

Modelagem matemática para sistema de geração de energia térmica

Mathematical modeling for thermal energy generation system

Modelado matemático para sistema de generación de energía térmica

Recebido: 19/04/2021 | Revisado: 26/04/2021 | Aceito: 04/05/2021 | Publicado: 16/05/2021

Sergio Suave

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6714-0727>
Universidade de Uberaba, Brasil
E-mail: s_suave@hotmail.com

José Roberto Delalibera Finzer

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6139-3619>
Universidade de Uberaba, Brasil
E-mail: jrdfinzer@uol.com.br

Euclides Antônio Pereira de Lima

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7649-1040>
Universidade de Uberaba, Brasil
E-mail: euclidessapl@yahoo.com.br

Resumo

O sistema de geração de energia térmica baseado na queima de GLP foi implantado para fornecer energia térmica em substituição a uma Caldeira a base de queima de óleo vegetal, com a finalidade de realizar a secagem de produtos agroquímicos do tipo grânulos dispersíveis em água (WDG), por meio de dois leitos vibro-fluidizados. Foi desenvolvida uma modelagem matemática, cujo objetivo é prever as temperaturas de processo, principalmente a temperatura da mistura de ar na entrada dos Secadores. Cálculos de consumo de GLP para diferentes produtos e condições de processo também são um importante resultado desse trabalho, pois se pode antever consumos e custos. A modelagem pode prever as condições do sistema para novos produtos, permitindo seu estudo antecipado. O MS Excel foi utilizado como software. Equações da literatura foram utilizadas para cálculos comparativos com dados originais de projeto do fornecedor. Foram calculadas as temperaturas adiabáticas de chama, obtendo-se uma margem de erro de 1,79%, as temperaturas de ar quente em tubulações e as temperaturas da mistura de ar para os Secadores, as quais foram comparadas com dados reais de operação, cujos resultados de cálculos apresentaram uma margem de erro de 2,56% e 2,87% para o primeiro e segundo Secadores, respectivamente, demonstrando que a modelagem é aplicável. Os resultados mostraram que o sistema a base de GLP é melhor em termos de desempenho térmico e é um sistema automatizado e instrumentado, o que proporciona um ótimo controle de processo.

Palavras-chave: Modelagem matemática, Energia térmica, Leito vibro-fluidizado.

Abstract

The thermal energy generation system based on the burning of LPG was implemented to provide thermal energy to replace a boiler based on burning vegetable oil, in order to perform the drying of agrochemical products such as granules dispersible in water (WDG), by means of two vibro-fluidized beds. A mathematical modeling was developed, whose objective is to predict process temperatures, mainly the temperature of the air mixture at the entrance of the Dryers. Calculations of LPG consumption for different products and process conditions are also an important result of this work, as it is possible to foresee consumption and costs. The modeling can predict the system conditions for new products, allowing their advance study. MS Excel was used as software. Literature equations were used for comparative calculations with the supplier's original design data. The adiabatic flame temperatures were calculated, obtaining a margin of error of 1.79%, the hot air temperatures in pipelines and the temperatures of the air mixture for the Dryers, which were compared with real data of operation, whose Calculation results showed a margin of error of 2.56% and 2.87% for the first and second dryers, respectively, demonstrating that the modeling is applicable. The results showed that the LPG-based system is better in terms of thermal performance and is an automated and instrumented system, which provides excellent process control.

Keywords: Mathematical modeling; Thermal energy; Vibro-fluidized bed.

Resumen

Se implementó el sistema de generación de energía térmica basado en la quema de GLP para proporcionar energía térmica en sustitución de una caldera a base de combustión de aceite vegetal, con el fin de realizar el secado de productos agroquímicos como granulados dispersables en agua (WDG), mediante dos lechos vibro-fluidizados. Se desarrolló un modelo matemático, cuyo objetivo es predecir las temperaturas del proceso, principalmente la temperatura de la mezcla de aire a la entrada de los Secadores. Los cálculos del consumo de GLP para diferentes productos y condiciones de

proceso también son un resultado importante de este trabajo, ya que es posible prever consumos y costos. El modelado puede predecir las condiciones del sistema para nuevos productos, permitiendo anticipar su estudio. Se utilizó MS Excel como software. Se utilizaron ecuaciones de la literatura para cálculos comparativos con los datos de diseño originales del proveedor. Se calcularon las temperaturas de llama adiabática, obteniendo un margen de error de 1.79%, las temperaturas del aire caliente en tuberías y las temperaturas de la mezcla de aire para los Secadores, las cuales se compararon con datos reales de operación, cuyos resultados de Cálculo arrojaron un margen de error de 2,56% y 2,87% para el primer y segundo secador, respectivamente, lo que demuestra que el modelo es aplicable. Los resultados mostraron que el sistema basado en GLP es mejor en términos de rendimiento térmico y es un sistema automatizado e instrumentado, que proporciona un excelente control del proceso.

