

Estudo experimental da secagem de alimentos: balanço térmico em um mini-secador de baixo custo^{†*}

Renato Letizia Garcia¹

Universidade Estadual do Rio Grande do Sul
Porto Alegre – RS

Marco Antonio Moreira Oliveira¹

Mestrando no Programa de Pós-Graduação em Docência para Ciências,
Tecnologias, Engenharias e Matemática – UERGS
Guaíba – RS

Moisés Nivaldo Cordeiro¹

Instituto Federal do Rio Grande do Sul
Ibirubá – RS

Diane Serpa¹

Mestranda no Programa de Pós-Graduação em Docência para Ciências,
Tecnologias, Engenharias e Matemática – UERGS
Guaíba – RS

Resumo

O artigo descreve a elaboração de uma atividade didática experimental, focada na utilização de materiais de baixo custo, construída a partir da seleção de um tema inicial e através do ensino por investigação orientada. O trabalho foi executado numa disciplina de mestrado profissional em docência na área de ciências exatas, podendo ser adaptado para disciplinas de outros cursos e programas, e se fundamenta na cooperação dos alunos que trabalham em equipe, com o professor atuando na apresentação dos conteúdos teóricos e na mediação dos debates, visando a elaboração de um produto educacional. O experimento descrito neste trabalho emprega um secador de alimentos em miniatura, confeccionado pelos alunos, no qual foram efetuados ensaios para determinar a massa de água removida de um

[†] Experimental study of food drying: heat balance in a low-cost mini-dryer

^{*} *Recebido: abril de 2020.
Aceito: julho de 2020.*

¹ E-mails: renato-garcia@uergs.edu.br; marco-oliveira01@uergs.edu.br; moises.cordeiro@ibiruba.ifrs.edu.br; diane_boeira@hotmail.com

alimento a partir de um balanço térmico no secador. Os resultados obtidos foram satisfatórios, com desvios da ordem de 10% entre valores teóricos e experimentais, sendo tais desvios compatíveis com o equipamento confeccionado e à incerteza associada aos dados registrados no ensaio. A participação e o engajamento dos alunos foi fator determinante na superação das dificuldades enfrentadas na execução do projeto, sendo tal atitude atribuída ao interesse do grupo em aplicar atividades pedagógicas similares em sua prática docente.

Palavras-chave: *Experimentos Didáticos de Baixo Custo; Secagem de Alimentos; Umidade do Ar.*

Abstract

The article describes the development of an experimental didactic activity, focused on the use of low-cost materials, built from the selection of an initial theme and through teaching by guided research. The work was carried out in master's post-graduated program – professional mode – in Science and Mathematics Teaching, and can be adapted for disciplines from other courses and programs, and is based on the cooperation of students working in teams, with the teacher acting in the presentation of theoretical and in the mediation of debates, aiming at the elaboration of an educational product. The experiment described in this work uses a miniature food dryer, made by the students, in which tests were carried out to determine the mass of water removed from a food from a thermal balance in the dryer. The results obtained were satisfactory, with deviations of around 10% between theoretical and experimental values, with such deviations being compatible with the equipment manufactured and the uncertainty associated with the data recorded in the test. The participation and engagement of students was a determining factor in overcoming the difficulties faced in carrying out the project, and this attitude was attributed to the group's interest in applying similar pedagogical activities in their teaching practice.

Keywords: *Low-cost Didactic Experiments; Food Drying; Air Humidity.*

I. Introdução

A formação continuada dos professores, que vem ocorrendo de forma mais intensa ao longo dos últimos anos, contribui para a melhoria da qualidade de ensino e o estímulo e

valorização da docência. Dentro desta proposta, o Programa de Mestrado Profissional em Docência para Ciências, Tecnologias, Engenharias e Matemática da Universidade Estadual do Rio Grande de Sul se destaca por promover atividades pedagógicas, em diversas disciplinas, nas quais os mestrandos atuam, simultaneamente, como sujeito e objeto da prática docente. Essa estratégia visa inserir os alunos no âmbito das pesquisas e estudos do programa de pós-graduação.

De acordo com CAÑAL (2007), “os processos indagadores estão presentes em todas as pessoas por toda sua vida e constituem um marco biológico de grande importância adaptativa em nossa espécie”. Portanto, o questionamento é um processo natural do ser humano e um aliado no processo epistemológico; e a presença de elementos investigativos, como a formulação de hipóteses e a proposição de soluções para a resolução de um problema, tende a facilitar o processo de ensino e aprendizagem em sala aula.

O processo investigativo é enriquecido na medida em que se desenvolve em um contexto interdisciplinar, no qual os participantes possuem formação em áreas distintas. Nessa situação, a escolha do tema a ser investigado deve ser feita de forma muito criteriosa, pois ele deve ser do interesse de todos e exige dos participantes um conhecimento teórico mínimo do assunto.

Na disciplina Ensino Experimental em Engenharia, as atividades foram desenvolvidas com foco num trabalho investigativo e interdisciplinar; no qual houvesse a participação efetiva dos alunos, que iriam atuar na escolha do tema, bem como na proposição e execução de tarefas didáticas. A elaboração de um experimento didático foi sugerida como atividade central, e as tarefas realizadas durante a disciplina, de cunho teórico e prático, tinham como objetivo viabilizar tal experimento. Cabe aqui citar alguns objetivos educacionais da atividade experimental, conforme mencionado por GIORDAN (1999):

[...] incentivar os alunos a expor suas ideias acerca do fenômeno, que estão no plano da subjetividade, desencadeia-se um processo pautado na intersubjetividade do coletivo, cujo aprimoramento fundamenta o conhecimento objetivo. O processo de objetivação do conhecimento, por ser uma necessidade social, deve ser um eixo central da prática educativa e aqui a experimentação desempenha um papel de fórum para o desenvolvimento dessa prática.

Assim, após algumas discussões mediadas pelo professor, um grupo de alunos optou pela realização do estudo da secagem de grãos, e a confecção de um equipamento didático tal fim. Nesse ponto, destacamos a atuação do professor na equalização dos conhecimentos teóricos e nos debates realizados durante as aulas, objetivando a viabilização do experimento. Paralelamente, os alunos vislumbraram que a experiência adquirida nesse trabalho seria útil na sua atividade docente, possibilitando-lhes adotar propostas similares com estudantes no ensino fundamental, médio e tecnológico, nas escolas nas quais muitos deles atuam; adaptando o trabalho ao seu contexto particular.

