



Camila Pereira Lisboa

**DESENVOLVIMENTO DE UM CONCENTRADOR DE SUCO
DE FRUTAS A PARTIR DA REDUÇÃO DA PRESSÃO**

Horizontina

2015

Camila Pereira Lisboa

**DESENVOLVIMENTO DE UM CONCENTRADOR DE SUCO DE
FRUTAS A PARTIR DA REDUÇÃO DA PRESSÃO**

Trabalho Final de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, pelo Curso de Engenharia Mecânica da Faculdade Horizontina.

ORIENTADOR: Anderson Dal Molin, Mestre.

Horizontina

2015

**FAHOR - FACULDADE HORIZONTINA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a monografia:

**“Desenvolvimento de um concentrador de suco de frutas a partir da redução
da pressão”**

Elaborada por:

Camila Pereira Lisboa

Como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Mecânica

**Aprovado em: 13/11/2015
Pela Comissão Examinadora**

**Prof. Me. Anderson Dal Molin
Presidente da Comissão Examinadora - Orientador**

**Prof. Dr. Ademar Michels
FAHOR – Faculdade Horizontina**

**Prof. Dr. Adriano Roberto da Silva Carotenuto
FAHOR – Faculdade Horizontina**

**Horizontina
2015**

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao meu companheiro, Richard Thomas Lermen, aos meus pais, Ademir Hahn Lisboa e Ester Teston Pereira, e ao meu irmão, Rafael Pereira Lisboa.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Faculdade Horizontina – FAHOR – pelo ambiente e recursos disponibilizados. Ao professor Me. Anderson Dal Molin, pela orientação prestada durante a execução deste trabalho. Ao meu companheiro Richard Thomas Lermen, por ter me incentivado, orientado e apoiado sempre nos meus projetos e nas minhas decisões. A minha família e amigos, pelo apoio dado. A todos que de alguma forma contribuíram para minha formação.

“A persistência é o menor caminho do êxito.”

Charles Chaplin

RESUMO

Grande parte das vitaminas e nutrientes encontradas em alimentos são termossensíveis, isto é, sofrem mutação em suas propriedades nutritivas quando submetidas a elevadas temperaturas. O Brasil é um dos maiores exportadores de sucos, porém, sabe-se que esses produtos tem uma vida útil curta e, nesse contexto, aparecem os métodos de concentração de sucos que utilizam, em sua maioria, elevadas temperaturas para obter a evaporação da água, para posterior congelamento (aumentando a vida útil do produto) e exportação. O objetivo deste trabalho foi desenvolver um equipamento capaz de concentrar suco de frutas a temperaturas próximas da ambiente (25 °C). Para tanto, foram utilizados como fluidos o suco de laranja e água, e foram determinadas as pressões de saturação do suco para as temperaturas de 25 °C, 30 °C e 35 °C, através de testes experimentais. O testes com o equipamento foram realizados de acordo com projeto experimental, onde a influência de dois fatores, temperatura e tempo, com três e quatro níveis, respectivamente, foram analisados. Para questão de comparação, foram realizados experimentos com o suco e a água, aquecendo os fluidos à pressão atmosférica até ambos entrarem em ebulição. Os resultados mostraram que a temperatura e o tempo têm influência significativa sobre a evaporação de água nos fluidos, sendo que, para o maior tempo a que foram submetidos, ou seja, 15 minutos, a água tratada apresentou médias de quantidade de massa evaporada de, aproximadamente 18 g, 33 g e 53 g para as temperaturas de 25 °C, 30 °C e 35 °C, respectivamente, e o suco de laranja, apresentou médias de quantidade de massa de água evaporada de 15 g, 28 g e 59 g para as temperaturas de 25 °C, 30 °C e 35 °C, respectivamente. Portanto, foi desenvolvido um equipamento capaz de concentrar sucos de frutas a baixas temperaturas.

Palavras-chaves:

Concentração de suco de fruta – temperatura de saturação – evaporação a baixas pressões

ABSTRACT

Most of the vitamins and nutrients found in foods are thermosensitive, i.e. are mutated in their nutritive properties when submitted to elevated temperatures. Brazil is a major exporter of juices, however, it is known that these products have a short shelf life and, in this context, appear the concentration methods juices using, mostly high temperatures for water evaporation for subsequent freezing (increasing the life of the product) and export. The objective of this study was to develop a device capable of concentrating fruit juice to near ambient temperature (25 °C). Therefore, the fluids used were orange juice and water, and were determined juice saturation pressure for temperatures of 25 ° C, 30 ° C and 35 ° C by means of experimental tests. The tests were performed with the equipment according to an experimental design, where the influence of two factors, time and temperature, three and four levels, respectively, were analyzed. For comparison, experiments were performed with juice and water, heating the fluid at atmospheric pressure to both boiling. The results showed that the temperature and time have significant influence on the evaporation of water in the fluids, and, for as long as they have undergone, 15 minutes, the treated water showed average amount of mass evaporated to approximately 18 g, 33 g and 53 g for temperatures of 25 ° C, 30 ° C and 35 ° C respectively, and orange juice showed means of mass amount of evaporated water of 15 g, 28 g and 59 g for the temperatures of 25 ° C, 30 ° C and 35 ° C respectively. Therefore, a device capable of concentrating fruit juices at low temperatures, has been developed.

Keywords:

Fruit juice concentration - saturation temperature - evaporation at low pressures

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: (a) Representação do fluxo osmótico, (b) do equilíbrio osmótico e (c) da osmose inversa.....	14
Figura 2: Osmose reversa acoplada à evaporação osmótica.....	15
Figura 3: Etapas do processo de concentração de sucos utilizando o método da evaporação.....	16
Figura 4: Exemplo de evaporador de tubos verticais.....	17
Figura 5: Esquema da evaporação de quatro efeitos em série.....	18
Figura 6: Esquema do equipamento.....	19
Figura 7: Diagrama de fases da água.....	21
Figura 8: Projeto do equipamento.....	23
Figura 9: Projeto do equipamento – vista no interior do condensador.....	24
Figura 10: Equipamento para concentração de suco de fruta.....	28
Figura 11: Gráfico da pressão em função da temperatura para diferentes pontos de ebulição do suco de laranja.....	29
Figura 12: Média dos mínimos quadrados da evaporação em função do tempo para a temperatura de 25 °C e pressão de 15 kPa.....	32
Figura 13: Média dos mínimos quadrados da evaporação em função do tempo para a temperatura de 30 °C e pressão de 16 kPa.....	32
Figura 14: Média dos mínimos quadrados da evaporação em função do tempo para a temperatura de 35 °C e pressão de 17 kPa.....	33

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 JUSTIFICATIVA	11
1.2 OBJETIVOS.....	11
2 REVISÃO DA LITERATURA	13
2.1 CONCENTRAÇÃO DE SUCO DE FRUTA.....	13
2.1.1 OSMOSE REVERSA (OR).....	13
2.1.2 EVAPORAÇÃO	16
2.1.3 LIOFILIZAÇÃO	18
2.2 PRINCÍPIOS TERMODINÂMICOS	20
3 METODOLOGIA	23
3.1 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS	23
3.2 MÉTODOS E TÉCNICAS	25
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	28
4.1 DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO E FUNCIONAMENTO	28
4.2 TESTES EXPERIMENTAIS PARA A DETERMINAÇÃO DO PONTO DE EBULIÇÃO PARA DIFERENTES TEMPERATURAS	29
4.3 TESTES EXPERIMENTAIS DE EVAPORAÇÃO E CONDENSAÇÃO UTILIZANDO O EQUIPAMENTO	30
5 CONCLUSÕES	34
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	35
APÊNDICE A – RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS DE EVAPORAÇÃO E CONDENSAÇÃO ..	37

1 INTRODUÇÃO

A necessidade crescente de mão de obra qualificada faz com que pessoas invistam mais tempo em estudos, especializações e desenvolvimento pessoal. Isso resulta em um ritmo de vida mais acelerado, restando pouco tempo para cuidar da alimentação e aumentando o consumo de alimentos processados e industrializados. Ao mesmo tempo, há uma preocupação crescente com a saúde por parte da população e de alguns governos, os quais tentam implantar programas de enriquecimento de alimentos e incentivar os consumidores a optar por uma alimentação mais nutritiva.

Alguns métodos e processos têm sido amplamente estudados com o intuito de melhorar a qualidade de produtos industrializados.

As frutas, por sua vez, são consideradas fontes de vitaminas e seu cultivo está diretamente ligado com o clima, sendo produzidas apenas em determinadas épocas do ano, não sendo possível obter a maioria das frutas durante todas as estações do ano. Porém, pode-se obter o suco da fruta na época de sua produção e criar condições favoráveis de armazenamento para que possa ser consumido em qualquer época do ano.

O congelamento do suco de frutas é uma alternativa para permitir seu consumo em qualquer época do ano, porém, em sua forma natural, o armazenamento em embalagens torna-se economicamente inviável, devido ao volume. Para facilitar esse procedimento, faz-se necessária a diminuição de seu volume, e isso é possível retirando a água contida na solução, isto é, concentrando-o. A água retirada pode ser adicionada novamente ao suco concentrado, fazendo-o voltar ao seu estado original. Ao diminuir o volume facilita-se o transporte e armazenamento, além do congelamento aumentando a vida de prateleira do produto.

