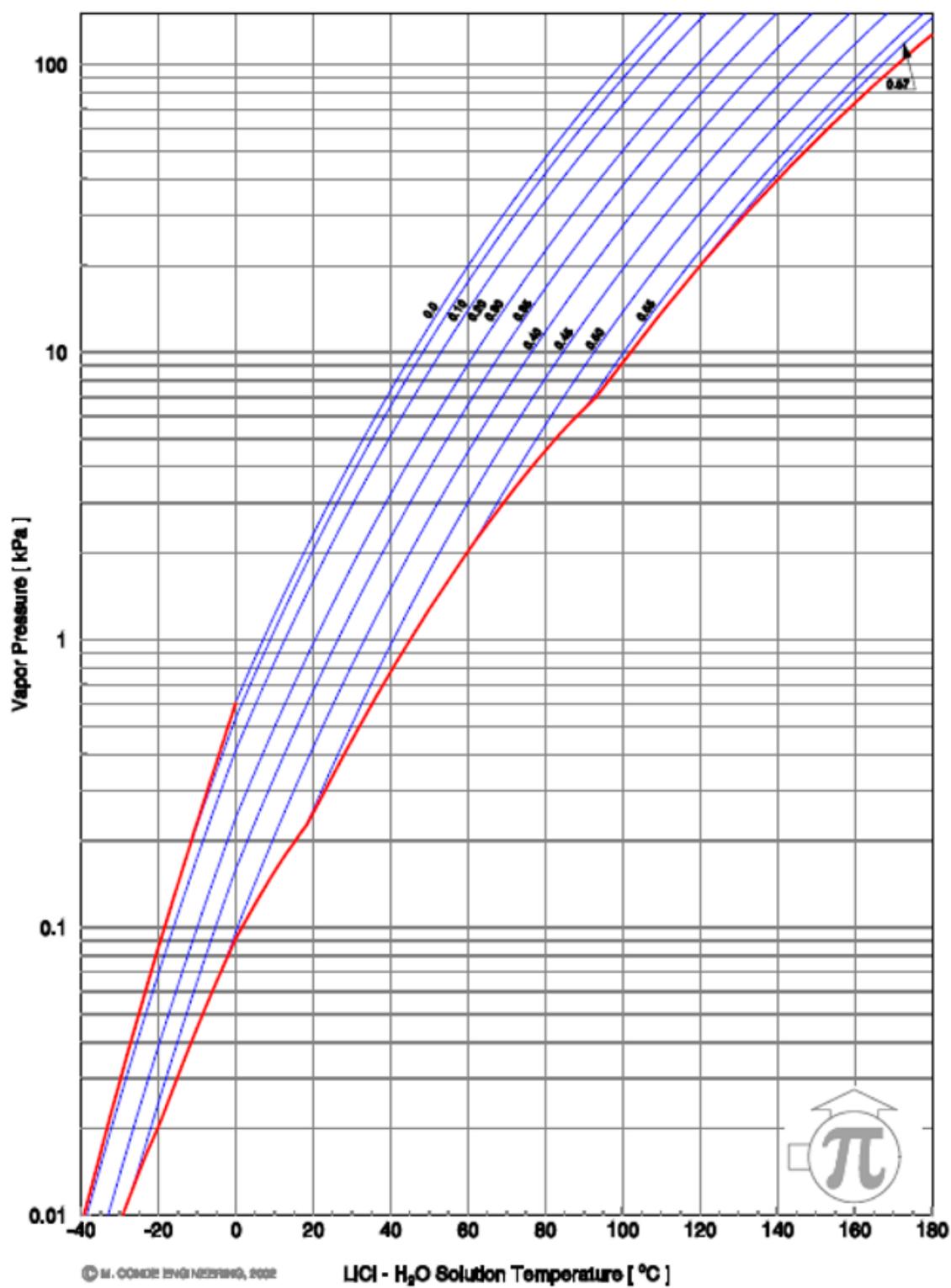


Gráfico 1 - Diagrama de Othmer para soluções aquosas de cloreto de lítio.