Palabras clave: Modelado matemático; Energía térmica; Lecho vibro-fluidizado.

1. Introdução

Nos diversos campos da ciência e da indústria, a modelagem matemática, baseada em abordagens teóricas e experimentais, tem sido útil para simular processos e prever os comportamentos de variáveis de interesse dentro dos limites de controle em estudo. Como no caso deste trabalho, a capacidade de modelar e prever o consumo de energia em sistemas complexos tem aplicações importantes em muitos campos científicos e industriais. Na indústria de corte de metal, por exemplo, o consumo de energia é muito importante na análise da eficiência energética de máquinas. Modelos preditivos que correlacionam planejamento de processo e consumo de energia foram desenvolvidos por meio de abordagens de modelagem numérica (Seung-Jun et al, 2018). O consumo de energia envolve questões de sustentabilidade e Maya et al., (2018) foram capazes de otimizar o consumo de energia de circuito de biosensores do tipo CMOS, utilizando programas de simulação. Outra modelagem matemática interessante foi a utilizada para desenvolver e otimizar o fluxo de tráfego multivariável em estradas urbanas na Indonésia, com o objetivo de evitar acidentes com motocicletas (Sulistio, 2017). Bärmann et al (2017) propuseram uma modelagem que simulasse uma diversidade de horários de partida de trens em estações visando reduzir custos de energia.

O sistema de geração de energia térmica do presente estudo foi projetado para atender a demanda térmica de dois leitos vibro-fluidizados para a secagem de produtos do tipo grânulos dispersíveis em água (WDG). Como o sistema de geração implementado propiciava facilidade de controle operacional, uma modelagem matemática foi desenvolvida para otimizar o uso da energia e prever cálculos de temperaturas relevantes de processo, como as temperaturas adiabática de chama, da câmara de combustão, da tubulação e também a temperatura do ar quente na entrada dos Secadores, bem como prever custos advindos do consumo de combustível quando novos produtos são estudados na planta, tendo em vista diversas condições de processo. (Suave, 2017).

O sistema de geração de energia térmica foi implantado em substituição a uma Caldeira flamotubular (Alfa-Laval Aalborg®, 2015), com mais de 30 anos e já no final de sua vida útil, com possibilidades de apresentar danos e falhas operacionais e que utilizava óleo vegetal (Faria et al., 2017) como combustível. O novo equipamento é um moderno sistema de geração de ar quente (Rayburnners®, 2017), a base de queima de gás liquefeito de petróleo (GLP), que produz energia térmica a ser utilizada na etapa de secagem da planta WDG por meio de leitos vibro-fluidizados, cujas características são muito peculiares em termos de frequência de vibração e da termodinâmica de secagem com o uso de uma corrente de ar quente (Finzer & Kieckbusch, 1989). Outros secadores de grânulos dispersíveis em água usam secadores em leito fluidizado com multicâmaras (Maciel Júnior & Finzer, 2021). A vibração do leito de secagem consiste em uma das técnicas usadas para aperfeiçoar o escoamento e a secagem: Finzer, et al., 1997; Menezes et al., 1998; Finzer, et al., 2003; Finzer, et al., 2007.

A secagem de granulados é um dos mais importantes processos da planta em estudo porque o produto possui alto valor agregado e alguns apresentam termo sensibilidade. Logo, a melhoria geral do processo também se fazia necessária para garantir estabilidade no parâmetro umidade expresso em base úmida, um importante item de especificação do produto acabado. Em função do material processado e do tipo de secador, ocorrem vários aspectos fenomenológicos que influenciam o produto obtido, citados por: Bucek, et al., 2020; Cavallaro, et al., 2020; Lourenço e Finzer, 2013; Sfredo, et al, 2005.

