

Desenvolvimento de um conceito para otimizar o tempo de resfriamento de latas de cervejas

Development of a concept to optimize the cooling time of beer cans

Dionet Maschio

Universidade da região de Joinville - UNIVILLE

Departamento de Engenharia Mecânica - Bacharelado em Engenharia Mecânica

Endereço eletrônico: garuvabr@gmail.com

Resumo. Ao longo da história, a cerveja ocupa um papel de destaque na sociedade, sendo apreciada em todos os cantos da terra, em alguns poucos lugares do mundo, o líquido a base de cevada é consumida a "quente", mas no Brasil, pelo clima tropical, a cultura do povo diz que a temperatura de consumo deve ser bem próxima a temperatura de congelamento, ou seja como cerveja congela a $-2,5^{\circ}\text{C}$, e as papilas gustativas perdem a sensibilidade a 0°C , então variando o gosto de pessoa para pessoa a temperatura ideal para consumo fica em torno de 2°C . O presente trabalho apresenta um conceito que busca otimizar o tempo de resfriamento das latas de cerveja através dos princípios de transferência de calor por convecção forçada, de maneira que este conceito possa ser estendido para aplicação em compartimentos anexos ao refrigerador ou até mesmo em dispositivos distintos. Além disso, o trabalho também faz uma análise quantitativa das variações do processo no interior do freezer, considerando tanto o resfriamento na posição vertical, quanto na horizontal. Ao final, após a obtenção dos dados, um gráfico comparativo classifica em uma escala de eficiência baseada nos coeficientes de película os processos mais eficientes no resfriamento das latas de cerveja.

Palavras-chave: Transferência de calor, Convecção forçada, Cerveja, Refrigeração.

Abstract. *Throughout history, beer plays a prominent role in society, being appreciated in all corners of the earth, in a few places in the world, barley-based liquid is consumed "hot", but in Brazil, by the climate tropical, people's culture says that the temperature of consumption should be very close to freezing temperature, ie as beer freezes at -2.5°C , and the taste buds lose their sensitivity at 0°C , then varying the taste of person for the person the ideal temperature for consumption is around 2°C . The present work presents a concept that seeks to optimize the cooling time of beer cans through the principles of heat transfer by forced convection, so that this concept can be extended for application in compartments adjacent to the refrigerator or even in different devices. In addition, the work also makes a quantitative analysis of the process variations inside the freezer, considering both vertical and horizontal cooling. In the end, after obtaining the data, a comparative graph ranks in a scale of efficiency based on the coefficients of film the most efficient processes in the cooling of the cans of beer.*

Key words: *Heat Transfer, Forced Convection, Beer, Cooling.*

Iniciação - Revista de Iniciação Científica, Tecnológica e Artística
Edição Temática em Tecnologia Aplicada

Vol. 7 no 4 – outubro de 2018, São Paulo: Centro Universitário Senac
ISSN 2179-474X

Portal da revista: <http://www1.sp.senac.br/hotsites/blogs/revistainiciacao/>
E-mail: revistaic@sp.senac.br

Esta obra está licenciada com uma Licença [Creative Commons Atribuição-Não Comercial-Sem Derivações 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) 

Introdução

De acordo com o anuário de 2016 da Associação Brasileira da Indústria da Cerveja (CervBrasil), o país fabricou 14,1 bilhões de litros de cerveja, esse número coloca o Brasil como o terceiro maior produtor mundial de cervejas ficando atrás apenas da China e dos EUA. Além disso, o mercado nacional ocupa a 27ª posição no *ranking* internacional de consumo médio *per capita*, fechando o ano com um faturamento de R\$ 77 bilhões (CERVBRASIL, 2016). Esses dados demonstram que o país está em crescente expansão no ramo de produtor cervejeiro, mas ainda há um grande mercado para explorar no setor de consumo interno, possibilitando o desenvolvimento e aceitação de novas tecnologias com intuito aumentar a demanda.

Para a cultura brasileira, o sabor e a sensação de “matar a sede” que a cerveja possui, está diretamente ligada a temperatura em que é bebida, havendo, portanto, uma temperatura ideal para o consumo, sendo esta algo em torno de 2 °C. Essa temperatura pode variar dependendo do gosto pessoal. Porém, para se atingir esta temperatura existem vários procedimentos de refrigeração, dentre eles o procedimento padrão, consiste na utilização de refrigerador, em que se exige um tempo de transição entre a temperatura inicial em que a lata é introduzida no aparelho até a obtenção da temperatura desejada.

Ao longo dos anos o público alvo das indústrias cervejeiras, por meio de pressuposições e inúmeras tentativas, acabaram desenvolvendo métodos improvisados com alguns inconvenientes, mas que realmente reduzem o tempo para resfriar a cerveja, como: levar ao refrigerador a lata envolvida em papel molhado; utilizar caixa térmica com mistura de gelo, água, álcool e sal; entre outras técnicas caseiras.

Diante dos diversos métodos populares e percebendo a necessidade que os apreciadores de bebida têm que elas resfriem rapidamente, notou-se um grande nicho de mercado ainda inexplorado, abrindo oportunidades para o desenvolvimento de compartimentos incorporados aos refrigeradores ou até mesmo dispositivos otimizadores portáteis com intuito de acelerar o processo de resfriamento, garantindo mais facilidade e agilidade para o consumidor, dispensando-o de usar métodos empíricos, ou que tenha que esperar um tempo maior para gelar a cerveja em um refrigerador convencional. Assim, também favorecendo o aumento do consumo da cerveja, beneficiando a economia brasileira.

Partindo deste contexto, é possível desenvolver um dispositivo, aplicando fundamentos de termodinâmica e transferência de calor, capaz de otimizar o tempo para resfriar latas de cerveja em um compartimento específico no interior do refrigerador. Baseando-se nos princípios de transferência de calor por convecção forçada, aumentando o coeficiente de transferência de calor, visando o aumento de eficiência d processo de resfriamento simples no interior do refrigerador.