As frutas são alimentos ricos em vitaminas e, para obter os sucos concentrados, passam por procedimentos que podem exigir um aumento de temperatura, causando a evaporação da água e separando-a parcialmente da mistura, porém, a temperatura elevada pode causar perda de vitaminas e outros nutrientes contidos no suco.

Buscou-se, portanto, desenvolver um equipamento que possibilite diminuir a pressão no seu interior – no qual foi depositado o fluido – com o intuito de diminuir a temperatura de saturação da água, fazendo com que ela entre em evaporação.

1.1 JUSTIFICATIVA

A forma como são fabricados e processados os alimentos é um dos fatores que está diretamente ligado às perdas de vitaminas. Alguns dos fatores que estão relacionados a essas perdas durante o processamento e estocagem são: a temperatura, o teor de umidade, a presença de oxigênio, pH e incidência de luz (TEIXEIRA; MONTEIRO, 2006).

A laranja é um alimento rico em ácido ascórbico (vitamina C) e a administração da temperatura é um dos fatores mais importantes para manter os teores dessa vitamina e outros nutrientes presentes na fruta. Os nutrientes da fruta são perdidos quando submetidos a temperaturas elevadas, longos períodos de estocagem e baixa umidade relativa (MARQUES, 2008).

A perda de nutrientes, ao realizar processamento de alimentos, faz com que sejam requeridos novos métodos que otimizem os processos, fazendo com que sejam mantidos os nutrientes da fruta ou que a perda dos mesmos sejam minimizadas.

A busca por processos que visam melhorar a qualidade dos alimentos industrializados contribui não apenas para o bem estar individual, mas também para a saúde coletiva. Portanto, um equipamento simples, e que oferece menor perda de vitaminas nos produtos processados por ele, poderá facilitar a produção, agregar valor aos produtos por apresentar uma maior qualidade, no que se refere a vitaminas e nutrientes, e até mesmo oportunizar novas opções de produção no que se refere ao ramo frutífero.

1.2 OBJETIVOS

Desenvolver um equipamento capaz de produzir suco de fruta concentrado, à baixas temperaturas proporcionando um produto com pouca alteração nas propriedades nutricionais existentes no fruto antes de ser processado.

Para alcançar o objetivo geral, alguns objetivos específicos foram considerados:

- a) Desenvolver e construir um equipamento capaz de concentrar sucos a baixas temperaturas, isto é, temperaturas próximas a ambiente (25 °C);

- b) Realizar testes com suco de laranja para encontrar seu ponto de ebulição em baixas pressões e diferentes temperaturas;
- c) Realizar testes experimentais com as temperaturas de 25 °C, 30 °C e 35 °C utilizando as pressões de ebulição encontradas nos testes iniciais (b), controlando a temperatura e pressão durante os testes e medindo a variação de massa após 2, 5, 10 e 15 minutos de processamento;
- d) Realizar testes com água, nas pressões e temperaturas de ebulição definidas para o suco.

2 REVISÃO DA LITERATURA

A revisão da literatura descreve os conceitos fundamentais para o desenvolvimento do presente trabalho. Nesta descrição os seguintes pontos são abordados: concentração de suco de frutas; processos de concentração de sucos; princípios termodinâmicos; e breve descrição do conceito sobre projetos de experimentos.

2.1 CONCENTRAÇÃO DE SUCO DE FRUTA

Todo alimento possui uma quantidade de água em sua composição e as frutas, por sua vez, contém um percentual que varia de 75% a 93%, por esse motivo sua preservação não é econômica (RAMTEKE *et al.*, 1993 *apud*, KESHANI; LUQMAN CHUAH; RUSSLY, 2012).

O suco de laranja contém entre 80% e 90% de água, e a melhor forma de vender e distribuir esse produto é na sua forma concentrada. A maioria dos processos de concentração de suco utilizam técnicas de evaporação para remover a maior parte da água contida no suco (STROBEL, 1984).

As técnicas frequentemente utilizadas no processo de concentração são: destilação por membrana (DM) utilizada na Osmose reversa (OR), e evaporação. Os métodos convencionais para obter suco concentrado, normalmente envolvem a evaporação, a qual requer altas temperaturas o que promove alterações sensoriais (sabor e aroma) e nutricionais, uma vez que são conferidas por componentes voláteis e vitaminas, os quais são termossensíveis (CASSANO *et al.*, 2003; ÁLVAREZ *et al.*, 1998; JESUS *et al.*, 2007).

Pode ser citado, ainda, o processo de liofilização, é uma técnica de secagem utilizada para retirar umidade de materiais através do congelamento e posterior sublimação (MARQUES, 2008).

2.1.1 Osmose Reversa (OR)

O processo por osmose reversa, ou osmose inversa, consiste em aplicar uma pressão de operação maior do que a pressão osmótica da solução, fazendo com que a água permeie da alta para a baixa concentração de solutos. Essas pressões de

operação são elevadas, variando de 10 a 200 bar. Portanto, a OR é considerado uma técnica de pré-concentração, e exige que seja realizado o processo de evaporação convencional (SOUZA *et al.*, 2013; JESUS *et al.*, 2007).

É possível observar, na Figura 1, que há uma membrana permeável entre o solvente e o soluto.

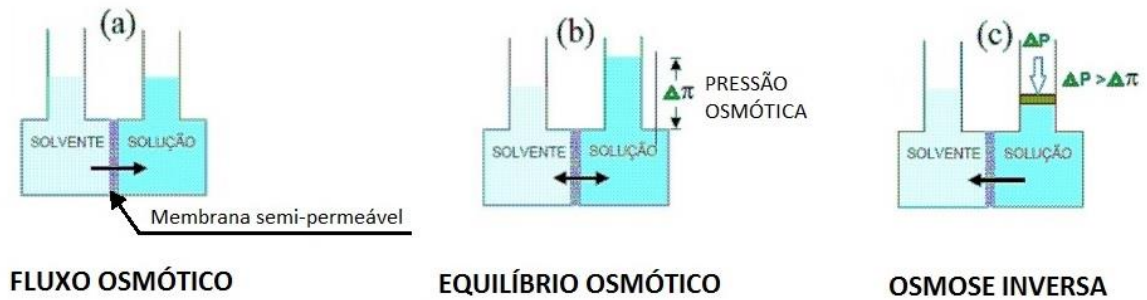


Figura 1: (a) Representação do fluxo osmótico, (b) do equilíbrio osmótico e (c) da osmose inversa. Fonte: Habert; Borges; Nobrega, 2006

A membrana é utilizada para separar o solvente puro do soluto, porém, quando isso acontece, o solvente tende a atravessar a membrana em direção ao soluto para equilibrar a diferença de potencial químico que existe entre as fases. O equilíbrio osmótico é atingido quando a diferença de pressão gerada entre solvente e soluto, atingir a pressão osmótica e, como não há mais força motriz, o equilíbrio osmótico é atingido. Ao aplicar uma diferença de pressão no lado em que encontra-se a solução, o solvente é forçado a atravessar a membrana para o lado de solvente puro, interrompendo o equilíbrio e gerando um fluxo osmótico contrário. Para que isso ocorra, é necessário que a pressão aplicada ao soluto seja maior que a diferença de pressão osmótica da solução (BAKER, 2004).

A membrana utilizada na destilação é microporosa e pode ser usada para remover água a partir de soluções aquosas e sob pressão atmosférica, à temperatura ambiente, evitando, desta forma, a degradação térmica (COUREL *et al.*, 2000; CASSANO *et al.*, 2003).

Se a pressão de operação for mantida abaixo da pressão de penetração capilar do líquido para dentro dos poros da membrana, ela não poderá ser penetrada por soluções. A diferença na concentração do soluto e na atividade da água das soluções gera a diferença de pressão de vapor provocando uma transferência do mesmo a partir da solução diluída para a solução de separação. A água transportada

através da membrana resume-se, basicamente, em três etapas: a evaporação da água na interface líquido-vapor; o vapor é transportado através dos poros da membrana, por meio de convecção ou difusão; e ocorre a condensação do vapor d'água na interface membrana-salmoura (CASSANO *et al.*, 2003).

A sequência de operações de todo processo de OR envolve a clarificação por microfiltração, uma pré-concentração do suco – pela osmose reversa – até 25 Brix, a recuperação de aroma por pervaporação e concentração do caldo clarificado de 25 a 72 Brix utilizando o processo de evaporação térmica (JESUS *et al.*, 2007).

O trabalho de Souza *et al.* (2013) apresenta a sequência do processo de osmose reversa, associada a evaporação osmótica e pode ser visualizada no diagrama apresentado na Figura 2.