O capítulo seguinte apresenta alguns fundamentos teóricos envolvendo o equilíbrio ar + vapor d'água e suas implicações na secagem de alimentos. O estudo experimental desse processo, a partir de um secador em miniatura construído para tal fim, é abordado no capítulo 3, que descreve o modelo matemático adotado para quantificar a massa de água removida do alimento. Os resultados obtidos e uma breve análise desses resultados são apresentados na sequência. Finalizando o artigo, são feitas algumas considerações sobre o trabalho, discorrendo sobre sua contribuição no estudo do processo de secagem, possibilidade de melhorias e a execução dessa atividade experimental em outras instituições de ensino.

II. Fundamentos teóricos da secagem de alimentos

O processo de secagem consiste, essencialmente, na remoção de água de um substrato, sendo ela transferida na forma de vapor para o ar circundante. A capacidade do ar absorver vapor de água irá regular a intensidade desse processo, e a umidade relativa do ar quantifica tal capacidade, que é determinada pelo equilíbrio líquido-vapor no ar úmido.

A umidade relativa do ar é o quociente entre a pressão parcial de vapor de água no ar, p_v , e a pressão de saturação nessa temperatura, p_{vs} .

$$UR (\%) = \frac{p_v}{p_{vs}} \cdot 100 \quad (1)$$

A saturação do ar ocorre quando sua capacidade máxima de retenção de vapor de água é atingida; ponto a partir do qual a água em excesso se condensa na forma de gotículas ou em uma superfície, como ocorre, respectivamente, ao exalamos ar dos pulmões em um dia muito frio e ao embaçar o lado interno do para-brisa de um automóvel.

Um processo adequado de secagem e armazenamento é fundamental para manter a boa qualidade no beneficiamento de alimentos, minimizando riscos na sua distribuição e reduzindo custos de comercialização de produtos pela redução do seu teor de umidade. GARCIA *et al.* (2004) enfatiza a importância da secagem de sementes: “A secagem de sementes, além de contribuir para a preservação da qualidade fisiológica durante o armazenamento, possibilita a antecipação da colheita evitando perdas de natureza diversa durante o processo produtivo”.

Segundo SILVA (2010), o processo de secagem consiste em uma operação de transferência de massa que envolve a retirada do teor de água de um sistema sólido ou semissólido.

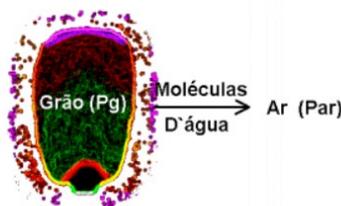
A remoção de água por vaporização térmica, isto é, na qual uma corrente de ar aquecido transfere calor para o substrato, é uma característica da maior parte das operações industriais de secagem, e nela se inclui o beneficiamento de grãos (McCABE *et al.*, 1993). Nesse processo, o aquecimento prévio aumenta a pressão de saturação de vapor de uma corrente de ar; e, conseqüentemente, diminui sua umidade relativa.

Quanto menor a umidade relativa de uma corrente de ar, maior será a sua capacidade de absorver água presente sobre uma superfície. Isso explica o fato de acionarmos o

desembaçador, que produz a passagem de uma corrente de ar aquecido na face interna do pára-brisa, provocando a vaporização das gotículas de água acumuladas no vidro embaçado.

Durante seu armazenamento, os grãos permanecem em constante troca de calor e umidade com o ar circundante. Essas trocas são dinâmicas e contínuas até o limite da condição de equilíbrio, determinada pela temperatura. A pressão de vapor é diretamente proporcional à umidade relativa e à temperatura do ar. Quando a pressão de vapor do ar for maior do que a pressão de vapor dos grãos, ocorre o fenômeno de sorção, e o grão absorve uma parcela da água contida no ar e se umedece. Quando a pressão de vapor do ar for menor do que a pressão de vapor dos grãos, ocorrerá a dessorção, que resultará na perda de umidade, e na secagem desse grão (SILVA *et al.*, 2000). Em síntese, podemos dizer que:

- i. Pressão de vapor do grão > Pressão de vapor do ar = **Secagem**
- ii. Pressão de vapor do grão < Pressão de vapor do ar = **Umedecimento**
- iii. Pressão de vapor do grão = Pressão de vapor do ar = **Equilíbrio Higroscópico**



Movimentação de água durante o processo de secagem
(Fonte: Silva et al. em Secretaria da Agricultura RS)

Fig.1 – Esquema ilustrativo do processo de secagem do ar.

Assim, a secagem é representada pelo deslocamento de água que ocorre devido às diferenças de potencial hídrico existentes, entre a superfície do grão e a corrente de ar que circula no silo de armazenamento (CARVALHO, 2005).

A secagem de frutas permite aumentar o tempo de conservação e as possibilidades de comercialização do produto desidratado, minimizando os riscos e eventuais prejuízos advindos de sua decomposição biológica (SILVA, 2010). Nesse caso, além da retirada da água, que reduz a massa e o volume transportado, busca-se obter um produto diferenciado, com maior valor agregado e com sabor e textura diferente da fruta *in natura*.

Em muitas situações, efetua-se um processo de secagem natural, que pode ser feito pela simples exposição do produto ao Sol. O produto pode ser disposto sobre um piso apropriado, ou colocado em varais e outros tipos de suporte, no interior de galpões. O uso de ventiladores e exaustores para a circulação do ar também é comum. Assim, as características dos processos e das instalações de secagem variam significativamente conforme a quantidade o tipo de produto processado, as condições climáticas da região produtora e outros fatores.