O uso da Caldeira como provedor de energia térmica não garantia a estabilidade de suprimento, nem a estabilidade da temperatura na secagem nos leitos porque a pressão da linha de vapor não se mantinha constante durante a secagem, provocando geração de lotes não conformes, requerendo reprocessos e perdas de produtividade na produção. Quando a pressão era normalizada, o Operador de Produção, no entanto, tinha receio de implementar ajustes finos no controle da secagem, por causa da instabilidade e da iminência de reprovação de lotes. Tratando-se do controle de umidade, o ideal é que os dados da curva de secagem possibilitassem operar num patamar próximo ao limite selecionado de controle, com o propósito de economizar energia e diminuir o desperdício de produto acabado (Suave, 2017). Nesse processo, o controle de temperatura é de fundamental importância.

2. Metodologia

A necessidade da melhora no desempenho energético e custos operacionais foram os fatores fundamentais (Ross et al., 2010) para o investimento em um novo projeto para o gerador de energia térmica. Assim sendo, inicialmente foi realizado um detalhado estudo sobre o sistema gerador de ar quente a base de queima de GLP e, posteriormente, foram realizadas visitas técnicas em indústrias que já operavam com o mesmo sistema e que já continham em suas instalações o mesmo tipo de gerador em estudo. Após isto, foi feito um estudo de viabilidade técnica e econômica, o qual apresentou como resultado inicial, um retorno financeiro de investimento em torno de 29 meses. Esse resultado fez com que o projeto fosse aprovado junto à direção e aos acionistas da empresa.

Após alguns meses de operação do sistema, foi realizada a coleta e o tratamento de dados de operação para a avaliação real do desempenho desse sistema. Foi utilizado o software MS Excel para o desenvolvimento da modelagem matemática para o cálculo das temperaturas e o software Matlab®, juntamente com regressões para gerar equações de cálculo do consumo de GLP em função de diversas variáveis de processo.

2.1. Caracterização do estudo

Até abril de 2015 a empresa utilizava uma Caldeira do tipo flamotubular para gerar vapor na capacidade total de 1.600 kg/h e suprir a energia necessária ao aquecimento do ar para a secagem de produtos agroquímicos do tipo WDG. O aquecimento do ar era realizado por meio de um radiador posicionado na entrada dos Secadores de leito vibro-fluidizado. Porém, diversos fatores fundamentais caracterizaram a necessidade da troca desse tipo de sistema por um sistema que propiciasse melhor estabilidade de fornecimento de energia e no controle de temperatura da etapa de secagem. Por isso, após análise técnica e econômica, decidiu-se pela implantação de um sistema gerador de ar quente (GAQ) a base de queima de gás GLP. Assim sendo, a partir de maio/2016 foi implantado o sistema composto por dois geradores de ar quente (GAQ) da marca RayBurners®, sendo que o GAQ-1 para o Secador-1 possui capacidade instalada de 1.569.00 kJ/h (375.000 kcal/h) e o GAQ-2 para o Secador-2 possui capacidade de 3.305.360 kJ/h (790.000 kcal/h), já planejada a possibilidade de expansão e, por essa razão, esse último opera com capacidade reduzida, em torno da capacidade do GAQ-1.

2.2. Modelagem matemática

Para os cálculos estimativos de temperaturas, foram utilizadas as equações descritas nos Capítulos 1, 2 e 4 de Smith, et al., (2007), bem como as tabelas do Apêndice C. Segundo Smith, et al., (2007), a avaliação da integral $Q = \Delta H = \int_{T_1}^{T_2} C_p \cdot dT$ requer o conhecimento da dependência da capacidade calorífica com a temperatura, que normalmente é fornecida por uma equação empírica, de acordo com a Equação (1):

$$\frac{C_p}{R} = A + B \cdot T + C \cdot T^2 + D \cdot T^{-2} \quad (1)$$

A avaliação da integral $\int_{T_1}^{T_2} C_p \cdot dT$ é efetuada com a substituição de uma expressão para C_p como uma função empírica da temperatura, seguindo-se a uma integração formal para limites de temperatura de T_0 a T . Para cada componente i da mistura, a relação $\frac{C_p}{R}$ será expressa, conforme a Equação (2):

$$\frac{[C_p]_{H_i}}{R} = \left[A + \frac{B}{2} \cdot (T + T_0) + \frac{C}{3} \cdot (T^2 + T \cdot T_0 + T_0^2) + \frac{D}{T \cdot T_0} \right]_i \quad (2)$$

Para facilitar a representatividade em programas computacionais em cálculos iterativos, o lado direito da Equação (2) é definido como uma função do tipo $MCPH(T_0, T, A, B, C, D)$ (Smith, et al (2007)).

