



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

**CONSTRUÇÃO DE UMA BANCADA DE SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO POR
ABSORÇÃO PARA FINS DIDÁTICOS**

DAYSE DE SOUZA BAIA
VANESSA SANTOS MORAES

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Faculdade de Engenharia
Mecânica do Campus de Tucuruí, como
parte dos requisitos para obtenção do
título de Engenheira Mecânica.

Orientador:
Profº Msc. Jessé Luís Padilha

TUCURUÍ – PA
2016



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

CONSTRUÇÃO DE UMA BANCADA DE SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO POR
ABSORÇÃO PARA FINS DIDÁTICOS

DAYSE DE SOUZA BAIA
VANESSA SANTOS MORAES

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Faculdade de Engenharia
Mecânica do Campus de Tucuruí, como
parte dos requisitos para obtenção do título
de Engenharia Mecânica.

BANCA EXAMINADORA

J. L. Padilha
Orientador:
Prof^o Msc. Jessé Luis Padilha
FEM/CAMTUC/UFPA

Ronaldo Raposo Moura
Orientador:
Prof^o Msc. Ronaldo Raposo Moura
FEM/CAMTUC/UFPA

Wassim Raja El Banna
Orientador:
Prof^o Msc. Wassim Raja El Banna
FEM/CAMTUC/UFPA

Conceito ERC

Tucuruí, 11 de 11 de 2016.

Dedicamos este trabalho aos nossos pais, irmãos e amigos;

Nossa mais bela razão de existir e viver.

Sem eles este trabalho e muitos dos nossos sonhos não fariam o menor sentido.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos primeiramente a Deus pelo dom da vida, por ter nos dado saúde e força para superar as dificuldades e seguir em frente.

Aos nossos pais, que são os grandes responsáveis pela nossa formação. Eles nos ensinaram o verdadeiro valor da vida, ensinaram a respeitar e buscar novos conhecimentos, pois apesar de todas as dificuldades e barreiras enfrentadas nunca nos deixaram desistir, sem eles nada disso seria possível.

A esta universidade, seu corpo docente, direção e administração que oportunizaram a janela que hoje vislumbramos um horizonte superior, eivado pela acendrada confiança no mérito e ética aqui presente.

A todos os professores, em especial ao nosso orientador Jessé Luís Padilha, pelo suporte no pouco tempo que lhe coube, pelas suas correções e incentivos.

Aos nossos amigos que nos momentos de angústia e indecisão e nos momentos de superação, fizeram-se presentes para nos confortar. O fardo se tornou mais leve com eles.

Aos nossos colegas de sala, que compartilharam conosco os prazeres e as dificuldades da jornada acadêmica com os quais convivemos durante tantas horas e carregamos a marca de experiências comuns que tivemos, tudo teria sido mais árduo sem as parcerias formadas ao longo desses cinco anos.

A todas as pessoas que passaram por nossas vidas contribuindo e torcendo de alguma forma por nossa formação acadêmica.

À todos nosso muito obrigado.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Sistema de refrigeração por absorção.	16
Figura 2. Processo de (a) absorção produzindo o efeito de refrigeração (b) dessorção de refrigerante necessitando de uma fonte de calor.	17
Figura 3. Princípio geral de um sistema de refrigeração por absorção.....	18
Figura 4 : Representação do Ciclo de Absorção.....	20
Figura 5. Sistema de Absorção Água-Amônia.	23
Figura 6. Comparação entre sistemas de refrigeração.....	26
Figura 7. Comparação entre os ciclos por compressão e por absorção.....	26
Figura 8. Fluxograma de um sistema de absorção de simples efeito.....	29
Figura 9. O evaporador de um sistema de refrigeração por absorção.	29
Figura 10. Absorvedor de um sistema de absorção.....	31
Figura 11. Detalhe no gerador do sistema.	33
Figura 12. Detalhe no condensador do sistema.....	34
Figura 13: Ciclo de Carnot.....	35
Figura 14. Ciclo ideal de absorção.....	36
Figura 15. Refrigerador Consul a) Vista Dianteira; b) Vista traseira.....	40
Figura 16. Suporte para a bancada didática.....	41
Figura 17. Sistema de Absorção do Refrigerador a) Vista dianteira; b) Lateral esquerda; c) Lateral direita.....	42
Figura 18. Pintura do Sistema de Absorção.	42
Figura 19. Fixação do Sistema de Absorção no suporte.....	43
Figura 20. Montagem do Painel de Comando.	43
Figura 21. Montagem do Painel Ilustrativo.	44
Figura 22. Montagem do sistema de ventilação forçada.	44
Figura 23. Instalação do Painel de Comando.	45
Figura 24. Sensores de temperatura a) Entrada do Condensador; b) Entrada do Evaporador.	45
Figura 25. Bancada didática do Sistema de Refrigeração por Absorção.....	46
Figura 26. Sistema de Refrigeração por absorção.	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Características Típicas de Sistemas de Absorção NH ₃ -H ₂ O Resfriados a Ar.....	23
Tabela 2. Lista de Materiais Utilizados.....	39
Tabela 3. Aferição das temperaturas da bancada	47
Tabela 4: Vazão Mássica obtida do Sistema	55
Tabela 5: Entalpias encontradas no sistema de absorção	56
Tabela 6: Balanço de Energia obtido no sistema.....	56
Tabela 8: Valores obtidos na Análise da Bancada	56
Tabela 7: Sistemas de Refrigeração Alimentados por Fonte de Calor	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CFC - Clorofluorcarbono

COP- Coeficiente de Performance

GLP – Gás Liquefeito de Petróleo

H₂O - Água

NH₃ – Amônia

UFPA – Universidade Federal do Pará

LISTA DE SÍMBOLOS

COP_{comp} = Coeficiente de performance de compressão

COP_{pot} = Coeficiente de performance de potencia

COP_{abs} = Coeficiente de performance de absorção

h = entalpia

W = potência

\dot{m} = vazão mássica

Q_e = Capacidade de refrigeração

Q_g = Taxa de adição de calor no gerador

T_g = Temperatura do gerador

T_a = Temperatura do absorvedor

T_e = Temperatura do evaporador

x = título

n = eficiência

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1 OBJETIVOS	13
1.1.1 Objetivo geral	13
1.1.2 Objetivos específicos	13
2. REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1 BREVE HISTÓRICO	14
2.2 REFRIGERAÇÃO POR ABSORÇÃO	15
2.2.1 Composição do Sistema de Refrigeração por Absorção	16
2.2.2 Princípios de Funcionamento	17
2.2.3 Características do Par Refrigerante-Absorvente	20
2.2.4 Sistemas que Empregam o Par Amônia-Água.....	22
2.2.5 Vantagens e Desvantagens de Sistemas de Refrigeração por Absorção.....	24
2.2.6 Relação entre o Ciclo de Absorção e o de Compressão de Vapor	24
2.2.7 Análise de Desempenho de Sistemas de Absorção.....	27
2.2.7.1 Coeficiente de Performance do Ciclo de Compressão	27
2.2.7.2 Coeficiente de Performance do Ciclo de Absorção.....	28
2.2.7.3 Coeficiente de Performance Ideal (Ciclo Carnot)	35
2.2.7.4 Eficiência de Refrigeração	38
3. MATERIAIS E MÉTODOS	39
3.1 CONCEPÇÃO DA BANCADA	40
3.2 ANÁLISE DE DESEMPENHO DA BANCADA DIDÁTICA	46
3.2.1 Balanço de Massa do Sistema	48
3.2.2 Análise Térmica do Sistemas de Absorção Simples	49
3.2.2.1 Entalpias da Solução	49
3.2.2.2 Entalpia da Água Líquida e Vapor de Água.....	49
3.2.3 Cálculo do COP do Sistema de Absorção da Bancada	51
3.2.4 Cálculo da Eficiência de Refrigeração do Sistema	51
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	53
5. CONCLUSÃO	58
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59
ANEXOS	59
APÊNDICE	62
APÊNDICE A – Roteiro do Experimento	62

RESUMO

CONSTRUÇÃO DE UMA BANCADA DE SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO POR ABSORÇÃO PARA FINS DIDÁTICOS.

RESUMO: O presente trabalho apresenta a construção de um aparelho de refrigeração com ciclo de absorção de amônia e água em uma bancada didática com o objetivo auxiliar no aprendizado dos alunos e profissionais que atuam diretamente na área de refrigeração, compreendendo os fenômenos físicos envolvidos no sistema, utilizando de maneira simples e fácil a demonstração do ciclo de refrigeração, bem como seu coeficiente de performance e a eficiência do sistema. Os objetivos do trabalho foram alcançados e a efetivação da bancada foi realizada, visto que a partir da sua análise foi possível obter todas as vazões mássicas, entalpias e carga térmicas, COP, eficiência e compará-las coma teoria.

Palavras-chaves: Refrigeração, absorção, bancada, água, amônia.

ABSTRACT

CONSTRUCTION OF A COOLING SYSTEM BENCH ABSORPTION FOR TEACHING PURPOSES.

SUMMARY: This work shows the assembly of a cooling equipment with uses ammonia (and water) absorption cycle in a didactic workbench in order to help the engineering students and cooling professionals a better comprehension of the physical phenomena involved at the system. This is an easy way to show a refrigeration cycle, their performance coefficient and the system efficiency. The objectives of the work were achieved and the implementation of the workbench was carried out, since from its analysis it was possible to obtain all the mass flows, enthalpies and thermal load, COP, efficiency and compare them with theory.

Keywords: cooling, absorption, work bench, water, ammonia.

1. INTRODUÇÃO

Segundo Menna (2008), o sistema de refrigeração por absorção é um modelo de sistema de refrigeração que utiliza calor proveniente de uma fonte quente para a sua operação, além de ser um dos mais antigos métodos de refrigeração, esses sistemas utilizam pares de fluidos na sua operação, geralmente amônia-água ou água-brometo de lítio, um como refrigerante e outro como absorvente.

Os refrigeradores domésticos por absorção tiveram grande utilização em áreas rurais onde não tinham luz elétrica, como afirma Ferrari (2005) as mesmas eram chamadas de geladeiras rurais, funcionando tanto a querosene quanto a gás GLP. Depois de um tempo com a chegada da eletricidade nas propriedades rurais e nas pequenas cidades as pessoas optaram pela substituição das geladeiras por absorção pelas novas geladeiras elétricas a motor/compressor. Atualmente esse sistema não é bastante conhecido, pois sua produção foi bastante reduzida.

O princípio de funcionamento do sistema de refrigeração por absorção é baseado na característica de alguns tipos de fluídos refrigerantes de se combinarem uma a outra substância, dita absorvente gerando calor. De forma inversa, fornecendo-se calor a esta mistura pode-se separar o fluído refrigerante do absorvente (CARMELLO, 2011).

De acordo com Abreu (199), a utilização de sistemas de refrigeração contribui para a conservação de alimentos por mais tempo, para o conforto térmico e para manutenção de ambientes industriais, de modo que sua abrangência compreende diversas áreas da Engenharia.

Como diz Dantas (2009) a refrigeração por absorção apresenta um grande ponto ao seu favor, além de reduzir o consumo elétrico, os fluidos utilizados nesse sistema não agredem o meio ambiente, tendo pouco impacto no efeito estufa. Atualmente esse sistema não é muito utilizado no meio doméstico, porém no meio industrial e comercial esse sistema ainda é bastante utilizado, principalmente todos aqueles que estão envolvidos na preservação dos alimentos e instalações de processos industriais, logo escolhem a amônia como refrigerante devido às suas propriedades termodinâmicas incomparáveis.

A proposta da bancada didática teve como intuito auxiliar no aprendizado de outros alunos e profissionais que atuam diretamente na área de refrigeração, compreendendo os fenômenos físicos envolvidos no sistema, utilizando de maneira simples e fácil a demonstração do ciclo de refrigeração por absorção. Devido a dificuldade do acesso a este ciclo de refrigeração no meio acadêmico, é que nos serviu de motivação para a construção de uma bancada didática, buscando mostrar na prática o que se aprende na teoria.

O presente trabalho traz em seu decorrer a construção de uma bancada de sistema de refrigeração por absorção tendo como intuito demonstrar de maneira simples e fácil o seu princípio de funcionamento. Além disso, busca-se observar e discutir o princípio de funcionamento do sistema bem como calcular seu Coeficiente de performance (COP) e sua eficiência de refrigeração de modo que tais dados possam vir a auxiliar no aprendizado de outros discentes da área de mecânica que poderão fazer estudos de otimização da bancada buscando dessa forma contribuir para melhorias em seu sistema e conseqüentemente em outros sistemas que utilizam refrigeração por absorção.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Construir uma bancada de sistema de refrigeração por absorção para servir de apoio aos alunos do Campus de Tucuruí, além de auxiliar no aprendizado de outros alunos e profissionais que atuam diretamente na área de refrigeração.

1.1.2 Objetivos específicos

- Apresentar os principais componentes do sistema do funcionamento do ciclo de refrigeração por absorção;
- Mostrar as etapas do funcionamento do sistema de refrigeração por absorção;
- Apresentar vantagens e desvantagens do sistema de absorção,
- Calcular o coeficiente de performance e a eficiência do sistema.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 BREVE HISTÓRICO

Desde a pré-história, o homem sentia a necessidade de obter formas de resfriamento que fizessem com que alimentos ou outras substâncias alcancem temperaturas inferiores às do ambiente e assim conservasse por mais tempo os alimentos adquiridos.

De acordo com Gerniêr (2013), a utilização dos meios de refrigeração é do conhecimento humano desde as mais antigas civilizações, pode-se citar a civilização chinesa, que muitos séculos antes de Cristo usavam o gelo natural, como fonte refrigerante com o intuito de conservar o chá que consumiam. As civilizações gregas e romanas também aproveitavam o gelo colhido no alto das montanhas, a custo do trabalho escravo, para o preparo de bebidas e alimentos gelados.

Os primeiros estudos teóricos sobre refrigeração por absorção foram realizados por NAIRN, em 1777, tendo o primeiro refrigerador residencial sendo construído em 1823, por Ferdinand Carré. Como afirma Cantarutti (2011), em 1859, Ferdinand Carré desenvolveu nos Estados Unidos, um sistema de refrigeração por absorção com água e amônia como fluido de trabalho, registrando a patente no ano seguinte. Máquinas baseadas nesta patente foram usadas para produzir gelo e armazenamento de alimentos.

No entanto, segundo Dantas (2009), em 1855 surgiu na Alemanha outro tipo de mecanismo para a fabricação de gelo artificial, este, baseado no princípio da absorção, descoberto em 1824 pelo físico e químico inglês Michael Faraday. Cerca de meio século os aperfeiçoamentos nos processos de fabricação de gelo artificial foram se acumulando, surgindo sistematicamente melhorias nos sistemas, com maiores rendimentos e melhores condições de trabalho.

Segundo Carmello (2011), a produção propriamente dita fez poucos progressos neste período, em consequência da prevenção do público consumidor contra o gelo artificial, pois apesar de todos estarem cientes das vantagens apresentadas pela refrigeração, era crença geral que o gelo produzido pelo homem era prejudicial à saúde humana.

Em 1834, Jacob Perkins fez a primeira descrição completa através de um registro de patente de uma máquina de refrigeração por compressão operando de maneira cíclica. Mas apenas em 1919, nos EUA, que o refrigerador realmente passou do estágio pioneiro para a etapa produtiva (DANTAS, 2009).

Segundo a Revista Super Interessante (2014), em 1922 dois estudantes de engenharia suecos, Baltzar Von Platem e Carl Gustav Munters, patentaram uma máquina de refrigeração de funcionamento contínuo, baixo custo. Tal equipamento produzido inicialmente por seus criadores teve sua patente adquirida pela Electrolux, que a usou para projetar-se definitivamente no mercado de eletrodomésticos.

O sistema é o mais popular de todos os sistemas de refrigeração por absorção, por causa de seu uso em refrigeradores domésticos. Seu funcionamento é baseado na lei das pressões parciais ou Lei de Dalton, segundo a qual em um recipiente contendo mais de um gás a pressão total é a soma da pressão parcial de cada gás (ABREU, 1999).

O primeiro refrigerador doméstico foi introduzido no mercado como afirma Junior (2010), por volta de 1925 pela empresa Electrolux/Dometic, que fabrica e vende esse tipo de refrigerador até os dias de hoje, principalmente para a Europa, América do Norte e Ásia.

De acordo com Cantarutti (2011), na década de 1950, um sistema utilizando o brometo de lítio e água como fluido de trabalho foi criado para aplicações industriais. Poucos anos depois, um sistema de absorção de duplo efeito foi criado e começou a ser utilizado como um padrão industrial para sistemas de refrigeração com alto desempenho.

Segundo Queiroz (2013), Woolrich, em 1965, foi um dos primeiros a descrever, de maneira clara, o sistema de refrigeração por absorção e a publicar tabelas completas com propriedades termodinâmicas sobre vapor de amônia em solução com água. O sistema de refrigeração por absorção, embora presente desde os primórdios da refrigeração, não teve uso expressivo até os anos 70, o que é claramente evidenciado pela pequena quantidade de instalações e publicações relacionadas.

2.2 REFRIGERAÇÃO POR ABSORÇÃO

Segundo Queiroz (2013) o sistema de refrigeração por absorção utiliza o calor como fonte de energia, ao contrário do ciclo por compressão, que utiliza a energia elétrica. Esse ciclo não tem compressor. Transfere calor da região de baixa temperatura para a região de alta temperatura através de processos de absorção e dessorção¹ do fluido refrigerante na fase vapor de uma solução líquida (que é normalmente uma mistura binária composta pelo refrigerante e uma outra substância). Água quente a 85°C já é suficiente para alimentar o ciclo por absorção, e dele se obter temperaturas de 5°C. Uma resistência elétrica também pode ser utilizada nesse

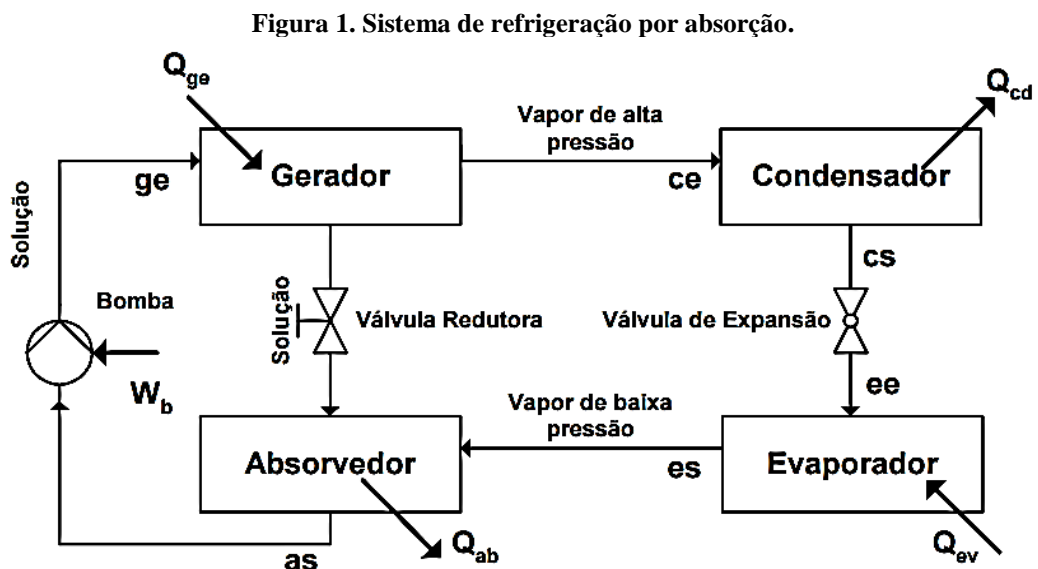
¹ Termo da química que consiste no processo pelo qual uma substância é liberada em determinada superfície.

ciclo (muitos refrigeradores de pequeno porte usam o sistema de absorção com resistência elétrica).

De acordo com o Portal da Refrigeração (2016), no ciclo por absorção há necessidade de dois fluidos: o fluido refrigerante, que efetivamente remove calor do meio desejado por evaporação e o fluido absorvente, que deve absorver vapor do refrigerante em baixas temperaturas e ser menos volátil do que este, de forma a liberar vapor de refrigerante por aquecimento. Esses fluidos misturam-se mas não se combinam de modo a poderem ser separados com a elevação da temperatura.

2.2.1 Composição do Sistema de Refrigeração por Absorção

A Figura 1 apresenta a composição de um sistema de refrigeração por absorção simplificado.



Fonte: Junior et. al (2004).