Fonte: (M. CONDE ENGINEERING, 2002)

Tabela 2 - Comparação entre as concentrações de LiCl encontradas e esperadas

Temperatura da solução (K)	Umidade relativa (%)	Concentração encontrada (%)	Concentração esperada (%)
293	95,0	7,40	7,00
	75,0	18,3	17,5
	50,0	30,7	29,8
313	95,0	7,10	6,90
	75,0	18,5	18,0
	50,0	31,2	30,5

Fonte: Autoria própria.

Como o objetivo dos testes foi concluído, assumiu-se que a implementação lógica da coluna estaria correta e ela pôde ser então inserida no modelo com as especificações do projeto real. No modelo produzido, o recheio escolhido foi o #2 NUPAC, mostrado na Figura 5, produzido pela LANTEC Products Incorporated. A coluna foi, então, definida como possuindo 10" de diâmetro e fator de empacotamento de 16 pé^{-1} .



Figura 8 - Recheio #2 NUPAC usado na coluna de absorção.

Fonte: (LANTEC Products Incorporated)

4.6.2. REGENERADOR

O regenerador utilizado para a posterior separação da solução de água com dessecante líquido foi modelado como um bloco separador Flash2 com duas saídas, como mostrado na Figura 9. A pressão e a temperatura em que o bloco se encontra foram escolhidas utilizando um diagrama de Othmer para a solução de água e LiCl na concentração desejada.



Figura 9 – Bloco do regenerador.

Fonte: Autoria própria.

Devido a necessidade de menores temperaturas na câmara do regenerador, foi inserida um compressor isentrópico que funcionaria como uma bomba de vácuo na saída do vapor de água. Essa bomba manteria uma pressão de 25,6 KPa dentro do regenerador, permitindo que a água mudasse de fase em uma temperatura mais baixa do que se estivesse à pressão ambiente. Analisando-se a pressão de vapor da solução a uma concentração de 38%, observou-se que a água entraria em ebulição a uma temperatura de aproximadamente 95 °C.

4.6.3. CONDENSADOR

Após o vapor de água ser extraído da solução de dessecante, ele precisa ser condensado para que possa ser feita a filtragem e o armazenamento da água produzida para consumo. O condensador pôde ser modelado como um bloco Heater, que pode ser utilizado para processos de aquecimento ou resfriamento, como mostrado na Figura 10. Assim, foi necessário apenas definir a pressão e a temperatura deveria sair do condensador em direção ao tanque de armazenamento. O condensador foi dimensionado para receber a água a uma temperatura de 95 °C e seria resfriada até 25 °C, como mostrado na Figura 11. Para realizar esse resfriamento, o condensador deveria retirar calor da água uma taxa de aproximadamente 8,6 cal/s, como mostrado na Figura 12.



Figura 10 - Bloco do condensador.

Fonte: Autoria própria.

	WATVAP3	WATERCON
Total Flow kmol/hr	0.0230707	0.0230707
Total Flow kg/hr	0.416014	0.416014
Total Flow l/min	0.119913	0.0211647
Temperature C	95	25
Pressure bar	1	1.01325
Vapor Frac	0.00963747	0.00151358
Liquid Frac	0.990363	0.998486
Solid Frac	0	0
Enthalpy cal/mol	-66870.3	-68210.1
Enthalpy cal/gm	-3708.4	-3782.7
Enthalpy cal/sec	-428.54	-437.127
Entropy cal/mol-K	-34.9072	-38.9232
Entropy cal/gm-K	-1.93583	-2.15855
Density mol/cc	0.00320659	0.0181675
Density gm/cc	0.0578216	0.3276
Average MW	18.0321	18.0321
Liq Vol 60F l/min	0.00696065	0.00696065
*** VAPOR PHASE ***		
RELHUMID	100.114	100.748

Figura 11 - Resultados da corrente de água que passa pelo condensador.