III. Estudo experimental do processo de secagem

Tendo em vista a relevância do processo de secagem, várias disciplinas de cursos técnicos e de graduação voltados para a área agrícola e do processamento industrial de alimentos tratam desse assunto. O estudo do equilíbrio ar-vapor de água (psicrometria), da curva de secagem e dos métodos e equipamentos empregados nessa etapa de beneficiamento de alimentos são abordados nessas disciplinas. A metodologia baseada em aulas dialogadas e expositivas, empregadas na maioria dos componentes curriculares dos cursos de graduação, nem sempre propicia ao aluno um nível de aprendizado satisfatório (MOREIRA, 2006). Essa deficiência no aprendizado tende a se acentuar e atingir um maior número de alunos quando se trata de tópicos que envolvem a análise de processos físicos e cálculos visando a quantificação desses processos (ARRUDA; LABURU, 1996).

No intuito de aprofundar os conhecimentos relativos ao processo de secagem, particularmente no que diz respeito à quantificação da perda de água em um alimento durante esse processo, os autores desenvolverem um experimento simples, de baixo custo e de fácil execução com essa finalidade.

Experimentos didáticos com tais características vêm sendo adotados por vários professores, muitos dos quais divulgam seus trabalhos em publicações científicas. Araújo *et al.* (2003) realizam uma análise da produção científica contemplando atividades experimentais voltadas para o ensino de Física no nível médio, visando uma melhor compreensão sobre as diferentes estratégias e modalidades adotados pelos docentes. Essa análise contempla 106 artigos, trabalhos, publicados entre 1992 e 2001, que foram avaliados e agrupados a partir de aspectos como a ênfase matemática, o uso de novas tecnologias, a associação com situações típicas do cotidiano e o detalhamento da montagem dos equipamentos. Nesse contexto, destacamos alguns trabalhos vinculados a experimentos didáticos implementados em disciplinas de graduação de Engenharia na Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (DELGADO *et al.*, 2019; GARCIA *et al.*, 2016; 2017).

III.1. Túnel de secagem

O experimento desenvolvido para quantificar a remoção de água no alimento iniciou pela confecção de um túnel de secagem a partir de um tubo de PVC de 1000 mm de comprimento e 100 mm de diâmetro. Nesse tubo foram conectadas duas reduções de 100 – 50 mm, sendo que numa delas foi acoplado um secador de cabelo. Uma bandeja retangular para contenção do alimento foi confeccionada com hastes de madeira e tela de tecido sintético. As dimensões dessa bandeja foram ajustadas para que fosse inserida e removida do tubo, e ali permanecesse imóvel durante o processo de secagem. Na Fig. 2 podemos observar os detalhes de montagem.

O ensaio de secagem consistiu em avaliar a temperatura de entrada do ar e a temperatura e a velocidade de saída do ar. A temperatura de entrada foi mensurada com a inserção do sensor de um termohigrômetro, em um furo que havia na extremidade do tubo

situada junto ao secador de cabelo. No bocal da redução de saída, na outra extremidade, foi colocado o sensor de um anemômetro de fio quente.

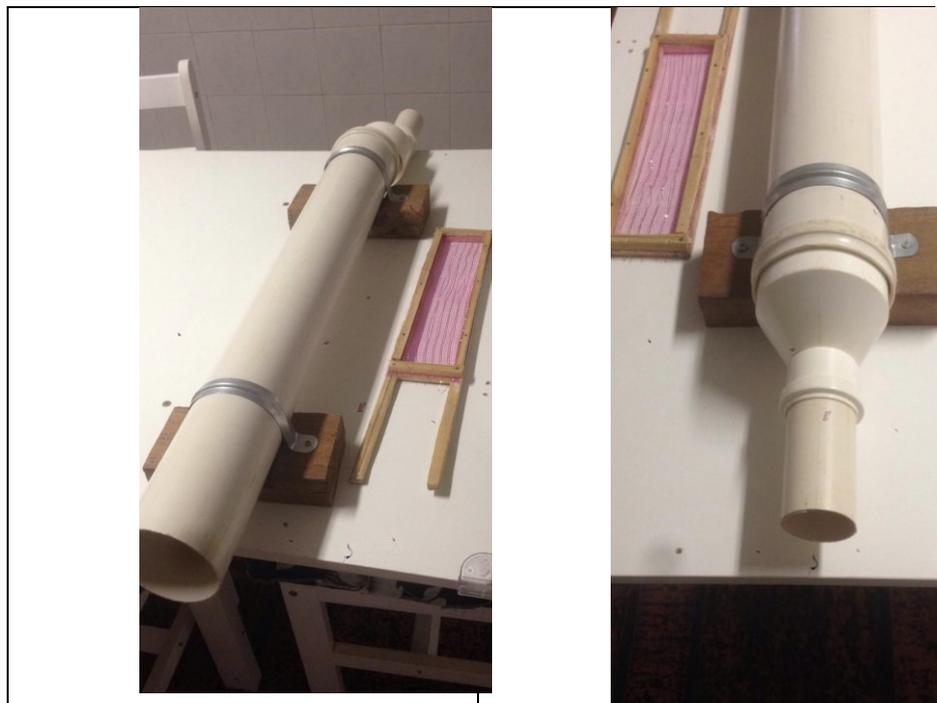


Fig. 2 – Imagens do processo de montagem do mini-secador. Fonte: os autores.

Os equipamentos utilizados para a medida de velocidade e temperatura do ar estão apresentados nas Fig. 3 e 4.



Fig. 3 e 4 – Imagens do anemômetro (à esq.) e termohigrômetro (à dir.). Fonte: os autores.

III.2 Balanço térmico no túnel de secagem

A passagem do ar aquecido através do túnel de secagem resulta no resfriamento dessa massa de ar, cuja entalpia é reduzida de um valor ΔH , correspondente à diferença entre a entalpia na entrada e na saída do túnel, isto é, $H1$ e $H2$. Uma pequena parcela do calor removido do ar é transferida para o ambiente, que se aquece durante esse processo. A maior parte desse calor promove a vaporização de uma porção da água contida do alimento. Nessa passagem do ar, há uma transferência de calor entre as paredes do túnel e o ambiente; sendo relevante destacar que esse fato foi percebido pelos alunos quando realizaram os testes iniciais, ao evidenciarem uma considerável diferença entre a temperatura na entrada e na saída do túnel, quando ar aquecido era insuflado no túnel vazio.