Os componentes básicos explicitado por Júnior et.al (2004) são:

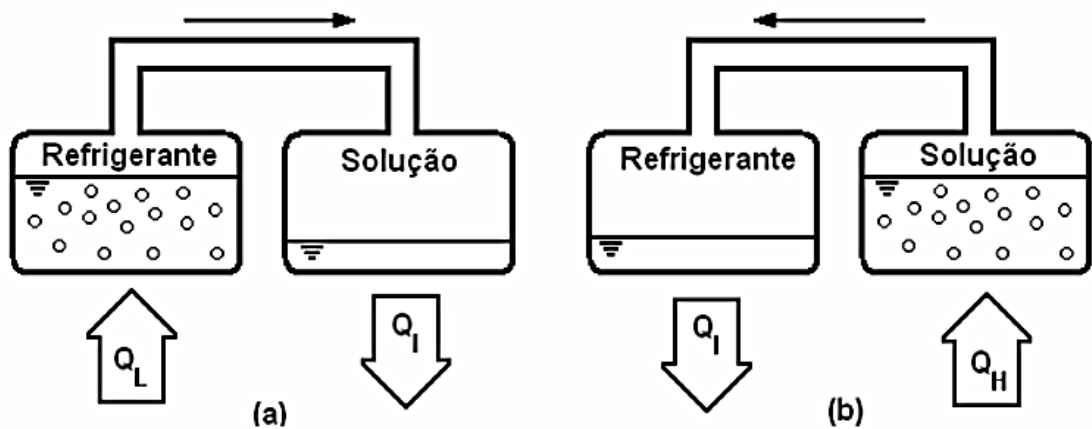
- **Gerador:** onde há separação (dessorção) do refrigerante da substância absorvente;
- **Condensador:** onde o refrigerante é condensado e há transferência de calor para o meio;
- **Válvula de expansão:** destinada a reduzir a pressão do fluxo de refrigerante do nível do condensador para o nível do evaporador;
- **Evaporador:** onde o refrigerante passa da fase líquida para a fase vapor, devido ao calor transferido da região a ser refrigerada;

- **Absorvedor:** onde o refrigerante é absorvido pela substância absorvente, com transferência de calor para o meio;
- **Bomba de solução:** responsável pela transferência da mistura pobre em absorvente do absorvedor para o gerador. Neste ciclo simplificado admite-se que apenas o refrigerante é vaporizado no gerador, e desta forma somente o refrigerante percorre o condensador, válvula de expansão e evaporador.

2.2.2 Princípios de Funcionamento

De acordo com Júnior et al. (2004), durante o processo de absorção há transferência de calor para a região de temperatura intermediária (meio ambiente para um ciclo de refrigeração) e durante o processo de dessorção há fornecimento de calor para o ciclo a partir de uma fonte de calor a alta temperatura, conforme mostrado na Figura 2, além de uma nova transferência de calor para a região de temperatura intermediária.

Figura 2. Processo de (a) absorção produzindo o efeito de refrigeração (b) dessorção de refrigerante necessitando de uma fonte de calor.



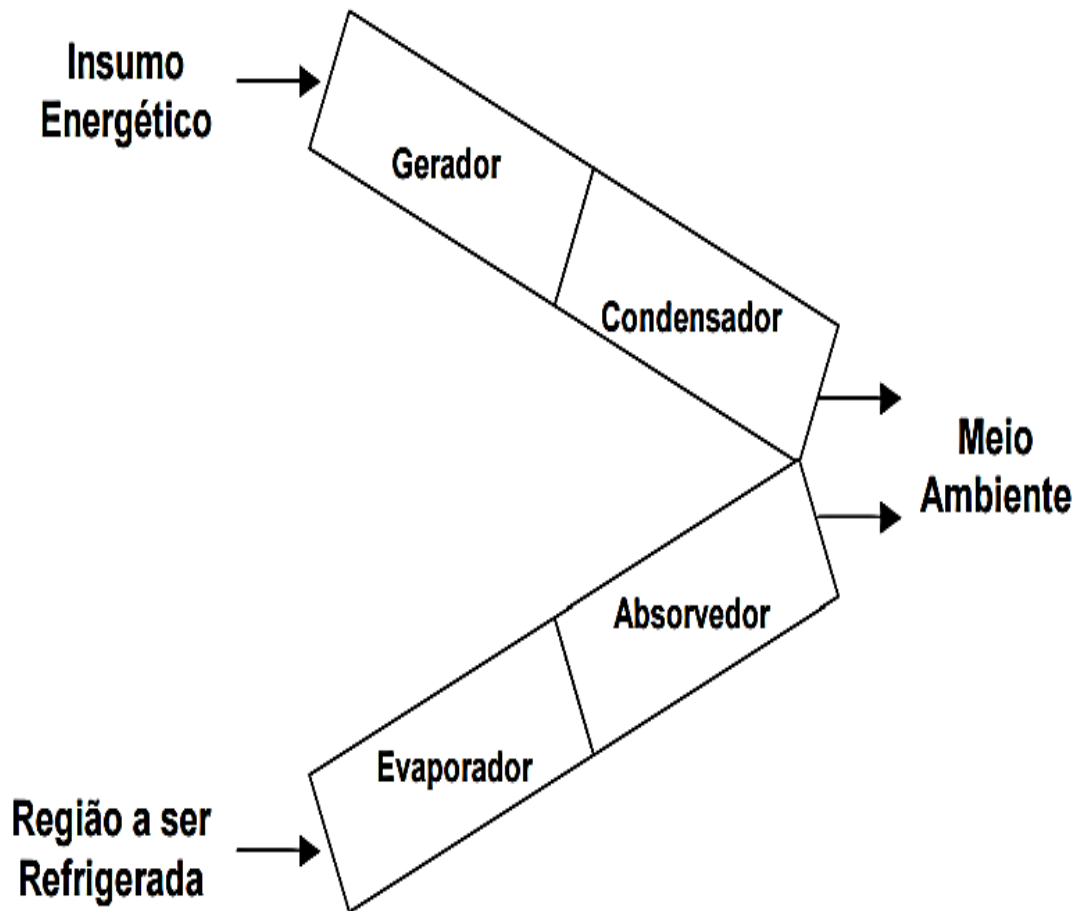
Fonte: Júnior (2004).

Conforme afirma Júnior (2004) o ciclo de absorção é composto por, basicamente, quatro processos, sendo dois deles caracterizados por trocas de calor e os dois outros caracterizados por trocas simultâneas de calor e massa. Estes processos são os seguintes:

- Vaporização do refrigerante no evaporador;
- Absorção do refrigerante pela solução no absorvedor;
- Separação (dessorção) do refrigerante no gerador;
- Condensação do refrigerante no condensador.

A Figura 3 apresenta o princípio geral de um sistema de refrigeração por absorção. Nela pode-se constatar que os processos de conversão de energia existentes neste sistema ocasionam uma degradação de parte do calor fornecido ao ciclo no gerador, do nível de temperatura dessa fonte de calor até a temperatura do meio ambiente, para “valorizar” o calor transferido no evaporador da temperatura da região que se quer refrigerar até a temperatura do meio ambiente.

Figura 3. Princípio geral de um sistema de refrigeração por absorção.



Fonte: Júnior et al (2004).

Este tipo de sistema de refrigeração segundo Júnior et al (2004) também pode ser considerado como um duplo conversor de exergia²:

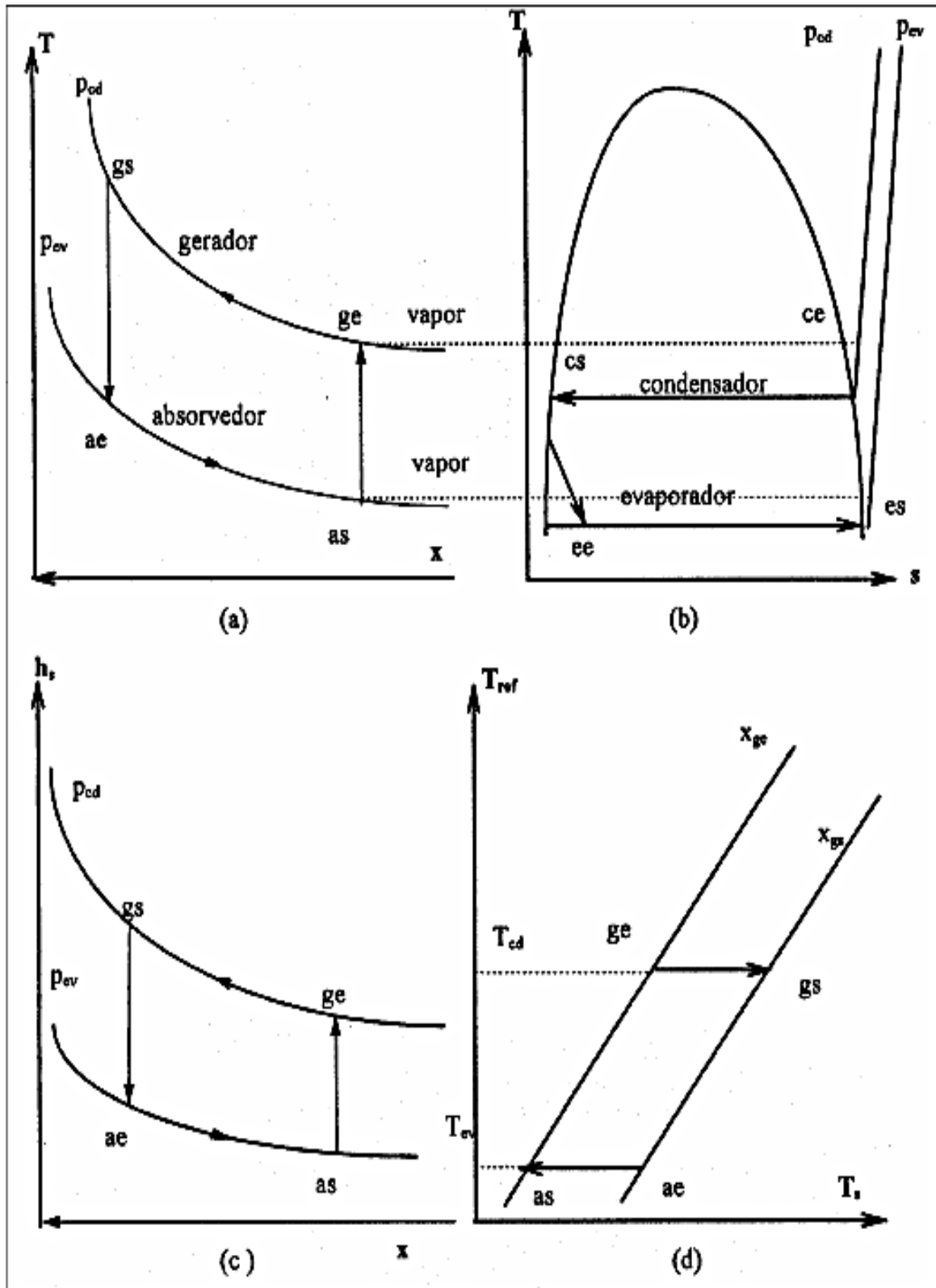
- O conjunto gerador-condensador é um conversor de exergia térmica em exergia química (a degradação de parte do calor fornecido ao ciclo no gerador, do nível de temperatura dessa fonte de calor até a temperatura do meio ambiente, provoca a separação do refrigerante da solução);

² Exergia é o trabalho máximo que pode ser obtido através do processo mais adequado de um sistema que se encontra em um estado inicial até que atinja o estado final, caracterizado pelo equilíbrio termodinâmico com o ambiente.

- O conjunto evaporador-absorvedor é um conversor de exergia química em exergia térmica (a absorção do refrigerante pela solução acarreta a “valorização” do calor transferido no evaporador da temperatura da região que se quer refrigerar até a temperatura do meio ambiente).

Na Figura 4 também é possível observar claramente a representação dos processos que ocorrem no misturador absorvedor e no separador de um ciclo de absorção.

Figura 4 : Representação do Ciclo de Absorção



Fonte: Junior et. al (2004).

2.2.3 Características do Par Refrigerante-Absorvente

As duas substâncias que compõem o par refrigerante-absorvente devem atender um número de requisitos para serem adequadas para emprego em sistemas por absorção (ASHRAE,1981 apud JÚNIOR, 2004). Os principais requisitos, são:

- **Afinidade:** o absorvente deve ter grande afinidade química pelo refrigerante nas condições em que o processo de absorção ocorre. Esta afinidade acarreta um desvio negativo do comportamento previsto pela Lei de Raoult e resulta em um coeficiente de atividade menor que um para o refrigerante. Isto reduz a quantidade de absorvente que circula e, conseqüentemente, o desperdício de energia devido aos efeitos de variação de temperatura. Além disto o tamanho do trocador de calor que transfere calor do absorvente para a solução refrigerante-absorvente (existente em sistemas reais) pode ser reduzido. Por outro lado, uma elevada afinidade está associada com uma elevada entalpia de diluição, tendo como consequência um consumo adicional de energia (na forma de calor) no gerador para separar o refrigerante do absorvente.
- **Relação de Volatilidades:** o refrigerante deve ser muito mais volátil que o absorvente, de forma a permitir a separação das duas substâncias facilmente.
- **Entalpia de Vaporização/Condensação:** as entalpias de vaporização e condensação do refrigerante devem ser elevadas para que as vazões de refrigerante e absorvente possam ser reduzidas ao mínimo possível.
- **Pressão:** é desejável que as pressões de operação sejam moderadas. Pressões elevadas requerem o emprego de equipamentos com paredes espessas e pressões muito baixas (vácuo) demandam equipamentos volumosos e dispositivos especiais para reduzir a perda de carga nos escoamentos de refrigerante na fase vapor.
- **Viscosidade:** os fluidos devem ter baixa viscosidade para promover os processos de transferência de calor e massa, bem como reduzir problemas com bombeamento dos fluidos.
- **Ausência de Fase Sólida:** o par refrigerante-absorvente não deve formar uma fase sólida na faixa de composições e temperaturas existente nas condições de operação do sistema de absorção, pois isto poderia ocasionar uma parada do equipamento.
- **Estabilidade:** A estabilidade química deve ser praticamente absoluta, pois os fluidos são submetidos a condições severas durante os vários anos de operação do sistema. Eventuais instabilidades podem resultar na formação de substâncias danosas como gases, sólidos ou uma substância corrosiva.

- **Corrosão:** é particularmente importante que os fluidos de trabalho ou qualquer substância resultante de instabilidade química não ataquem os materiais empregados no sistema de absorção. Inibidores de corrosão são geralmente empregados.
- **Segurança:** os fluidos de trabalho não devem ser tóxicos e nem substancialmente inflamáveis caso o sistema seja operado em ambientes ocupados por pessoas. Para aplicações industriais este requisito é menos crítico.

Os pares de fluidos de trabalho água-amônia e água-brometo de lítio são, atualmente, os únicos pares que têm largo emprego comercial e que satisfazem vários dos critérios listados anteriormente. Entretanto, estes pares também apresentam alguns inconvenientes. Assim, a relação de volatilidades para o par água-amônia é menor que o desejado, apresenta pressões de trabalho levemente elevadas, e tem restrições para emprego em residências, devido à toxicidade da amônia (JÚNIOR, 2010).

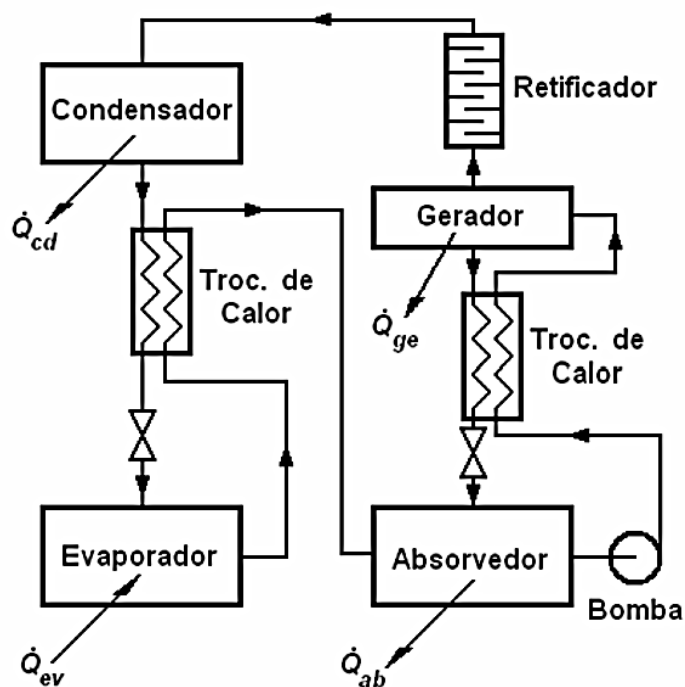
Por outro lado, de acordo com Júnior et. al (2004), o par água-brometo de lítio pode apresentar formação de fase sólida, uma vez que a água congela a 0°C, o que inviabiliza seu emprego para fins de refrigeração, caracterizando-o como adequado para sistemas destinados ao condicionamento ambiental. Além deste aspecto o brometo de lítio pode cristalizar a valores moderados de concentração (por exemplo, há cristalização na concentração de 67% de brometo de lítio na solução para uma temperatura de saturação da água pura de 20°C e temperatura da solução de 75°C).

Outras desvantagens do par água-brometo de lítio estão associadas com os baixos valores de pressão de trabalho e altos valores de viscosidade da solução de brometo de lítio. Os principais aspectos positivos deste par são alta relação de volatilidades e afinidade química, alta estabilidade, elevado valor da entalpia de vaporização/condensação, e alto padrão de segurança (JÚNIOR ET AL. (2004)).

2.2.4 Sistemas que Empregam o Par Amônia-Água

Segundo Júnior et al. (2004), o sistema de absorção que opera com o par NH₃-H₂O é um dos mais antigos sistemas de refrigeração por absorção. Neste a amônia é o refrigerante e a água o absorvente. Como a água e a amônia são voláteis o gerador de um sistema convencional é substituído pela combinação de um gerador e uma coluna de retificação. Estes componentes são necessários para separar o vapor de água do vapor de amônia. Um esquema de um sistema água-amônia está mostrado na Figura 5.

Figura 5. Sistema de Absorção Água-Amônia.



Fonte: Junior et al (2004).

Os níveis de pressão existentes no sistema são consideravelmente maiores que aqueles reinantes nos sistemas que operam com o par H₂O-LiBr, devido ao emprego da amônia como refrigerante. As pressões de condensação situam-se em torno de 20 bar e as de evaporação em torno de 5 bar. Para sistemas resfriados a ar, os processos de condensação e absorção ocorrem no interior de tubos, para que a parte externa dos tubos possa ser aletada para melhorar a transferência de calor para o ar. Para sistemas deste tipo obtém-se coeficientes de eficácia de cerca de 0,5 (ASHRAE,1981 apud JÚNIOR, 2004).

A Tabela 1 apresenta algumas características de sistemas a absorção com o par NH₃-H₂O destinados ao resfriamento de ar.

Tabela 1. Características Típicas de Sistemas de Absorção NH₃-H₂O Resfriados a Ar.

CARACTERÍSTICAS	VALORES TÍPICOS
Capacidade de Resfriamento (kW)	10,6-17,6
Comprimento (m)	1,0-1,2
Largura (m)	0,7-0,9
Altura (m)	1,0-1,2
Peso em Operação (kgf)	250-350

Fonte: (ASHRAE,1981 apud JÚNIOR, 2004)

2.2.5 Vantagens e Desvantagens de Sistemas de Refrigeração por Absorção

De acordo com DORGAN *et al.*, (1995) desde a primeira máquina, a popularidade dos sistemas de absorção tem variado devido a condições econômicas e de desenvolvimento tecnológico.

Dentre as vantagens de sistemas de absorção, incluem-se as que necessitam de menor consumo de energia elétrica quando comparados com os sistemas de compressão de vapor; suas plantas de absorção são silenciosas e livres de vibração; o calor recuperado pode ser utilizado como insumo energético (cogeração e em substituição ao trabalho mecânico) em ciclos de refrigeração por absorção ; plantas de absorção não causam danos à camada de ozônio diferente dos CFC's e podem ter menor impacto no aquecimento global do que outras opções.

Além disso, as máquinas de absorção têm a vantagem de utilizar a energia térmica em lugar da energia elétrica que é mais cara. Plantas de absorção são economicamente atrativas quanto aos custos dos combustíveis (querosene, gás GLP, óleo, biogás) que são substancialmente menores³ que os de energia elétrica, com o custo do combustível de 12 a 20 % do custo da energia elétrica.