Por sua vez, $[C_p]_{H_i}$, é definida como o calor específico médio ($KJ/kmol.K$) do componente i . A função $MCPH(T_0, T, A, B, C, D)_i$ é definida pela Equação (3):

$$MCPH(T_0, T, A, B, C, D)_i = \left[A + \frac{B}{2} \cdot (T + T_0) + \frac{C}{3} \cdot (T^2 + T \cdot T_0 + T_0^2) + \frac{D}{T \cdot T_0} \right]_i \quad (3)$$

Assim sendo, $[C_p]_{H_i}$ será definida pela Equação (4):

$$[C_p]_{H_i} = 8,314 \cdot MCPH(T_0, T, A, B, C, D)_i \quad (4)$$

A temperatura será medida em K e a constante R será definida com o valor de 8,314 ($kJ/Kmol.K$). Quando T_0 e T são conhecidos, o cálculo de Q (ou ΔH) será direto. Porém, o cálculo da temperatura final T deverá ser realizado iterativamente, de preferência com a utilização de um software.

No Apêndice C de Smith, et al., (2007) são encontradas as constantes A, B, C e D para relação $\frac{[C_p]}{R}$ para gases de interesse neste trabalho (no estado ideal). A Figura 1 mostra o volume de controle (VC) estudado para o Queimador de gases.

Figura 1 - Esboço do volume de controle (VC) para Queimador de GLP.



Fonte: Suave (2017).

A partir do estabelecimento do volume de controle indicado na Figura 1, é realizado o balanço material e energético com a obtenção de equações para os cálculos das temperaturas adiabática de chama (Smith et al., 2007) e também a temperatura da câmara de combustão. A temperatura adiabática de chama (T_{ch}) é calculada pela Equação (5):

$$T_{ch} = T_o + \frac{\sum_{Reag} v_i [Cp]_{H_i} (T_a - T_o) - [\sum_{Prod} v_i \Delta H_{298,15}^i - \sum_{Reag} v_i \Delta H_{298,15}^i]}{\sum_{Prod} v_i [Cp]_{H_i}} \quad (5)$$

Sendo:

| | |
|-----------------------|--|
| T_{ch} | Temperatura de chama (K) |
| v_i | Vazão molar do componente i (kmol/h) |
| T_o | Temperatura de referência - 298,15 K |
| T_a | Temperatura ambiente em que se encontram todos os reagentes (K) |
| $[Cp]_{H_i}$ | É o calor específico médio do componente i calculado para esta e para as demais quantificações neste artigo pela seguinte equação: $8,314 \cdot [A + \frac{B}{2} \cdot (T + T_o) + \frac{C}{3} \cdot (T^2 + T \cdot T_o + T_o^2) + \frac{D}{T \cdot T_o}]_i$ (kJ/kmol.K). |
| $\Delta H_{298,15}^i$ | Entalpia do componente i na temperatura de referência - 298,15 K (kJ/kmol) |

Neste trabalho foram utilizadas as tabelas do Apêndice C de Smith et al, (2007), para a obtenção das constantes A, B, C e D de cada componente da reação de queima do GLP.

A temperatura da câmara de combustão (T_c) é calculada com o acréscimo do trabalho do eixo do ventilador industrial no sistema e a diminuição das perdas térmicas das paredes do conjunto do Queimador, conforme a Equação (6):

$$T_c = T_o + \frac{\sum_{Reag} v_i [Cp]_{H_i} (T_a - T_o) - [\sum_{Prod} v_i \Delta H_{298,15}^i - \sum_{Reag} v_i \Delta H_{298,15}^i] + W_s - q_o}{\sum_{Prod} v_i [Cp]_{H_i}} \quad (6)$$

Sendo:

| | |
|-----------------------|--|
| T_c | Temperatura da câmara de combustão (K) |
| v_i | Vazão molar do componente i (kmol/h) |
| T_o | Temperatura de referência (298,15K) |
| T_a | Temperatura ambiente em que se encontram os reagentes (K) |
| $[Cp]_{H_i}$ | É o calor específico médio do componente i (KJ/Kmol.K) |
| $\Delta H_{298,15}^i$ | Entalpia do componente i na temperatura de referência - 298,15K (kJ/Kmol) |
| W_s | Trabalho de eixo do motor (ventilador industrial ou insuflador de ar) (kJ/h) |
| q_o | Perda térmica do Queimador (KJ/Kmol) |