A literatura de transferência de calor reconhece três mecanismos de troca de calor, sendo eles, de acordo com Shapiro et al. (2013, p. 41), dois mecanismos básicos de transferência de calor: condução e radiação térmica, e a partir de relações empíricas envolvendo condução e um movimento macroscópico, dá origem a um terceiro mecanismo combinado chamada convecção térmica. Considerando o escopo deste projeto, os processos de transferência de calor relevantes que podem ocorrer para a etapa de resfriamento são a condução e a convecção, porém na maioria dos casos acontecem os dois mecanismos juntos.

Segundo Silva (2007), a condução consiste na troca de calor entre um fluido e a superfície de um sólido, quando estes estão em contato e se encontram em temperaturas diferentes, provocando, assim um gradiente de temperatura no interior do sólido e induzindo à transferência de calor por condução.

No que diz respeito a convecção, Incropera et al., (2014) afirma que a convecção é um modo combinado de transferência de calor entre uma superfície sólida e uma líquida ou um gás adjacente, sendo composto pelo movimento molecular aleatório também chamado de difusão ou condução, e pelos movimentos macroscópicos do fluido também chamado de movimento global.

Além disso, é preciso ressaltar que o mecanismo da convecção pode ser classificado em convecção natural ou convecção forçada, sendo que a diferença entre elas é a maneira como o movimento do fluido é iniciado. Define-se convecção natural quando o movimento do fluido é causado por forças de flutuação que são induzidas por diferenças de densidade devida a variação da temperatura no fluido (ÇENGEL, 2009). A convecção forçada é diferente da convecção natural em função do movimento macroscópico do fluido ser forçado a fluir sobre a superfície por meios externos, tais como um ventilador, bomba ou vento, esses mecanismos são utilizados para agitar o fluido, o que reduz a espessura do filme limite para produzir taxas mais altas de transferência de calor e uma redistribuição mais rápida da temperatura (ÇENGEL, 2009; SILVA, 2007; FELLOWS, 2008).

Considerando o resfriamento de uma lata quente por ar frio soprando sobre a sua superfície. O primeiro mecanismo acontece no contato da bebida com o recipiente, a bebida recebe nesse momento o calor por condução através da área de contato com o material. Esse calor é então transportado para longe da superfície por convecção, isto é, pelos efeitos combinados de condução dentro do ar, que são devidos ao movimento aleatório das moléculas do ar e ao movimento da massa ou macroscópico do ar, que remove o ar aquecido próximo a superfície e o substitui por ar mais frio para superfície externa do produto (ÇENGEL, 2009; REIS, 2012). No início, o resfriamento evaporativo ocorre quando o ar não se encontra saturado, e é insuflado por meio de uma superfície úmida. O calor vai ser removido à medida que ocorre a evaporação da água na superfície do produto, conseqüentemente, ocorre diminuição da temperatura (VISSOTTO et al., 1999).

Segundo Nascimento (2011), a refrigeração é produzida quase totalmente por meios artificiais, utilizando diferentes tipos de sistemas, dentre os quais destacam-se: refrigeração por absorção, refrigeração por compressão mecânica de vapor, refrigeração forçada de ar, refrigeração termoelétrica e refrigeração termomagnética. No sistema de resfriamento por ar forçado, é utilizado ar a baixa temperatura como meio de resfriamento, baseado no princípio de convecção.

É importante ressaltar que o produto deve permanecer no local o tempo necessário para que a temperatura no seu centro térmico seja reduzida até o patamar desejado. Esse tempo é determinado pela temperatura do meio, pelas características do produto e embalagem, pelo calor específico, pelo fluxo de ar, pela disposição e geometria do produto (BARBIN et al., 2009; SANTOS, 2005; LAGUERRE et al., 2006). Além disso, o movimento do ar refrigerado é ocorre em direção ao produto, evitando a condensação de água sobre sua superfície (TERUEL et al., 2004). É interessante também que o produto tenha o maior contato possível com o ar para intensificar a perda de calor diminuindo significativamente o tempo de resfriamento do mesmo.

Atualmente não se têm estudos sobre o uso de resfriamento rápido específico para cervejas e nem produtos comerciais no mercado, porém encontra-se na literatura especializada diversos estudos sobre resfriamento/congelamento rápido em que se usa um sistema similar ao desenvolvido nesse projeto, porém para outras finalidades em cada estudo. Para este projeto foi elaborado um dispositivo especificamente para ser usado em refrigeradores domésticos. Entre os diversos estudos, temos o congelamento de suínos e o resfriamento rápido de morango, pimentão amarelo, alface crespa em câmara fria e ambos os autores obtiveram sucesso em suas pesquisas (PIROZZI e AMENDOLA, 2005; SIQUEIRA et al., 2014; ANTONIALI et al., 2012; ANTONIALI e CORTEZ, 2000).

A proposta deste trabalho foi desenvolver um conceito para direcionar a potência de resfriamento em um compartimento para latas de cerveja, aplicado em compartimentos anexos ao refrigerador, ou em dispositivos distintos e inseridos manualmente no refrigerador, para otimizar o resfriamento de latas de cerveja.

1. Metodologia

Como o objetivo dessa pesquisa foi desenvolver um dispositivo para otimizar o tempo para resfriar latas de cerveja no interior do freezer, baseando-se nos princípios da convecção forçada. Para isso o método adotado foi através de correlações empíricas tanto do conceito apresentado, como do procedimento padrão. Foram calculados e analisados os parâmetros térmicos dos diferentes processos para, posteriormente, fazer uma análise comparativa entre eles, A estratégia de pesquisa empregada foi dividida em duas etapas, como será descrito a seguir.

Na primeira parte do estudo, realizou-se um levantamento das condições de operação padrão existentes por meio de dados encontrados em normas, livros, artigos e periódicos com o objetivo de entender o mecanismo de resfriamento de latas de cerveja, bem como as temperaturas operacionais. Fórmulas que poderiam ser úteis na resolução analítica e algumas restrições durante o tempo de resfriamento das latas. Essa fase foi importante para consolidar as bases técnicas para se dar início ao desenvolvimento do projeto, as quais forneceram propriedades que devem ser levadas em consideração nos cálculos e os conhecimentos das propriedades térmicas tanto da cerveja em si, como das latas de alumínio por onde o calor flui.