O esquema apresentado na Fig. 5 ilustra o balanço térmico descrito no parágrafo anterior. Os termos $H1$ e $H2$ correspondem, respectivamente, à entalpia do ar na entrada e saída do túnel. $Q0$, $Q1$ e $Q2$ representam as seguintes parcelas de calor: transferido para o ambiente, absorvido no processo de vaporização da água e absorvido no aquecimento do alimento contido na bandeja.

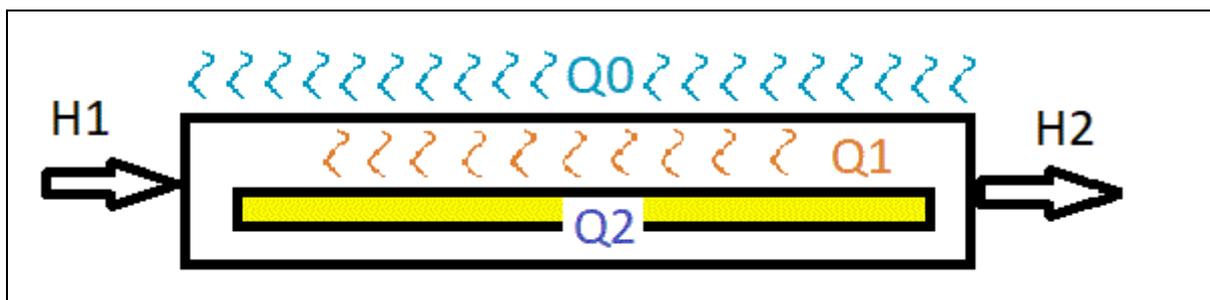


Fig. 5 – Esquema representativo da operação do túnel de secagem. Fonte: os autores.

Um ensaio inicial, com a passagem de ar aquecido através do túnel vazio, foi realizado no intuito de avaliar $Q0$, cujo valor corresponde à diferença entre a entalpia do ar na entrada e na saída do mini-secador. A partir dessas considerações iniciais sobre o balanço térmico no mini-secador é possível escrever:

$$\Delta H = H1 - H2 = m_{ar} \cdot c_{p ar} \cdot (T_e - T_s) = Q0 + Q1 + Q2 \quad e \quad (1)$$

$$Q0 = m_{ar 0} \cdot c_{p ar} \cdot (T_{e0} - T_{s0}), \quad (2)$$

sendo m_{ar} , $c_{p ar}$, T_e e T_s , a massa de ar que atravessa o túnel de secagem, o calor específico do ar e a temperatura de entrada e saída do ar nesse túnel, respectivamente. Na equação 2, o acréscimo do índice “0” nessas variáveis indica que os valores se referem ao ensaio realizado com o túnel vazio. O calor cedido para a vaporização da massa de água removida do alimento, $m_{\text{água}}$, corresponde ao produto dessa massa pelo calor latente de vaporização da água, L_{vap} , conforme a equação:

$$Q1 = m_{\text{água}} \cdot L_{\text{vap}} \cdot \quad (3)$$

No aquecimento do alimento contido na bandeja, durante o processo de secagem, é transferido uma quantidade de calor que consiste no produto da massa do alimento, $m_{\text{alim.}}$, pelo calor específico do alimento, $c_{p \text{ alim.}}$, e pela diferença entre a temperatura ambiente, $T_{\text{amb.}}$, e temperatura do túnel, $T_{\text{média}}$. Essa última temperatura consiste na média entre a temperatura na entrada e na saída do túnel, no final do processo de secagem, resultando na seguinte expressão:

$$Q2 = m_{\text{alim}} \cdot c_{p \text{ alim}} \cdot (T_{\text{média}} - T_{\text{amb}}). \quad (4)$$

A partir do conjunto de equações (2) a (4) é possível obter a seguinte expressão:

$$m_{\text{ar}} \cdot c_{p \text{ ar}} \cdot (T_e - T_s) - m_{\text{ar}0} \cdot c_{p \text{ ar}} \cdot (T_{e0} - T_{s0}) = m_{\text{água}} \cdot L_{\text{vap}} + m_{\text{alim}} \cdot c_{p \text{ alim}} \cdot (T_{\text{média}} - T_{\text{amb}}). \quad (5)$$

III.3 Roteiro de cálculo

O ensaio proposto nesse experimento trata-se de um processo contínuo, de modo que o balanço térmico foi feito com base num intervalo de tempo fixado, Δt , no intuito de determinar a massa de ar que circula no interior do túnel nesse intervalo. A vazão mássica, isto é, a quantidade de massa que atravessa uma superfície, é igual ao produto da velocidade, V , pela área dessa superfície, A , e pela massa específica do material, ρ , na forma da expressão:

$$\dot{m} = \rho \cdot V \cdot A. \quad (6)$$

A massa específica do ar é determinada admitindo que esse fluido se comporta como um gás ideal, apresenta uma composição molar de 80% de N_2 e 20% de O_2 – massa molar média de 28,8 g/mol – está submetido a uma pressão de 1 atm e sua temperatura é o valor médio entre os registros na seção de entrada e saída do túnel, o que nos permite escrever:

$$\rho_{\text{ar}} = \frac{28,8}{0,082 \cdot \left(\frac{T_e + T_s}{2} + 273 \right)}. \quad (7)$$

Na equação (7) os valores de temperatura devem ser inseridos em graus centígrados e o valor da massa específica do ar é obtido em g/L. Diante do exposto, a massa de ar que circula no túnel num intervalo de tempo Δt , é dada pela expressão:

$$m_{\text{ar}i} = \rho_{\text{ar}i} \cdot V_{\text{ar}i} \cdot A \cdot \Delta t, \quad (8)$$

sendo acrescido o índice “i” para evidenciar que esses dados referem-se a um intervalo “i” de duração Δt .