Fonte: Autoria própria.

Outlet temperature	25	C
Outlet pressure	1.01325	bar
Vapor fraction	0.00151358	
Heat duty	-8.58637	cal/sec
Net duty	-8.58637	cal/sec
1st liquid / Total liquid	1	
Pressure-drop correlation parameter		

Figura 12 - Resultados da taxa de calor retirada da água pelo condensador.

Fonte: Autoria própria.

4.7. BLOCOS SECUNDÁRIOS

Devido ao fato de um sistema construído com apenas três blocos principais ser bastante ineficiente, estudou-se a possibilidade de adicionar blocos secundários ao diagrama original. Esses blocos permitiriam que uma parcela da energia perdida para o exterior do sistema fosse recuperada e reutilizada em outras áreas do sistema, diminuindo a quantidade de energia elétrica que deveria ser alimentada ao sistema para o aquecimento do regenerador.

4.7.1. PRÉ-AQUECIMENTO

Como o regenerador apresentava o maior consumo de energia, era necessário diminuir a quantidade de calor que seria adicionada à água para que ela evaporasse da solução de LiCl. Para isso, foi colocado um trocador de calor de dois canais com arranjo de fluxo contracorrente após a coluna de absorção para que a solução fosse pré-aquecida antes de entrar na câmara do regenerador, como mostrado na Figura 13. A solução rica em LiCl, que sairia do regenerador, serviria como fluido para o lado quente do trocador, enquanto a solução enfraquecida, que sairia da coluna de absorção a uma temperatura próxima da ambiente, serviria como fluido frio. Esse processo de pré-aquecimento permitiu que a solução sofresse um aumento de temperatura de 46 °C, diminuindo a potência consumida pelo regenerador. As temperaturas do lado quente e frio do trocador de calor são apresentadas na Figura 14.

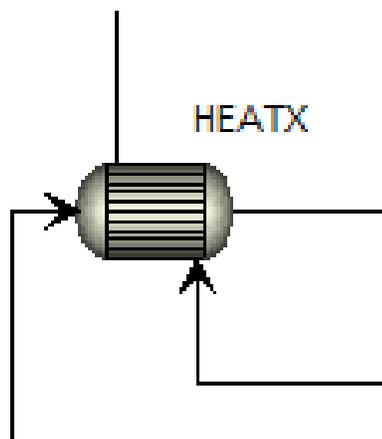


Figura 13 - Bloco de pré-aquecimento.

Fonte: Autoria própria.

	DILUTE5	DILUTE1	DILUTE2	DILUTE6
Total Flow kmol/hr	0.0485695	0.0716402	0.0716402	0.0485695
Total Flow kg/hr	0.939835	1.35585	1.35585	0.939835
Total Flow l/min	0.0123957	0.0189133	0.0271633	0.0119459
Temperature C	95.0046	20.4008	66.752	22
Pressure bar	1.01325	1	1	1.01325
Vapor Frac	0	0	0.000234655	0
Liquid Frac	1	1	0.999765	1
Solid Frac	0	0	0	0
Enthalpy cal/mol	-60619.5	-63840.4	-63193.9	-61573.1
Enthalpy cal/gm	-3132.74	-3373.19	-3339.03	-3182.02
Enthalpy cal/sec	-817.85	-1270.43	-1257.56	-830.715
Entropy cal/mol-K	-24.6369	-30.9813	-28.9356	-27.5208
Entropy cal/gm-K	-1.27321	-1.63699	-1.5289	-1.42224
Density mol/cc	0.065304	0.0631301	0.0439564	0.067763
Density gm/cc	1.26365	1.19479	0.831911	1.31124
Average MW	19.3503	18.9258	18.9258	19.3503

Figura 14 - Temperaturas e vazões presentes no trocador de calor de pré-aquecimento.