A segunda fase da pesquisa consistiu em resoluções analíticas a fim de se obter os coeficientes de película para diversas técnicas englobando tanto o procedimento padrão, como o conceito apresentado nesse artigo, após o recolhimento e análise dos dados resultantes das resoluções analíticas foi construído um protótipo e realizados testes práticos com o intuito de verificar a validade dos dados obtidos de forma analítica. Para o procedimento padrão foram efetuados testes com a lata no interior do refrigerador, tanto na posição horizontal, como na posição vertical. Já para o desenvolvimento de um dispositivo de ar forçado foi criado um protótipo para ser inserida a lata de cerveja, que foi instalado no interior do refrigerador e testado sob diferentes condições de operação.

Caracterização das Propriedades Físicas, Térmicas e Condições de Operação

Com relação as características físicas das latas de alumínio, os dados foram extraídos por meio de engenharia reversa, a partir do modelamento tridimensional da lata em software CAD. Para as medições de temperatura iniciais adotou-se uma temperatura média no interior do refrigerador de -20°C e temperatura ambiente da cerveja de 28°C . Estes dados foram medidos com termômetro digital, modelo TP-101 e um termômetro a laser digital industrial. A velocidade do fluxo de ar no interior do dispositivo foi medida com um termo anemômetro digital profissional, modelo TAD-500. O tempo de exposição foi determinado em 30 minutos para cada experimento. Esses dados serviram de base para os cálculos teóricos do coeficiente de película e como parâmetros para os testes práticos.

2. Procedimento padrão através convecção natural

Resfriamento da lata no interior do refrigerador

O procedimento padrão utilizado atualmente consiste em introduzir as latas de cerveja no interior do refrigerador e aguardar o tempo necessário para resfriar. A

vantagem desse procedimento é a praticidade, embora exija um longo tempo de espera. Este procedimento funciona seguindo os princípios da convecção natural e pode ser feito de duas maneiras:

- Com a lata na posição horizontal;
- Com a lata na posição vertical.

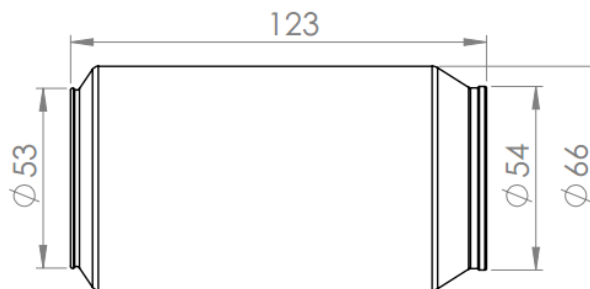
A temperatura foi medida por um termômetro digital, modelo TP-101 e um termômetro a laser digital industrial.

Para todos os cálculos de convecção através das correlações empíricas é importante conhecer os regimes de escoamento, sendo que para o caso de convecção natural o regime de escoamento deve ser avaliado segundo o resultado do produto do número Grashof e Prandtl, ou seja, o número de Rayleigh, estando o regime laminar entre 10^4 e 10^8 .

a) Lata na posição horizontal

Considerando a lata de cerveja, como um cilindro horizontal, para garantir uma boa precisão dos resultados, deve-se calcular separadamente o coeficiente de película para cada superfície de troca de calor, ou seja, para a área cilíndrica horizontal, para o disco vertical do fundo da lata e para o disco vertical da tampa da lata, seguindo as dimensões características mostradas em milímetros na figura 1.

Figura 1. Dimensões características da lata na horizontal



Fonte: Elaborada pelo autor

Para obter um coeficiente médio de transferência de calor por convecção natural, aplicando as correlações empíricas para este tipo de transferência de calor, é fundamental seguir quatro determinações importantes.

- É necessário utilizar uma correlação com número de Nusselt médio, \overline{Nu} ;
- Todas as propriedades físicas devem ser avaliadas na temperatura média entre a temperatura do fluido longe da superfície T_{∞} e a temperatura superficial T_s ;
- A diferença de temperatura associada ao número de Grashof deve ser considerada nas temperaturas absolutas, na escala Kelvin;
- Os subscritos adicionados em números adimensionais, referem-se à dimensão característica.

Segundo Lindeburg (2013), a correlação do tipo de Nusselt pode ser utilizada para várias formas. A equação 1 e equação 2, mostra a correlação do tipo de Nusselt adaptada para o caso de cilindros horizontais, onde ela abrange desde as faixas de escoamento sub laminar até o final da faixa de escoamento de transição (equação 1) até o regime totalmente turbulento (equação 2).

$$\overline{Nu}_{D_c} = \frac{h \cdot D_c}{k_f} = 0,53(Gr_{D_c} \cdot Pr)^{1/4} \quad (1)$$

$$\overline{Nu}_{D_c} = \frac{h \cdot D_c}{k_f} = 0,13(Gr_{D_c} \cdot Pr)^{1/3} \quad (2)$$

$$Gr_{D_c} = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_\infty) \cdot D_c^3}{\nu^2} \quad (3)$$

$$\beta = \frac{1}{T_\infty} \quad (4)$$

$$\nu = \frac{\mu}{\rho_f} \quad (5)$$

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\mu \cdot c_{p_f}}{k_f} \quad (6)$$

$$Ra = Gr_{D_c} \cdot Pr \quad (7)$$

Onde, \overline{Nu}_{D_c} é o número de Nusselt Médio para a dimensão característica do cilindro, Gr_{D_c} é o número de Grashof a dimensão característica do cilindro, Pr é o número de Prandtl, k_f é o coeficiente de condutividade térmica do fluido em convecção, h é o coeficiente de película, D_c é a dimensão característica do cilindro, g é a aceleração gravitacional, β é o coeficiente de expansão térmica, T_s é a temperatura absoluta da superfície, T_∞ é a temperatura absoluta longe da superfície, ν é a viscosidade cinemática, α é a difusividade térmica do fluido, μ é a viscosidade dinâmica, c_{p_f} é o calor específico do fluido, ρ_f é a densidade do fluido e Ra é o número de Rayleigh médio. Isolando o coeficiente de película, tem-se:

$$h = \frac{\overline{Nu}_{D_c} \cdot k_f}{D_c} \quad (8)$$

b) Lata na posição vertical

Da mesma maneira que foi descrito na subseção anterior, também foi analisado o coeficiente de película caso a lata seja colocada na posição vertical. Onde a equação 9 representa esta correlação para escoamento no sub laminar, a equação 10 para escoamento em regime laminar e de transição, e a equação 11 para o regime de escoamento totalmente turbulento.