Numa primeira etapa do cálculo, quantifica-se o calor dissipado durante a operação do túnel vazio, a partir da equação (2). Após o carregamento do secador com alimento, registram-se os valores de temperatura na entrada e saída do túnel e da velocidade do ar ao final de cada intervalo “i”, calculando-se a variação da entalpia do ar nesse intervalo:

$$\Delta H_i = m_{ar\ i} \cdot c_{p\ ar} \cdot (T_{s\ i} - T_{e\ i}). \quad (9)$$

Desta forma, ΔH corresponde ao somatório dos valores de ΔH_i ao longo do ensaio. Para obter a variação da entalpia corrigida, desconta-se do valor de ΔH as parcelas correspondentes a Q_0 e Q_2 , obtendo-se o valor de Q_1 , conforme detalhado no lado direito da equação (1). A massa teórica de água removida do alimento é calculada pela equação (3).

IV. Resultados obtidos

Foram realizados experimentos com grãos de milho previamente umedecidos durante 72 horas e com chuchu cozido e descascado. Em ambos os experimentos, a temperatura ambiente era de 27°C.

A Tabela 1 apresenta os resultados finais do ensaio com o túnel vazio, no qual foi calculado um valor de 6.430,6 J para as perdas de calor do ar para o ambiente no intervalo de 1 minuto, sendo tal valor indicado como $\overline{Q_0}$. Logo após a realização desse ensaio, a bandeja contendo a amostra de milho foi introduzida no interior do mini-secador.

Tabela 1 – Resultados experimentais relativos ao túnel vazio.

| $T_{e\ 0}$ (°C) | $T_{s\ 0}$ (°C) | A (m ²) | ρ (g/L) | V (m/s) | $m_{ar\ 0}$ (g/s) | $\overline{Q_0}$ (J) |
|-----------------|-----------------|---------------------|--------------|---------|-------------------|----------------------|
| 54,3 | 45,7 | 0,00196 | 1,087 | 5,84 | 12,46 | 6.430,6 |

No experimento com grãos de milho, foram colocados 100 gramas desse alimento sobre a bandeja e a operação de secagem foi realizada durante 20 minutos, e o intervalo fixado foi de 1 minuto. Na Fig. 6 são apresentados os registros de temperatura na entrada e na saída do túnel de secagem durante o ensaio.

A diferença entre as temperatura de entrada e saída do ar no túnel de secagem é significativamente maior nos dois minutos iniciais do ensaio. Essa diferença decorre de uma maior absorção de calor pelo alimento nesse período, que sofre um maior aquecimento no início da secagem.

O cálculo do calor total absorvido no aquecimento dos grãos de milho requer a determinação do seu calor específico, que pode estimado a partir da expressão (ANDRADE *et al.*, 2004):

$$c_{p\ milho} = 1132 + 54,4 \cdot UR, \quad (10)$$

sendo o calor específico obtido em kJ/(kg.K); e a umidade relativa, UR, expressa em percentagem. Foi arbitrada uma faixa de 20% a 40% para a UR da amostra de milho utilizada, e os cálculos efetuados resultaram em valores de Q_2 iguais a 6.032,5 J e 8.989,5 J para os limites de UR citados, respectivamente.

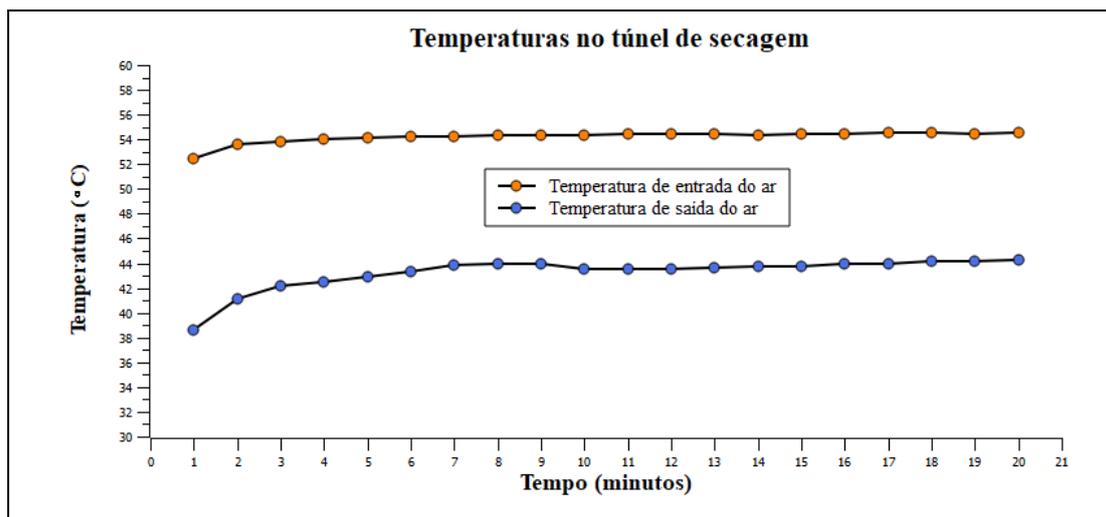


Fig. 6 – Registros de temperatura durante o ensaio com milho umedecido. Fonte: os autores.

Na Fig. 7 é apresentado um gráfico, construído a partir dos registros de $T_{e,i}$, $T_{s,i}$ e V_i de cada intervalo, no qual são apresentados os valores de $Q_{1,i}$, isto é, a quantidade teórica de calor absorvida na vaporização da água contida no alimento a cada intervalo, nas duas condições avaliadas; isto é, com UR do milho igual a 20 e 40%. Nesse gráfico também são apresentados os valores médios de Q_2 nessas duas condições, calculados como a razão entre os valores totais de Q_2 e o número de intervalos, tendo em vista a impossibilidade de se determinar qual a quantidade de calor absorvida no aquecimento em cada intervalo.