As máquinas de absorção permitem a recuperação do calor perdido no caso de turbinas e outros tipos de instalação que utilizam o vapor d'água, podem ser utilizadas em combinadas com máquinas de compressão a vapor. As instalações de absorção se caracterizam, pela sua simplicidade, por não apresentarem partes internas móveis, o que lhes garante um funcionamento silencioso e sem vibração, além de se adaptarem bem às variações de carga, além que o sistema água-amônia é capaz de atingir temperaturas de evaporação abaixo de 0 °C com capacidade de operar a pressões acima da atmosférica.

No sistema de absorção o sistema água-amônia tem a desvantagem da toxicidade da amônia; pode tornar-se explosiva em concentrações de 15% a 30% em volume; requerer componentes extras; o maior inconveniente das máquinas de absorção é o seu consumo de energia (calor e bombas), muito mais elevado que o das máquinas de compressão mecânica.

2.2.6 Relação entre o Ciclo de Absorção e o de Compressão de Vapor

³ A questão econômica nesse trecho só é perceptível em larga escala, no caso em escalas industriais e não necessariamente em uso doméstico.

Segundo Menna (2008), os sistemas de refrigeração por absorção têm o princípio físico do efeito de refrigeração semelhante ao dos sistemas por compressão: a evaporação de uma massa fluida líquida, à temperatura controlada, em contato indireto com o meio a resfriar. Neste processo, o controle da temperatura é efetuado pelo controle da pressão de evaporação. Para o autor, principal diferença entre os dois sistemas, o de compressão e o de absorção, está na maneira como a elevação da pressão do vapor da zona de baixa para a zona de alta é efetuada. Nos sistemas por absorção, o vapor vindo do evaporador é recebido por um elemento chamado absorvedor. No absorvedor, o vapor de refrigerante entra em contato e é absorvido por um absorvente (uma solução líquida).

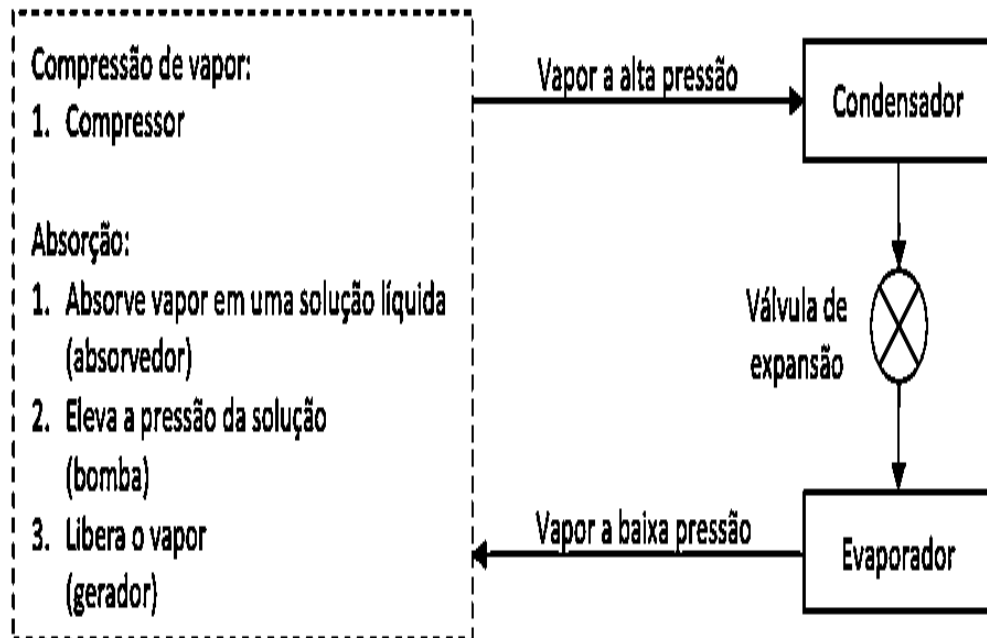
A solução líquida é então bombeada até a pressão de alta (pressão de condensação do vapor), e descarregada no gerador. No gerador, ela recebe calor de uma fonte externa, a uma temperatura controlada (gás, eletricidade, vapor, fluidos a alta temperatura, aquecimento solar) para dissociar o vapor de amônia da solução. O vapor é, então, enviado ao condensador, onde retorna troca calor com o meio externo, retornando à fase líquida. Posteriormente, é expandido novamente até a pressão de evaporação e retorna ao evaporador, seguindo os mesmos passos de um ciclo por compressão. A solução resultante no gerador, por sua vez, chamada de solução pobre, tem sua pressão corrigida e retorna ao absorvedor, formando outro ciclo. (MENNA, 2008)

Desta forma, em sistemas de refrigeração por absorção, o compressor de vapores é substituído por uma solução que ‘capta’ o vapor proveniente do evaporador, uma bomba, que aumenta a pressão dessa solução líquida, e um trocador de calor onde, com o auxílio de uma fonte de calor externa, o vapor é novamente dissociado da solução líquida. (GARIMELLA, 2007 apud MENNA, 2008)

A vantagem do sistema de absorção está em a potência necessária para operar a bomba ser de dez a trinta vezes menor que a para operar o compressor, operando no mesmo ciclo. Além disso, naturalmente, deve-se levar em consideração que os sistemas de absorção necessitam de uma fonte de calor para sua operação, porém a energia na forma de calor via de regra é mais barata que na forma de trabalho, um exemplo claro disso é a energia elétrica. Por conseguinte, ainda no ciclo de absorção, a solução com alta concentração de refrigerante, que deixa o absorvedor e é bombeada até o gerador é chamada de solução rica ou solução forte, enquanto que a solução com baixa concentração, que vai do gerador de volta ao absorvedor, é chamada de solução pobre, ou solução fraca (STOECKER, 2002 apud MENNA, 2008).

Em suma, de acordo com Menna (2008), a diferença entre os dois sistemas está na maneira como o vapor é levado da pressão de evaporação para a pressão de condensação. Na Figura 6 é apresentada uma comparação entre os dois métodos.

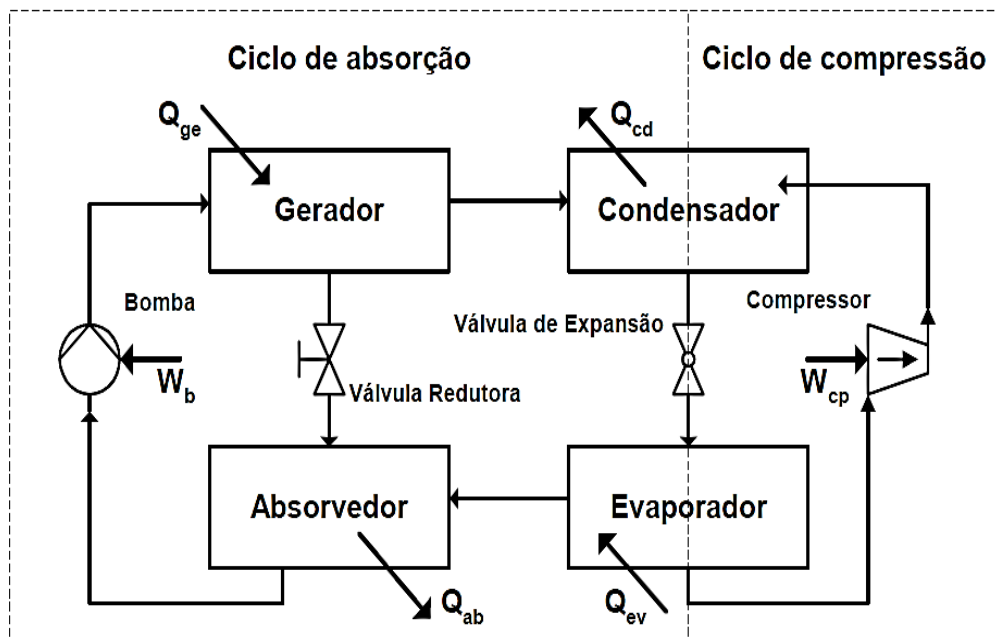
Figura 6. Comparação entre sistemas de refrigeração



Fonte: (Stoecker, 2002 apud Menna, 2008)

De acordo com Junior et. al (2013), ciclo de absorção possui o evaporador, o condensador e o dispositivo de expansão exatamente como o ciclo de compressão de vapor. A compressão, entretanto, é substituída por outra forma de elevação de pressão do vapor. Na Figura 7 a seguir é possível observar que o Ciclo de absorção equivale ao Ciclo operado a calor. O Ciclo de compressão equivale ao Ciclo operado a trabalho.

Figura 7. Comparação entre os ciclos por compressão e por absorção



Fonte: Junior et. al (2013).

Uma comparação entre um sistema de refrigeração por compressão e um por absorção para a mesma capacidade apresenta prós e contras de ambos os lados, que devem ser considerados na hora da opção por um ou outro sistema.

2.2.7 Análise de Desempenho de Sistemas de Absorção

Geralmente a análise de um sistema de refrigeração por absorção pode ser feita através de balanços de massa e de energia aplicados em cada um dos seus componentes do ciclo. Frequentemente, é feito uso de diagramas de propriedades termodinâmicas de substâncias, de forma a visualizar graficamente o processo, de forma análoga aos ciclos de compressão.

2.2.7.1 Coeficiente de Performance do Ciclo de Compressão

Segundo Menna (2008), o ciclo de compressão, é operado geralmente com energia elétrica acionando diretamente o compressor. O quociente entre a quantidade de calor retirada do ambiente e a energia consumida pelo compressor é denominado COP (do termo inglês coefficient of performance), e é, em resumo, a eficiência do sistema. O COP é sensivelmente influenciado por fatores inerentes ao ciclo, como temperatura de evaporação e temperatura de condensação, e por características do sistema, como a lubrificação do compressor. O menor custo operacional advém do fato de o COP ser calculado de maneira diferente para os dois

sistemas, o de compressão e o de absorção. A seguir apresenta-se a Equação (1) para fins de cálculo do COP do ciclo de compressão:

$$COP_{Comp} = \frac{Q_{EV}}{\tau_{CP}} \quad (1)$$

Em que:

COP = coeficiente de desempenho do sistema

Q_{EV} = potência de refrigeração do evaporador [W]

τ_{CP} = potência de compressão [W]

2.2.7.2 Coeficiente de Performance do Ciclo de Absorção

Como principal vantagem, o sistema por absorção apresenta um custo operacional sensivelmente menor e um controle muito preciso da “produção de frio”. De acordo com Geniêr, (2013) o COP de um sistema por absorção de simples efeito possui um valor próximo a 1, enquanto com sistemas por compressão pode-se chegar a valores entre 3 e 6, dependendo do regime de operação e das condições de manutenção do sistema. É possível extrair informações sobre o desempenho global do sistema de refrigeração, sob uma ótica da primeira lei da termodinâmica. As duas relações capazes de oferecer esta informação são o coeficiente de performance do ciclo (COP) e a eficiência de primeira lei do ciclo (MENNA, 2008).

Nos sistemas por absorção o COP é o quociente entre o calor retirado no evaporador e o calor inserido no gerador, como mostra a Equação (2).

$$COP_{Abs} = \frac{Q_e}{Q_g} \quad (2)$$

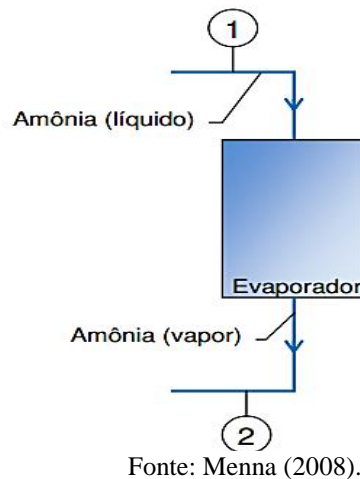
Em que:

COP = coeficiente de desempenho do sistema

Q_e = capacidade de refrigeração [W]

Q_g = Taxa de adição de calor no gerador [W]

Segundo Menna (2008), o COP do ciclo de absorção é menor que o COP do ciclo por compressão, isto se deve ao fato da energia na forma de trabalho ser muito mais valiosa. Desse modo, para se obter o COP do sistema real de absorção deve-se esquematizar o funcionamento do ciclo por absorção e dessa forma realizar os cálculos para se obter todos os dados para obtenção de Q_e e Q_g . Para tanto, o fluxograma de um sistema de refrigeração por



- Balanço de Massa do Evaporador

O balanço de massa do evaporador apresentado na Figura 9, pode ser realizado utilizando a Equação (3).

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 \quad (3)$$

Em que:

\dot{m}_1 = fluxo mássico de amônia no ponto 1 [Kg/s]

\dot{m}_2 = fluxo mássico de amônia no ponto 2 [Kg/s]

- Balanço de energia

O balanço de energia aplicado no evaporador observado na Figura 9 resulta na Equação (4).

$$\dot{m}_1 h_1 + Q_{EVAP} = \dot{m}_2 h_2 \quad (4)$$

Onde:

h_1 = Entalpia da amônia no ponto 1 [KJ/kg]

h_2 = Entalpia da amônia no ponto 2 [KJ/kg]

Q_{EVAP} = Carga térmica do evaporador [Kw]

Observando a Figura 9, é possível identificar as entalpias da amônia nos pontos 1 e 2, logo é possível determinar o fluxo de massa de amônia através do evaporador, através do balanço de energia apresentado na equação acima.

No entanto é possível afirmar que os fluxos \dot{m}_1 e \dot{m}_2 são iguais e a sua determinação pode ser realizada através da Equação (5).

$$\dot{m}_{EVAP} = \frac{Q_{EVAP}}{\Delta h_{EV}} \quad (5)$$

Logo:

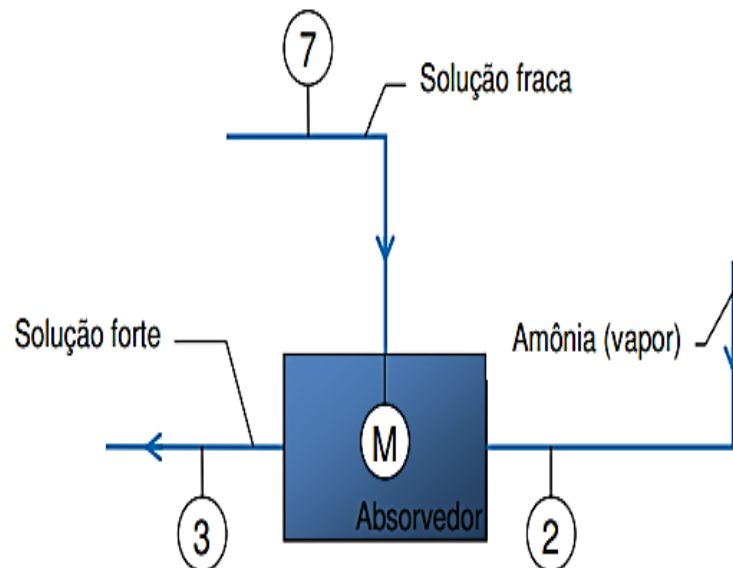
\dot{m}_{EVAP} = Fluxo mássico de amônia no evaporador [kg/s]

Δh_{EV} = Diferença de entalpia entre os pontos 1 e 2 da figura 9 do evaporador [kJ/kg]

- **Absorvedor**

De acordo com Carvalho et al (2006), no absorvedor ocorrem basicamente dois processos a transferência de calor e a transferência de massa. Para a modelagem matemática desses dois fenômenos, simplificaremos o processo utilizando-se o princípio da superposição de efeitos, para tal dividiremos o processo em dois distintos, a saber: a absorção (mistura adiabática de dois fluxos) de vapor pela solução e a troca de calor.

Figura 10. Absorvedor de um sistema de absorção



Fonte: Menna (2008).

- **Balço de massa no absorvedor**

Observando o ponto M onde todo processo de absorção já foi realizado, tem-se o balanço de massa que pode ser observado na Equação (6).

$$\dot{m}_2 + \dot{m}_7 = \dot{m}_3 \quad (6)$$

Onde:

\dot{m}_2 = Fluxo mássico de amônia no ponto 2 [kg/s]

\dot{m}_7 = Fluxo mássico de amônia no ponto 7 [kg/s]

\dot{m}_3 = Fluxo mássico de amônia no ponto 3 [kg/s]

- Balanço de energia no absorvedor

Através do balanço de energia pode se determinar a entalpia no ponto M que está em função do ponto 3 somado a da carga térmica do absorvedor, conforme mostra a Equação (7).

$$\dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_7 h_7 = \dot{m}_3 h_3 + Q_a \quad (7)$$

Onde:

h_2 = Entalpia da amônia no ponto 2 [kJ/kg]

h_7 = Entalpia da solução no ponto 7 [kJ/kg]

h_3 = Entalpia da solução no ponto 3 [kJ/kg]

Q_a = Carga térmica do absorvedor [Kw]

Também é possível determinar a quantidade de calor que deve ser removida da mistura para manter sua temperatura na saída do absorvedor, por meio da Equação (8).

$$Q_{ABS} = \dot{m}_3 \Delta h_{M-3} \quad (8)$$

Logo:

Q_{ABS} = Carga térmica a ser retirada do absorvedor [kW]

Δh_{M-3} = Diferença de entalpia da solução entre os pontos M e 3 [KJ/kg]

A vazão nos pontos 3 e 7 do sistema (Figura 10) podem ser determinadas em função das concentrações nesses pontos e do fluxo de amônia pura através do sistema através de um sistema das Equação (9) e (10).

- Balanço de fluxo de massa total

$$\dot{m}_2 + \dot{m}_7 = \dot{m}_3 \quad (9)$$

- Balanço de fluxo de massa de amônia no absorvedor

$$\dot{m}_2 + \dot{m}_7 C_7 = \dot{m}_3 C_3 \quad (10)$$

Logo:

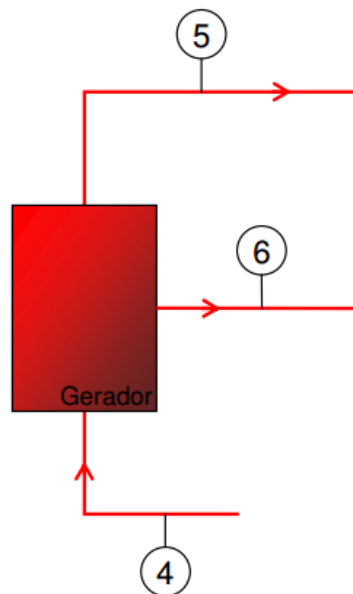
C = concentração de amônia na solução [kg(amônia)/kg(solução)].

- **Gerador**

O gerador é o componente do sistema onde é feita a separação, à alta pressão, do vapor de amônia da solução absorvente. Essa dissociação é feita através da adição de calor à solução.

Segundo Menna (2008), no gerador ocorre a absorção de calor que pode ser por fonte direta ou indireta (no caso de aproveitamento de calor residual). Este calor é transferido à solução de H₂O/NH₃, fazendo com que parte da amônia desta solução se torne em estado de vapor que flui ao condensador. A outra parte da solução (água condensada), chamada de solução pobre retorna para o absorvedor. Na Figura (11) é apresentado o evaporador do sistema de absorção.

Figura 11. Detalhe no gerador do sistema.



Fonte: Menna (2008).

- Balanço de massa no gerador

O balanço de massa aplicado no gerador pode ser visto na Equação (11).

$$\dot{m}_4 = \dot{m}_5 + \dot{m}_6 \quad (11)$$

Logo:

\dot{m}_4 = Fluxo mássico de solução no ponto 4 [kg/s]

\dot{m}_5 = Fluxo mássico de solução no ponto 5 [kg/s]

\dot{m}_6 = Fluxo mássico de solução no ponto 6 [kg/s]

Um balanço de massa do fluxo de amônia aplicado ao gerador é apresentado na Equação (11). Com esse balanço, em um sistema montado com a Equação (12) é possível determinar as vazões nos pontos 6 e 4 da Figura 11.

$$\dot{m}_4 X_4 = \dot{m}_5 + \dot{m}_6 X_6 \quad (12)$$

- Balanço de energia no gerador

O balanço de energia do gerador fornece a quantidade de energia que deve ser fornecida à solução para que sua concentração seja reduzida. Esse balanço é apresentado na Equação (13).

$$\dot{m}_4 h_4 + Q_{GER} = \dot{m}_5 h_5 + \dot{m}_6 h_6 \quad (13)$$

h_4 = entalpia no ponto 4 [KJ/hg]

h_5 = entalpia no ponto 5 [KJ/hg]

h_6 = entalpia no ponto 6 [KJ/hg]

Q_{GER} = Quantidade de calor inserida no gerador [Kw]

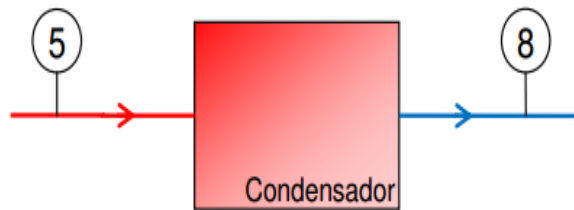
De acordo com Menna (2008), a partir da solução das Equação (12) e (13) é possível obter a quantidade de calor que deve ser inserida no gerador. O calor a ser inserido no gerador pode vir de diversas fontes, sendo inserido através da aplicação de resistências elétricas diretamente em contato com a solução, utilizando trocadores de calor e fluidos quentes em contato indireto com a solução, ou através da queima de combustíveis em geradores a fogo direto.