Fonte: Autoria própria.

O trocador de calor foi modelado através de um bloco HeatX Exchanger, que permite definir a temperatura com que o fluido quente sairá do trocador. O coeficiente de transferência de calor U foi calculado separadamente utilizando dois métodos de dimensionamento de trocadores de calor existentes no *AspenPlus*. Primeiramente, foi utilizado o método Atalho (Shortcut Method), exemplificado na Figura 15, onde algumas especificações de troca de calor são definidas e através delas é possível encontrar o coeficiente de troca de calor para esse trocador. Esse método é bem rápido e prático, no entanto ele se limita a análises generalizadas e não leva em consideração a geometria do trocador. Usando o primeiro método como base, um segundo método mais detalhado (Detailed Method), exemplificado na Figura 16, foi implementado. Essa ferramenta permite que as especificações previamente encontradas sejam avaliadas, verificando se o trocador está sobre ou subprojetado, além de permitir que os detalhes geométricos sejam adicionados. Por fim, o trocador foi simulado para verificar se as temperaturas de saída estavam corretas e o coeficiente encontrado foi definido como constante, na aba U Methods. Na Figura 17 é possível observar que o calor total transferido, *Heat Duty*, para esse trocador de calor é de aproximadamente 12 cal/s.

The image shows the configuration window for a HeatX Exchanger in AspenPlus, specifically for the Shortcut method. The interface is divided into several sections:

- Calculation:** Radio buttons for 'Shortcut' (selected), 'Detailed', and 'Rigorous'. A dropdown menu shows 'Size Shell&Tube'. A checkbox for 'Use Design Template File' is present.
- Flow arrangement:** A dropdown for 'Hot fluid', a dropdown for 'Flow direction' set to 'Countercurrent', and a text input for 'No. shells in series' set to '1'. A checkbox for 'Calculate number of shells' is present.
- Rigorous Model:** Radio buttons for 'Shell&Tube', 'AirCooled', and 'Plate'. A button labeled 'Transfer UA to shortcut' is located below.
- Type:** A dropdown menu set to 'Design'.
- Exchanger type:** A dropdown menu set to 'Heat exchanger'.
- Exchanger specification:** A dropdown for 'Specification' set to 'Hot stream outlet vapor fraction', a text input for 'Value' set to '0', a dropdown for 'Exchanger area' set to 'sqm', a dropdown for 'Constant UA' set to 'cal/sec-K', and a dropdown for 'Minimum temperature approach' set to '1' with a unit dropdown set to 'C'.

Figura 15 - Interface gráfica do *AspenPlus* para a definição do método Atalho.
Fonte: (ASPEN TECHNOLOGY).

Calculation

Shortcut
 Detailed
 Rigorous
 Size Shell&Tube
 Use Design Template File

Flow arrangement

Hot fluid: Shell
 Flow direction: Countercurrent
 No. shells in series: 1
 Calculate number of shells

Rigorous Model

Shell&Tube
 AirCooled
 Plate
 Transfer UA to shortcut

Type: Rating
 Exchanger type: Heat exchanger

Exchanger specification

Specification: Hot stream outlet vapor fraction
 Value: 0
 Exchanger area: sqm
 Constant UA: cal/sec-K
 Minimum temperature approach: 1 C

Figura 16 - Interface gráfica do AspenPlus para a definição do método Detalhado.
 Fonte: (ASPEN TECHNOLOGY).