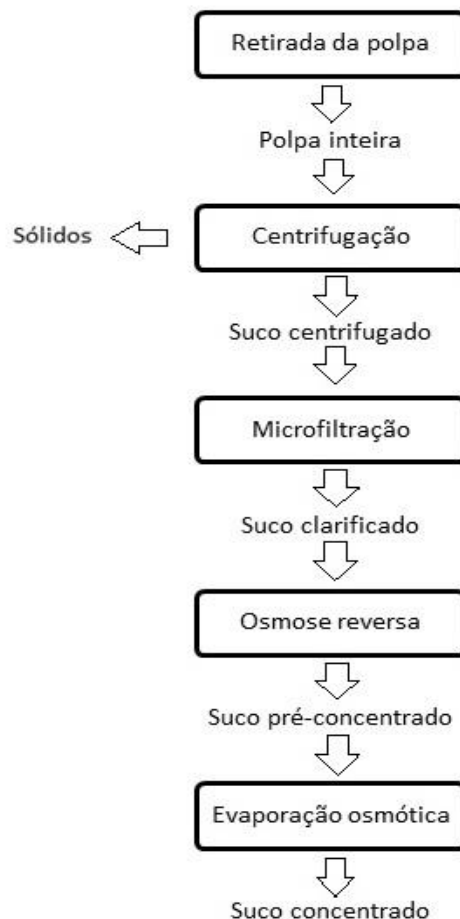


Figura 2: Osmose reversa acoplada à evaporação osmótica. Fonte: Adaptado de Souza *et al.*, 2013

2.1.2 Evaporação

A evaporação é a técnica mais utilizada para concentração de sucos. Para realizar o processo, são necessárias algumas etapas como seleção, classificação e armazenamento dos frutos, porém as principais, que estão diretamente ligadas ao processo, podem ser visualizadas na Figura 3.



Figura 3: Etapas do processo de concentração de sucos utilizando o método da evaporação. Adaptado de MACHADO, 2010

Na extração faz-se a separação do suco da fruta do bagaço, da casca e da semente, em seguida, passa pelo processo de filtração, o qual serve para retirar a polpa e resíduos de bagaço e pode, ainda, passar por um processo de centrifugação para diminuir o teor e polpa. Após esses procedimentos, inicia-se então o processo de concentração, no qual o suco passa por evaporadores de múltiplos estágios, onde a temperatura é elevada gradativamente até atingir 95°C (MACHADO, 2010).

O evaporador de tubos horizontais é o modelo mais antigo de evaporadores, porém, as correntes térmicas induzidas durante o aquecimento não são tão eficientes em relação ao modelos de tubos verticais, sendo menos utilizados atualmente (SILVA, 2013).

O evaporador vertical é um modelo de evaporador utilizado em escala industrial para produzir, por exemplo, café solúvel, leite em pó e açúcar (ROGÉRIO; COSTA; JÚNIOR, 2013).

A Figura 4 mostra um exemplo esquemático desse tipo de evaporador.

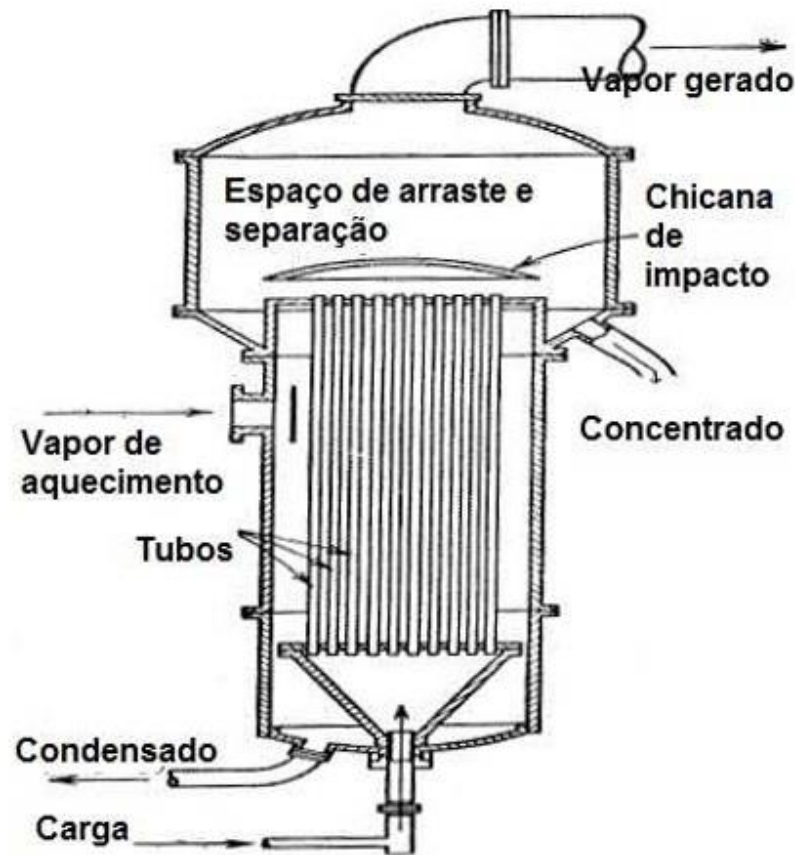


Figura 4: Exemplo de evaporador de tubos verticais. Fonte: Rogério; Costa; Júnior, 2013

Na área dos tubos ocorre o aquecimento através do vapor que entra em contato com a parte externa dos mesmos e, na parte superior, ocorre a separação de água do suco concentrado. O vapor gerado pela solução sai pela parte superior dos tubos, onde encontra-se o fluido, que é projetado contra uma chicana que atua como um eliminador de espuma (ROGÉRIO; COSTA; JÚNIOR, 2013).

Esse modelo de evaporador pode ser instalado em série com outros do mesmo tipo, formando o que é chamado de evaporador de múltiplos estágios. O processo torna-se mais econômico, pois o vapor gerado num evaporador é utilizado como fonte de aquecimento para o seguinte (MENDRONE; SOUSA, 2012).

A Figura 5 ilustra um esquema do processo de evaporação em múltiplos estágios.

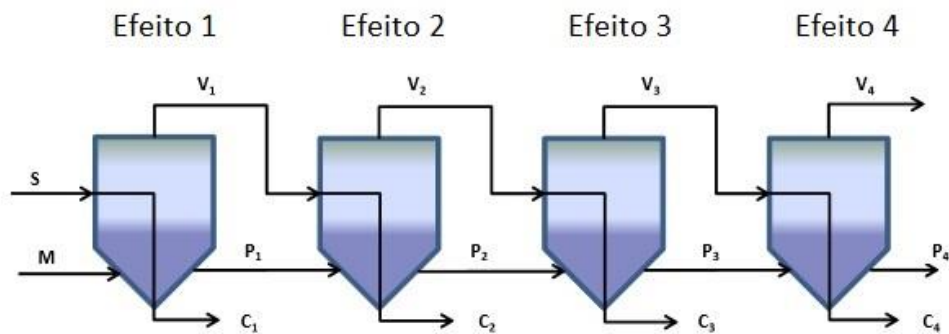


Figura 5: Esquema da evaporação de quatro efeitos em série. Fonte: Mendrone; Sousa, 2012

Onde M é a vazão de entrada do fluido antes de iniciar o processamento, S é a vazão de entrada de vapor de aquecimento, V a saída de vapor de cada efeito (estágio), P é a saída do produto concentrado e C a saída do vapor condensado (MENDRONE; SOUSA, 2012).

A solução a ser concentrada é alimentada até cobrir os tubos e então as válvulas que liberam vapor de aquecimento são acionadas. Inicia-se o regime transiente de temperatura e regulagem de parâmetros até iniciar o processo de ebulição da solução. A circulação da solução de um estágio para outro acontece pela diferença de pressão, exceto pela entrada na alimentação e saída do produto final (MENDRONE; SOUSA, 2012).

2.1.3 Liofilização

A liofilização é uma técnica utilizada para retirar a umidade contida em materiais, como alimentos, materiais biológicos, produtos químicos, farmacêuticos e outros termossensíveis (BOSS, 2004; MARQUES, 2008).

Seu processo baseia-se em congelar a parte líquida de materiais e retirando-a pelo processo de sublimação. É recomendado para materiais termossensíveis por ser realizado a baixas temperaturas e, sob vácuo (MARQUES, 2008).

A água que pretende-se sublimar, contida no material, deve se encontrar na fase sólida. A maioria dos liofilizadores trabalham com valores negativos de temperatura ou a uma pressão absoluta de aproximadamente 266,65 Pa. Este método de desidratação tem como objetivo manter a qualidade do produto, evitando

desnaturação de proteínas e reações enzimáticas, pois a transição de material hidratado para desidratado ocorre rapidamente (BOSS, 2004).

O liofilizador é composto por um painel de controle, câmara de secagem, bandejas de aquecimento, câmara de condensação do vapor, compressor, sistema de vácuo e trocador de calor. O esquema do equipamento é apresentado pela Figura 6.