$$\overline{Nu}_{L_{hc}} = \frac{h \cdot L_{hc}}{k_f} = 1,36(Gr_{L_{hc}} \cdot Pr)^{0,20} \quad (9)$$

$$\overline{Nu}_{L_{hc}} = \frac{h \cdot L_{hc}}{k_f} = 0,59(Gr_{L_{hc}} \cdot Pr)^{1/4} \quad (10)$$

$$\overline{Nu}_{L_{hc}} = \frac{h \cdot L_{hc}}{k_f} = 0,13(Gr_{L_{hc}} \cdot Pr)^{1/3} \quad (11)$$

Onde, $\overline{Nu}_{L_{hc}}$ é o número de Nusselt médio para a altura do cilindro, $Gr_{L_{hc}}$ é o número de Grashof para a altura do cilindro e L_{hc} é a altura do cilindro.

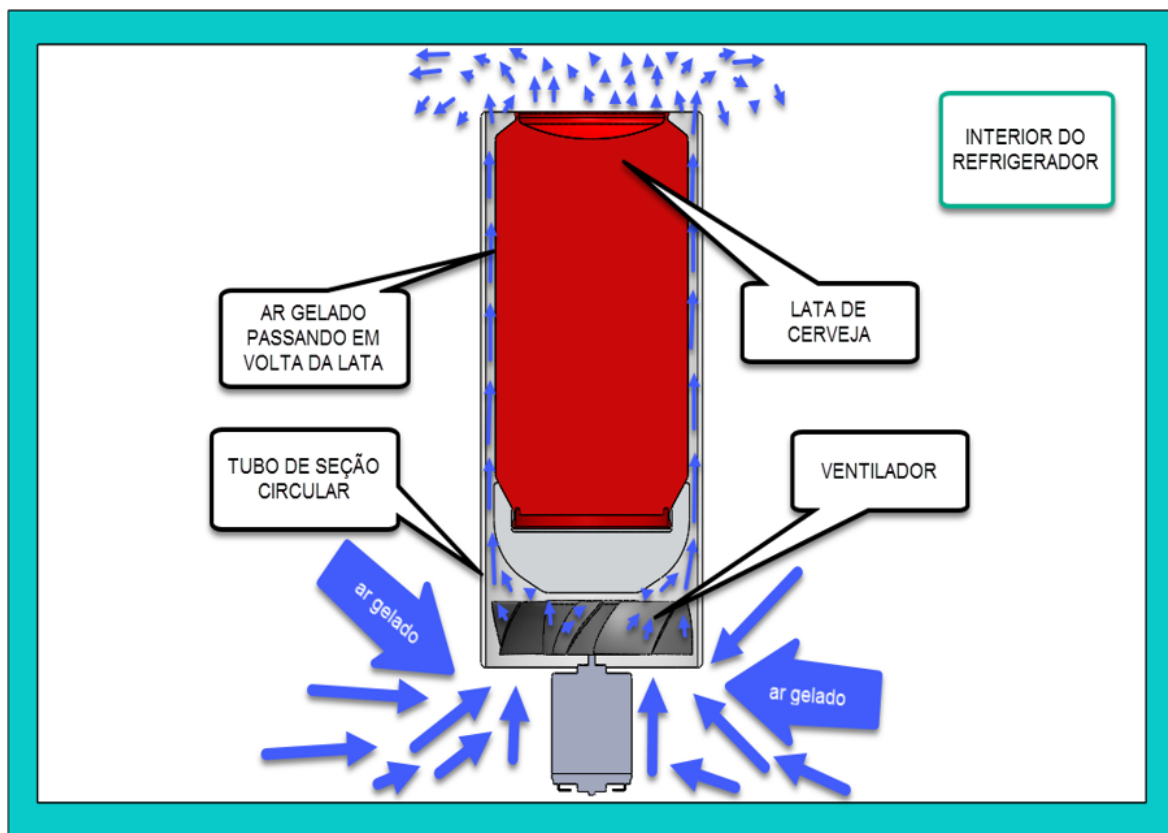
3. Conceito apresentado através de convecção forçada

Neste experimento, foi avaliado a redução da temperatura da lata por convecção forçada para as seguintes condições:

- Resfriamento através do conceito apresentado com $V = 1$ m/s;
- Resfriamento através do conceito apresentado com $V = 2$ m/s;
- Resfriamento através do conceito apresentado com $V = 5$ m/s;
- Resfriamento através do conceito apresentado com $V = 10$ m/s;
- Resfriamento através do conceito apresentado com $V = 20$ m/s.

O dispositivo desenvolvido para otimizar o tempo de refrigeração das latas de cerveja, resume-se, em introduzir no interior do refrigerador, um tubo de seção circular com a lata de cerveja no seu interior de maneira a formar uma seção anular, e então forçar o ar contido no refrigerador a passar pela seção anular entre a lata e o tubo conforme ilustrado na figura 2.

Figura 2. conceito desenvolvido para otimizar o tempo de refrigeração das latas de cerveja.

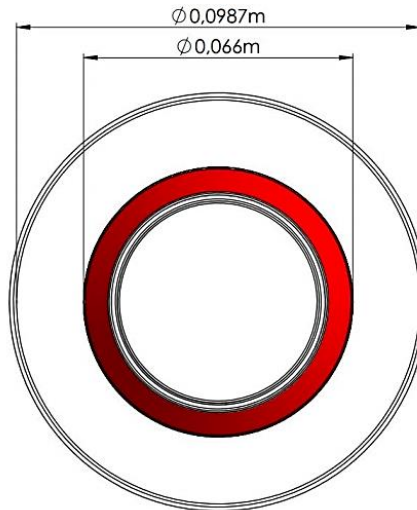


Fonte: Elaborada pelo autor

As temperaturas foram medidas por um termômetro digital, modelo TP-101 e um termômetro a laser digital industrial e as velocidades de fluxo de ar foram medidas com um anemômetro digital profissional, modelo TAD-500.