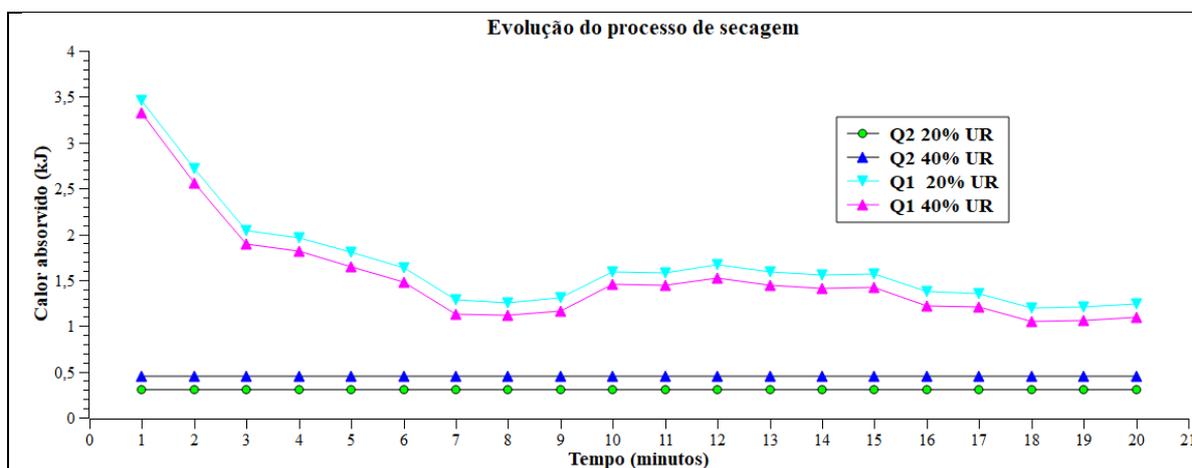


Fig. 7 – Calor absorvido pelo alimento (milho umedecido) durante o ensaio. Fonte: os autores.

Após o término do ensaio, foi determinada a massa experimental de água removida do alimento, confrontado-se esse valor com o resultado teórico obtido através da equação (3),

na qual Q_1 consiste no somatório de Q_{1i} ao longo de todo o ensaio. A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 2 – Resultados obtidos no experimento com milho umedecido.

| UR | Massa água experimental | Massa de água teórica | Erro relativo |
|------|-------------------------|-----------------------|---------------|
| 20 % | 13 gramas | 14,74 gramas | 11,80 % |
| 40 % | 13 gramas | 13,43 gramas | 3,20 % |

Fonte: os autores.

No experimento com chuchu cozido foram colocados 100 gramas desse alimento sobre a bandeja e a operação de secagem foi realizada no período de 20 minutos, de modo similar ao procedimento realizado no ensaio com grãos de milho. Na Figura 8 são apresentados os registros de temperatura na entrada e na saída do túnel de secagem durante o ensaio.

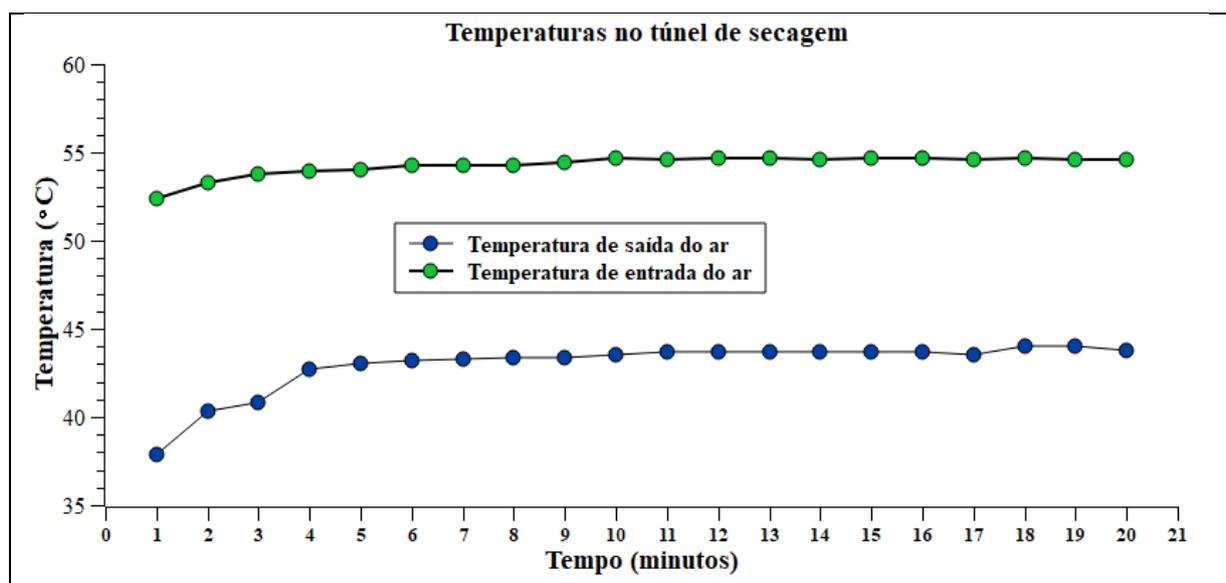


Fig. 8 – Registros de temperatura durante o ensaio com chuchu. Fonte: os autores.

Visando determinar o calor específico desse alimento, e tendo em vista que não foi encontrada tal informação na literatura científica, esse valor foi estimado com base na umidade desse alimento, que é de 94,8% (STORCK *et al.*, 2013). Os autores consideraram o calor específico do alimento como sendo o produto do seu teor de umidade pelo calor específico da água (4.180 kJ/kg). Na Fig. 9 é apresentado um gráfico com o valor médio do calor absorvido pelo alimento por intervalo, Q_2 , e o valor de Q_{1i} computado em cada intervalo.