A temperatura da câmara de combustão obviamente será muito menor que a temperatura de chama, por causa do excesso de ar suprido dentro da câmara do Queimador pelo ventilador industrial do gerador de ar quente. Parte do ar insuflado pelo ventilador entra na linha no meio do Queimador para a reação de combustão. Já o excesso é direcionado, via tubulação, para os lados internos laterais da câmara com a finalidade de resfriar a mesma, bem como a tubulação. O presença do nitrogênio é bastante importante, pois se comporta como gás inerte em grande quantidade no ar de excesso e afeta significativamente a temperatura e o calor resultante da combustão, promovendo esse efeito de resfriamento (Çengel e Boles, 2007).

A temperatura da tubulação de gases (T_t) é calculada diminuindo-se as perdas térmicas das tubulações (Bird et al., 2004). O cálculo também leva em conta as influências do trabalho do eixo do ventilador e da energia cinética, conforme a Equação (7):

$$T_t = T_o + \frac{\sum_{Reag} (v_i \Delta H_{298,15}^i) + \sum_{Reag} v_i [Cp]_{H_i} (T_a - T_o) + \left(m_i \frac{u^2}{2000} \right)_{Reag} - \sum_{Prod} (v_i \Delta H_{298,15}^i) - \left(m_i \frac{u^2}{2000} \right)_{Prod} + W_s - q_o - q_o'}{[\sum_{Prod} v_i [Cp]_{H_i}]} \quad (7)$$

Sendo:

| | |
|-------|--|
| T_t | Temperatura da tubulação (K) |
| v_i | Vazão molar do componente i (kmol/h) |
| m_i | Vazão mássica do componente i (kg/h) |

| | |
|---|--|
| T_i : | Temperatura da tubulação (K) |
| T_0 : | Temperatura de referência (298,15 K) |
| T_a | Temperatura ambiente em que se encontram os reagentes (K) |
| $[Cp]_{Hi}$ | É o calor específico médio do componente i (KJ/Kmol.K) |
| W_s : | Trabalho de eixo do motor do ventilador industrial) (kJ/h) |
| q_o | Perda térmica do Queimador (KJ/h) |
| q_o' | Perda de calor na tubulação (kJ/h) |
| $\left(m_i \cdot \frac{u^2}{2000}\right)_{\text{Reag}}$ | Energia cinética do escoamento da corrente de reagentes (kJ/h) |
| $\left(m_i \cdot \frac{u^2}{2000}\right)_{\text{Prod}}$ | Energia cinética do escoamento da corrente de produtos (kJ/h) |
| $\Delta H_{298,15}^i$ | Entalpia do componente i na temperatura de referência - 298,15 K (KJ/kmol) |

As perdas térmicas nos Queimadores (q_o) são calculados pela Equação (8):

$$q_o = \frac{(T_g - T_a) \cdot A \cdot 3,6}{\left(\frac{1}{h_0} + \frac{(x_1 - x_0)}{k_{01}} + \frac{(x_2 - x_1)}{k_{12}} + \frac{1}{h_2}\right)} \quad (8)$$

As perdas térmicas nos trechos de tubulação (q_o') são calculados pela Equação (9):

$$q_o' = \frac{2 \cdot \pi \cdot L \cdot (T_g - T_a) \cdot 3,6}{\left(\frac{1}{r_0 \cdot h_0} + \frac{\ln\left(\frac{r_1}{r_0}\right)}{k_{01}} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{k_{12}} + \frac{1}{r_2 \cdot h_2}\right)} \quad (9)$$

Sendo:

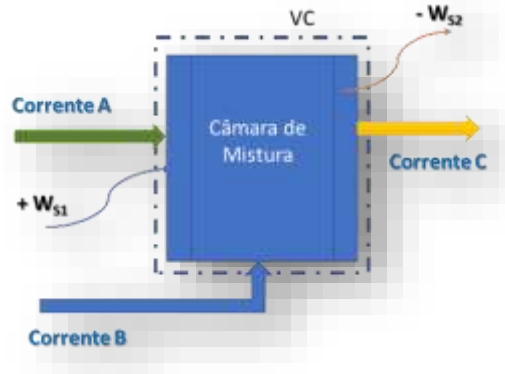
| | |
|---------------|---|
| q_o, q_o' | Taxa de calor em paredes plana e cilíndrica compostas (kJ/h) |
| $(x_1 - x_0)$ | Espessura da parede metálica (m) |
| $(x_2 - x_1)$ | Espessura do isolamento do Queimador (m) |
| L | Comprimento do trecho da tubulação (m) |
| k_{01} | Condutividade térmica da parede de aço do Queimador (W/m.K) |
| k_{12} | Condutividade térmica da manta de fibra cerâmica (W/m.K) |
| h_0 | Coefficiente de transferência de calor de gases quentes (W/m ² .K) |
| h_2 | Coefficiente de transferência de calor do ar (W/m ² .K) |
| A | Área de troca térmica do Queimador (m ²) |
| r_0 | Raio interno da tubulação (m) |
| r_1 | Raio externo da tubulação (m) |
| r_2 | Raio externo do isolamento térmico (m) |
| T_g | Temperatura dos gases quentes dentro da tubulação (K) |
| T_a | Temperatura externa ambiente (K) |

Os gases de provenientes da câmara de combustão são misturados com o ar de excesso e são direcionados para a tubulação que alimentará uma outra câmara que antecede o leito de secagem, que é a câmara de mistura, onde ocorre uma rápida, mas importante homogeneização dos gases quentes que se encontram com a corrente de ar frio proveniente do ventilador

industrial principal para gerarem a mistura de ar aquecido, com temperatura bem controlada, que por sua vez alimentará o Secador.

Para o cálculo da temperatura do ar de mistura aquecido para os Secadores, leva-se em conta o balanço de massa e energia realizado no volume de controle da câmara de mistura, conforme demonstrado na Figura 2, de onde é deduzida a Equação (10) para o cálculo da temperatura de mistura (T_m).

Figura 2 - Volume de controle da Câmara de Mistura.



Fonte: Suave (2017).

$$T_m = T_o + \frac{\sum_i^n (v_i \cdot \Delta H_{298,15}^i + v_i \cdot [Cp]_{H_i} \cdot (T_a - T_o))^A + \sum_i^n (v_i \cdot \Delta H_{298,15}^i + v_i \cdot [Cp]_{H_i} \cdot (T_c - T_o))^B}{[\sum_{Prod} v_i \cdot [Cp]_{H_i}]^C} + \frac{(\sum_i^n \frac{m_i}{2000} u^2)^A + (\sum_i^n \frac{m_i}{2000} u^2)^B - (\sum_i^n \frac{m_i}{2000} u^2)^C - \sum_1^n (v_i \cdot \Delta H_{298,15}^i)^C + (W_{s1}) - W_{s2}}{([\sum_{Prod} v_i \cdot [Cp]_{H_i}]^C)} \quad (10)$$

Sendo:

| | |
|---|--|
| T_m | Temperatura média do ar na entrada da Câmara de Mistura (K) |
| T_o | Temperatura padrão de referência (298,15K) |
| T_a | Temperatura ambiente (K) |
| T_c | Temperatura da câmara de combustão (K) |
| m_i | Vazão mássica do componente i (kg/h) |
| v_i | Vazão molar do componente i (kmol/h) |
| $[Cp]_{H_i}$ | É o calor específico médio do componente i (KJ/Kmol.K) |
| W_{s1} | Trabalho realizado pelo ventilador a montante do sistema (kJ/h) |
| W_{s2} | Trabalho realizado pelo exaustor a jusante no sistema (kJ/h) |
| $(\sum_i^n \frac{m_i}{2000} u^2)^{A,B,C}$ | Energia cinética das correntes A, B e C respectivamente (kJ/h) |
| $\Delta H_{298,15}^i$ | Varição de entalpia do reagente i na temperatura padrão(kJ/kmol) |

Algumas formas de energia estão associadas à massa das correntes (como H, Ec e Ep), sendo que energias como o calor (Q) e trabalho (W) são formas energia transportáveis através das fronteiras do sistema.