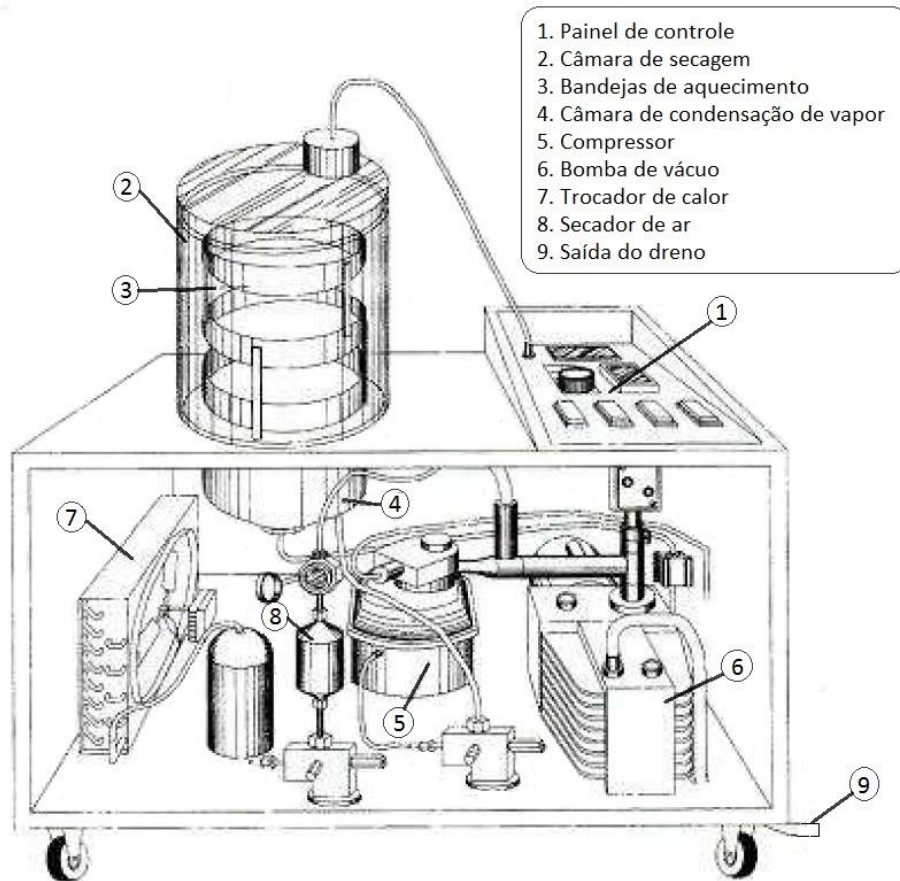


Figura 6: Esquema do equipamento. Fonte: Marques, 2008

As medidas e monitoramento de temperatura e pressão são feitas através do painel de controle. A câmara de secagem é em formato cilíndrico e pode ser de vidro ou acrílico, já a câmara de condensação é composta por condensador de aço inoxidável e um compressor e trocador de calor fazem parte do sistema de refrigeração do equipamento. As bandejas de aquecimento são metálicas e possuem resistores internos em sua base. O sistema a vácuo é composto por uma bomba rotativa de alto vácuo. Há ainda, um secador de ar, para impedir a entrada de ar úmido quando a secagem está completa, e uma saída de dreno, por onde são liberados os vapores da bomba e água do sistema (MARQUES, 2008).

O processo de liofilização divide-se em três etapas principais: congelamento, sublimação ou secagem primária e dessorção ou secagem secundária (MARQUES, 2008).

O congelamento é a primeira etapa do processo e define a forma, tamanho distribuição e conectividade dos poros na camada seca que se forma durante a sublimação (LIAPIS; PIKAL; BRUTINI, 1996). A sublimação ou secagem primária ocorre com o fornecimento de calor durante o processo, mantendo a pressão no liofilizador menor, ou próxima, à pressão de vapor de equilíbrio do solvente congelado (LUCCAS, 1998). A última etapa do processo é dessorção ou secagem secundária e consiste em retirar a água que está ligada à estrutura do material de forma mais lenta do que na sublimação. Também há fornecimento de calor e a temperatura não deve exceder 50 °C (LUCCAS, 1998).

2.2 PRINCÍPIOS TERMODINÂMICOS

Quando ocorre o início ou fim de uma mudança de fase em uma determinada substância, diz-se que ela encontra-se no estado de saturação. A temperatura de saturação é a temperatura em que essa mudança ocorre, a uma determinada pressão, que, por sua vez, é chamada pressão de saturação (MORAN; SHAPIRO, 2002).

Sabe-se que a água entra em ebulição, à pressão atmosférica (1 atm ou 101 kPa), a uma temperatura de aproximadamente 100 °C, ou seja, essa é a temperatura de saturação da água à pressão atmosférica. Outros valores de temperaturas de saturação da água podem ser visualizados na Tabela 1.

Tabela 1
Propriedades termodinâmicas da água

Água saturada em função da temperatura			
Temperatura (°C)	Pressão (kPa)	Líquido saturado (m ³ /kg)	Vapor Saturado (m ³ /kg)
T	P	v _l	v _v
25	3,169	0,001003	43,3593
30	4,246	0,001004	32,8922
35	5,628	0,001006	25,2158
100	101,3	0,001044	1,6729

Fonte: Adaptado de: Borgnakke; Sonntag, 2009.

A Tabela 1 apresentou os valores combinados de temperatura e pressão de saturação para a água pura. A tabela mostra ainda, que quanto maior a temperatura e maior a pressão, o volume específico de líquido saturado (v_l) aumenta e o de vapor saturado (v_v) diminui. É possível verificar a relação da pressão e temperatura através do diagrama de fases, exposto na Figura 7.

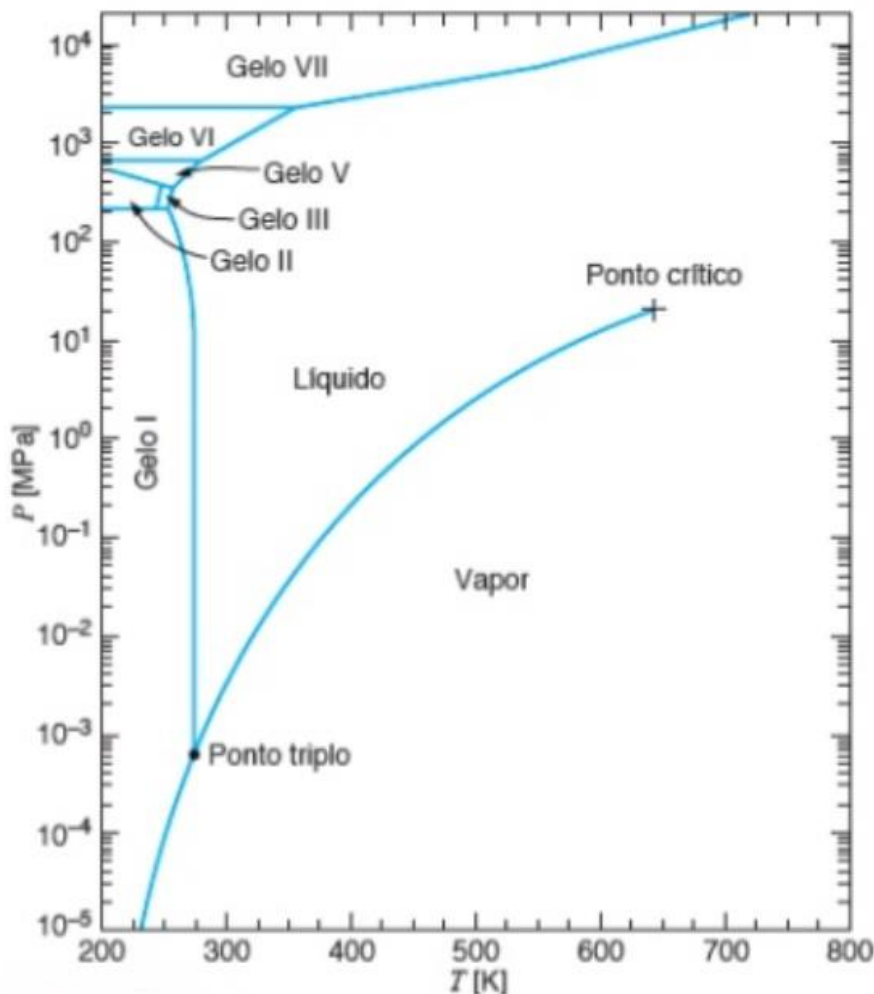


Figura 7: Diagrama de fases da água. Fonte: Borgnakke; Sonntag, 2009 p. 42

O ponto triplo é onde as três fases podem coexistir em equilíbrio, e o ponto crítico é onde os estados de líquido e vapor saturados são idênticos. Acima do ponto crítico haverá apenas uma fase presente e apenas uma variação contínua da massa específica (BORGNAKKE; SONNTAG, 2009).

O diagrama de fases mostra que quanto menor a temperatura, menor será a pressão necessária para que a água passe do estado líquido para vapor, acima do ponto triplo e abaixo do ponto crítico.

Marques (2008), afirma que quando a água inicia a mudança do estado sólido para o gasoso (sublimação), suas moléculas contêm uma quantidade de calor latente significativa, fazendo com que a temperatura do sólido diminua. Se não houver uma fonte térmica abastecendo a substância, a pressão de vapor d'água na temperatura do produto irá se igualar a pressão de vapor parcial que há dentro da câmara de secagem e não ocorrerá mais a sublimação da água contida no produto, pois o sistema entrará em equilíbrio.

Analogamente, a mesma situação ocorre em sistemas em que a água passa do estado líquido para o gasoso, necessitando um fonte de calor para manter a temperatura do produto em um valor determinado.

2.3 PROJETO DE EXPERIMENTOS

Existem várias técnicas desenvolvidas para projetos e análise de experimentos, onde as mais utilizadas são: Planejamento fatorial completo; Planejamento fatorial fracionado; Taguchi – engenharia robusta; e Metodologia da superfície de resposta (MONTGOMERY, 1991).

O planejamento fatorial completo tem aplicações em processos onde já se tem um prévio domínio e onde a realização das corridas (experimentos) não demanda alto tempo e custo. Esta técnica permite varredura completa da região de estudo, pois utiliza todos os fatores e respectivos níveis (MONTGOMERY, 1991).