- **Condensador**

Para Menna (2008), no condensador o vapor de amônia proveniente do gerador a alta pressão, perde calor no trocador, sendo então condensado. Este vapor de amônia que adentra o condensador sai na forma de líquido.

Na saída do gerador, tem-se vapor saturado de amônia, à alta pressão. Esse vapor é, então, encaminhado ao condensador, onde será condensado e enviado ao evaporador. Na Figura 12 é apresentado o condensador do sistema de absorção.

Figura 12. Detalhe no condensador do sistema



Fonte: Menna (2008).

- Balanço de massa no condensador

Um balanço de massa aplicado ao condensador da Figura 12 é apresentado na Equação (14).

$$\dot{m}_5 = \dot{m}_8 \quad (14)$$

Em que:

\dot{m}_8 = Fluxo mássico de amônia no ponto 8 [kg/s]

- Balanço de energia no condensador

O balanço de energia do condensador fornece a quantidade de energia que deve ser dissipada para o meio, e é um parâmetro básico de projeto ou seleção deste componente. A equalização dos fluxos de energia entrando e saindo do condensador é apresentada na Equação (15).

$$\dot{m}_5 h_5 = \dot{m}_8 h_8 + Q_{COND} \quad (15)$$

Em que:

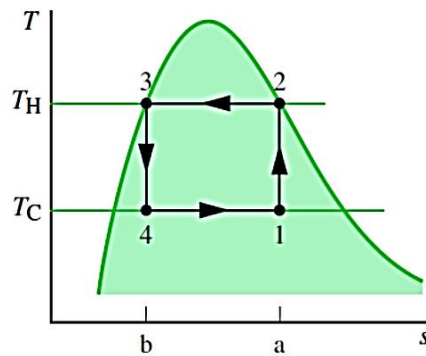
h_8 = entalpia no ponto 8 [kJ/kg]

Q_{COND} = quantidade de calor dissipada no condensador [kW]

2.2.7.3 Coeficiente de Performance Ideal (Ciclo Carnot)

Seria útil possuir um ciclo de refrigeração por absorção ideal, a partir do qual medir-se-ia o grau de afastamento apresentado pelo ciclo real. Este afastamento é medido a partir da relação conhecida como eficiência de primeira lei do ciclo e se apresenta graficamente na Figura 13.

Figura 13: Ciclo de Carnot



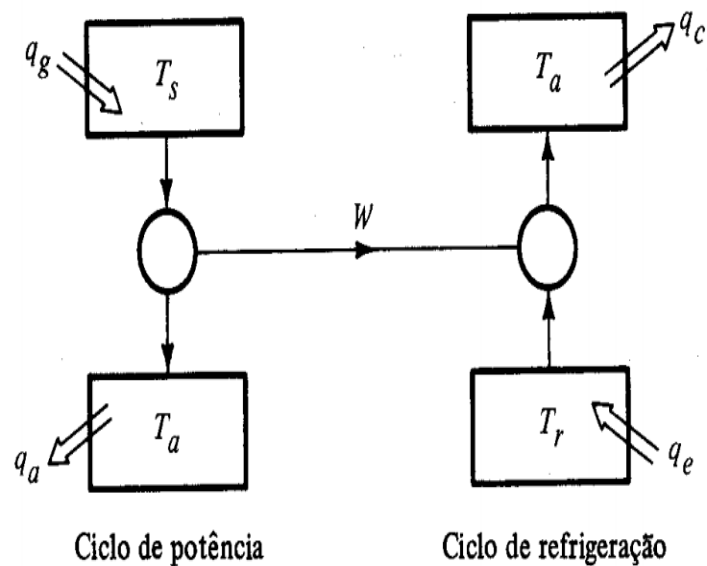
Fonte: Franklin, s/d.

De acordo com Franklin (s/d) as principais características do Ciclo de Carnot destacam-se por: possuir maior eficiência possível; Impossível de ser realizado na prática; Base de comparação com outros ciclos; Composto de 4 processos internamente reversíveis; Compressão adiabática; Rejeição de calor à T e P constantes; Expansão adiabática e Adição de calor a T e P constantes.

Este sistema de refrigeração imaginário almejado, sobre o qual calcula-se o distanciamento imposto pela realidade, foi desenvolvido por e seu coeficiente de performance é definido na Equação (18), (BOSNJAKOVIC, s/d Apud BRANDÃO, 2015).

O Ciclo Ideal de absorção pode ser considerado composto por duas máquinas: uma máquina de potência e uma máquina de refrigeração como mostra a Figura 14.

Figura 14. Ciclo ideal de absorção



Fonte: Geniêr (2013).

Dessa forma, o COP ideal do sistema de absorção será de acordo com a Equação (16).

$$COP_{Carnot} = \frac{COP_{Comp}}{COP_{Pot}} \quad (16)$$

Em que:

COP_{Abs} = coeficiente de desempenho ideal do sistema

Q_e = Taxa de adição de calor no evaporador [W]

Q_g = Taxa de adição de calor no gerador [W]

COP_{Comp} = coeficiente de desempenho do compressor

COP_{Pot} = coeficiente de desempenho da potência

É possível obter o COP ideal por meio das Equação (17) e (18) referentes a Potência e a Refrigeração de Carnot:

- COP do Ciclo de Potência de Carnot

$$COP_{Pot} = \frac{Q_g}{W} = \frac{T_g}{T_g - T_a} \quad (17)$$

Em que:

COP_{Pot} = coeficiente de desempenho da potência

Q_g = Taxa de adição de calor no gerador [W]

W = Trabalho realizado [J]

T_g = Temperatura do gerador (K)

T_a = Temperatura ambiente (K)

- COP do Compressor

$$COP_{Compressor} = \frac{Q_e}{W} = \frac{T_e}{T_a - T_e} \quad (18)$$

Em que:

COP_{Comp} = coeficiente de desempenho do compressor

Q_e = Taxa de adição de calor no evaporador [W]

W = Trabalho realizado [J]

T_e = Temperatura do evaporador (K)

T_a = Temperatura ambiente (K)

Segundo Brandão (2015), o limite superior de performance de um ciclo de refrigeração por absorção é igual ao coeficiente de performance de um ciclo de refrigeração de Carnot operando entre reservatórios a temperatura do recinto e a temperatura ambiente, multiplicado pela eficiência de um motor de Carnot trabalhando entre dois reservatórios a temperatura do gerador e a temperatura ambiente.

2.2.7.4 Eficiência de Refrigeração

Segundo Gramignia (2013), os geradores são equipamentos críticos para a melhor eficiência do processo de refrigeração por absorção. Devido às diferenças de pressão entre equipamento e ambiente externo, os geradores devem possuir estruturas reforçadas para garantir a sua integridade e resistir às forças do processo. Também é importante o correto isolamento da estrutura deste trocador, já que nele ocorre o ponto de mais alta temperatura do ciclo e, para o correto aproveitamento da energia, deve-se evitar ao máximo as perdas para o meio.

Conforme Martelozo (2009), a temperatura de evaporação tem influência sobre a eficiência do ciclo, uma redução na temperatura de evaporação resulta em redução do COP; isto é, o sistema se torna menos eficiente. O grau de distanciamento entre o ciclo idealizado e o ciclo real é calculado através da razão entre a performance real e ideal de um sistema por absorção. Este é o rendimento de primeira lei do ciclo e segue sua expressão matemática, conforme Equação (19).

$$n_R = \frac{COP_{Abs}}{COP_{Carnot}} \quad (19)$$

Para se obter a eficiência de refrigeração do sistema de absorção, faz necessários os valores referentes do COP real de absorção e o COP ideal (Ciclo de Carnot) obtendo a razão de um pelo outro respectivamente.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para realizar a construção da bancada didática de Refrigeração por absorção teve-se que levantar inicialmente os materiais necessários que seriam utilizados em cada passo dos procedimentos de construção.

Os materiais utilizados para a construção e montagem da bancada encontram-se especificados na Tabela 2.

Tabela 2. Lista de Materiais Utilizados.

Item	Descrição	Qtde.	Un.	Valor Unit.	Valor Total
1	Refrigerador Consul	1	Pç	R\$ 630,00	R\$ 630,00
2	Metalon 30 x 20	5	M	R\$ 24,00	R\$ 120,00
3	Zarcão Veloz Branco	1	Lt	R\$ 15,50	R\$ 15,50
4	Eletrodo Denver 2, 5	2	Pç	R\$ 14,50	R\$ 29,00
5	Disco de Corte 10 Pol. 3/4	2	Pç	R\$ 7,80	R\$ 15,60
6	Rodízio de Silicone	4	Pç	R\$ 5,50	R\$ 22,00
7	Fita de Led Silicone 12V	2	M	R\$ 12,95	R\$ 25,90
8	Coolers 80 x 80 12 V	4	Pç	R\$ 8,50	R\$ 34,00
9	Parafuso Inox 6 x 40	12	Pç	R\$ 0,60	R\$ 7,20
10	Porca Inox 6CH 10 pol.	12	Pç	R\$ 0,20	R\$ 2,40
11	Arruela Lisa Inox 6mm	12	Pç	R\$ 0,40	R\$ 4,80
12	Tinta Veloz	4	Pç	R\$ 7,00	R\$ 28,00
13	Plástico A3	8	Pç	R\$ 1,00	R\$ 8,00
14	Cabo 2,5 mm 750V	8	M	R\$ 0,90	R\$ 7,20
15	Pino 2 polos 10Amp	1	Pç	R\$ 2, 09	R\$ 2,09
16	Tomada fêmea 10 Amp	1	Pç	R\$ 4,50	R\$ 4,50
17	Tinta Acrilex preta	1	Lt	R\$ 10,95	R\$ 10,95
18	Pincel 715 n°24	1	Pç	R\$ 8,30	R\$ 8,30
19	Tinta Guache 6 cores	1	Lt	R\$ 2,75	R\$ 2,75
20	Painel Decorativo	2	Pç	R\$ 2,00	R\$ 4,00
21	Pincel n° 06 Acrilex	1	Pç	R\$ 2,50	R\$ 2,50
22	Impressão Digital	1	M	15,00	R\$ 15,00
23	Folha de Isopor 20mm	1	M	R\$ 5,00	R\$ 5,00
24	Folha de EVA	2	M	R\$ 1,75	R\$ 3,50

25	Chave Liga/ Desliga	1	Pç	R\$ 15,00	R\$ 15,00
26	Transformador 127 p/ 12V	4	Pç	R\$ 35,00	R\$ 140,00
27	Registro/ Mang. de Botijão	1	Pç	R\$ 24,00	R\$ 24,00
28	Fita Dp. Face/ crepe/ades.	3	Pç	R\$ 5,00	R\$ 15,00
29	Placa de Eucatex	1	M	R\$ 24,00	R\$ 24,00
30	Cola	3	Vidro	R\$ 2,00	R\$ 6,00
31	Trena métrica	1	Pç	R\$ 3,75	R\$ 3,75
32	Frete da bancada	3	Unid.	R\$ 20,00	R\$ 60,00
33	Termômetro Digital	1	Pç	R\$ 170,00	R\$ 170,00
34	Solda/ Instalação	1	Unid.	R\$ 100,00	R\$ 100,00
TOTAL					R\$ 1.565,94

Fonte: Autoria própria

Após tomar posse de todos os materiais citados deu-se início a construção da bancada.

3.1 CONCEPÇÃO DA BANCADA

Para iniciar o processo prático da bancada, foi utilizado uma geladeira modelo Consul, modelo CQG22DBINA, série JH0526589 que utiliza como fonte de energia gás GLP (Figura 14a e 14b).

Figura 15. Refrigerador Consul a) Vista Dianteira; b) Vista traseira.



Fonte: Autoria própria.

Em seguida foi construída a estrutura da bancada, onde foi utilizado 5 tubos metálicos de secção quadrada (metalon) 20 x 30 mm com dimensão total de 1 m de largura e 2,20 m de comprimento. Depois de concluída toda a confecção da estrutura foi fixada quatro rodízios giratórios para dar a bancada uma maior mobilidade, e para finalizar a estrutura, a bancada recebeu uma camada de tinta branca na parte metálica, conforme mostra a Figura 15.

Figura 16. Suporte para a bancada didática.



Fonte: Autoria própria.

Logo em seguida foi retirado a parte traseira da geladeira, onde está contida o sistema de absorção (Figura 16a, 16b e 16c).

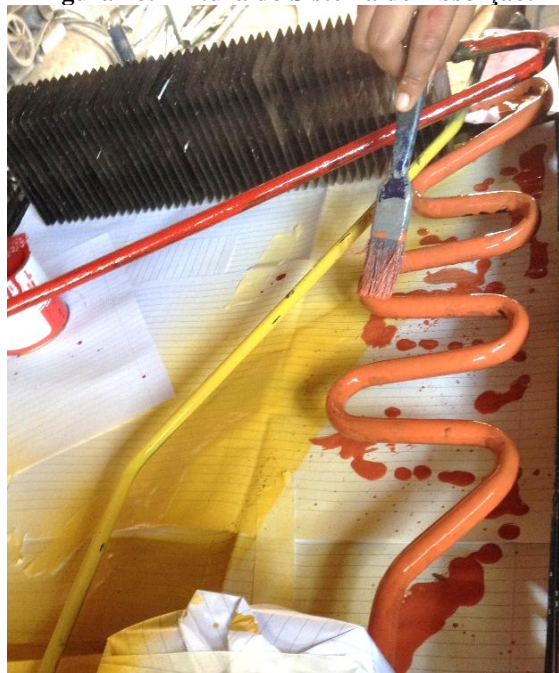
Figura 17. Sistema de Absorção do Refrigerador a) Vista dianteira; b) Lateral esquerda; c) Lateral direita.



Fonte: Autoria própria.

Para demonstrar as principais etapas do sistema de absorção foram utilizadas diferentes cores de tintas para destacar cada componente existentes na mesma. (Figura 17).

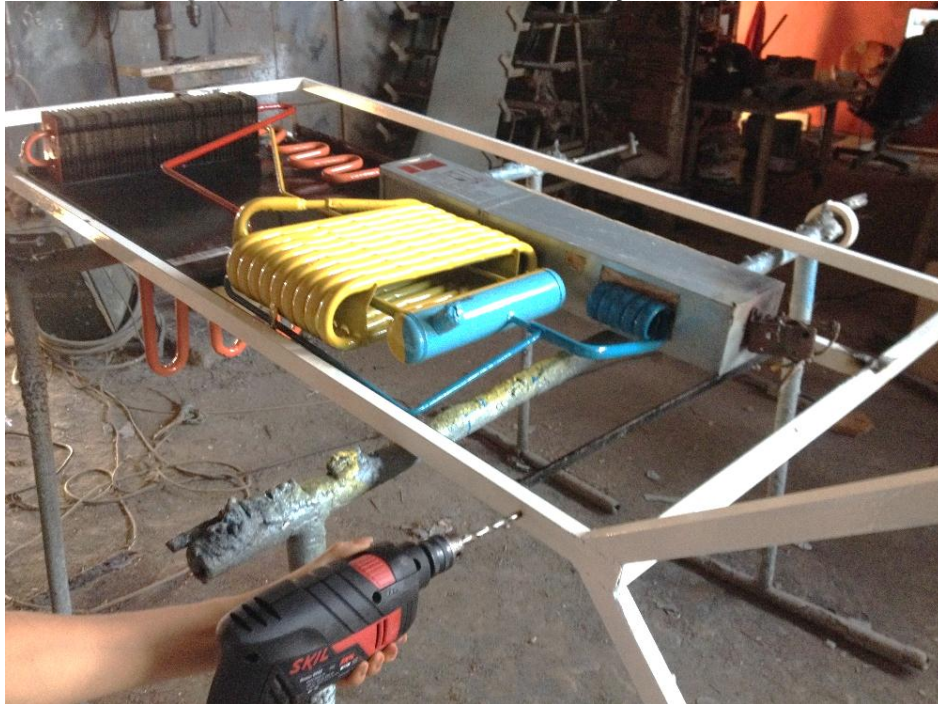
Figura 18. Pintura do Sistema de Absorção.



Fonte: Autoria própria.

Depois de pintado o sistema de absorção da geladeira, o mesmo foi fixado na estrutura da bancada utilizando parafusos (Figura 18).

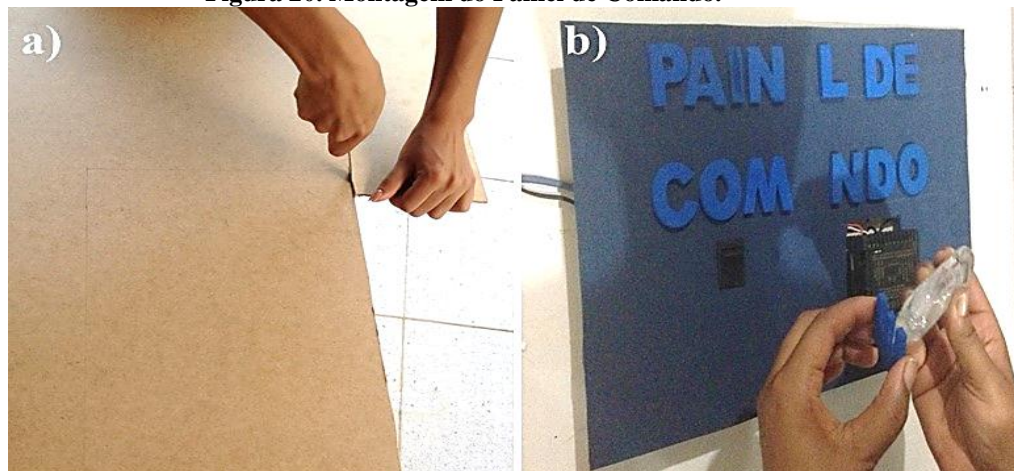
Figura 19. Fixação do Sistema de Absorção no suporte.



Fonte: Autoria própria.

No canto superior esquerdo da bancada foi montado o painel de comando para facilitar a visualização da temperatura. Nele está disposta uma chave liga/desliga para ligar a ventilação forçada (coolers) e a iluminação do painel do diagrama. Também está disposto no painel o marcador de temperaturas incluídos no sistema. O painel foi montado utilizando uma placa de Eucatex com dimensões de altura 25 cm e largura 42 cm.

Figura 20. Montagem do Painel de Comando.



Fonte: Autoria própria.

Depois foi montado o diagrama ilustrativo do processo de absorção, utilizando uma folha de plástico A3 fixado no desenho utilizando uma fita dupla face, medindo 42 cm de

largura e 60 cm de altura. No verso foi fixado uma fita composta de LED's para a iluminação do painel ilustrativo, alimentado por uma fonte de 12 V (Figura 20). Em seguida o painel foi fixado na bancada utilizando cola quente.

Figura 21. Montagem do Painel Ilustrativo.



Fonte: Autoria Própria.

Para ajudar na ventilação do condensador, foram colocados quatro coolers, ou seja, um sistema de ventilação forçada, alimentados com uma tensão de 12 V cada um, e foram fixados na parte superior do condensador, utilizando parafusos. Esses coolers foram colocados com o intuito de melhorar a eficiência do ciclo, tendo como meta acelerar o processo de condensação por meio da passagem forçada de ar sobre as aletas, fazendo com que o resfriamento no evaporador se dê de forma mais rápida.