HEATX (HeatX) - Thermal Results | REGEN (Flash2) - Stream Results | Main Flowsheet | Results S

Summary | Balance | Exchanger Details | Pres Drop/Velocities | Zones | Utility Usage | Status

Heatx results

Calculation Model: Shortcut

	Inlet		Outlet	
Hot stream:	DILUTE5		DILUTE6	
Temperature	95.0046	C	22	C
Pressure	1.01325	bar	1.01325	bar
Vapor fraction	0		0	
1st liquid / Total liquid	1		1	
Cold stream	DILUTE1		DILUTE2	
Temperature	20.4008	C	66.752	C
Pressure	1	bar	1	bar
Vapor fraction	0		0.000234655	
1st liquid / Total liquid	1		1	
Heat duty	12.8651		cal/sec	

Figura 17 - Calor total transferido no trocador de calor de pré-aquecimento.
 Fonte: Autoria própria.

4.7.2. RECUPERAÇÃO

Ao sair da câmara do regenerador, o vapor de água sofre uma alta variação de temperatura após ser pressurizado novamente à pressão ambiente. Como esse aumento de temperatura dificulta a condensação do vapor, foi estudada a possibilidade de recircular o vapor em alta temperatura de volta à câmara do regenerador, como mostrado na Figura 18. Nesse processo, o vapor seria levemente resfriado, fazendo com que o condensador não precisasse ejetar uma quantidade tão grande de calor para o ambiente. As temperaturas presentes na saída da bomba de vácuo e após o processor de recuperação estão apresentadas na Figura 19.



Figura 18 – Bloco de recuperação.

Fonte: Autoria própria.

	WATVAP2	WATVAP3
▶ Total Flow kmol/hr	0.0230707	0.0230707
▶ Total Flow kg/hr	0.416014	0.416014
▶ Total Flow l/min	16.1173	0.119913
▶ Temperature C	239.222	95
▶ Pressure bar	1.01325	1
▶ Vapor Frac	1	0.00963747
▶ Liquid Frac	0	0.990363
▶ Solid Frac	0	0
▶ Enthalpy cal/mol	-55962	-66870.3
▶ Enthalpy cal/gm	-3103.46	-3708.4
▶ Enthalpy cal/sec	-358.634	-428.54
▶ Entropy cal/mol-K	-6.12848	-34.9072
▶ Entropy cal/gm-K	-0.339865	-1.93583
▶ Density mol/cc	2.38571e-05	0.00320659
▶ Density gm/cc	0.000430195	0.0578216
▶ Average MW	18.0321	18.0321

Figura 19 - Temperaturas e vazões presentes no bloco utilizado para o resfriamento do vapor de água.
Fonte: Autoria própria.

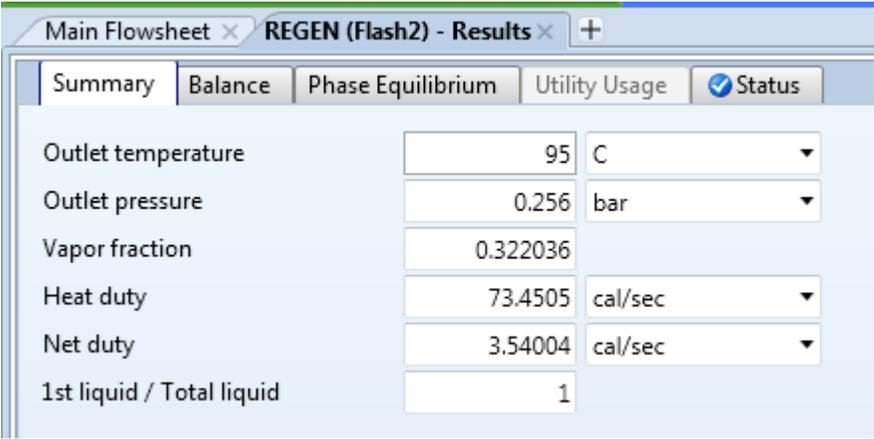
O processo de recuperação foi modelado como um fluxo de calor, representado por uma stream de transferência de energia, que sairia de um bloco de resfriamento localizado após a bomba de vácuo. Esse fluxo foi ligado ao bloco do regenerador para representar uma tubulação, que passaria por dentro da câmara de aquecimento. Essa configuração permitiria que os fluidos trocassem calor entre si, sem haver mistura entre a solução que estaria sendo aquecida e o vapor de água que já havia sido extraído do regenerador. Foi também necessário introduzir mais um fluxo de calor

saindo da câmara do regenerador, só assim o *AspenPlus* é capaz de processar que o balanço de energia está completo para esse bloco.