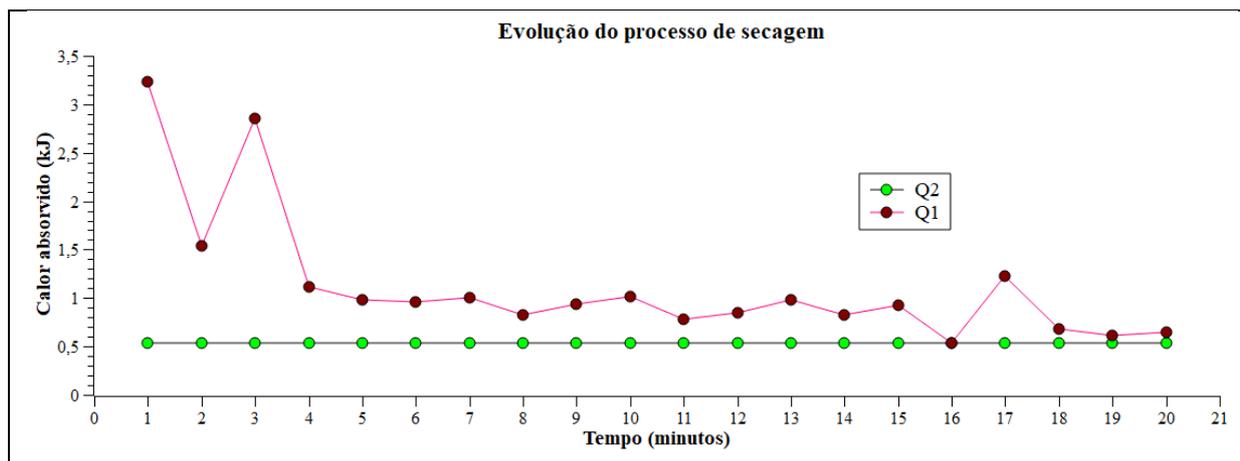


Fig. 9 – Calor absorvido pelo alimento (chuchu) durante o ensaio. Fonte: os autores.

A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos nesse experimento.

Tabela 3 – Resultados obtidos no experimento com chuchu cozido.

| Massa água real | Massa de água teórica | Erro relativo |
|-----------------|-----------------------|---------------|
| 12 gramas | 9,97 gramas | 20,36 % |

Fonte: os autores.

V. Discussão dos resultados

Os desvios entre a massa real e teórica de água removida oscilaram entre 3,20% e 20,36%, nos dois tipos de ensaio realizados. Tais resultados foram considerados satisfatórios, tendo em vista o emprego de material de baixo custo e outros fatores que atuam como fontes de erro.

O baixo custo do PVC e a facilidade de efetuar conexões resultou em uma estrutura bastante simples para o mini-secador. Contudo, a perda de calor através das paredes desse material é significativa, tendo em vista que não foi projetado nenhum tipo de isolamento. Tal dificuldade foi solucionada realizando-se um ensaio prévio com o túnel vazio, o que possibilitou estimar a perda de calor para o ambiente, de modo a minimizar significativamente o erro associado a esse fator.

A utilização de uma balança simples, disponível em lojas de produtos para cozinha, com resolução de 1 grama, constitui uma fonte de erro da ordem de 10% no valor da massa experimental de água removida. Contudo, o emprego desse tipo de balança foi objeto de debate, e a maioria dos alunos julgou importante utilizar um equipamento mais simples e barato, argumentando que isso facilitaria a reprodução desse experimento didático em outras

instituições de ensino. No intuito de avaliar a influência da incerteza da massa aferida na balança nos desvios obtidos entre valores teóricos e experimentais da massa de água removida no alimento, tais desvios foram calculados com acréscimo e decréscimo de um grama em relação à aferição original, sendo apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Desvios entre valores teóricos e experimentais da massa de água removida.

| | | Massa de água removida (experimental) | | |
|--------|----------|---------------------------------------|----------|-----------|
| Ensaio | Condição | - 1 grama | Original | + 1 grama |
| Milho | UR = 20% | 18,59 % | 11,80 % | 5,02 % |
| Milho | UR = 40% | 10,65 % | 3,20 % | 4,24 % |
| Chuchu | ----- | 10,33 % | 20,36, % | 30,39 % |

Fonte: os autores.

Os registros de temperatura e velocidade do ar possuem uma incerteza associada à precisão dos instrumentos utilizados. É importante ressaltar que as medições são efetuadas em um ponto no início e outro no final do secador; e o modelo proposto não considera o perfil de temperatura e velocidade na entrada e na saída do túnel de secagem. Consequentemente, há um fator de erro vinculado à adoção de uma distribuição homogênea dessas variáveis nas seções de entrada e saída.

A estimativa do calor específico dos alimentos utilizados no ensaio é um fator de erro adicional; pois, além da escassez de dados na literatura científica sobre essa propriedade termofísica, há uma variabilidade do produto em si, seja do grão de milho ou do chuchu cozido.

Do ponto de vista pedagógico, os resultados obtidos foram bastante satisfatórios, notadamente pela manifestação dos alunos que, ao final da disciplina, disseram que o conteúdo ministrado e os debates realizados em sala de aula se tornavam mais interessantes na medida em que se integravam num projeto concreto. O engajamento dos alunos na confecção do mini-secador, bem como na preparação dos alimentos utilizados e na execução dos ensaios, revela que a estratégia de ensino adotada foi bem aceita pelos alunos.

No final da disciplina foi solicitado aos alunos que elaborassem um texto registrando suas impressões sobre o trabalho realizado. Alguns dos escritos efetuados pelos alunos, que revelam o seu aproveitamento na atividade proposta, foram compilados e inseridos na imagem da Fig. 10.

Cabe destacar que os alunos perceberam, desde o primeiro momento em que o projeto foi apresentado, que iriam enfrentar dificuldades, tanto do ponto de vista do conhecimento teórico como na elaboração do experimento didático. No que tange ao conhecimento teórico, ressaltamos que muitos alunos eram graduados em matemática, e outros em química, física e engenharia elétrica ou civil; e nenhum deles lecionava disciplinas

de caráter experimental. Contudo, a ideia de realizar um trabalho conjunto, voltado para a elaboração de um produto educacional, motivou-os a enfrentar essas dificuldades.

Este processo de aprendizagem com aulas experimentais possibilitou a participação da turma em experiências concretas com equipamentos de fácil construção e com baixo custo de fabricação e montagem, proporcionando aos alunos um nível de observação e reflexão sobre os resultados quantitativos das experiências...

O aluno, ao ter uma aula experimental, diferentemente de uma aula teórica, padronizada, metódica e engessada, atinge sua aprendizagem de forma autônoma e também criativa, levando este conhecimento para a vida.

Quando se usa equipamentos de baixo custo na montagem de experimentos abre-se espaço para que mais pessoas tenham acesso a aulas práticas que dão significado ao aprendizado. O baixo custo não implica em baixa qualidade do experimento e, sim, reflete a criatividade de quem o elabora.