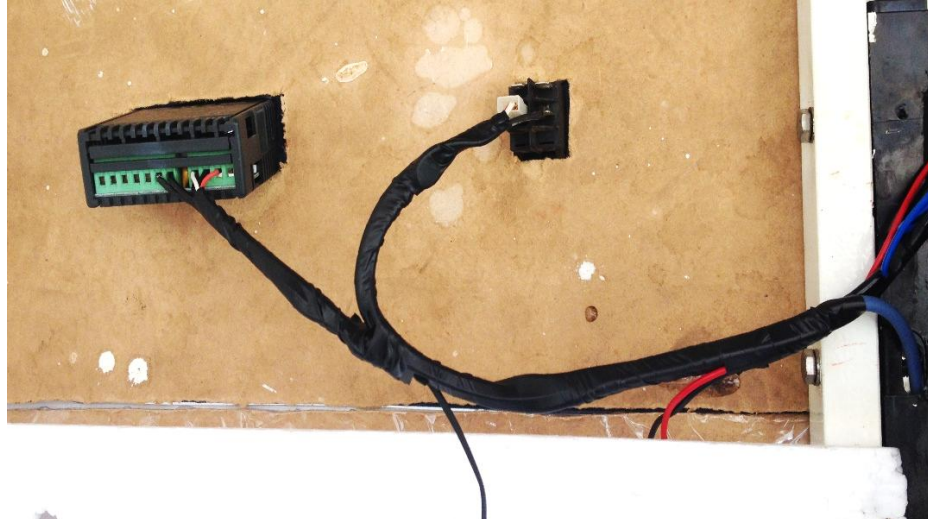
Figura 22. Montagem do sistema de ventilação forçada.



Fonte: Autoria própria.

Em seguida foram ligados os coolers e o termômetro na chave liga/desliga, que está inserida no painel de comando (Figura 22).

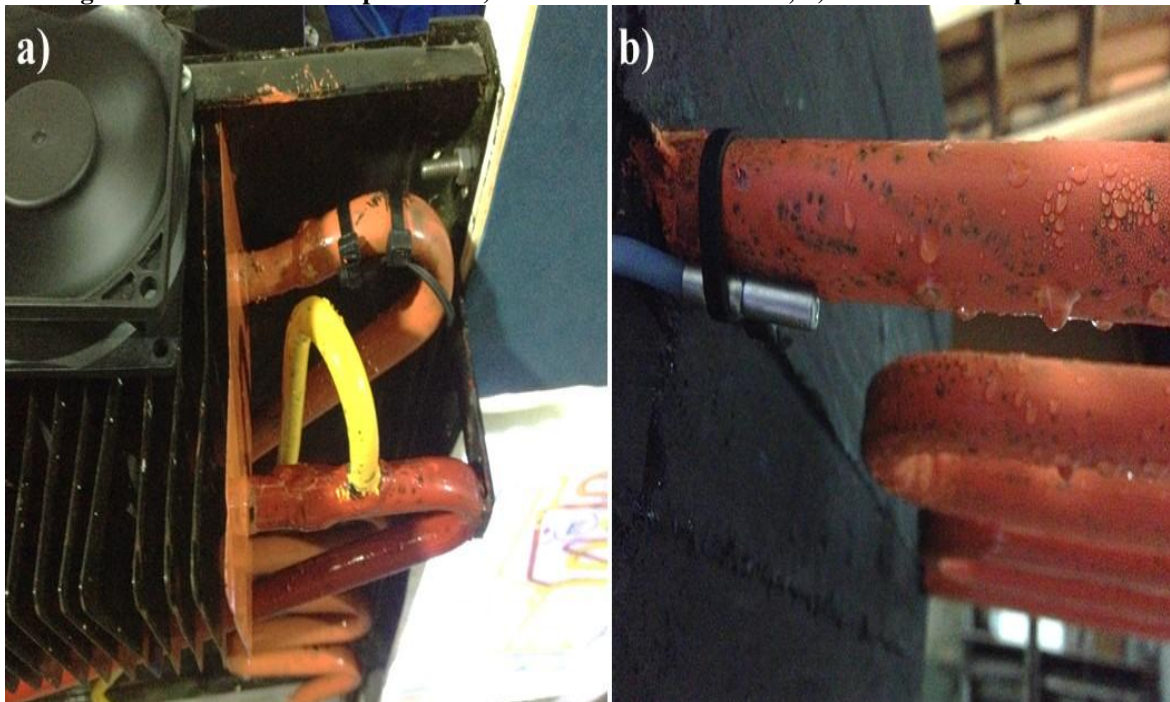
Figura 23. Instalação do Painel de Comando.



Fonte: Autoria própria.

Foi colocado um termômetro digital para monitorar o sistema em funcionamento que atuam na faixa de -22°C a 110°C . O primeiro sensor do termômetro foi colocado na entrada do condensador (Figura 23a) e o segundo sendo na entrada do evaporador (Figura 23b).

Figura 24. Sensores de temperatura a) Entrada do Condensador; b) Entrada do Evaporador.



Fonte: Autoria própria.

Depois de feito todo o processo descrito, foi possível obter o resultado final da bancada didática, contendo o diagrama ilustrativo, o painel de comando, o painel com o título

do trabalho e a própria bancada com suas partes dianteira e traseira e em funcionamento mostradas na Figura 24.

Figura 25. Bancada didática do Sistema de Refrigeração por Absorção.



Fonte: Autoria própria.

3.2 ANÁLISE DE DESEMPENHO DA BANCADA DIDÁTICA

Para a análise do desempenho da bancada didática foram utilizadas as equações da seção 2.2.7 de um sistema de refrigeração por absorção de simples efeito, tanto na obtenção das propriedades dos fluidos utilizados quanto na modelagem dos fenômenos de transferência de calor e de massa nos elementos do sistema.

Realizaram-se balanços no intuito de determinar as quantidades de energia que estão sendo trocadas ou as mudanças de estado que são geradas em cada elemento do sistema. Para

fins de obter dados referente ao desempenho da bancada foram efetuados cálculos para obtenção das cargas térmicas do evaporador, gerador, condensador e do absorvedor, além também de encontrar o COP do sistema bem como sua eficiência de refrigeração.

Como não se obtinha dados suficientes para a realização dos cálculos, na modelagem matemática do sistema foram assumidas algumas hipóteses simplificadoras. Essas hipóteses não apresentam erros significativos e simplificam sensivelmente algumas das análises realizadas. Podem ser encontradas nos trabalhos de (CARVALHO, 2005 apud MENNA, 2008). As hipóteses assumidas neste trabalho foram:

- I. Somente amônia pura flui no condensador e evaporador;
- II. A perda de carga devida ao fluxo nas tubulações e recipientes é nula;
- III. Não há superaquecimento na saída do evaporador (o estado da amônia na saída do evaporador é o de vapor saturado, na temperatura de evaporação);
- IV. Os dispositivos de expansão operam adiabaticamente;
- V. A bomba opera isentropicamente;
- VI. As pressões dentro dos componentes são constantes;
- VII. O sistema opera em regime permanente;
- VIII. Para fins de cálculo foi assumida a vazão de 0,6 kg/s.
- IX. No presente trabalho, foi adotado que as faixas de trabalho de sistemas de absorção simples operam com concentrações de amônia na solução variando em média entre 30 % e 40 %, ou seja, a concentração da solução rica, que sai do absorvedor, tem 40 % de amônia em relação à massa total da solução, e a que retorna do gerador, pobre, tem 30 %. (MÜHLE, 2008 apud MENNA 2008).

A próxima etapa foi aferir as temperaturas de todos os elementos do sistema. O sistema da bancada foi ligado deixando-o funcionando por 4 horas até obter valores precisos e constantes. Para a obtenção das temperaturas foi utilizado o termômetro digital da bancada que opera com dois sensores de temperatura. Dessa forma teve-se a Tabela 3.

Tabela 3. Aferição das temperaturas da bancada

Elemento	Temperatura (°C)
Gerador	100
Condensador	50
Evaporador	12
Absorvedor	36

Fonte: Autoria própria

Para fins de análise, considerou-se o fluxograma da Figura 8 da seção 2.2.7.2 bem como as equações subsequentes dos elementos do sistema. De modo a se obter o COP real do sistema foi necessário encontrar a capacidade de refrigeração e a taxa de adição de calor no gerador como mostra a Equação 2.

3.2.1 Balanço de Massa do Sistema

Após a análise e comparação do sistema com o fluxograma, com os dados das hipóteses simplificadoras foi feito o levantamento dos dados disponíveis. De maneira análoga ao Balanço de Massa da seção 2.2.7.2 foi possível equiparar os fluxos mássicos das Equações 3, 6, 9 e 14, apresentando-os a seguir:

Dados:

$$\dot{m}_4 = \dot{m}_3 = 0,6 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_6 = \dot{m}_7 = 0,45 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$\dot{m}_5 = \dot{m}_8 = \dot{m}_1 = \dot{m}_2 = 0,15 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$x_4 = 0,3$$

$$x_6 = 0,4$$

- Balanço de massa da solução no Gerador

$$\dot{m}_6 = \dot{m}_7$$

$$\dot{m}_6 + \dot{m}_5 = \dot{m}_4 = \dot{m}_3 = 0,6 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

- Balanço de massa de NH_3 no Gerador

Foi realizado então o Balanço de Massa de amônia no gerador onde a partir dos títulos de forma semelhante as Equações (11) e (12) foi possível determinar as vazões nos pontos 4 e 6.

$$\dot{m}_4 \cdot x_4 = \dot{m}_6 \cdot x_6$$

Assim:

$$\dot{m}_4 \cdot x_4 = \dot{m}_6 \cdot x_6$$

$$0,6 \frac{kg}{s} \cdot 0,3 = \dot{m}_6 \cdot 0,4$$

$$\dot{m}_6 = 0,45 \frac{kg}{s}$$

$$\dot{m}_6 + \dot{m}_5 = \dot{m}_4$$

$$0,45 \frac{kg}{s} + \dot{m}_5 = 0,6$$

$$\dot{m}_5 = 0,15 \frac{kg}{s}$$

3.2.2 Análise Térmica do Sistemas de Absorção Simples

3.2.2.1 Entalpias da Solução

Para verificar as entalpias do Absorvedor e do Gerador consultou-se a Tabela 3 com os valores aferidos na bancada e posteriormente consultou-se a Tabela de Diagrama entalpia-concentração para soluções água-amônia disponível no Anexo 1 deste trabalho. Dessa forma teve-se que:

- Entalpia do absorvedor

$$h_4 = h_3 = (36^\circ\text{C}; 0,3) = -86 \text{ KJ/Kg}$$

- Entalpia do gerador

$$h_6 = h_7 = (100^\circ\text{C}; 0,4) = 198 \text{ KJ/Kg}$$

3.2.2.2 Entalpia da Água Líquida e Vapor de Água

Para verificar as entalpias da Água Líquida e Vapor de Água consultou-se a Tabela de Água Saturada disponível no Anexo 2 deste trabalho.

$$h_5 = h_v(100^\circ\text{C}) = 2676,1 \text{ KJ/Kg}$$

$$h_8 = h_1 = h_e(36^\circ\text{C}) = 50,86 \text{ KJ/Kg}$$

$$h_2 = h_v(12^\circ\text{C}) = 2520 \text{ KJ/Kg}$$

- Balanço de Energia do Gerador

Tendo posse dos valores de entalpia foi possível realizar o Balanço de Massa do Gerador de acordo com a Equação (13) que fornece a quantidade de energia que deve ser fornecida à solução para que sua concentração seja reduzida.

$$\begin{aligned}\dot{Q}_g + \dot{m}_4 \cdot h_4 &= \dot{m}_6 \cdot h_6 + \dot{m}_5 \cdot h_5 \\ \dot{Q}_g &= \dot{m}_6 \cdot h_6 + \dot{m}_5 \cdot h_5 - \dot{m}_4 \cdot h_4 \\ \dot{Q}_g &= 0,45 \frac{kg}{s} \cdot 198 \frac{kJ}{kg} + 0,15 \frac{kg}{s} \cdot 2676,1 \frac{kJ}{kg} - \left[\left(0,6 \frac{kg}{s} \right) \cdot \left(-186 \frac{kJ}{kg} \right) \right] \\ \dot{Q}_g &= 89,1KW + 401,42KW + 11,6KW \\ \dot{Q}_g &= 502,12 KW\end{aligned}$$

- Balanço de Energia do Condensador

Para se obter a quantidade de energia dissipada para o meio foi feito o Balanço de Energia do Condensador utilizando como base a Equação (15).

$$\begin{aligned}\dot{m}_5 h_5 &= \dot{m}_8 h_8 + \dot{Q}_c \\ \dot{m}_5 &= \dot{m}_8 = \dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}_c \\ \dot{Q}_c &= \dot{m}_c (h_5 - h_8) \\ \dot{Q}_c &= 0,15 \frac{kg}{s} \cdot [(2676,1 - 150,86) \frac{kJ}{kg}] \\ \dot{Q}_c &= 378,78 KW\end{aligned}$$

- Balanço de Energia do Absorvedor

Para se obter a carga térmica a ser retirada do absorvedor foi realizado o Balanço de Energia do Absorvedor como na Equação (7) e (8) da seção 2.2.7.2.

$$\begin{aligned}\dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_7 h_7 &= \dot{m}_3 h_3 + \dot{Q}_a \\ \dot{Q}_a &= \dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_7 h_7 - \dot{m}_3 h_3 \\ \dot{Q}_a &= 0,15 \frac{kg}{s} \cdot 2520 \frac{kJ}{kg} + 0,45 \frac{kg}{s} \cdot 198 \frac{kJ}{kg} - \left[\left(0,6 \frac{kg}{s} \right) \cdot \left(-186 \frac{kJ}{kg} \right) \right] \\ \dot{Q}_a &= 378 KW + 89,1 KW + 111,6KW \\ \dot{Q}_a &= 578,7KW\end{aligned}$$

- Balanço de Energia no Evaporador

Para se obter a carga térmica do evaporador utilizou-se como fundamento as Equações (4) e (5) que considera o fluxo mássico de amônia no evaporador e a diferença de entalpia entre os pontos 1 e 2 da Figura 9.

$$\dot{Q}_e + \dot{m}_1 h_1 = \dot{m}_2 h_2$$

$$\begin{aligned}\dot{m}_1 &= \dot{m}_2 = \dot{m}_e \\ \dot{Q}_e &= \dot{m}_e (h_2 - h_1) \\ \dot{Q}_e &= 0,15 \frac{kg}{s} \cdot (2520 - 150,86) KJ/kg \\ \dot{Q}_e &= 355,37 KW\end{aligned}$$

3.2.3 Cálculo do COP do Sistema de Absorção da Bancada

Com os valores da Capacidade de Refrigeração e da Taxa de adição de Calor no gerador, utilizando a Equação (2) foi possível encontrar o COP do sistema de absorção da bancada didática.

- Cálculo do COP do Sistema de Absorção (Ciclo Real)

$$\begin{aligned}COP_{abs} &= \frac{Q_e}{Q_g} \\ COP_{abs} &= \frac{355,37 KW}{502,12KW} \\ COP_{abs} &= 0,707\end{aligned}$$

3.2.4 Cálculo da Eficiência de Refrigeração do Sistema

Para fins de obtenção da eficiência de refrigeração do sistema da bancada, fez-se necessário calcular primeiramente os COP de Compressão e de Potência utilizando as Equações 16 e 17, de modo a obter a partir do quociente destes o COP do Ciclo de Carnot a partir da Equação 18.

- COP de Potência

$$\begin{aligned}COP_{POT} &= \frac{Q_g}{w} \\ COP_{POT} &= \frac{T_g}{T_g - T_a} \\ COP_{POT} &= \frac{100 + 273,15}{100 - 34,5} \\ COP_{POT} &= 5,69\end{aligned}$$

- COP de Compressão

$$COP_{COMP} = \frac{Q_e}{W}$$

$$COP_{COMP} = \frac{T_a}{T_a - T_e}$$

$$COP_{COMP} = \frac{12 + 273,15}{34,5 - 12}$$

$$COP_{COMP} = 12,67$$

- COP de Carnot

$$COP_{carnot} = \frac{Q_e}{Q_g} = \frac{COP_{COMP}}{COP_{POT}}$$

$$COP_{carnot} = \frac{12,67}{5,69}$$

$$COP_{carnot} = 2,22$$

- Eficiência de Refrigeração

Utilizando a Equação (19) por meio também do quociente do COP real pelo COP ideal foi possível obter a eficiência do sistema.

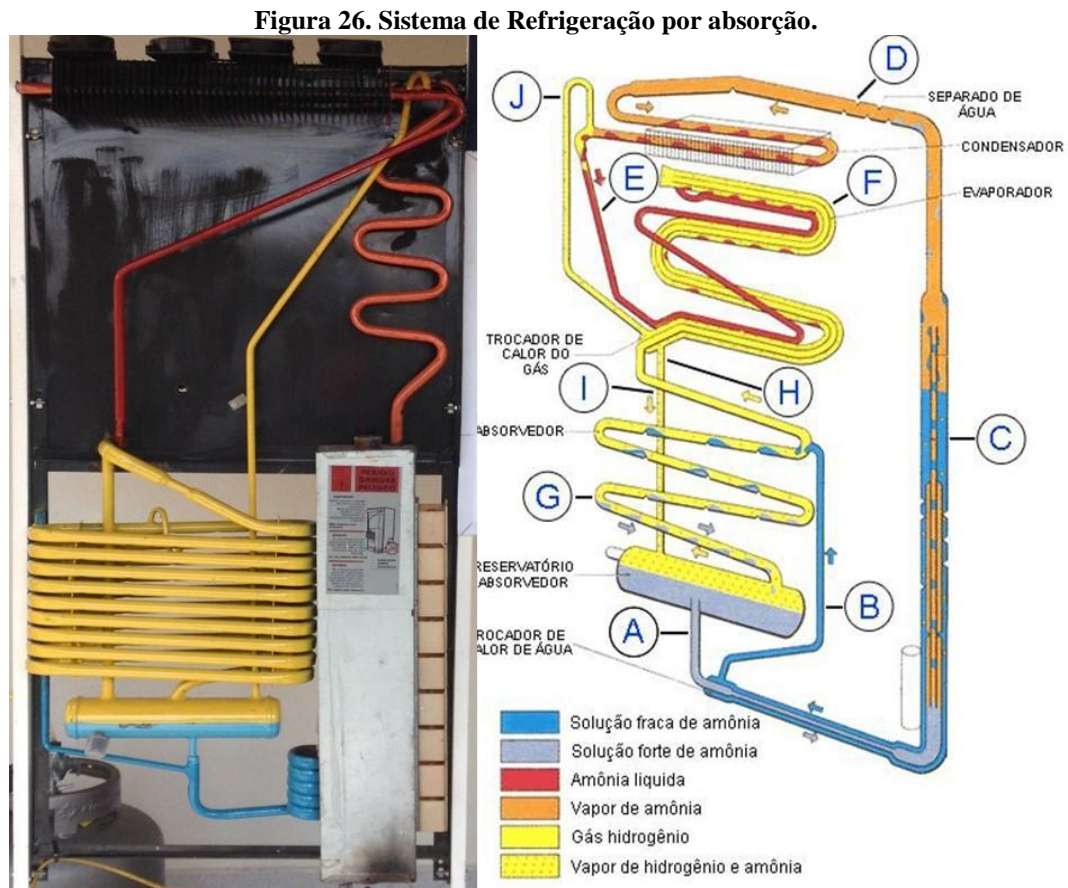
$$n_R = \frac{COP_{abs}}{COP_{carn}}$$

$$n_R = \frac{0,707}{2,22}$$

$$n_R = 0,318$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após ter sido realizada a montagem da bancada composta por placa com o nome da bancada, painel de comando, painel ilustrativo e o próprio sistema de refrigeração por absorção com seus componentes pintados de cores diferentes, foi possível compreender melhor o sistema proposto por este trabalho (Figura 25).



Desta forma é possível verificar o sistema de absorção que opera com o par $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ e pelas cores como ciclo de refrigeração se dá pelo aquecimento de uma solução composta de água destilada e amônia, adicionada ao hidrogênio, de modo a se gerar uma pressão parcial no absorvedor e evaporador que permite a evaporação da amônia a baixa pressão.

De modo semelhante ao sistema montado na bancada didática ilustra perfeitamente o princípio de funcionamento do sistema de absorção. No tubo “A” há uma solução rica de amônia e água destilada. No tubo “B”, além de conter uma solução pobre em amônia, composta quase que inteiramente de água destilada ainda mantém o nível de água na entrada do absorvedor.