2.3. Modelagem para previsão de consumos de combustível

A estimativa de consumo de combustível dos geradores de ar quente é importante na previsão de custos de produção de vários produtos. A maioria dos produtos WDG requer que o ar de mistura seja aquecido a 60°C, outros requerem 70°C e alguns raros requerem 90°C. O controle da temperatura depende do estado de, pelo menos, outras duas variáveis relevantes, tais como a vazão de ar do ventilador de ar frio e da temperatura ambiente. Portanto, para cada Secador foram realizadas simulações com variações das seguintes variáveis para a obtenção do comportamento do consumo de GLP:

1. A temperatura na entrada do Secador (T_{ent}),
2. A temperatura ambiente local (T_a),
3. A vazão do ventilador de ar frio;

Para a previsão do consumo de combustível utilizou-se o método da regressão linear múltipla. Segundo Lima (2000), por meio regressão múltipla procura-se prever uma variável resposta ou dependente y , assumindo que ela tem uma relação linear com outras variáveis independentes ou preditoras x_1, x_2, \dots, x_k . A Tabela 1, apresenta os intervalos definidos e o número de discreções (o número divisões da variável que é calculada dentro do intervalo) para compor o gráfico de cada variável para os cálculos estimativos do modelo desse sistema em estudo.

Tabela 1 - Intervalos e número de discreções.

| Parâmetro | Unid. | Intervalo | Número de Discreções |
|-------------------------------|-------------------|----------------|----------------------|
| T_{ent} | °C | 60 - 70 | 2 |
| T_a | °C | 20 - 30 | 5 |
| Vazão de ar frio do Secador-1 | m ³ /h | 7.000 – 11.500 | 10 |
| Vazão de ar frio do Secador-2 | m ³ /h | 2.000 – 6.500 | 10 |

Fonte: Suave (2017).

Os diversos pontos de consumo de GLP para diferentes situações apresentados foram representados graficamente com o objetivo de se estudar o comportamento do consumo de combustível em função dessas variáveis. Utilizou-se o software *Matlab*® para a geração dos gráficos e das equações. Uma vez que os gráficos de 3 variáveis (x, y, z) foram gerados, darão origem a um plano de superfície. É, portanto, possível tratá-las matematicamente por meio da regressão linear múltipla para a obtenção de uma equação para cada plano. Segundo Nunes e Carvalho (2017) a Equação (11) pode ser descrita para cada plano:

$$Z = a + bX + cY \quad (11)$$

Muitas vezes, existem vários outros fatores que podem estar, assim como X , afetando a variável de resposta Z e serem também correlacionados com X . (Chein, 2019). Nesse sentido, surge a proposta do modelo de regressão linear múltipla. O conceito por trás desse modelo é de que mantendo-se outros fatores fixos (como Y), pode-se estimar o efeito de X sobre Z que é a variável dependente e vice-versa.

Esta equação é relacionada ao processo em estudo, de acordo com a Equação (12).

$$Q_{GLP} = a + b T_a + c (\text{Vazão}) \quad (12)$$

Onde (T_a) é a temperatura do ar ambiente e a Vazão é a vazão de ar frio do ventilador principal para o Secador. Logo, para cada Secador, existem duas equações, para as temperaturas de entrada de 60°C e 70°C, de maior interesse neste estudo, e cuja incógnita será o consumo de GLP.

As Equações (13) a (20) a seguir representam o tratamento matemático proveniente da regressão linear múltipla, as quais são utilizadas pelo software *Matlab*® para o desenvolvimento dos gráficos tridimensionais que relacionam o consumo de GLP em função da temperatura ambiente (T_a) e da vazão do ventilador industrial (VE004) e são apresentadas como se seguem:

$$(\sum T_a)^2 = \sum T_a \cdot T_a - \frac{(\sum T_a) \cdot (\sum T_a)}{N} \quad (13)$$

$$(\sum Vazão)^2 = \sum Vazão \cdot \sum Vazão - \frac{\sum Vazão \cdot \sum Vazão}{N} \quad (14)$$

$$(\sum T_a \cdot QGLP) = \sum T_a \cdot QGLP - \frac{(\sum T_a) \cdot (\sum QGLP)}{N} \quad (15)$$

$$(\sum Vazão \cdot QGLP) = \sum Vazão \cdot QGLP - \frac{(\sum Vazão) \cdot (\sum QGLP)}{N} \quad (16)$$

$$(\sum T_a \cdot Vazão) = \sum T_a \cdot Vazão - \frac{(\sum T_a) \cdot (\sum Vazão)}{N} \quad (17)$$