Para analisar estatisticamente a significância de fatores (parâmetros) sobre uma determinada resposta do processo, utiliza-se a técnica de análise da variância (ANOVA). Esta técnica consiste, basicamente, em um teste de hipótese. A partir dos valores de variância pode-se determinar a probabilidade de erro ao aceitar uma hipótese, a qual é definida por P valor. Este índice é obtido através de uma distribuição de variância em um determinado nível de significância, onde, geralmente, são utilizados níveis de significância acima de 90% (MONTGOMERY, 1991).

3 METODOLOGIA

Na metodologia serão apresentados os equipamentos e materiais que foram utilizados para a realização dos experimentos e, em seguida, apresentada a técnica utilizada para avaliar as variações de massa encontradas.

3.1 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

Para a montagem do equipamento foram utilizados: uma bomba de vácuo, câmara de condensação (câmara de vácuo), recipiente para alojamento do fluido, válvula de regulação de pressão, fonte de potência, ebulidor elétrico, multímetro digital, sensor de temperatura, vacuômetro analógico, balança digital e recipiente de resfriamento, além de mangueira industrial para vácuo e conexões.

Os componentes que compõem o equipamento podem ser visualizados na Figura 8 e na Figura 9 as quais mostram os desenhos esquemáticos do aparato experimental.

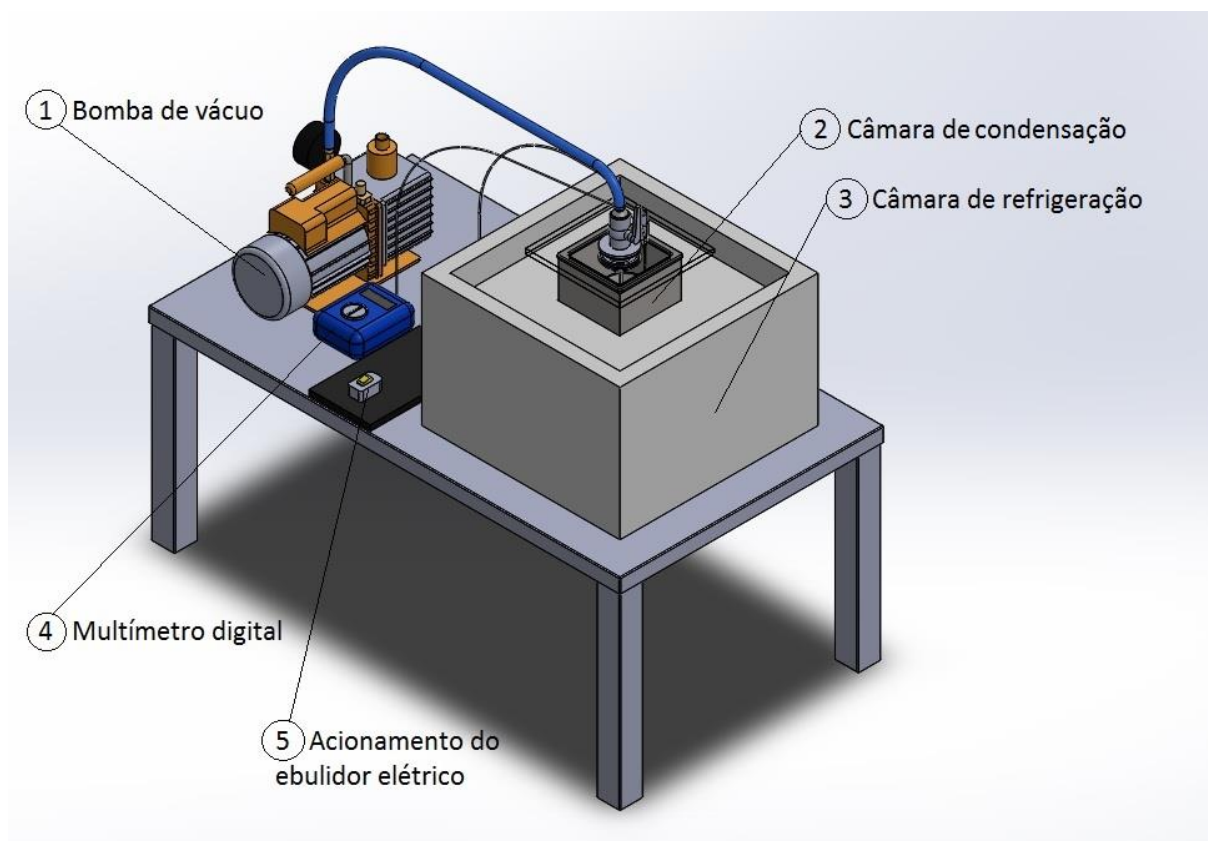


Figura 8: Projeto do equipamento.

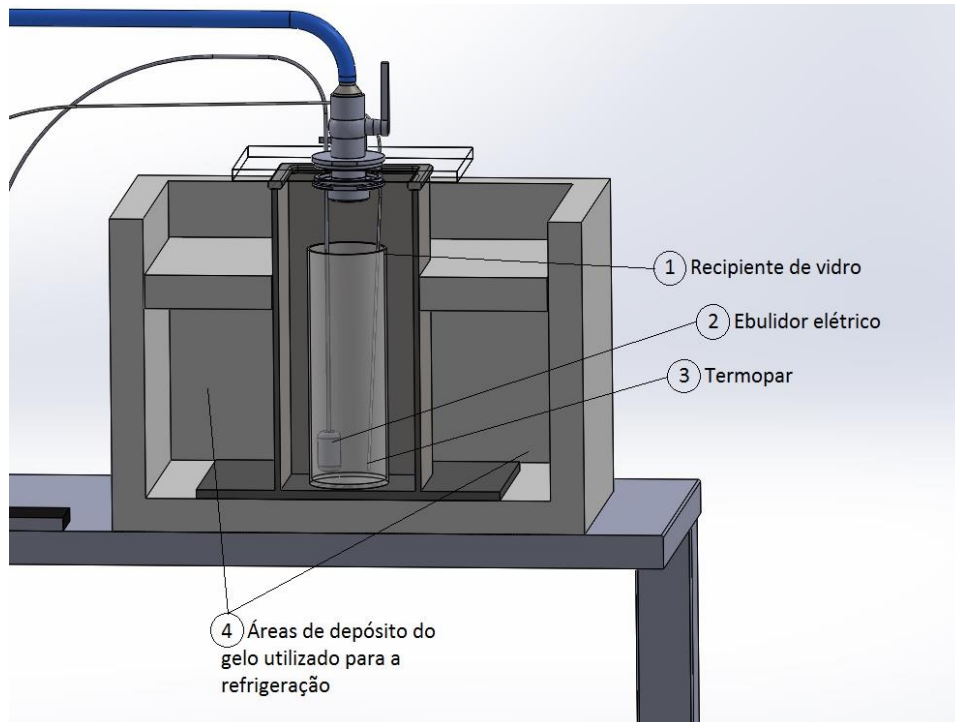


Figura 9: Projeto do equipamento – vista no interior do condensador.

Os principais componentes e suas funções estão descritos a seguir:

- a) Bomba de vácuo: utilizada para retirar o ar contido na câmara onde ocorre a evaporação e condensação através de mangueira hidráulica conectada na câmara e na bomba. A bomba da marca Suryha possui dois estágios, potência de 250 Watts e vazão de até 120 l/min. Possui sistema de gás “ballast” que evita a condensação do líquido na bomba e a contaminação do óleo.
- b) Câmara de condensação: local onde acontece a evaporação e condensação da água. O recipiente feito de aço SAE 1020, tem formato quadrado de 125 mm x 125 mm e altura 270 mm. Possui umas das extremidades abertas permitindo colocar e retirar o suco de fruta. Uma camada de silicone na extremidade auxilia na vedação do sistema. O fechamento é realizado com uma placa de acrílico, com 12 mm de espessura e furações para a saída de ar, regulador de pressão, sensor de pressão e ebulidor elétrico utilizado para aquecimento do fluido a ser condensado. Dentro da câmara de condensação há um recipiente de vidro, com 70 mm de diâmetro e 210 mm de altura, no qual o fluido a ser

consensado é depositado. As paredes externas da câmara de condensação, ficam em contato com o gelo depositado dentro da câmara de refrigeração.

- c) Câmara de refrigeração: desenvolvida para gerar uma diferença de temperatura entre o fluido e a câmara de condensação, fazendo com que o vapor d'água gerado aloje-se nas paredes e fundo da câmara de condensação. A câmara é feita de isopor, em formato quadrado de 420 mm x 420 mm e 250 mm de altura e envolve a câmara de condensação. Para o resfriamento foi utilizado gelo, fazendo com que a temperatura no interior do sistema atinja aproximadamente 5 °C.

3.2 MÉTODOS E TÉCNICAS

A fruta escolhida para a realização dos experimentos foi a laranja, por conter um percentual elevado de água, isto é, de 80% a 90%. Os testes foram realizados também com água tratada para consumo, isto é, água disponibilizada pelas redes de distribuição de água, e em seguida, realizada uma comparação entre os comportamentos dos dois fluidos.

A preparação do suco foi realizada utilizando espremedor de frutas e um coador de tela de aço, com orifícios de, aproximadamente, 0,5 mm. Esse procedimento foi repetido três vezes para separar restos de sementes, bagaço e outras partículas pequenas que poderiam estar misturadas ao suco.

Os experimentos foram realizados utilizando três variações de temperatura, sendo 25 °C, 30 °C e 35 °C, por serem próximas da temperatura ambiente e, através de ensaios experimentais, foram definidos os valores de pressão em que o suco entrava em ebulição. Os mesmos valores de pressão foram utilizados para os experimentos realizados com a água.