Por conseguinte, analisando o sistema de absorção montado na bancada em funcionamento foi possível observar que a chama do gás GLP fornece uma certa quantidade de calor ao tubo “A”. Semelhante ao que ocorre ao entrar no tubo “C”, a amônia evapora separando-se da água. A água retorna por fora do tubo “C” e a amônia vai para o condensador. A água é então condensada e retorna ao absorvedor através do tubo “B”. Essa solução é chamada de “solução pobre”.

Em seguida, subindo pelo tubo “D”, a amônia chega ao condensador, onde passa para a fase líquida novamente. Por gravidade, a amônia líquida desce pelo tubo “E”, e encontra-se com o gás hidrogênio vindo pelo tubo “F” e ambos vão para o evaporador. O hidrogênio, dentro do evaporador, permite criar uma pressão parcial da amônia suficientemente baixa para obter-se a temperatura de refrigeração desejada. Este princípio da pressão parcial está fundamentado na Lei de Dalton⁴. Posteriormente no evaporador a amônia se evapora instantaneamente, em razão da baixa pressão, dessa forma é que é possível a retirada de calor de alimentos guardados na geladeira.

Após a evaporação, a amônia e o hidrogênio descem pelo tubo “I”, por gravidade. A amônia e o hidrogênio chegam ao reservatório absorvedor e imediatamente sobem pelo tubo “G”. O gás de hidrogênio por ser muito difusível só se apresenta com a amônia na fase gasosa não tendo afinidade com o absorvente. A água condensada no início do processo, no pré-condensador, desce pelo mesmo tubo. Nesse momento a amônia é separada do hidrogênio pela água e então, juntos, retornam ao absorvedor.

Por ser mais leve, nessa etapa do ciclo o hidrogênio sobe até o evaporador pelo tubo “F”. É por esse motivo que o sistema é chamado de absorção, pois a água tem a característica de absorver a amônia. Os dois tubos em “U” existentes no sistema (na parte interna do tubo “F”) servem para manter o gás hidrogênio preso no evaporador e no absorvedor, onde a pressão parcial da amônia deve ser mantida, evitando que o mesmo passe para o lado do separador, gerador e condensador.

Através da análise do sistema também foi possível observar que o tubo “J” é o tubo de compensação. Sua função é a de permitir que a amônia não condensada retorne ao tanque. Essa condição acontece somente quando a temperatura ambiente está muito alta, ou quando o refrigerador está instalado incorretamente. Outro tubo soldado no absorvedor, não mostrado na Figura 25, funciona como uma válvula de segurança. Ele está localizado num ponto onde apenas o hidrogênio circula.

⁴Lei estabelecida em 1801 que relaciona a pressão dos gases em misturas gasosas.

Sabe-se que o hidrogênio é um gás altamente inflamável, por isso requer proteção para evitar explosões, em casos de alta pressão, ou temperaturas altas no sistema. Por esse motivo, para melhorar a eficiência do refrigerador por absorção, ou seja, fazer com que ele resfrie mais rápido, foi instalado sobre as aletas dissipadoras de calor do condensador um sistema de ventilação forçada, acionado através de uma chave liga/desliga posicionada no painel de controle.

Para tanto foram utilizados quatro *coolers* de 12 V de computadores por serem silenciosos, econômicos e baratos. Ao ligar o sistema de absorção acionando a chave do botijão de gás, com o sistema de ventilação forçada desligado a temperatura aferida na entrada do condensador foi de 54,3° C. Com o sistema de ventilação forçada ligada a temperatura de entrada da amônia no condensador alcançou 50°C apresentando desta forma uma redução de 4,3°C, comprovando a interferência positiva do sistema de ventilação forçada e mostrando assim sua fundamental importância.

No que diz respeito a temperatura aferida na entrada do evaporador, a mesma só passou a ser obtida aproximadamente 2 h e 30 minutos depois do sistema ter sido ligado, atingindo assim a temperatura de 15,9° C. Após 3 horas de funcionamento o sistema marcou na entrada do evaporador a temperatura referente a 13,6° C após 3h e 30 minutos foi aferida a temperatura de 12,2° C e após 4 horas de funcionamento a temperatura da entrada do evaporador chegou a 12°C.

A partir dos cálculos realizados na seção 3.2 foram obtidos os valores da Vazão Mássica do sistema, suas Entalpias, o COP tanto do ciclo de Carnot quanto do Ciclo real e a Eficiência de refrigeração, podendo assim explicar os seguintes resultados na Tabela 4.

Tabela 4: Vazão Mássica obtida do Sistema

Vazão mássica	
\dot{m}_1	0,6 kg/s
\dot{m}_2	0,15kg/s
\dot{m}_3	0,6 kg/s
\dot{m}_4	0,15kg/s
\dot{m}_5	0,15kg/s
\dot{m}_6	0,45 kg/s
\dot{m}_7	0,45 kg/s
\dot{m}_8	0,15kg/s

Fonte: Autoria própria

Foram obtidas todas as entalpias do sistema como mostra a Tabela 5, levando em consideração que o fato de algumas serem isentalpicas facilitou a resolução do problema.

Tabela 5: Entalpias encontradas no sistema de absorção

Entalpias	
h_1	150,86 KJ/Kg
h_2	2520 KJ/Kg
h_3	-186 KJ/Kg
h_4	-186 KJ/Kg
h_5	2676,1 KJ/Kg
h_6	198 KJ/Kg
h_7	198 KJ/Kg
h_8	150,86 KJ/Kg

Fonte: Autoria própria

As variáveis necessárias para se obter os respectivos valores de carga térmica do sistema podemos observar na Tabela 6.

Tabela 6: Balanço de Energia obtido no sistema

Balanço de Energia do Sistema		
Gerador	\dot{Q}_g	502,12 KW
Condensador	\dot{Q}_c	378,78 KW
Absorvedor	\dot{Q}_a	578,7 KW
Evaporador	\dot{Q}_e	355,37 KW

Fonte: Autoria própria

Os valores correspondentes ao COP real, COP ideal (Carnot) e Eficiência de refrigeração observado na Tabela 7.

Tabela 7: Valores obtidos na Análise da Bancada

DESEMPENHO DA BANCADA	
COP Ideal (Carnot)	2,22
COP real (Bancada)	0,707
Eficiência de Refrigeração	31,8%

Fonte: Autoria própria

Após a realização do projeto e o desenvolvimento dos cálculos do sistema foi possível obter valores que indicam uma boa concordância entre o comportamento esperado e o comportamento real de um sistema de refrigeração por absorção de simples efeito. O valor do COP real do sistema de absorção da bancada foi equivalente a 0,707. Tal valor condiz com a Tabela 8 de sistema de absorção de simples estágio ilustrada por Ferrari (2005), mostrando assim que o sistema da bancada atende a performance esperada para um bom funcionamento.

Tabela 8: Sistemas de Refrigeração Alimentados por Fonte de Calor

<i>Sistema térmico</i>				<i>Aplicação</i>	
Sistema	Gen./ Regen. Temp. (°C)	COP_{ciclo}	Fluido de Trabalho	Refrigeração	A/C
Absorção	80-190	0,6-0,8 (simples estágio) ≤ 1,3 (2 estágios)	NH ₃ /H ₂ O, H ₂ O/LiCl, H ₂ O/LiBr	X	X
Adsorção	80-300	0,3-0,8	H ₂ O-Zeolite, Metanol- Carvão Ativado	X	
Reação química	80-300	0,1-0,2	NH ₃ /SrCl ₂	X	
Rankine	>120	0,3-0,5	Água, R114, Tolueno, Fluidos orgânicos		X
Dessecante	40-100	0,5-1,5	Água		X
Ejetor	80-150	0,3-0,8	Água, Butano, R141b, etc.		X

Fonte: (PRIDASAWAS E LUNDQVIST, 2003 apud FERRARI, 2005)

A Eficiência de Refrigeração do sistema de absorção da bancada foi de 31, 8%. Conforme Silva (2010), citado anteriormente, a temperatura de evaporação tem influência sobre a eficiência do ciclo, uma redução na temperatura de evaporação resulta em redução do COP; isto é, o sistema se torna menos eficiente. Visto que o COP do sistema de absorção da bancada manteve-se dentro da faixa esperada, compreende-se que a eficiência do ciclo também está dentro de sua normalidade.

Os resultados obtidos na análise do desempenho da bancada foram satisfatórios, visto que o sistema mostrou seu funcionamento de maneira correta, sem ruídos e escapes, fornecendo assim uma bancada didática que desenvolve efetivamente seu ciclo por absorção.

5. CONCLUSÃO

A proposta de desenvolvimento da bancada didática de refrigeração por absorção possibilitou a aplicação dos conhecimentos teóricos obtidos ao longo da jornada acadêmica no curso de Engenharia Mecânica, utilizando de conceitos importantes e essenciais do sistema de refrigeração.

O objetivo da construção da bancada de sistema de refrigeração por absorção foi alcançado de modo a disponibilizá-la para estudos no laboratório da Faculdade de Engenharia Mecânica (FEM) do Campus de Tucuruí.

Os principais componentes do ciclo de refrigeração por absorção foram apresentados. A partir do painel ilustrativo foi possível identificar o Absorvedor, o Condensador, o Evaporador, o Gerador, o Trocador de calor do gás, o Reservatório absorvedor e o Trocador de Calor de Água.

As etapas do funcionamento do sistema de refrigeração por absorção foram percebidas também com o auxílio do Painel Ilustrativo e do Fluxograma do sistema. A bancada didática do sistema de absorção mostrou-se uma excelente ferramenta ao nos permitir realizar o balanço de massa e de energia, bem como obter o COP e a eficiência de refrigeração do sistema.

Dentre as vantagens disponíveis no referencial teórico, algumas foram notórias durante o período em que o sistema da bancada estava funcionando como, por exemplo: o sistema de absorção esteve silencioso e livre de vibração; utilizou-se para funcionamento do sistema, energia térmica advinda de gás GLP ao invés de energia elétrica que é mais cara; foram explicitadas de modo claro e objetivo.

As desvantagens fizeram-se presentes na temperatura do evaporador que deveria apresentar valor inferior. Contudo, tal valor pode ser justificado, visto que o sistema de absorção estava fora de suas instalações de origem, ou seja, sem seu isolamento térmico, e dessa forma em contato direto com o meio ambiente.

Em suma, é notória a necessidade do homem de estar sempre buscando o aprimoramento e a melhoria da qualidade de vida. Por esse motivo, desenvolver uma bancada didática de um sistema de absorção tem elevada importância, visto que a mesma pode contribuir significativamente para o conhecimento e a possível pesquisa de sistemas de melhoria para o ciclo. Sugere-se para futuros trabalhos o estudo de parâmetros que melhore o COP e a Eficiência de Refrigeração do sistema da Bancada Didática de modo a buscar otimizar o sistema e contribuir para possíveis melhorias em sistemas que utilizam refrigeração por absorção.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

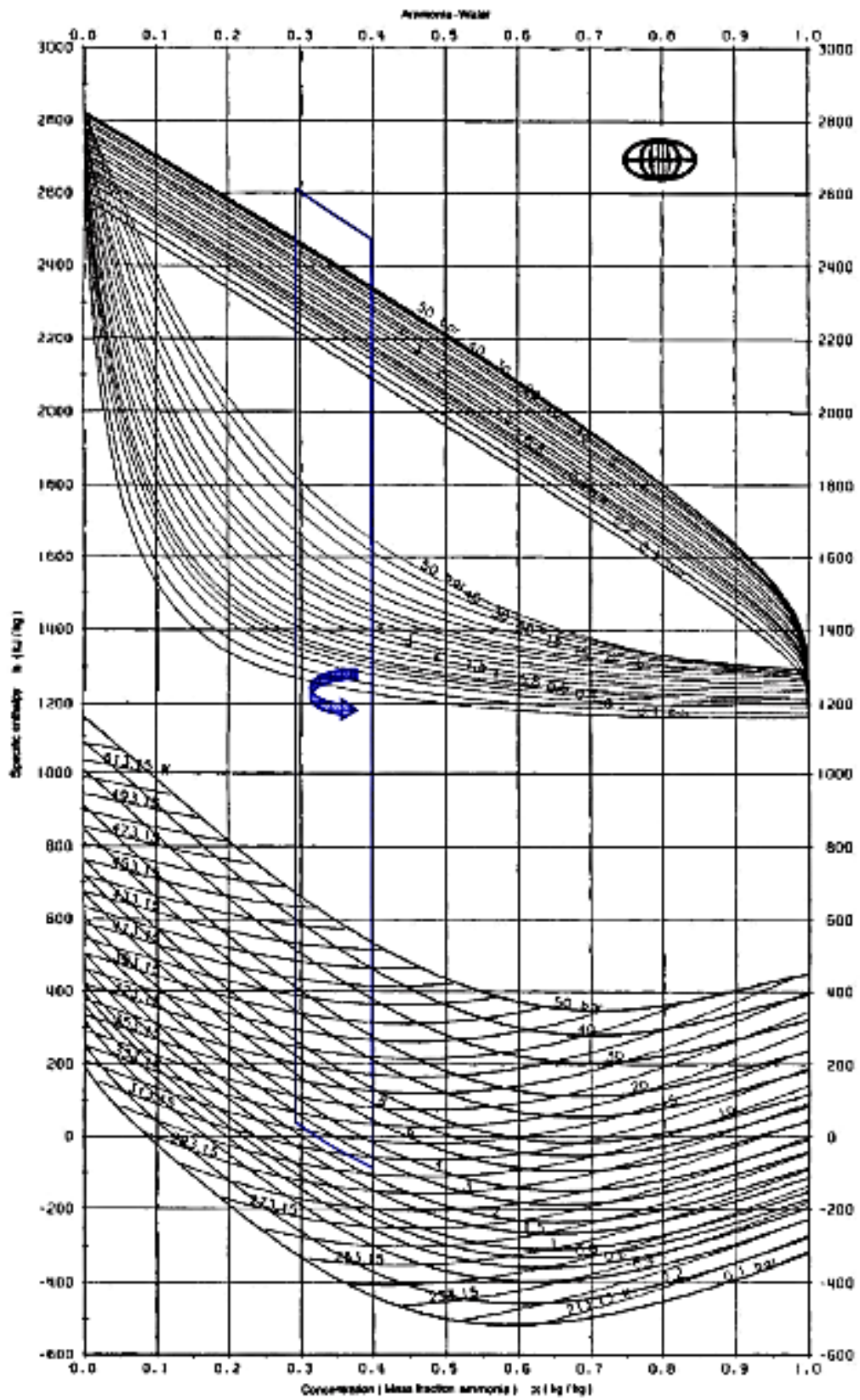
- ABREU, Ari Ferreira, 1999. Sistema de refrigeração por absorção intermitente: Concepção, dimensionamento, construção, ensaio e considerações econômicas. Disponível em: <<http://www.phbio.com.br/media/cultivo/Sistema%20de%20Refrigera%C3%A7%C3%A3o%20por%20Absor%C3%A3o%20Intermitente.pdf>>. Acessado em: 04 de Agosto de 2016.
- BRANDÃO, Rafael Cardoso. Análise exergetica de um ciclo de refrigeração por absorção água-amônia. Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: <<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10014984.pdf>>. Acesso em: 02 de setembro de 2016.
- CARMELLO, Guilherme Fernando, 2011. Sistemas de refrigeração por absorção: Análise e modelagem termodinâmica. Disponível em: <http://www.unimep.br/p/hpg/mostra_academica/anais/9mostra/1/290.pdf>. Acessado em: 02 de Agosto de 2016.
- CANTARUTTI, Bruno Ribeiro, 2011. Análise teórico-experimental de um sistema de refrigeração por absorção de simples efeito utilizado H₂O-LiBr. Disponível em: <<http://saturno.unifei.edu.br/bim/0038210.pdf>>. Acessado em 02 de Agosto de 2016.
- CARVALHO, Enio Nascimento de; Pimenta, João Manoel Dias; Almeida, Gustavo Soares de; Junior, José de Araújo Fonseca. Modelagem e Simulação de Chillers por absorção H₂O-libr em um edifício. Uberlândia-MG, 2006. Fonte: <<http://www.posgrad.mecanica.ufu.br/posmec/16/pdf/pm16-0120.pdf>>. Acesso em: 1 de setembro de 2016.
- DANTAS, Lucas, 2009. O histórico da refrigeração fluidos. Disponível em: <<http://www.academia.edu>>. Acessado em: 05 de Agosto de 2016.
- DORGAN, C. B.; LEIGHT, S. P.; DORGAN, C. E. Application Guide for Absorption Cooling/ Refrigeration Using Recovered Heat. USA: ASHRAE. 1995, 186p.
- FERRARI, Fabrício. Otimização Termodinâmica de Sistemas de Refrigeração Solar. Curitiba, 2005. Disponível em: <http://www.pgmecc.ufpr.br/dissertacoes/dissertacao_048.pdf>. Acesso em: 03 de setembro de 2016.

- FRANKLIN, Mauro. Refrigeração. Unicamp, s/d. Disponível em: <http://www.fem.unicamp.br/~franklin/ES672/pdf/refrigeracao_intro.pdf>. Acesso em: 15 de novembro de 2016.
- GRAMIGNIA, Leandro. Modelagem e avaliação de um sistema de refrigeração por absorção para residências e instalações de pequeno porte. Guaratinguetá, 2013. Disponível em: <<http://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/119340/000739769.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 02 de setembro de 2016.
- GENIÊR, Francieli Silva, 2013. Ciclos de refrigeração: Conceitos e estudos de eficiência. Disponível em: <http://www.conhecer.org.br/enciclop/2013a/engenharias/Ciclos%20de%20refrigeracao.pdf>>. Acessado em 04 de Agosto de 2016.
- JUNIOR, Carlos, 2010. Geladeira a gás GLP, a querosene ou a resistência elétrica. Disponível em:<<http://campingcomconforto.blogspot.com.br/2010/08/refrigeracao-por-sistema-de-absorcao.html>>. Acessado em: 03 de Agosto de 2016.
- JÚNIOR, Sílvio de Oliveira; TRIBESS, Arlindo; NETO, Alberto Hernandez; Fiorelli, Flávio Augusto Sanzovo. Sistemas de Refrigeração por Absorção. São Paulo, 2004. Disponível em: http://www.lete.poli.usp.br/PME2517_files/sistRefrigeraoAbsorcao.pdf.
- MARTELOZO, Fábio Rosa. Manutenção Básica em Sistemas de Ar Condicionado. Guarulhos, 2009. Disponível em: <https://www.passeidireto.com/arquivo/21356806/manutencao-basica-em-sistemas-de-ar-condicionado>. Acesso em: 28 de agosto de 2016.
- MENNA, Marcio Renato Mirapalheta, 2008. Modelagem e análise de custos de sistemas de refrigeração por absorção. Disponível em:<http://200.201.88.199/portalpos/media/File/eng_quimica/marcio_mirapalheta.pdf>. Acesso em: 03 de Agosto de 2016.
- PORTAL DA REFRIGERAÇÃO, 2016. Disponível em: <http://www.refrigeracao.net/Topicos/refrigeracao_absorcao.htm>. Acesso em: 06 de julho de 2016.
- QUEIROZ, MÁRCIO HENRIQUE BASTOS DE. Bancada Didática Para Sistema De Refrigeração Por Absorção. Medianeira – PR 2013. Disponível em: <http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/1376/1/MD_COMIN_2012_2_08.pdf> . Acesso em: 05 de agosto de 2016.
- REVISTA, Super Interessante. Fonte: < <http://super.abril.com.br/comportamento/a-geladeira>>. Acesso em: 14 de agosto de 2016.

- SHAPIRO, Howard N; MORAN, Michael J. Fundamentals of Engineering Thermodynamics. 5^a Edition, 2006.