As dimensões características da seção anular do conceito apresentado, são mostrados na figura 3. Tais condições geométricas foram definidas em função da facilidade proporcionada na construção de futuros protótipos.

Figura 3. Dimensões características da seção anular.



Fonte: Elaborada pelo autor

Quanto ao comprimento do duto de seção anular, foi adotado como 140mm, em função da altura da lata somado a um apoio para mesma.

Após definido todas as características geométricas essenciais do conceito apresentado, foi possível a aplicação de correlações empíricas existente na literatura especializada para as resoluções analíticas. Sendo as três de maior importância a equação de Dittus-Boelter, de Sieder e Tate e a correlação de Gnielinski.

Correlação de Dittus-Boelter

A equação de Dittus-Boelter corrigida para dutos curtos é apresentada na equação 12.

$$\overline{Nu}_{DH} = \frac{h \cdot DH}{k_f} = 0,023 \cdot Re_{DH}^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot \left(1 + \left(\frac{6DH}{L_t} \right) \right) \quad (12)$$

$$DH = D_{a2} - D_{a1} \quad (13)$$

$$Re_{DH} = \frac{\rho_f \cdot V \cdot DH}{\mu} \quad (14)$$

$$V = \frac{V_{entrada} + V_{saída}}{2} \quad (15)$$

Onde, \overline{Nu}_{DH} é o número de Nusselt médio para o diâmetro hidráulico, DH é o diâmetro hidráulico, Re_{DH} é o número de Reynolds para o diâmetro hidráulico, L_t é o comprimento do tubo, D_{a1} é o diâmetro interno da seção anular, D_{a2} é o diâmetro externo da seção anular, e V é a velocidade média entre a entrada e a saída.

Correlação de Sieder e Tate

A equação de Sieder e Tate corrigida para dutos curtos é visualizada na equação 16.

$$\overline{Nu}_{DH} = \frac{h \cdot DH}{k_f} = 0,027 \cdot Re_{DH}^{0,8} \cdot Pr^{1/3} \cdot \left(\frac{\mu_b}{\mu_s} \right)^{0,14} \cdot \left(1 + \left(\frac{6DH}{L_t} \right) \right) \quad (16)$$

Onde, μ_b é a viscosidade dinâmica avaliada na temperatura média do volume do fluido, μ_s é a viscosidade dinâmica avaliada na temperatura da superfície.

Correlação de Gnielinski

E por fim, a equação de Gnielinski é mostrada na equação 17.

$$\frac{Nu_{DH}}{Pr} = \frac{\left(\frac{f}{8}\right) \cdot (Re_{DH} - 1000) \cdot Pr}{1 + 12,7 \cdot \left(\frac{f}{8}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot (Pr^{\frac{2}{3}} - 1)} \cdot \left[1 + \left(\frac{DH}{L_t}\right)^{\frac{2}{3}}\right] \cdot K \quad (17)$$

$$f = (1,82 \cdot \log_{10} Re_{DH} - 1,64)^{-2} \quad (18)$$

$$K = \begin{cases} (Pr_b/Pr_s)^{0,11} & \text{Para líquidos} \\ (T_h/T_s)^{0,45} & \text{Para Gases} \end{cases} \quad (19)$$

Onde, f é o coeficiente de atrito, K é a constante para gases ou líquidos em convecção, Pr_b é o número de Prandtl avaliado na temperatura média do volume do fluido e Pr_s é o número de Prandtl avaliado na temperatura da superfície da lata.

Utilizando os dados de temperatura e tempo pré-estabelecido, e aplicando as correlações empíricas, foi feito então uma análise para várias velocidades de fluxo de ar, sendo que para cada velocidade considerada, foi realizada uma média aritmética, da velocidade de entrada e saída do tubo com seção circular, após isso, foi feito um balanço de massa para ajustar a velocidade na seção anular. Depois de encontrados todos esses valores, foi possível encontrar o coeficiente de película para cada correlação.

4. Resoluções Analíticas

Propriedades das análises

As dimensões da lata de alumínio são mostradas na tabela 1, e quanto as propriedades físicas e químicas da cerveja, em função do segredo de industrial não foi possível obtê-las com o fabricante, porém em função da composição ser quase inteiramente constituída de água, para fins acadêmicos, neste artigo foi considerado as propriedades físicas e químicas da cerveja iguais as da água.

Tabela 1. Características da lata de alumínio.

| Altura da lata (m) | Diâmetro da lata (m) | Área da superfície de convecção | | |
|--------------------|----------------------|---------------------------------|-------------|-------------|
| | | Cilíndrico 81,25% | Fundo 9,35% | Tampa 9,40% |
| 0,123 | 0,066 | 0,025994 | 0,002991 | 0,003024 |

Procedimento Padrão

a) Posição Horizontal

Utilizando as dimensões características da lata de cerveja e as propriedades tanto do ar contido no interior do refrigerador como da cerveja no interior da lata, foi possível encontrar os números de Grashof e de Prandtl através da aplicação das equações (3) e (6) respectivamente, e pelo produto de ambos foi obtido o número de Rayleigh (equação 7) de cada forma específica da lata horizontal, conforme a é observado na tabela 2.

Tabela 2. Números de Grashof, Prandtl e Rayleigh médios para a Lata Horizontal

| Número de Prandtl | Números de Grashof Médios |
|-------------------|---------------------------|
|-------------------|---------------------------|

| | | | | | | |
|----------------------------------|------------------------|----------------------------|--------|----------------------------|------------------------|------------------------|
| μ (kg/m.s) | c_{p_f} (kJ/kg.K) | k_f (W/m.K) | 0,7458 | Superfície Cilíndrica | Superfície do Fundo | Superfície da Tampa |
| 0,000017 | 1048 | 0,0245 | | 2606940,18 | 1349978,55 | 1427843,27 |
| Número de Rayleigh Médios | | | | | | |
| Superfície Cilíndrica | | Superfície do Fundo | | Superfície da Tampa | | |
| 1944313,98 | | 1006844,04 | | 1064917,28 | | |

Comparando os resultados do número de Rayleigh médios, pode-se notar que todos os escoamentos estão no regime laminar, assim aplicando a equação (1) para dimensão característica, encontra-se os números de Nusselt mostrados na tabela 3.