Para todos os experimentos foi depositada uma massa de 200 g de fluido no recipiente de vidro e então aquecido até alcançar as temperaturas definidas para cada teste e, novamente medida a massa. O recipiente de vidro foi colocado com o fluido dentro da câmara de condensação em seguida posicionados o ebulidor elétrico e o termopar dentro do fluido e colocada a tampa de acrílico na parte superior da câmara de condensação.

Com a válvula de alívio de pressão aberta, ligou-se a bomba de vácuo e, assim que o vácuo máximo foi alcançado, a válvula foi lentamente fechada até atingir o valor de pressão estabelecido para cada temperatura, e nesse momento, iniciada a medição do tempo para medir a quantidade de massa de água evaporada do suco e da água. Utilizando um termopar conectado a um multímetro digital foi possível acompanhar o valor de temperatura em que o fluido se encontrava, e quando esse valor baixava 1 °C, o ebulidor elétrico era acionado até, no máximo, 1 °C acima da temperatura desejada. Esse procedimento foi realizado ao longo de todos os testes experimentais e cada teste foi repetido três vezes com cada fluido. O projeto de experimentos pode ser visualizado no Quadro 1.

Fluido	Temperatura (°C)	Varição de Pressão em que o Suco entra em ebulição	Massa inicial (g)	Tempo (min)
Água	25	P1	200	2
Água	25	P1	200	5
Água	25	P1	200	10
Água	25	P1	200	15
Água	30	P2	200	2
Água	30	P2	200	5
Água	30	P2	200	10
Água	30	P2	200	15
Água	35	P3	200	2
Água	35	P3	200	5
Água	35	P3	200	10
Água	35	P3	200	15
Suco de Laranja	25	P1	200	2
Suco de Laranja	25	P1	200	5
Suco de Laranja	25	P1	200	10
Suco de Laranja	25	P1	200	15
Suco de Laranja	30	P2	200	2
Suco de Laranja	30	P2	200	5
Suco de Laranja	30	P2	200	10
Suco de Laranja	30	P2	200	15
Suco de Laranja	35	P3	200	2
Suco de Laranja	35	P3	200	5
Suco de Laranja	35	P3	200	10
Suco de Laranja	35	P3	200	15

Quadro 1 – Projeto experimental.

Para cada combinação de temperatura e pressão a que os fluidos foram submetidos, avaliou-se a variação de massa após 2, 5, 10 e 15 minutos. Três medições para cada tempo foram realizadas, totalizando 36 experimentos para cada tipo de fluido.

Para encontrar a pressão de saturação do suco de laranja, para as temperaturas de 25 °C, 30 °C e 35 °C, foram realizados nove testes, utilizando as três temperaturas pré-estabelecidas, sendo que, para cada uma, o teste foi realizado três vezes.

Utilizou-se 200 g de suco que foram depositados no recipiente de vidro, em seguida aquecido o fluido até atingir as temperaturas fixadas. O recipiente então foi depositado dentro da câmara de condensação.

Após esse procedimento, ligou-se a bomba de vácuo, deixando a válvula de alívio de pressão do sistema parcialmente aberta. Após atingir o vácuo máximo com a válvula aberta, ela foi girada lentamente, diminuindo a saída de ar, e foi estabilizada no momento em que o fluido começou a entrar em ebulição.

Os resultados encontrados foram analisados estatisticamente através da metodologia fatorial completo. Nesta análise a influência dos fatores, com 95% de confiabilidade, foram determinadas através da análise de variância (ANOVA).

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 OPERACIONALIZAÇÃO DO EQUIPAMENTO

A Figura 10, mostra o aparato experimental construído conforme descrito na metodologia.

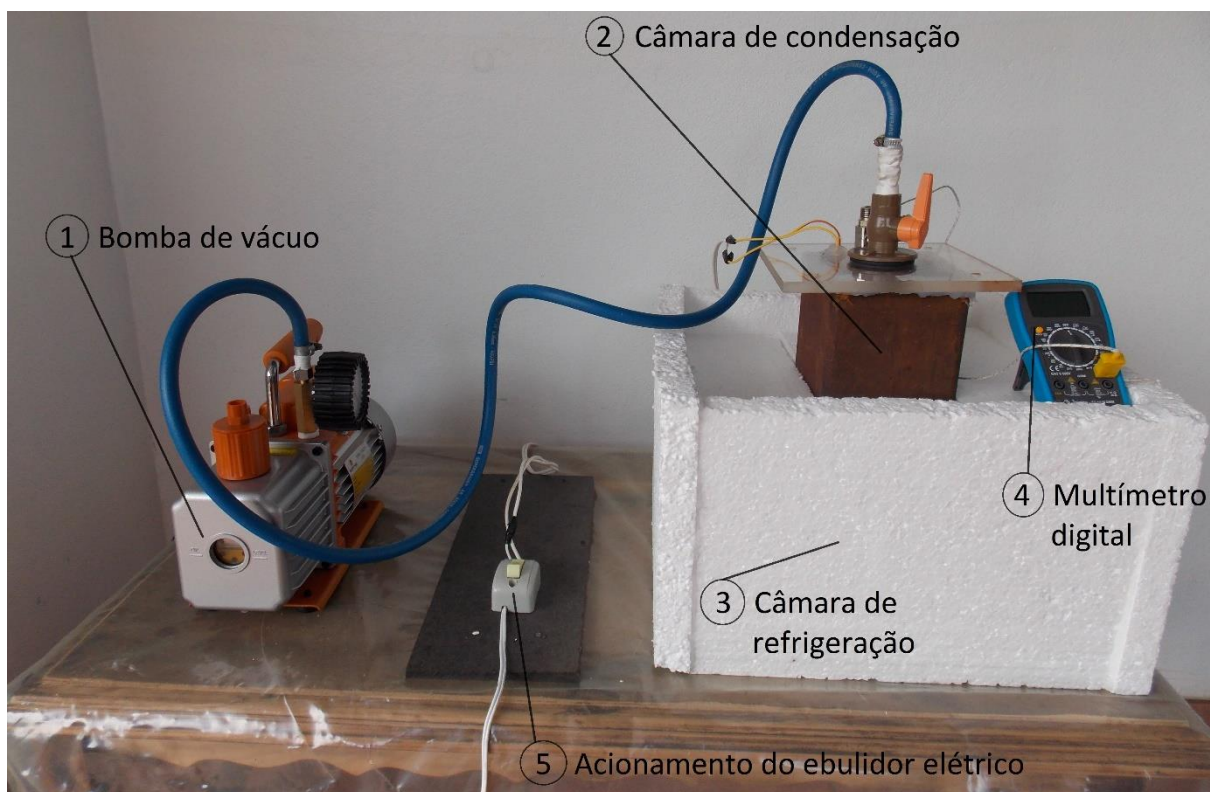


Figura 10: Equipamento para concentração de suco de fruta.

Para ocorrer a evaporação da água contida no suco e da água tratada, a câmara de refrigeração é preenchida com gelo em cubos e o processo é iniciado quando a temperatura no interior da câmara de condensação atinge o valor de 5 °C. Deposita-se 200 g do fluido no recipiente de vidro e em seguida aquece a substância (se necessário), até a temperatura desejada, utilizando o ebulidor elétrico. Coloca-se então o recipiente dentro da câmara de condensação e inicia-se o funcionamento do equipamento, que pode ser descrito em 9 etapas:

- 1) Regular a válvula de alívio de pressão para que fique parcialmente aberta;
- 2) Ligar a bomba de vácuo;
- 3) Aplicar uma força sobre o acrílico para que o procedimento de evacuação do ar inicie;

- 4) Abrir a válvula de gás *ballast* da bomba;
- 5) Ler a variação de pressão, dada pelo vacuômetro, que está sendo gerada dentro da câmara de condensação e fazer a regulagem da pressão através da válvula de alívio até estabilizar no valor requerido;
- 6) Deixar o equipamento operando durante o tempo estabelecido;
- 7) Fechar a válvula de gás *ballast*;
- 8) Desligar a bomba de vácuo;
- 9) Deixar o ar entrar na câmara de condensação lentamente até que a pressão em seu interior seja igual a pressão atmosférica.

Em seguida, retira-se o recipiente de vidro contendo o fluido de dentro da câmara e a massa é novamente medida.

A cada teste realizado, a água que fica depositada nas paredes internas e fundo da câmara de condensação é retirada.

4.2 TESTES EXPERIMENTAIS PARA A DETERMINAÇÃO DO PONTO DE EBULIÇÃO PARA DIFERENTES TEMPERATURAS

Os resultados de pressões encontradas para cada temperatura estão dispostos na Figura 11.