Desta maneira podemos vivenciar e perceber a importância das aulas experimentais, práticas, interativas que não se limitam a listas de exercícios e conceitos teóricos excessivos e maçantes. A possibilidade de vivenciar, desenvolver e obter sucesso através do experimento desperta no discente a clareza dos conceitos e conteúdos transitando no nosso dia-a-dia.

Durante as aulas foram pensados experimentos de baixo custo que facilitassem a compreensão de processos industriais, com itens de uso diário, mas que poderiam refletir, simplificar e demonstrar conceitos e conteúdos tratados, explicados e analisados durante os encontros presenciais.

Fig. 10 – Imagem da compilação de alguns relatos dos alunos.

Após a seleção do tema e do tipo de experimento a ser realizado, os alunos efetuaram a montagem do equipamento. Durante a realização dos ensaios, verificou-se que a ideia inicial, que consistia em avaliar a quantidade de água vaporizada do alimento a partir de um balanço de massa, efetuado a partir dos registros de umidade relativa do ar na entrada e saída do túnel de secagem, mostrou-se infrutífera. Isso ocorre, essencialmente, em virtude da incerteza do instrumento utilizado para determinar a umidade relativa do ar. Após vários ensaios, optou-se por estimar a massa de água removida do alimento a partir de um balanço térmico, sendo que tal abordagem se mostrou eficaz.

VI. Conclusões

O experimento didático possibilitou um trabalho interdisciplinar e investigativo, com a participação efetiva dos alunos, que se mostraram motivados e envolvidos na realização das tarefas necessárias à execução do projeto. O aprendizado do conteúdo teórico foi estimulado a partir de discussões fomentadas em sala de aula, baseadas no conceito de umidade relativa e sua importância no processo de secagem de um alimento. O processo investigativo foi construído a partir do questionamento dos problemas enfrentados, tanto na montagem do mini-secador como na realização dos ensaios, sendo a contribuição individual de cada aluno analisada de forma criteriosa pelo grupo. A formulação de hipóteses sobre os fatos

observados, buscando sua explicação, despertou o interesse em entender o processo de secagem e as variáveis relevantes nesse processo, visando reformular as condições dos ensaios de modo a obter um resultado quantitativo satisfatório.

É importante ressaltar que se trata de uma proposta flexível, que pode ser adaptada a projetos similares no ensino fundamental e médio, considerando-se as condições das escolas de cada região. Destacamos, no trabalho apresentado, a ideia de fazer conexões entre conceitos científicos e o funcionamento do mundo que nos cerca, construída a partir da elaboração de um experimento didático, num processo em que o aluno participa de forma integral, desde a seleção do tema até as discussões finais sobre o resultado obtido e eventuais possibilidades de melhorias. Nessa proposta, a interação aluno-professor e aluno-aluno são realizadas em cooperação, sendo papel do professor esclarecer dúvidas sobre os conteúdos teóricos necessários, tornando a sala de aula um espaço social onde a construção do conhecimento acontece com foco em um objetivo comum de todo o grupo.

Referências bibliográficas

ANDRADE, E. T.; COUTO, S. M.; QUEIROZ, D. M.; PEIXOTO, A. B. Determinação de propriedades térmicas de grãos de milho. **Revista Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 28, n. 3, p. 488-498, maio/junho, 2004.

ARAÚJO, M. S. T; ABIB, M. L. V. S. Atividades Experimentais no Ensino de Física: diferentes enfoques, diferentes finalidades. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 25, n. 2, p. 176-194, 2003.

ARRUDA, S. M.; LABURÚ, C. E. Considerações sobre a função do experimento no ensino de ciências. In: NARDI, R. (Org.). **Questões atuais no ensino de ciências**. São Paulo: Escrituras, 1998. p. 53-60.

CAÑAL, P. La investigación escolar, hoy. **Alambique: Didáctica de las Ciencias Experimentales**, n. 52, p. 9-19, abril 2007.

CARVALHO, N. M. **A secagem de sementes**, 2.ed. Jaboticabal: FUNEP, 2005. 184p.

DELGADO, L. P. M. *et al.* Experimental determination of surface emissivity using the cooling process of a solid in ambient air. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING, 25th, 2019, Uberlândia. **Proceddings...**

GARCIA, D. C.; BARROS, A. C. S.; PESQUE, S. T. A secagem de sementes. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 2, p. 603-608, 2004.

GARCIA, R. L. *et al.* Tanque hidráulico experimental para cálculo de perda de carga em tubulações. **Revista Eletrônica Científica da UERGS**, v. 2, n. 1, 2016.

GARCIA, R. L. *et al.* Transferência de calor e massa: Fusão de uma placa de gelo. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 39, n. 3, e3502, 2017. Epub Feb 09, 2017. ISSN 1806-1117. <http://dx.doi.org/10.1590/1806-9126-rbef-2016-0280>.

GIORDAN, M. O papel da experimentação no ensino de ciências. **Revista Química nova na escola**, v. 10, n. 10, p. 43-49, 1999.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009. v. 2.

McCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOTT, P. **Unit operations of chemical engineering**, 5th ed. New York: McGraw-Hill, 1993. p. 767-809.

MOREIRA, M. A. **A teoria da aprendizagem significativa e sua implementação em sala de aula**. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 2006.

SILVA, J. M. **Secagem de pedaços cúbicos de goiaba em Leito de Jorro**. 2010. 110p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

SILVA, J. S. S.; AFONSO, A. D. L.; DONZELLES, S. M. L. Secagem e Secadores. In: **Secagem e Armazenamento de Produtos Agrícolas**, Viçosa, Cap. 5, p.107-137, 2000.

STORCK, C. R.; NUNES, G. L.; OLIVEIRA, B. B.; BASSO, C. Folhas, talos, cascas e sementes de vegetais: composição nutricional, aproveitamento na alimentação e análise sensorial de preparações. **Revista Ciência Rural**, v. 43, n. 3, p. 537-543, 2013.

VAN WYLEN, G. J.; SONNTAG, R. E.; BORGNAKKE, C. **Fundamentos da termodinâmica clássica**. 4. ed. São Paulo: Blucher, 2008. 589 p. ISBN 9788521201359.



Direito autoral e licença de uso: Este artigo está licenciado sob uma [Licença Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).