Tabela 3. Número de Nusselt para lata horizontal

| Números de Nusselt Médios | | |
|----------------------------------|--------------|--------------|
| Cilíndrico | Fundo | Tampa |
| 19,79 | 18,69 | 18,95 |

Então a partir da equação (8), isolando o coeficiente de película, considerando as dimensões características de cada forma, e fazendo uma média ponderada em relação ao percentual de área que cada forma possui, tem-se o coeficiente de película médio da lata na posição horizontal, conforme mostrado na tabela 4.

Tabela 4. Coeficiente de película para lata horizontal

| Coeficiente de Película (h) (W/m².K) | | | |
|--|--------------|--------------|--------------|
| Cilíndrico | Fundo | Tampa | Médio |
| 7,35 | 7,71 | 7,82 | 7,43 |

b) Posição Vertical

Da mesma maneira que foi descrito na análise anterior, também foi analisado o coeficiente de película caso a lata seja colocada na posição vertical, e neste caso a correlação aplicada é a equação (10), desta maneira os coeficientes de película para cada superfície da lata e também o coeficiente médio obtido através da média ponderada das áreas correspondentes, são mostrados na tabela 5 para a condição da lata na posição vertical.

Tabela 5 – Coeficiente de película para lata vertical

| Coeficiente de Película (h) (W/m².K) | | | |
|--|--------------|--------------|--------------|
| Cilíndrico | Fundo | Tampa | Médio |
| 7,00 | 3,52 | 7,15 | 6,69 |

Comparando-se as tabelas 4 e 5, pode-se afirmar que a posição horizontal é mais eficiente no resfriamento da cerveja do que a posição vertical, no que diz respeito ao procedimento padrão utilizado para o resfriamento de latas de cerveja.

Conceito apresentado

A tabela 6 mostra os coeficientes de película médio para cada velocidade de fluxo de ar, obtidos mediante as três correlações empíricas presentes neste artigo (Equações (12), (16) e (17)).

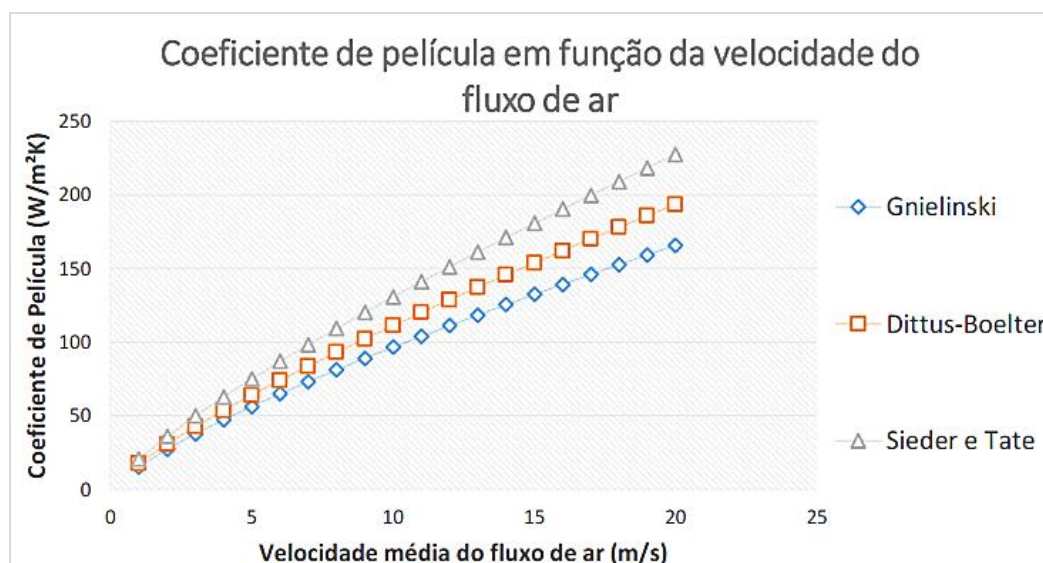
Tabela 6 – Coeficientes de película em função da velocidade do fluxo

| Velocidade média do fluxo de ar (m/s) | Coeficiente de Película (h) (W/m ² .K) | | |
|--|---|----------------|---------------|
| | Gnielinski | Dittus-Boelter | Sieder e Tate |
| 1,00 | 15,13 | 17,62 | 20,67 |
| 2,00 | 27,27 | 30,68 | 36,00 |
| 5,00 | 56,09 | 63,85 | 74,93 |
| 10,00 | 96,03 | 111,17 | 130,46 |
| 20,00 | 165,08 | 193,56 | 227,14 |

É possível notar uma diferença em cada correlação, porém de acordo com Kreith e Bohn (2015), a correlação mais aceita e mais utilizada na prática, é a correlação de Gnielinski. Sendo assim os resultados desta correlação serão comparados com os coeficientes de película obtidos para o procedimento padrão.

A figura 4, mostra um gráfico comparativo entre os coeficientes de película obtidos por cada correlação em função da velocidade do fluxo de ar.