ANEXO 1

Anexo 1: Diagrama entalpia-concentração para soluções água-amônia



Fonte: (Perry, 2007 apud Menna, 2008)

ANEXO 2

Anexo 2: Tabela de água Saturada Líquido-Vapor

Table T-2 Properties of Saturated Water (Liquid-Vapor): Temperature Table

Temp. °C	Press. bar	Specific Volume m ³ /kg		Internal Energy kJ/kg		Enthalpy kJ/kg			Entropy kJ/kg · K		Temp. °C
		Sat. Liquid $v_f \times 10^3$	Sat. Vapor v_g	Sat. Liquid u_f	Sat. Vapor u_g	Sat. Liquid h_f	Evap. h_{fg}	Sat. Vapor h_g	Sat. Liquid s_f	Sat. Vapor s_g	
.01	0.00611	1.0002	206.136	0.00	2375.3	0.01	2501.3	2501.4	0.0000	9.1562	.01
4	0.00813	1.0001	157.232	16.77	2380.9	16.78	2491.9	2508.7	0.0610	9.0514	4
5	0.00872	1.0001	147.120	20.97	2382.3	20.98	2489.6	2510.6	0.0761	9.0257	5
6	0.00935	1.0001	137.734	25.19	2383.6	25.20	2487.2	2512.4	0.0912	9.0003	6
8	0.01072	1.0002	120.917	33.59	2386.4	33.60	2482.5	2516.1	0.1212	8.9501	8
10	0.01228	1.0004	106.379	42.00	2389.2	42.01	2477.7	2519.8	0.1510	8.9008	10
11	0.01312	1.0004	99.857	46.20	2390.5	46.20	2475.4	2521.6	0.1658	8.8765	11
12	0.01402	1.0005	93.784	50.41	2391.9	50.41	2473.0	2523.4	0.1806	8.8524	12
13	0.01497	1.0007	88.124	54.60	2393.3	54.60	2470.7	2525.3	0.1953	8.8285	13
14	0.01598	1.0008	82.848	58.79	2394.7	58.80	2468.3	2527.1	0.2099	8.8048	14
15	0.01705	1.0009	77.926	62.99	2396.1	62.99	2465.9	2528.9	0.2245	8.7814	15
16	0.01818	1.0011	73.333	67.18	2397.4	67.19	2463.6	2530.8	0.2390	8.7582	16
17	0.01938	1.0012	69.044	71.38	2398.8	71.38	2461.2	2532.6	0.2535	8.7351	17
18	0.02064	1.0014	65.038	75.57	2400.2	75.58	2458.8	2534.4	0.2679	8.7123	18
19	0.02198	1.0016	61.293	79.76	2401.6	79.77	2456.5	2536.2	0.2823	8.6897	19
20	0.02339	1.0018	57.791	83.95	2402.9	83.96	2454.1	2538.1	0.2966	8.6672	20
21	0.02487	1.0020	54.514	88.14	2404.3	88.14	2451.8	2539.9	0.3109	8.6450	21
22	0.02645	1.0022	51.447	92.32	2405.7	92.33	2449.4	2541.7	0.3251	8.6229	22
23	0.02810	1.0024	48.574	96.51	2407.0	96.52	2447.0	2543.5	0.3393	8.6011	23
24	0.02985	1.0027	45.883	100.70	2408.4	100.70	2444.7	2545.4	0.3534	8.5794	24
25	0.03169	1.0029	43.360	104.88	2409.8	104.89	2442.3	2547.2	0.3674	8.5580	25
26	0.03363	1.0032	40.994	109.06	2411.1	109.07	2439.9	2549.0	0.3814	8.5367	26
27	0.03567	1.0035	38.774	113.25	2412.5	113.25	2437.6	2550.8	0.3954	8.5156	27
28	0.03782	1.0037	36.690	117.42	2413.9	117.43	2435.2	2552.6	0.4093	8.4946	28
29	0.04008	1.0040	34.733	121.60	2415.2	121.61	2432.8	2554.5	0.4231	8.4739	29
30	0.04246	1.0043	32.894	125.78	2416.6	125.79	2430.5	2556.3	0.4369	8.4533	30
31	0.04496	1.0046	31.165	129.96	2418.0	129.97	2428.1	2558.1	0.4507	8.4329	31
32	0.04759	1.0050	29.540	134.14	2419.3	134.15	2425.7	2559.9	0.4644	8.4127	32
33	0.05034	1.0053	28.011	138.32	2420.7	138.33	2423.4	2561.7	0.4781	8.3927	33
34	0.05324	1.0056	26.571	142.50	2422.0	142.50	2421.0	2563.5	0.4917	8.3728	34
35	0.05628	1.0060	25.216	146.67	2423.4	146.68	2418.6	2565.3	0.5053	8.3531	35
36	0.05947	1.0063	23.940	150.85	2424.7	150.86	2416.2	2567.1	0.5188	8.3336	36
38	0.06632	1.0071	21.602	159.20	2427.4	159.21	2411.5	2570.7	0.5458	8.2950	38
40	0.07384	1.0078	19.523	167.56	2430.1	167.57	2406.7	2574.3	0.5725	8.2570	40
45	0.09593	1.0099	15.258	188.44	2436.8	188.45	2394.8	2583.2	0.6387	8.1648	45
50	0.1235	1.0121	12.032	209.32	2443.5	209.33	2382.7	2592.1	.7038	8.0763	50
55	0.1576	1.0146	9.568	230.21	2450.1	230.23	2370.7	2600.9	.7679	7.9913	55
60	0.1994	1.0172	7.671	251.11	2456.6	251.13	2358.5	2609.6	.8312	7.9096	60
65	0.2503	1.0199	6.197	272.02	2463.1	272.06	2346.2	2618.3	.8935	7.8310	65
70	0.3119	1.0228	5.042	292.95	2469.6	292.98	2333.8	2626.8	.9549	7.7553	70
75	0.3858	1.0259	4.131	313.90	2475.9	313.93	2321.4	2635.3	1.0155	7.6824	75
80	0.4739	1.0291	3.407	334.86	2482.2	334.91	2308.8	2643.7	1.0753	7.6122	80
85	0.5783	1.0325	2.828	355.84	2488.4	355.90	2296.0	2651.9	1.1343	7.5445	85
90	0.7014	1.0360	2.361	376.85	2494.5	376.92	2283.2	2660.1	1.1925	7.4791	90
95	0.8455	1.0397	1.982	397.88	2500.6	397.96	2270.2	2668.1	1.2500	7.4159	95

Fonte: Moran e Shapiro (2006).

ANEXO 3

Anexo 3: Tabela de Saturação da Água (continuação)

Table T-2 (Continued)

Temp. °C	Press. bar	Specific Volume m ³ /kg		Internal Energy kJ/kg		Enthalpy kJ/kg			Entropy kJ/kg · K		Temp. °C
		Sat. Liquid $v_f \times 10^3$	Sat. Vapor v_g	Sat. Liquid u_f	Sat. Vapor u_g	Sat. Liquid h_f	Evap. h_{fg}	Sat. Vapor h_g	Sat. Liquid s_f	Sat. Vapor s_g	
100	1.014	1.0435	1.673	418.94	2506.5	419.04	2257.0	2676.1	1.3069	7.3549	100
110	1.433	1.0516	1.210	461.14	2518.1	461.30	2230.2	2691.5	1.4185	7.2387	110
120	1.985	1.0603	0.8919	503.50	2529.3	503.71	2202.6	2706.3	1.5276	7.1296	120
130	2.701	1.0697	0.6685	546.02	2539.9	546.31	2174.2	2720.5	1.6344	7.0269	130
140	3.613	1.0797	0.5089	588.74	2550.0	589.13	2144.7	2733.9	1.7391	6.9299	140
150	4.758	1.0905	0.3928	631.68	2559.5	632.20	2114.3	2746.5	1.8418	6.8379	150
160	6.178	1.1020	0.3071	674.86	2568.4	675.55	2082.6	2758.1	1.9427	6.7502	160
170	7.917	1.1143	0.2428	718.33	2576.5	719.21	2049.5	2768.7	2.0419	6.6663	170
180	10.02	1.1274	0.1941	762.09	2583.7	763.22	2015.0	2778.2	2.1396	6.5857	180
190	12.54	1.1414	0.1565	806.19	2590.0	807.62	1978.8	2786.4	2.2359	6.5079	190
200	15.54	1.1565	0.1274	850.65	2595.3	852.45	1940.7	2793.2	2.3309	6.4323	200
210	19.06	1.1726	0.1044	895.53	2599.5	897.76	1900.7	2798.5	2.4248	6.3585	210
220	23.18	1.1900	0.08619	940.87	2602.4	943.62	1858.5	2802.1	2.5178	6.2861	220
230	27.95	1.2088	0.07158	986.74	2603.9	990.12	1813.8	2804.0	2.6099	6.2146	230
240	33.44	1.2291	0.05976	1033.2	2604.0	1037.3	1766.5	2803.8	2.7015	6.1437	240
250	39.73	1.2512	0.05013	1080.4	2602.4	1085.4	1716.2	2801.5	2.7927	6.0730	250
260	46.88	1.2755	0.04221	1128.4	2599.0	1134.4	1662.5	2796.6	2.8838	6.0019	260
270	54.99	1.3023	0.03564	1177.4	2593.7	1184.5	1605.2	2789.7	2.9751	5.9301	270
280	64.12	1.3321	0.03017	1227.5	2586.1	1236.0	1543.6	2779.6	3.0668	5.8571	280
290	74.36	1.3656	0.02557	1278.9	2576.0	1289.1	1477.1	2766.2	3.1594	5.7821	290
300	85.81	1.4036	0.02167	1332.0	2563.0	1344.0	1404.9	2749.0	3.2534	5.7045	300
320	112.7	1.4988	0.01549	1444.6	2525.5	1461.5	1238.6	2700.1	3.4480	5.5362	320
340	145.9	1.6379	0.01080	1570.3	2464.6	1594.2	1027.9	2622.0	3.6594	5.3357	340
360	186.5	1.8925	0.006945	1725.2	2351.5	1760.5	720.5	2481.0	3.9147	5.0526	360
374.14	220.9	3.155	0.003155	2029.6	2029.6	2099.3	0	2099.3	4.4298	4.4298	374.14

Source: Tables T-2 through T-5 are extracted from J. H. Keenan, F. G. Keyes, P. G. Hill, and J. G. Moore, *Steam Tables*, Wiley, New York, 1969.

Table T-3 Properties of Saturated Water (Liquid-Vapor): Pressure Table

Press. bar	Temp. °C	Specific Volume m ³ /kg		Internal Energy kJ/kg		Enthalpy kJ/kg			Entropy kJ/kg · K		Press. bar
		Sat. Liquid $v_f \times 10^3$	Sat. Vapor v_g	Sat. Liquid u_f	Sat. Vapor u_g	Sat. Liquid h_f	Evap. h_{fg}	Sat. Vapor h_g	Sat. Liquid s_f	Sat. Vapor s_g	
0.04	28.96	1.0040	34.800	121.45	2415.2	121.46	2432.9	2554.4	0.4226	8.4746	0.04
0.06	36.16	1.0064	23.739	151.53	2425.0	151.53	2415.9	2567.4	0.5210	8.3304	0.06
0.08	41.51	1.0084	18.103	173.87	2432.2	173.88	2403.1	2577.0	0.5926	8.2287	0.08
0.10	45.81	1.0102	14.674	191.82	2437.9	191.83	2392.8	2584.7	0.6493	8.1502	0.10
0.20	60.06	1.0172	7.649	251.38	2456.7	251.40	2358.3	2609.7	0.8320	7.9085	0.20
0.30	69.10	1.0223	5.229	289.20	2468.4	289.23	2336.1	2625.3	0.9439	7.7686	0.30
0.40	75.87	1.0265	3.993	317.53	2477.0	317.58	2319.2	2636.8	1.0259	7.6700	0.40
0.50	81.33	1.0300	3.240	340.44	2483.9	340.49	2305.4	2645.9	1.0910	7.5939	0.50
0.60	85.94	1.0331	2.732	359.79	2489.6	359.86	2293.6	2653.5	1.1453	7.5320	0.60
0.70	89.95	1.0360	2.365	376.63	2494.5	376.70	2283.3	2660.0	1.1919	7.4797	0.70

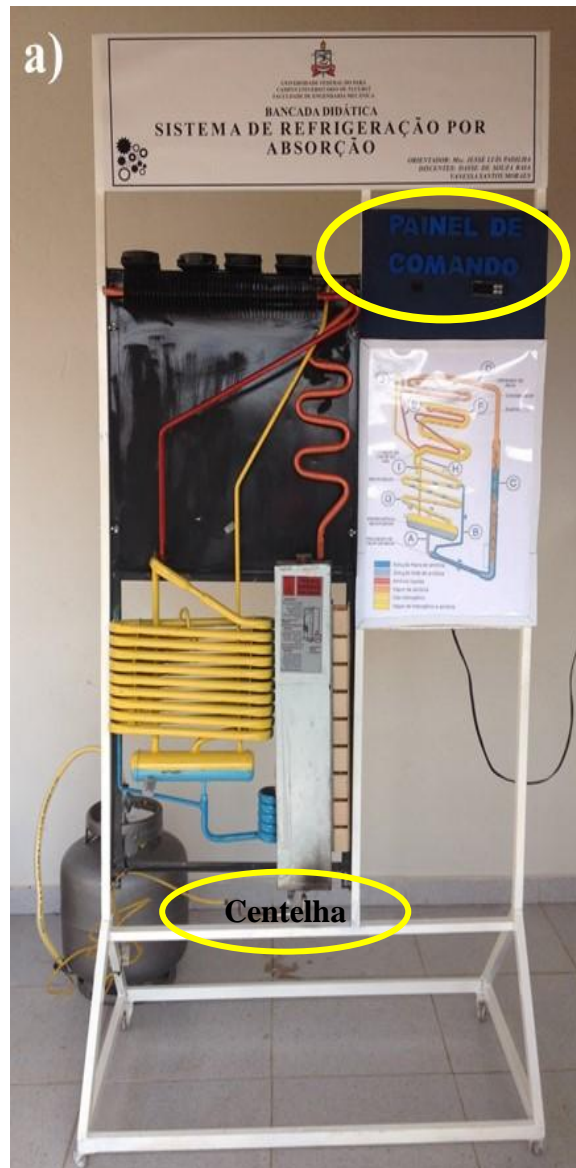
Fonte: Moran e Shapiro (2006).

APÊNDICE A - ROTEIRO DO EXPERIMENTO

ETAPA 1

PASSO 1- Ligar a válvula do botijão;

PASSO 2- Com o auxílio de um isqueiro acender a centelha localizada na parte inferior do gerador;



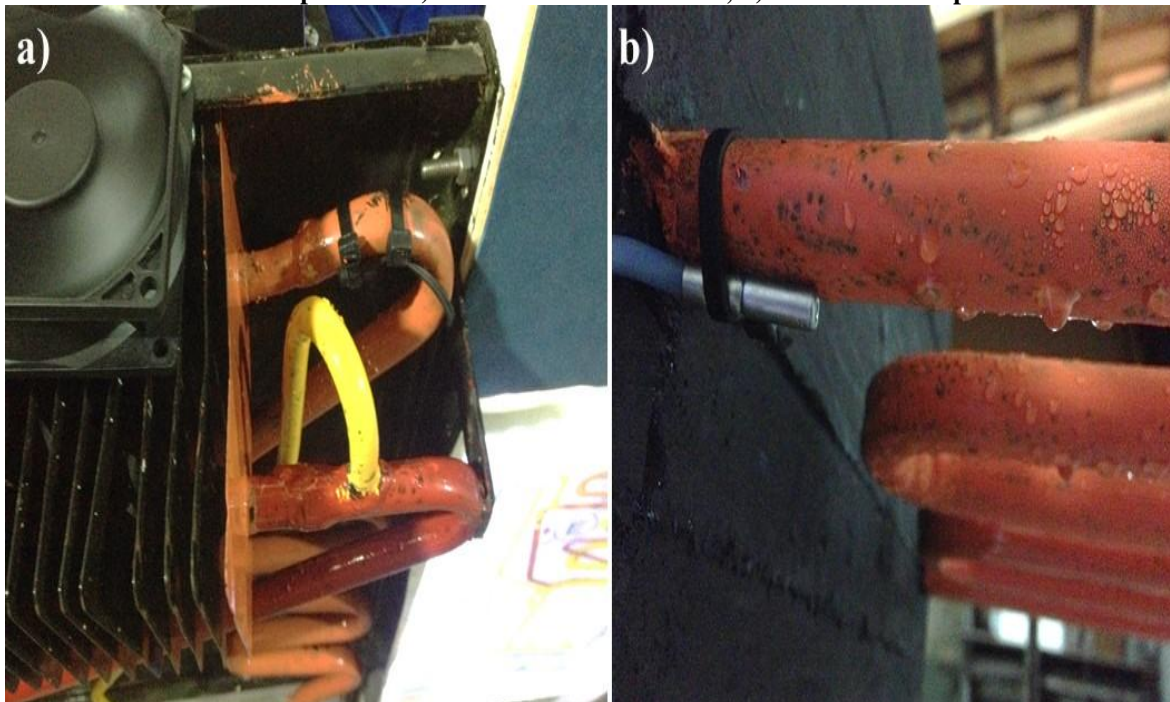
PASSO 3- Ligar o plug da bancada à tomada;

PASSO 4- Ligar a chave liga desliga do painel de comando;

PASSO 5- Aguardar 4 horas após o início do funcionamento;

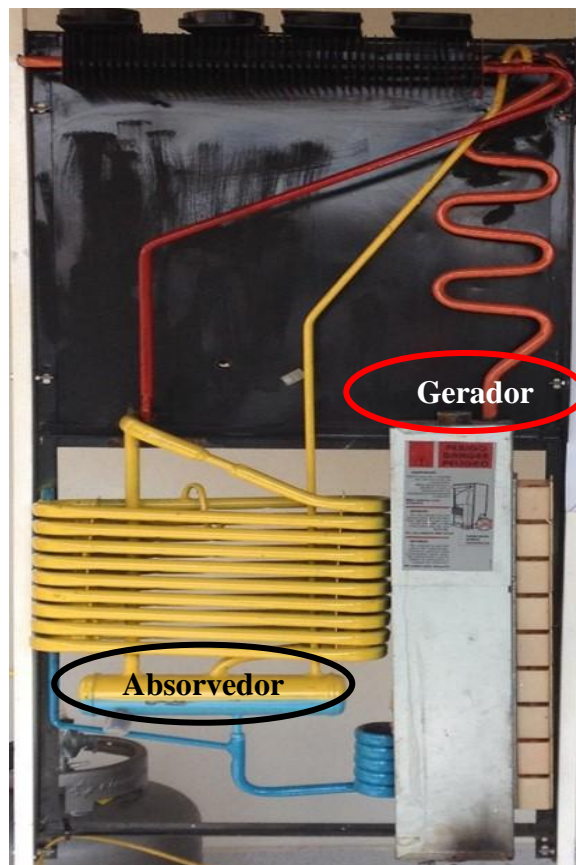
PASSO 6- Coletar as informações das temperaturas da entrada do condensador e do evaporador disponível no painel de comando;

Sensores de temperatura a) Entrada do Condensador; b) Entrada do Evaporador.



Fonte: Autoria própria.

PASSO 7- Utilizar um termômetro para aferir a temperatura no gerador e no absorvedor;



Fonte: Autoria própria

PASSO 8- Organizar os dados referentes a temperatura dos elementos do sistema em tabelas;

ETAPA 2

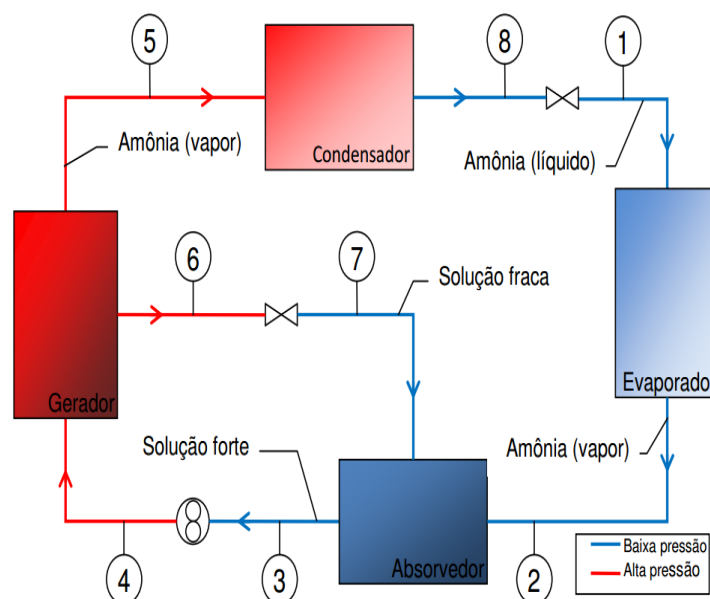
PASSO 9- Realizar a análise de desempenho utilizando tais passos:

Hipóteses simplificadoras:

- I. Somente amônia pura flui no condensador e evaporador;
- II. A perda de carga devida ao fluxo nas tubulações e recipientes é nula;
- III. Não há superaquecimento na saída do evaporador (o estado da amônia na saída do evaporador é o de vapor saturado, na temperatura de evaporação);
- IV. Os dispositivos de expansão operam adiabaticamente;
- V. A bomba opera isentropicamente;
- VI. As pressões dentro dos componentes são constantes;
- VII. O sistema opera em regime permanente;
- VIII. Para fins de cálculo foi assumida a vazão de 0,6 kg/s podendo variar até 0,8 kg/s.
- IX. No presente trabalho, foi adotado que as faixas de trabalho de sistemas de absorção simples operam com concentrações de amônia na solução variando em média entre 30 % e 40 %, ou seja, a concentração da solução rica, que sai do absorvedor, tem 40 % de amônia em relação à massa total da solução, e a que retorna do gerador, pobre, tem 30 %. (MÜHLE, 2008 apud MENNA 2008).