5. RESULTADOS

Após realizados os primeiros testes com o modelo na sua forma mais simples, compreendendo apenas as seções do absorvedor, do regenerador, do condensador e as bombas, concluiu-se que maior parte da energia necessária para a operação do sistema estaria sendo consumida pelo regenerador. Essa conclusão dá-se ao fato de que o regenerador precisa gerar grandes quantidades de calor para aquecer e manter a solução de saturada de dessecante e água a uma temperatura próxima a 95 °C. Assim, os esforços para melhorar a eficiência energética do sistema foram concentrados em encontrar formas de reduzir o custo de operação do regenerador.

Após a implementação dos blocos secundários de recuperação de energia, a potência líquida consumida pelo bloco de regeneração diminuiu. O uso da energia que seria desperdiçada durante a condensação do vapor superaquecido que saía da bomba de vácuo teve grande impacto na melhoria da eficiência do processo de aquecimento necessário para a separação da solução de água e LiCl. Assim como mostrado na Figura 20, a potência líquida consumida pelo regenerador passou de 73.5 cal/s, ou 307 W, para apenas 3.54 cal/s, ou 14.8 W.



Main Flowsheet		REGEN (Flash2) - Results	
Summary		Balance	Phase Equilibrium
Outlet temperature	95	C	
Outlet pressure	0.256	bar	
Vapor fraction	0.322036		
Heat duty	73.4505	cal/sec	
Net duty	3.54004	cal/sec	
1st liquid / Total liquid	1		

Figura 20 - Potência líquida consumida pelo regenerador após o processo de recuperação.

Fonte: Autoria própria.

Pode-se observar que, com a implementação de um sistema de recuperação de energia integrado ao sistema principal, houve uma redução de aproximadamente 95,1% no consumo de energia necessária para o aquecimento do regenerador.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados obtidos, pode-se observar que o modelo atingiu o objetivo principal de ser capaz de operar em situações de extrema aridez, com umidades relativas de até 50%. Com os testes realizados nessas condições climáticas, foi possível alcançar a produção de 9,6 litros de água por dia de operação.

Pela análise realizada do modelo e com os valores de potência consumida obtidos através da simulação de todos os processos, nota-se nitidamente que a implementação de métodos de recuperação de energia térmica que seria ejetada em alguns blocos do sistema tiveram uma grande influência sobre a eficiência total do sistema. A quantidade de energia recuperada através do trocador de calor de pré-aquecimento e da criação de uma corrente de calor que transferisse o calor produzido pela compressão do vapor de água ao sair da bomba de vácuo foi significativa. Os efeitos positivos dessa estratégia podem ser visualizados na queda drástica de potência consumida pelo regenerador, durante o processo de separação da solução de água e de cloreto de lítio.

Outro indicador de melhoria da eficiência do sistema foi a redução da quantidade de energia que deveria ser retirada do vapor de água durante a condensação, já que agora o vapor entraria no condensador em uma temperatura mais próxima da temperatura de condensação da água à pressão atmosférica.

6.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros, seria possível calcular qual seria a área necessária de painéis solares para alimentar o sistema e, também, qual seria a

configuração mais eficiente para otimizar a coleta de luz de forma que o sistema continue compacto e possa ser móvel.

Outra sugestão, seria estudar os efeitos poluentes do cloreto de lítio que seria perdido durante os processos realizados no sistema e, no caso de uma avaliação positiva, verificar a possibilidade do uso de outros sais higroscópicos para substituí-lo como dessecante líquido na solução de absorção.