Figura 4. Gráfico dos coeficientes de película em função da velocidade



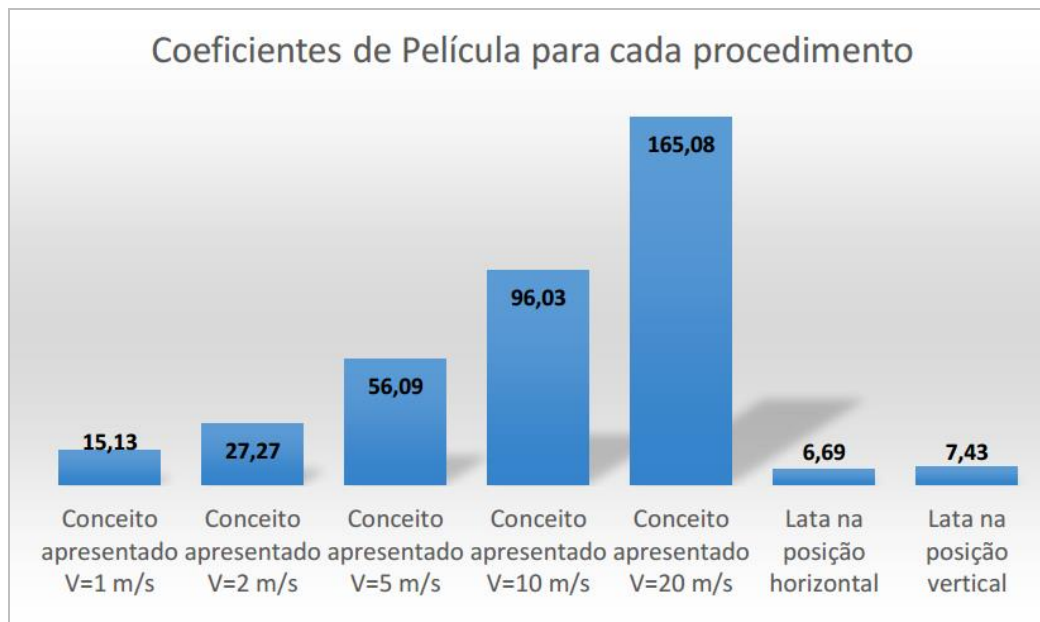
Fonte: Elaborada pelo autor

Comparações entre o conceito apresentado e o procedimento padrão

Sabendo que o tempo de resfriamento das latas de cerveja, está diretamente ligado ao valor do coeficiente de película, e desta forma, quanto maior o coeficiente de película, menor será o tempo de resfriamento das latas de cerveja.

Fazendo um comparativo, entre o procedimento padrão, considerando as variações de posição entre horizontal e vertical, e o conceito apresentado neste trabalho com variação de fluxo de ar, o gráfico da figura 5 mostra um comparativo dos coeficientes de película para cada procedimento.

Figura 5. Gráfico comparativo entre os procedimentos.



Fonte: Elaborada pelo autor

Como se pode ver o conceito apresentado nesse artigo com velocidade de fluxo de 20m/s, prevê um coeficiente de película de 165,08 W/m²K, representando um aumento superior a 20 vezes, ou seja 2.221%, em relação ao procedimento padrão com a posição horizontal.

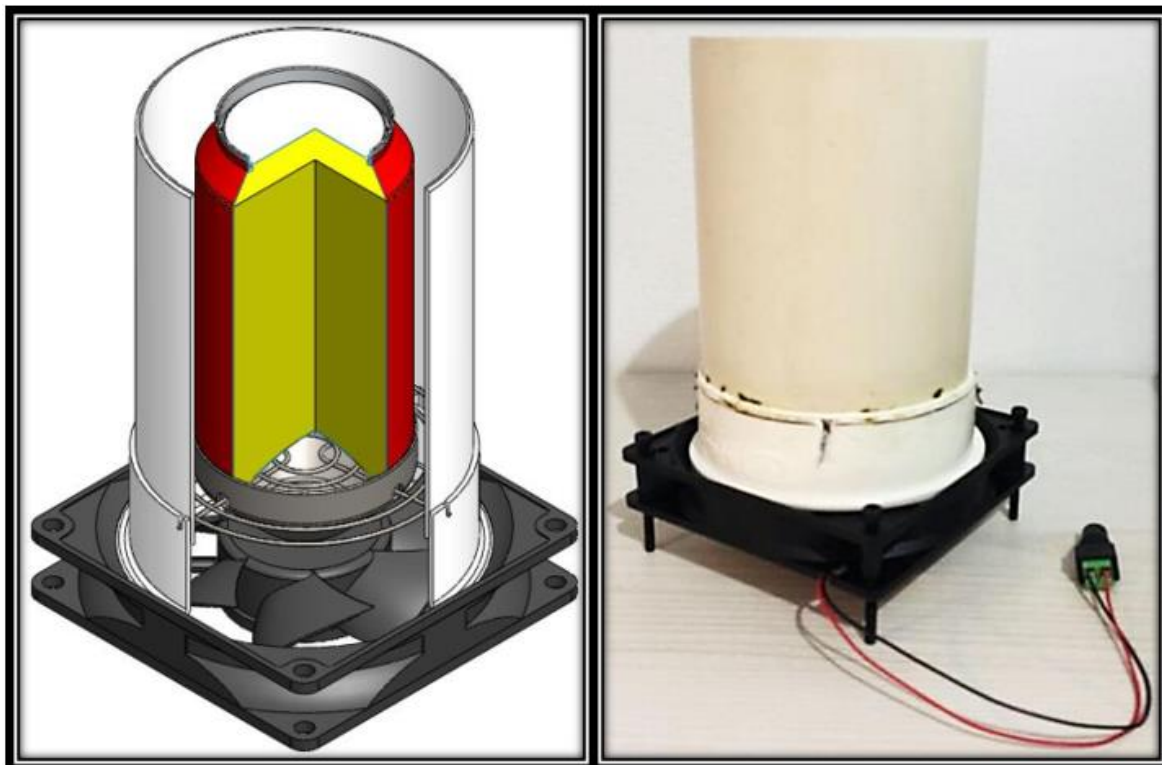
5. Testes Práticos

Para atestar a validade dos resultados obtidos nas resoluções analíticas foi construído um protótipo com características geométricas semelhantes aos dados utilizados nas correlações empíricas e com capacidade de fornecer o fluxo de ar com velocidade de 2 m/s a fim de testar a eficiência de resfriamento da lata. Todos os testes foram realizados no mesmo refrigerador doméstico. Dessa forma foram realizados três experimentos diferentes com cinco repetições cada, sendo eles:

- Procedimento padrão com lata em posição horizontal;
- Procedimento padrão com lata em posição vertical;
- protótipo apresentado com velocidade média do fluxo de ar igual a 2,0m/s.