PASSO 10 – Identificar os pontos conforme apresentam-se no fluxograma

Figura 1. Fluxograma de um sistema de absorção de simples efeito



Fonte: Menna (2008)

- Fazer o balanço de massa do sistema de modo análogo ao apresentado abaixo:

$$\dot{m}_4 = \dot{m}_3 = 0,6 \text{ kg/s}$$

$$x_4 = 0,3 - 0,4$$

$$x_3 = 0,4 - 0,5$$

$$\dot{m}_4 \cdot x_4 = \dot{m}_6 \cdot x_6$$

$$\dot{m}_6 + \dot{m}_5 = \dot{m}_4$$

$$\dot{m}_6 = \dot{m}_7$$

$$\dot{m}_5 = \dot{m}_8 = \dot{m}_1 = \dot{m}_2$$

$$\dot{m}_6 + \dot{m}_5 = \dot{m}_4 = \dot{m}_3$$

- Encontrar as entalpias da solução utilizando as temperaturas e os títulos dos pontos 3 e 4 do absorvedor e dos pontos 6 e 7 referente ao gerador, utilizando o Diagrama entalpia-concentração para soluções água-amônia a seguir:

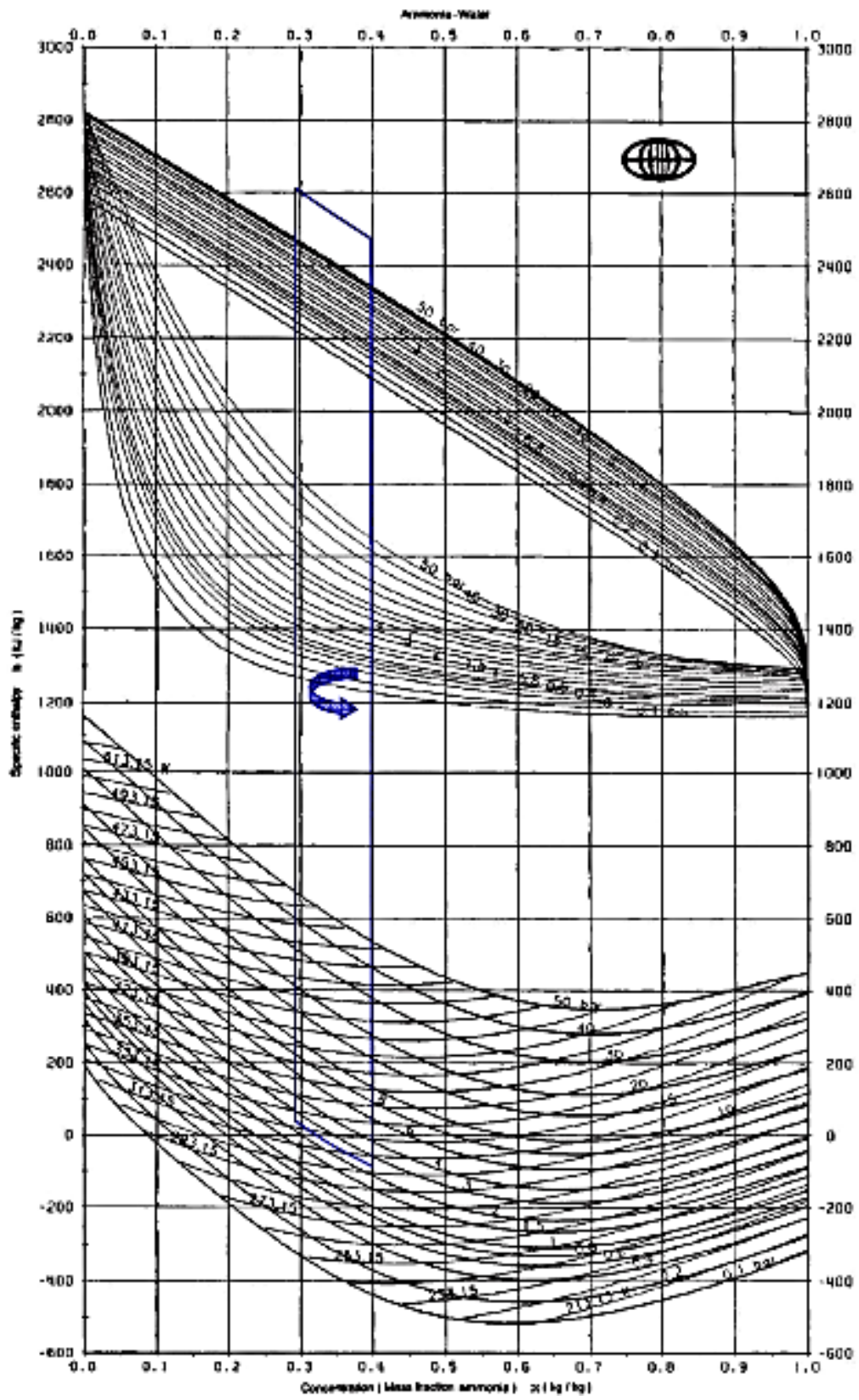
- Entalpia do absorvedor

$$h_4 = h_3 \text{ (Temperatura do Absorvedor e concentração de amônia } x_3 = 0,4)$$

- Entalpia do gerador

$$h_6 = h_7 \text{ (Temperatura do Gerador e concentração de amônia } x_4 = 0,3)$$

Tabela 4: Diagrama entalpia-concentração para soluções água-amônia



(Perry, 2007 apud Menna, 2008)

Fonte:

PASSO 11 – Encontrar as demais entalpias do sistema utilizando as temperaturas encontradas anteriormente no PASSO 6 e 7 e consultar a Tabela de Água Saturada Líquido-Vapor abaixo.

Tabela 2: Tabela de água Saturada Líquido-Vapor

Table T-2 Properties of Saturated Water (Liquid-Vapor): Temperature Table

Temp. °C	Press. bar	Specific Volume m ³ /kg		Internal Energy kJ/kg		Enthalpy kJ/kg			Entropy kJ/kg · K		Temp. °C
		Sat. Liquid $v_f \times 10^3$	Sat. Vapor v_g	Sat. Liquid u_f	Sat. Vapor u_g	Sat. Liquid h_f	Evap. h_{fg}	Sat. Vapor h_g	Sat. Liquid s_f	Sat. Vapor s_g	
.01	0.00611	1.0002	206.136	0.00	2375.3	0.01	2501.3	2501.4	0.0000	9.1562	.01
4	0.00813	1.0001	157.232	16.77	2380.9	16.78	2491.9	2508.7	0.0610	9.0514	4
5	0.00872	1.0001	147.120	20.97	2382.3	20.98	2489.6	2510.6	0.0761	9.0257	5
6	0.00935	1.0001	137.734	25.19	2383.6	25.20	2487.2	2512.4	0.0912	9.0003	6
8	0.01072	1.0002	120.917	33.59	2386.4	33.60	2482.5	2516.1	0.1212	8.9501	8
10	0.01228	1.0004	106.379	42.00	2389.2	42.01	2477.7	2519.8	0.1510	8.9008	10
11	0.01312	1.0004	99.857	46.20	2390.5	46.20	2475.4	2521.6	0.1658	8.8765	11
12	0.01402	1.0005	93.784	50.41	2391.9	50.41	2473.0	2523.4	0.1806	8.8524	12
13	0.01497	1.0007	88.124	54.60	2393.3	54.60	2470.7	2525.3	0.1953	8.8285	13
14	0.01598	1.0008	82.848	58.79	2394.7	58.80	2468.3	2527.1	0.2099	8.8048	14
15	0.01705	1.0009	77.926	62.99	2396.1	62.99	2465.9	2528.9	0.2245	8.7814	15
16	0.01818	1.0011	73.333	67.18	2397.4	67.19	2463.6	2530.8	0.2390	8.7582	16
17	0.01938	1.0012	69.044	71.38	2398.8	71.38	2461.2	2532.6	0.2535	8.7351	17
18	0.02064	1.0014	65.038	75.57	2400.2	75.58	2458.8	2534.4	0.2679	8.7123	18
19	0.02198	1.0016	61.293	79.76	2401.6	79.77	2456.5	2536.2	0.2823	8.6897	19
20	0.02339	1.0018	57.791	83.95	2402.9	83.96	2454.1	2538.1	0.2966	8.6672	20
21	0.02487	1.0020	54.514	88.14	2404.3	88.14	2451.8	2539.9	0.3109	8.6450	21
22	0.02645	1.0022	51.447	92.32	2405.7	92.33	2449.4	2541.7	0.3251	8.6229	22
23	0.02810	1.0024	48.574	96.51	2407.0	96.52	2447.0	2543.5	0.3393	8.6011	23
24	0.02985	1.0027	45.883	100.70	2408.4	100.70	2444.7	2545.4	0.3534	8.5794	24
25	0.03169	1.0029	43.360	104.88	2409.8	104.89	2442.3	2547.2	0.3674	8.5580	25
26	0.03363	1.0032	40.994	109.06	2411.1	109.07	2439.9	2549.0	0.3814	8.5367	26
27	0.03567	1.0035	38.774	113.25	2412.5	113.25	2437.6	2550.8	0.3954	8.5156	27
28	0.03782	1.0037	36.690	117.42	2413.9	117.43	2435.2	2552.6	0.4093	8.4946	28
29	0.04008	1.0040	34.733	121.60	2415.2	121.61	2432.8	2554.5	0.4231	8.4739	29
30	0.04246	1.0043	32.894	125.78	2416.6	125.79	2430.5	2556.3	0.4369	8.4533	30
31	0.04496	1.0046	31.165	129.96	2418.0	129.97	2428.1	2558.1	0.4507	8.4329	31
32	0.04759	1.0050	29.540	134.14	2419.3	134.15	2425.7	2559.9	0.4644	8.4127	32
33	0.05034	1.0053	28.011	138.32	2420.7	138.33	2423.4	2561.7	0.4781	8.3927	33
34	0.05324	1.0056	26.571	142.50	2422.0	142.50	2421.0	2563.5	0.4917	8.3728	34
35	0.05628	1.0060	25.216	146.67	2423.4	146.68	2418.6	2565.3	0.5053	8.3531	35
36	0.05947	1.0063	23.940	150.85	2424.7	150.86	2416.2	2567.1	0.5188	8.3336	36
38	0.06632	1.0071	21.602	159.20	2427.4	159.21	2411.5	2570.7	0.5458	8.2950	38
40	0.07384	1.0078	19.523	167.56	2430.1	167.57	2406.7	2574.3	0.5725	8.2570	40
45	0.09593	1.0099	15.258	188.44	2436.8	188.45	2394.8	2583.2	0.6387	8.1648	45
50	0.1235	1.0121	12.032	209.32	2443.5	209.33	2382.7	2592.1	.7038	8.0763	50
55	0.1576	1.0146	9.568	230.21	2450.1	230.23	2370.7	2600.9	.7679	7.9913	55
60	0.1994	1.0172	7.671	251.11	2456.6	251.13	2358.5	2609.6	.8312	7.9096	60
65	0.2503	1.0199	6.197	272.02	2463.1	272.06	2346.2	2618.3	.8935	7.8310	65
70	0.3119	1.0228	5.042	292.95	2469.6	292.98	2333.8	2626.8	.9549	7.7553	70
75	0.3858	1.0259	4.131	313.90	2475.9	313.93	2321.4	2635.3	1.0155	7.6824	75
80	0.4739	1.0291	3.407	334.86	2482.2	334.91	2308.8	2643.7	1.0753	7.6122	80
85	0.5783	1.0325	2.828	355.84	2488.4	355.90	2296.0	2651.9	1.1343	7.5445	85
90	0.7014	1.0360	2.361	376.85	2494.5	376.92	2283.2	2660.1	1.1925	7.4791	90
95	0.8455	1.0397	1.982	397.88	2500.6	397.96	2270.2	2668.1	1.2500	7.4159	95

Fonte: Moran e Shapiro (2006).

Tabela 3: Tabela de Saturação da Água (continuação)

Table T-2 (Continued)

Temp. °C	Press. bar	Specific Volume m ³ /kg		Internal Energy kJ/kg		Enthalpy kJ/kg			Entropy kJ/kg · K		Temp. °C
		Sat. Liquid $v_f \times 10^3$	Sat. Vapor v_g	Sat. Liquid u_f	Sat. Vapor u_g	Sat. Liquid h_f	Evap. h_{fg}	Sat. Vapor h_g	Sat. Liquid s_f	Sat. Vapor s_g	
100	1.014	1.0435	1.673	418.94	2506.5	419.04	2257.0	2676.1	1.3069	7.3549	100
110	1.433	1.0516	1.210	461.14	2518.1	461.30	2230.2	2691.5	1.4185	7.2387	110
120	1.985	1.0603	0.8919	503.50	2529.3	503.71	2202.6	2706.3	1.5276	7.1296	120
130	2.701	1.0697	0.6685	546.02	2539.9	546.31	2174.2	2720.5	1.6344	7.0269	130
140	3.613	1.0797	0.5089	588.74	2550.0	589.13	2144.7	2733.9	1.7391	6.9299	140
150	4.758	1.0905	0.3928	631.68	2559.5	632.20	2114.3	2746.5	1.8418	6.8379	150
160	6.178	1.1020	0.3071	674.86	2568.4	675.55	2082.6	2758.1	1.9427	6.7502	160
170	7.917	1.1143	0.2428	718.33	2576.5	719.21	2049.5	2768.7	2.0419	6.6663	170
180	10.02	1.1274	0.1941	762.09	2583.7	763.22	2015.0	2778.2	2.1396	6.5857	180
190	12.54	1.1414	0.1565	806.19	2590.0	807.62	1978.8	2786.4	2.2359	6.5079	190
200	15.54	1.1565	0.1274	850.65	2595.3	852.45	1940.7	2793.2	2.3309	6.4323	200
210	19.06	1.1726	0.1044	895.53	2599.5	897.76	1900.7	2798.5	2.4248	6.3585	210
220	23.18	1.1900	0.08619	940.87	2602.4	943.62	1858.5	2802.1	2.5178	6.2861	220
230	27.95	1.2088	0.07158	986.74	2603.9	990.12	1813.8	2804.0	2.6099	6.2146	230
240	33.44	1.2291	0.05976	1033.2	2604.0	1037.3	1766.5	2803.8	2.7015	6.1437	240
250	39.73	1.2512	0.05013	1080.4	2602.4	1085.4	1716.2	2801.5	2.7927	6.0730	250
260	46.88	1.2755	0.04221	1128.4	2599.0	1134.4	1662.5	2796.6	2.8838	6.0019	260
270	54.99	1.3023	0.03564	1177.4	2593.7	1184.5	1605.2	2789.7	2.9751	5.9301	270
280	64.12	1.3321	0.03017	1227.5	2586.1	1236.0	1543.6	2779.6	3.0668	5.8571	280
290	74.36	1.3656	0.02557	1278.9	2576.0	1289.1	1477.1	2766.2	3.1594	5.7821	290
300	85.81	1.4036	0.02167	1332.0	2563.0	1344.0	1404.9	2749.0	3.2534	5.7045	300
320	112.7	1.4988	0.01549	1444.6	2525.5	1461.5	1238.6	2700.1	3.4480	5.5362	320
340	145.9	1.6379	0.01080	1570.3	2464.6	1594.2	1027.9	2622.0	3.6594	5.3357	340
360	186.5	1.8925	0.006945	1725.2	2351.5	1760.5	720.5	2481.0	3.9147	5.0526	360
374.14	220.9	3.155	0.003155	2029.6	2029.6	2099.3	0	2099.3	4.4298	4.4298	374.14

Source: Tables T-2 through T-5 are extracted from J. H. Keenan, F. G. Keyes, P. G. Hill, and J. G. Moore, *Steam Tables*, Wiley, New York, 1969.

Table T-3 Properties of Saturated Water (Liquid-Vapor): Pressure Table

Press. bar	Temp. °C	Specific Volume m ³ /kg		Internal Energy kJ/kg		Enthalpy kJ/kg			Entropy kJ/kg · K		Press. bar
		Sat. Liquid $v_f \times 10^3$	Sat. Vapor v_g	Sat. Liquid u_f	Sat. Vapor u_g	Sat. Liquid h_f	Evap. h_{fg}	Sat. Vapor h_g	Sat. Liquid s_f	Sat. Vapor s_g	
0.04	28.96	1.0040	34.800	121.45	2415.2	121.46	2432.9	2554.4	0.4226	8.4746	0.04
0.06	36.16	1.0064	23.739	151.53	2425.0	151.53	2415.9	2567.4	0.5210	8.3304	0.06
0.08	41.51	1.0084	18.103	173.87	2432.2	173.88	2403.1	2577.0	0.5926	8.2287	0.08
0.10	45.81	1.0102	14.674	191.82	2437.9	191.83	2392.8	2584.7	0.6493	8.1502	0.10
0.20	60.06	1.0172	7.649	251.38	2456.7	251.40	2358.3	2609.7	0.8320	7.9085	0.20
0.30	69.10	1.0223	5.229	289.20	2468.0	289.23	2336.1	2625.3	0.9439	7.7686	0.30
0.40	75.87	1.0265	3.993	317.53	2477.0	317.58	2319.2	2636.8	1.0259	7.6700	0.40
0.50	81.33	1.0300	3.240	340.44	2483.9	340.49	2305.4	2645.9	1.0910	7.5939	0.50
0.60	85.94	1.0331	2.732	359.79	2489.6	359.86	2293.6	2653.5	1.1453	7.5320	0.60
0.70	89.95	1.0360	2.365	376.63	2494.5	376.70	2283.3	2660.0	1.1919	7.4797	0.70

Fonte: Moran e Shapiro (2006).

- Encontrar a entalpia da água líquida e vapor de água;

$$h_5 = h_v$$

$$h_8 = h_1 = h_e$$

$$h_2 = h_v$$

- Fazer o balanço de energia do Gerador;

$$\dot{Q}_g + \dot{m}_4 \cdot h_4 = \dot{m}_6 \cdot h_6 + \dot{m}_5 \cdot h_5$$

$$\dot{Q}_g = \dot{m}_6 \cdot h_6 + \dot{m}_5 \cdot h_5 - \dot{m}_4 \cdot h_4$$

- Fazer o balanço de energia do condensador;

$$\begin{aligned}\dot{m}_5 h_5 &= \dot{m}_8 h_8 + \dot{Q}_c \\ \dot{m}_5 &= \dot{m}_8 = \dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}_c \\ \dot{Q}_c &= \dot{m}_c (h_5 - h_8)\end{aligned}$$

- Fazer o balanço de energia do absorvedor;

$$\begin{aligned}\dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_7 h_7 &= \dot{m}_3 h_3 + \dot{Q}_a \\ \dot{Q}_a &= \dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_7 h_7 - \dot{m}_3 h_3\end{aligned}$$

- Fazer o balanço de energia no evaporador.

$$\begin{aligned}\dot{Q}_e + \dot{m}_1 h_1 &= \dot{m}_2 h_2 \\ \dot{m}_1 &= \dot{m}_2 = \dot{m}_e \\ \dot{Q}_e &= \dot{m}_e (h_2 - h_1)\end{aligned}$$

PASSO 12- Calcular o COP do Sistema de Absorção (Ciclo Real);

$$COP_{abs} = \frac{Q_e}{Q_g}$$

PASSO 13- Calcular o COP de Potência;

$$\begin{aligned}COP_{POT} &= \frac{Q_g}{W} \\ COP_{POT} &= \frac{T_g}{T_g - T_a}\end{aligned}$$

PASSO 14- Calcular o COP de Compressão;

$$\begin{aligned}COP_{COMP} &= \frac{Q_e}{W} \\ COP_{COMP} &= \frac{T_e}{T_a - T_e}\end{aligned}$$

PASSO 15- Calcular o COP de Carnot;

$$COP_{carnot} = \frac{Q_e}{Q_g} = \frac{COP_{COMP}}{COP_{POT}}$$

PASSO 16- Calcular a Eficiência de Refrigeração.

$$n_R = \frac{COP_{abs}}{COP_{carn}}$$