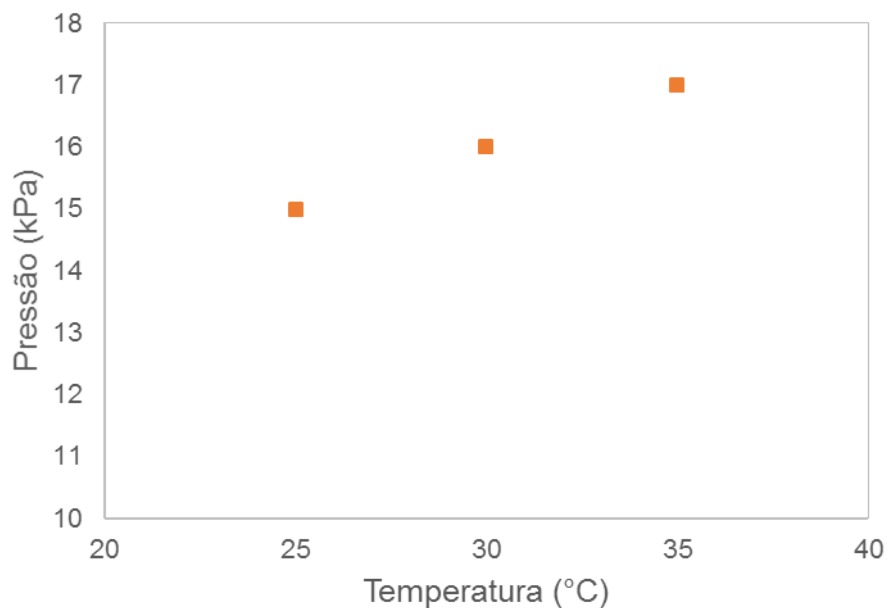


Figura 11: Gráfico da pressão em função da temperatura para diferentes pontos de ebulição do suco de laranja.

Os valores de pressão de saturação para as temperaturas encontrados são de, aproximadamente, 15 kPa para 25 °C, 16 kPa para 30 °C e 17 kPa para 35 °C. Esses valores de pressão e temperatura foram utilizados para realizar os testes de evaporação com o suco de laranja e com a água, sendo que, a água também entrou em ebulição utilizando esse valores. Isso ocorreu, possivelmente, porque a água utilizada não era pura e sim, tratada para consumo.

4.3 TESTES EXPERIMENTAIS DE EVAPORAÇÃO E CONDENSAÇÃO UTILIZANDO O EQUIPAMENTO

A Tabela 2 apresenta os resultados da análise de variância, com nível de confiabilidade de 95%, para a evaporação da água. Através desta análise, observou-se que os valores de probabilidade P-valor foram menores que 0,05 e, conseqüentemente, pode-se dizer que todos os fatores e interação entre os mesmos tiveram influência significativa sobre a evaporação da água. Também, os fatores ou interações dos mesmos que tiveram maior influência sobre a evaporação podem ser determinados pelos valores de F, isto é, quanto maior o valor de F maior será a influência. Portanto, os fatores mais influentes sobre a a evaporação da água foram a temperatura e o tempo, respectivamente.

Tabela 2

Análise de Variância (ANOVA) para a massa de evaporação da água tratada.

Fonte	Soma dos Quadrados	Grau de Liberdade	Médias dos Quadrados	Valor de F	P – Valor
Temperatura	4810,17	2	2405,08	1374,33	0,0000
Tempo	3127,42	3	1042,47	595,70	0,0000
Interação (temperatura/tempo)	291,17	6	48,53	27,73	0,0000
Erro	42	24	1,75	----	----
Total	8270,75	35	----	----	----

A Tabela 3 apresenta os resultados da análise de variância, com nível de confiabilidade de 95%, para a evaporação da água contida no suco de laranja. Através

desta análise, observou-se que os valores de probabilidade P-valor foram menores que 0,05 e, conseqüentemente, pode-se dizer que todos os fatores e interação entre os mesmos tiveram influência significativa sobre a evaporação da água contida no suco. Também, os fatores ou interações dos mesmos que tiveram maior influência sobre a evaporação podem ser determinados pelos valores de F, isto é, quanto maior o valor de F maior será a influência. Portanto, os fatores mais influentes sobre a evaporação da água contida no suco de laranja foram a temperatura e o tempo respectivamente.

Tabela 3
Análise de Variância (ANOVA) para a massa de evaporação da água contida no suco de laranja.

Fonte	Soma dos Quadrados	Grau de Liberdade	Médias dos Quadrados	Valor de F	P – Valor
Temperatura	6646,17	2	3323,08	996,93	0,0000
Tempo	2876,75	3	958,92	287,67	0,0000
Interação (temperatura/tempo)	925,83	6	154,31	46,29	0,0000
Erro	80	24	3,33	----	----
Total	10528,75	35	----	----	----

Os testes com o equipamento foram realizados utilizando os valores definidos no projeto experimental, com as pressões de saturação encontradas para o suco de laranja. Para os testes com água, foram realizados os mesmos procedimentos utilizados nos testes com o suco de laranja. Os valores de variação de massa encontrados na realização desse experimento podem ser visualizados no Apêndice A.

As Figuras 12, 13 e 14 apresentam os gráficos das médias dos mínimos quadrados da evaporação em função do tempo, para as temperaturas de 25 °C, 30 °C e 35 °C, respectivamente. Foi utilizado o método de mínimos quadrados para encontrar o melhor ajustamento para um conjunto de dados tentando minimizar a soma dos quadrados das diferenças entre o valor estimado e os dados observados (tais diferenças são chamadas de resíduos) (MONTGOMERY, 1991). As barras verticais dos gráficos denotam intervalos com 95% confiabilidade.

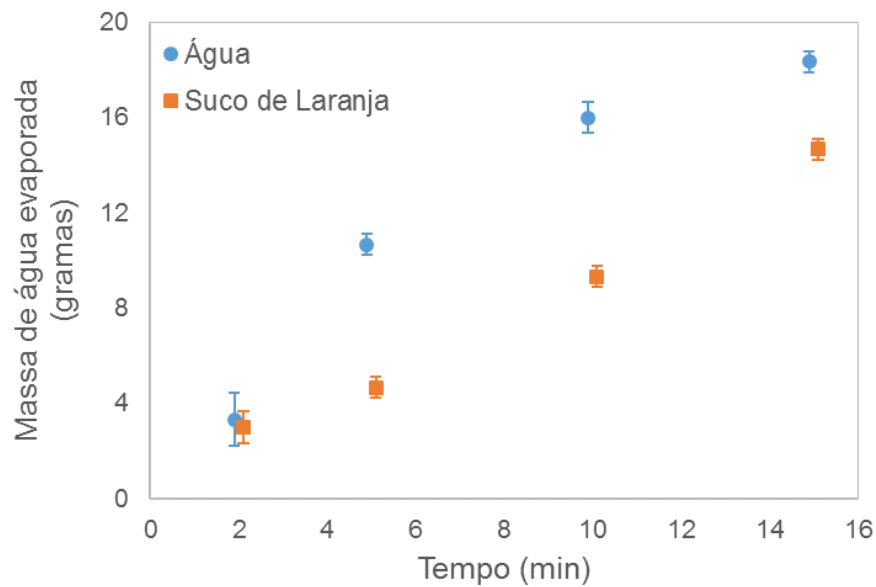


Figura 12: Média dos mínimos quadrados da evaporação de água em função do tempo para a temperatura de 25 °C e pressão de 15 kPa.

A Figura 12 mostra que, quando submetidos ao tempo de 2 minutos, os dois fluidos sofrem variações semelhantes de massa de água evaporada, porém, a medida em que esse tempo aumenta, a água apresenta maior variação de massa de água evaporada do que o suco de laranja. O aumento do tempo, aumenta a quantidade de massa evaporada para as duas substâncias.

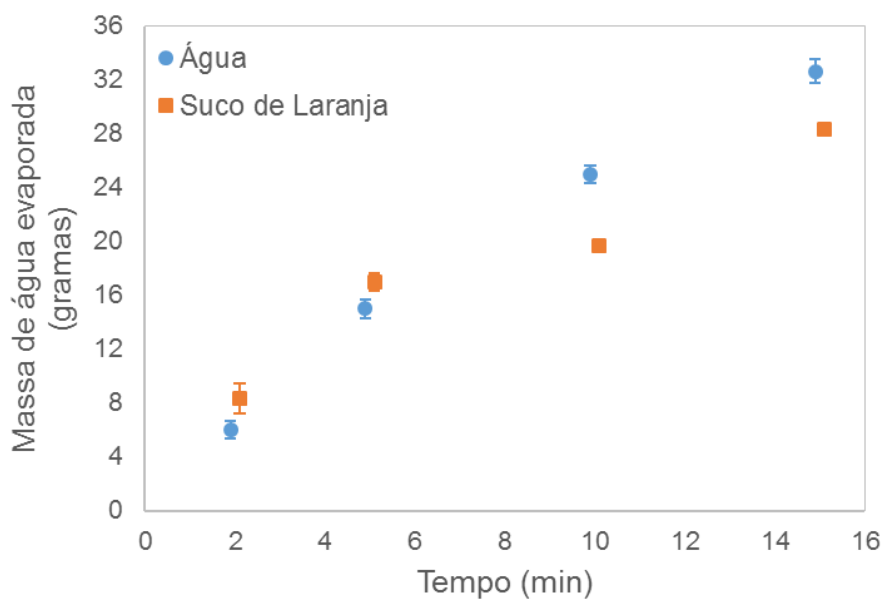


Figura 13: Média dos mínimos quadrados da evaporação de água em função do tempo para a temperatura de 30 °C e pressão de 16 kPa.

A Figura 13 apresenta variações crescentes de massa de água evaporada para os dois fluidos em função do tempo. Porém, para essa situação, a quantidade de massa de água evaporada no suco apresentou valores maiores do que a da água tratada nos tempos de 2 e 5 minutos, e houve pouca diferença entre os tempos de 5 e 10 minutos para a evaporação de água do suco de laranja.