A figura 6, mostra o projeto e o protótipo do conceito apresentado para otimizar o tempo de resfriamento de latas de cerveja.

Figura 6. Projeto e protótipo para testes.



Fonte: Elaborado pelo autor

A figura 7 ilustra como os experimentos foram realizados.

Figura 7. Realização dos experimentos.



Fonte: Elaborada pelo autor

Com a média dos resultados de cada experimento pode-se constatar uma grande diferença nas temperaturas finais médias dos dois métodos avaliados para o resfriamento de latas de cerveja, como pode ser visto na tabela 7.

Tabela 7. Parâmetros dos experimentos realizados.

| Método de Refrigeração | Testes | Velocidade Média do Fluxo de Ar | Refrigerador | Cerveja | | Tempo (minutos) |
|--|------------|---------------------------------|-------------------|---------------------------|-------------------------|-----------------|
| | | | Temperatura média | Temperatura Inicial Média | Temperatura Final Média | |
| Procedimento Padrão (Convecção Natural) | Horizontal | | -20,0 | 28 | 14,2 | 30 |
| | Vertical | | -20,0 | 28,1 | 14,8 | 30 |
| Conceito Apresentado (Convecção Forçada) | Normal | 2,0 | -20,0 | 28,8 | 1,4 | 30 |

Durante os testes práticos, em virtude do termo anemômetro medir também a temperatura do ar no entorno da lata, foi verificado que as temperaturas no interior do freezer e no entorno da lata eram as mesmas, e assim foi constatado tanto que temperatura não influenciava no fluxo de ar como o fluxo de ar não influenciava na temperatura ao redor da lata.

6. Conclusão

Ao longo deste artigo foi possível tornar mais claro o processo de resfriamento de latas de cervejas, além disso, foi possível classificar quantitativamente os procedimentos para se obter um resfriamento mais rápido das latas de cerveja.

Através de correlações empíricas foi possível calcular e prever os coeficientes de películas para diversas velocidades de fluxo de ar, e também para convecção natural.

Dessa forma, foi possível concluir que a formulação da ideia apresentada, quando comparada com o procedimento padrão para resfriar de latas de cerveja, possui eficiência superior, em função do aumento do coeficiente de película.

Por estes motivos, pode-se dizer que os objetivos propostos no início deste artigo foram alcançados, sendo que quanto maior for a velocidade do fluxo de ar, maior será o coeficiente de película, e conseqüentemente menor será o tempo para resfriar a cerveja.

Referências

ANTONIALI, S.; CORTEZ, L. A. B. Resfriamento rápido com ar forçado para conservação pós-colheita de alface "crespa". In: **Encontro de Energia no Meio Rural**, Campinas, SP, Brasil, p. 3, 2000.

ANTONIALI, S.; LEAL, P. A. M.; MAGALHAES, A. M.; SANCHES, J. Resfriamento rápido de pimentão amarelo com ar forçado. **Ciência Rural**, 42(6), 1110-1116, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE CERVEJA (CERVBRASIL). **Anuário de 2016**. Disponível em: <http://www.cervbrasil.org.br/arquivos/anuario2016/161130_CervBrasil-Anuario2016_WEB.pdf>. Acessado em: 10 ago. 2017.

BARBIN, D. F.; NEVES FILHO, L. C.; SILVEIRA JUNIOR, V. Processo de congelamento em túnel portátil com convecção forçada por exaustão e insuflação para paletes. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, 667-675, 2009.

BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S.; INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. 7. ed. Rio de Janeiro, LTC, 2017.

ÇENGEL, Y. A. **Transferência de Calor e Massa: Uma Abordagem Prática**. 3 ed., São Paulo, McGraw-Hill, 2009.

FELLOWS, P. J. **Tecnologia do Processamento de Alimentos: Princípios e Prática**. 2 ed., Porto Alegre, Artmed, 2008.

INCROPERA, Frank P. *et al.* **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. 1 ed. Rio de Janeiro, LTC, 2014.

LAGUERRE, O.; BEN AMARA, S.; FLICK, D. Heat transfer between wall and packed bed crossed by low velocity airflow. **Applied Thermal Engineering**, 26 (16), 1951-1960, 2006.

NASCIMENTO, N. R. **Análise termodinâmica e otimização de um sistema de refrigeração por absorção para conservação de alimentos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.

PIROZZI, D. C. Z.; AMENDOLA, M. Modelagem matemática e simulação numérica do resfriamento rápido de morango com ar forçado. **Engenharia Agrícola**, 25(1), 222-230, 2005.

REIS, J. C. D. **Medidas do Coeficiente de Transferência de Calor em Fornos Combinados**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos Químicos e

Bioquímicos), Escola de Engenharia Mauá, Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul, 2012.

SANTOS, C. A. **Estudo da Transferência de Calor Durante o Congelamento de Cortes de Aves em Caixas de Papelão Ondulado**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

SHAPIRO, Howard N. *et al.* **Princípios de Termodinâmica para Engenharia**. 1 ed. Rio de Janeiro, LTC, 2013.

SILVA, R. R. **Estudo da Transferência de Calor em Tanques submersos: Influências do Modo e da Intensidade da Agitação da Água**. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Alimentos), Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, 2007.

SIQUEIRA, A. M. A.; SANTOS, S. M. L.; LIMA, B. L.; AFONSO, M. R. A.; COSTA, J. M. C. Vida útil pós-colheita de goiaba cv. 'Paluma' submetida ao resfriamento rápido por ar forçado. **Revista Ciência Agronômica**, 45(1), 45-51, 2014.

TERUEL, M. B.; KIECKBUSCH, T.; CORTEZ, L. Cooling parameters for fruits and vegetables of different sizes in a hydricooling system. **Science Agricola**, 61(6), 655-658, 2004.

VISSOTTO, F. Z.; KIECKBUSCH, T. G.; NEVES FILHO, L. C. C. Pré-resfriamento de frutas e hortaliças com ar forçado. **Boletim da Sociedade Brasileira de Ciência e Tecnologia de Alimentos (SBCTA)**, 33(1), 106-114, 1999.