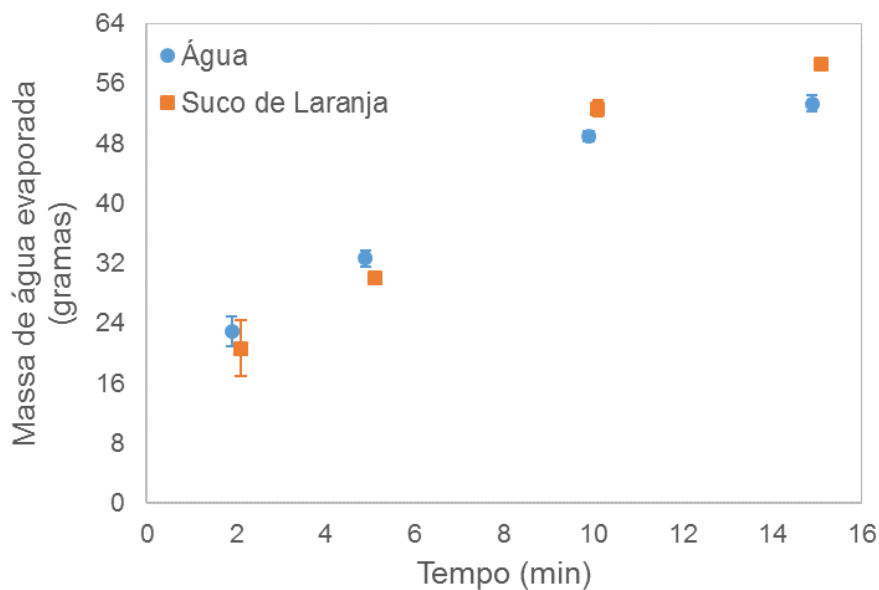


Figura 14: Média dos mínimos quadrados da evaporação de água em função do tempo para a temperatura de 35 °C e pressão de 17 kPa.

Na Figura 14 observou-se que nos tempos de 2, 5 e 10 minutos, a água e o suco tiveram valores próximos de massa de água evaporada. Nesse gráfico, o suco de laranja apresentou menor evaporação de água em relação a água tratada nos dois primeiros tempos, e maior evaporação nos tempos de 10 e 15 minutos.

Segundo os três gráficos apresentados (Figura 12; Figura 13; Figura 14) o tempo exerce influência sobre a quantidade de massa de água evaporada, tanto para a água quanto para o suco. Pode-se observar que houve evaporação nos quatro tempos medidos e que a quantidade de massa de água evaporada aumentou, conforme o tempo, tanto para a água, quanto para o suco de laranja.

5 CONCLUSÕES

Considerando a necessidade de ingestão de alimentos ricos em vitaminas e outros nutrientes para garantir o bom funcionamento do organismo humano e, conseqüentemente, uma vida mais saudável, as tecnologias na área da alimentação tem evoluído constantemente na busca por novos métodos de processamento de alimentos. Buscam-se formas de enriquecimento nutricional e métodos eficazes para evitar a perda de vitaminas e nutrientes, além de perdas de produção, devido à curta vida útil de alimentos perecíveis.

Foi construído um equipamento capaz de realizar a evaporação de água a temperaturas próximas da ambiente (25 °C), possibilitando, dessa forma, a concentração de sucos de frutas.

Foram definidas as pressões necessárias para que o suco de laranja entrasse em ebulição nas temperaturas definidas no projeto experimental, ou seja, pressão e temperatura de saturação do fluido.

Ao submeter a água tratada e o suco de laranja as pressões e temperaturas de saturação definidas, por diferentes períodos de tempo, pode-se concluir, através da análise dos gráficos, que os fatores tempo e temperatura tiveram influência significativa sobre a evaporação de água nos dois fluidos. Notou-se ainda, que, quanto maior o tempo em que os fluidos ficaram em ebulição e quanto maior a temperatura, maior foi a quantidade de massa de água evaporada.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ÁLVAREZ, S. et al. **Permeation of apple aroma compounds in reverse osmosis. Separation and Purification Technology.** Elsevier. v.14, 1998.

BAKER, R. W. **Membrane Technology and applications.** 2.ed. California: Wiley, 2004.

BORGNAKKE, C.; SONNTAG, R. E. **Fundamentos da Termodinâmica.** 7. ed. São Paulo: Blucher, 2009. (Série Van Wylen).

BORGNAKKE, C.; SONNTAG, R. E. **Fundamentos da Termodinâmica.** 7. ed. São Paulo: Blucher, 2009. Volume complementar. (Série Van Wylen).

BOSS, E. A. **Modelagem e otimização do processo de liofilização:** Aplicação para leite desnatado e café solúvel. 2004. Tese (Doutorado em engenharia Química/Desenvolvimento de Processos Químicos) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Campinas, Campinas, 2004.

CASSANO, A. et al. **Clarification and concentration of citrus and carrot juices by integrated membrane processes.** Journal of Food Engineering. Elsevier. v.57, 2003.

COUREL, M. et al. **Effect of operating conditions on water transport during the concentration of sucrose solutions by osmotic distillation.** Journal of Membrane Science. Elsevier. 2000.

HABERT, A. C.; BORGES, C. P.; NOBREGA, R. **Processos de Separação por Membranas.** Rio de Janeiro: E-papers, 2006.

JESUS, D. F. et al. **Orange (Citrus sinensis) juice concentration by reverse osmosis.** Journal of Food Engineering. Elsevier. v.81, 2007.

LIAPIS, A. I.; PIKAL, M. J.; BRUTINI, R. **Research and development needs and opportunities in freeze drying.** Drying Technology. v.14. 1996.

LUCAS, P. **Influência do congelamento no processo de liofilização do sangue bovino.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Processos Industriais e Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 1998.

MACHADO, T. V. **Avaliação sensorial e físico-química do suco de laranja proveniente das etapas do processamento do suco concentrado e congelado.** 2010. Dissertação (Mestrado em Ciências dos Alimentos) – Faculdade de Ciências Farmacêuticas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, São Paulo, 2010.

MARQUES, L. G. **Liofilização de frutas tropicais.** 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Química/Pesquisa e Desenvolvimento de Processos Químicos) – Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2008.

MENDRONE, N. A.; SOUSA, W. F. **Análise de custos e viabilidade econômica de usinas sucroalcooleiras com diferentes sistemas de funcionamento das linhas de evaporadores.** 2012. Monografia (Trabalho de conclusão de curso de Engenharia Química) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

MONTGOMERY, D. C., **Design and Analysis of Experiments.** John Wiley & Sons, New York, 1991.

MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N. **Princípios de termodinâmica para engenharia**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

RAMTEKE et. al., 1993 apud KESHANI, S.; LUQMAN, A. C.; RUSSLY, A. R. **Effect of temperature and concentration on rheological properties pomelo juice concentrates**. International Food Research Journal, Selangor, v. 19, n. 2, p. 553-562, 2012.

ROGERIO, H. A.; COSTA, A. O. S.; JUNIOR, E. F. C. **Aplicações industriais de evaporadores de múltiplo efeito**. Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer, Goiania, v.9, n.16, 2013.

SILVA, P. R. S. **Simulação dinâmica e otimização de evaporadores de múltiplos efeitos em biorrefinarias**. 2013. Dissertação. (Mestrado em Engenharia Química/ Programa de Engenharia Química) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

SOUZA, A. L. R. et al. **Concentration of camu–camu juice by the coupling of reverse osmosis and osmotic evaporation processes**. Journal of Food Engineering. Elsevier, 119, 2013. p. 7–12.

STROBEL, R. G. K. **Process for preparing a citrus fruit concentrate**. US Pat. 4.463.025, 31 jul. 1984.

TEIXEIRA, M.; MONTEIRO, M. **Degradação de vitamina C em suco de fruta**. Alimentação e Nutrição, Araraquara. v.17, n.2, p.219-227, abr./jun. 2006.

APÊNDICE A – Resultados dos experimentos de evaporação e condensação

Fluido	Temperatura (°C)	Pressão (kPa)	Tempo (min)	Varição de massa (g) - TESTE 1	Varição de massa (g) - TESTE 2	Varição de massa (g) - TESTE 3
Água	25	15	2	3	2	5
Água	25	15	5	11	10	11
Água	25	15	10	17	16	15
Água	25	15	15	18	19	18
Suco de Laranja	25	15	2	2	3	4
Suco de Laranja	25	15	5	4	5	5
Suco de Laranja	25	15	10	9	9	10
Suco de Laranja	25	15	15	15	14	15
Água	30	16	2	7	6	5
Água	30	16	5	15	16	14
Água	30	16	10	26	24	25
Água	30	16	15	34	32	32
Suco de Laranja	30	16	2	10	8	7
Suco de Laranja	30	16	5	18	16	17
Suco de Laranja	30	16	10	19	20	20
Suco de Laranja	30	16	15	28	28	29
Água	35	17	2	24	20	25
Água	35	17	5	33	31	34
Água	35	17	10	50	48	49
Água	35	17	15	53	52	55
Suco de Laranja	35	17	2	15	21	26
Suco de Laranja	35	17	5	30	29	31
Suco de Laranja	35	17	10	54	51	53
Suco de Laranja	35	17	15	59	58	59

Quadro 2 – Resultados dos experimentos de evaporação de água e condensação.