$$b = \frac{(\sum Vazão)^2 \cdot (\sum T_a \cdot QGLP) - (\sum T_a \cdot Vazão) \cdot (\sum Vazão \cdot QGLP)}{(\sum T_a)^2 \cdot (\sum Vazão)^2 - (\sum T_a \cdot Vazão)^2} \quad (18)$$

$$c = \frac{(\sum T_a)^2 \cdot (\sum Vazão \cdot QGLP) - (\sum T_a \cdot Vazão) \cdot (\sum T_a \cdot QGLP)}{(\sum T_a)^2 \cdot (\sum Vazão)^2 - (\sum T_a \cdot Vazão)^2} \quad (19)$$

$$a = \overline{QGLP} - b(\overline{T_a}) - c(\overline{Vazão}) \quad (20)$$

O programa fornecerá também o resultado de cálculo dos coeficientes a, b e c (das Equações 18, 19 e 20) que serão atribuídos à Equação (12) (Nunes & Carvalho, 2017), sendo que especificamente os coeficientes c e b são coeficientes parciais da regressão (Chein, 2019). Portanto, a Equação (12) relaciona o consumo de GLP como sendo uma função ajustada em um plano dependentes de duas outras variáveis.

2.4. Cálculo de Variâncias

O cálculo da variância de temperaturas é feito por meio da Equação (21):

$$E_r = \frac{|T_{MOD} - T_{EXP}|}{T_{MOD}} \cdot 100 \quad (21)$$

Sendo:

| | |
|-----------|---|
| E_r | Erro percentual (%) |
| T_{MOD} | Temperatura calculada pela modelagem (°C) |
| T_{EXP} | Temperatura verificada experimentalmente (°C) |

3. Resultados e Discussão

Segundo Bizzo (2003), o GLP é uma mistura de frações leves de petróleo com 3 e 4 carbonos na cadeia e, para efeitos práticos de combustão na indústria, pode ser considerado como uma mistura em partes iguais de propano (C₃H₈) e butano (C₄H₁₀). Um resultado médio de diversas análises é apresentado na Tabela 2:

Tabela 2 - Valores Médios de alguns parâmetros do GLP.

| Componente | Composição em massa (%) m/m |
|----------------|-----------------------------|
| <i>Etano</i> | 1,0 |
| <i>Propano</i> | 30,6 |
| <i>Butano</i> | 32,9 |
| <i>Propeno</i> | 20,7 |
| <i>Buteno</i> | 14,7 |

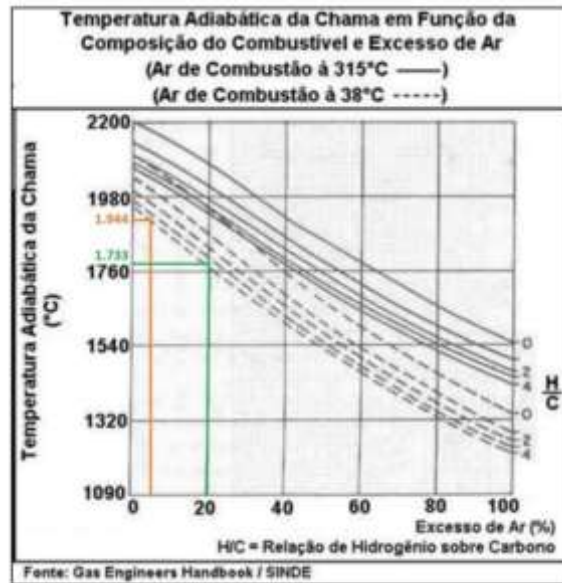
Fonte: Bizzo (2003).

Na presente modelagem, no entanto, o propano e o butano participam com 40 e 60%, respectivamente na reação química com o O₂, para manter a consistência com os dados de projeto do fornecedor do sistema gerador (Liquigás, 2017). Para efeito do cálculo final da temperatura da mistura de ar dos Secadores, a diferença, no entanto, seria de menos de 0,1%, caso as proporções fossem mantidas iguais.

Na Figura 3 são ilustradas várias curvas de temperaturas adiabáticas de chama calculadas para vários componentes variando a relação $\frac{H}{C}$, (hidrogênio/carbono), conforme o gráfico (Gasnet®, 2017). Fazendo-se o cálculo da relação de hidrogênio e carbono (H/C) considerada na modelagem tem-se:

$$\frac{H}{C} = 0,4 \cdot \left(\frac{8}{3}\right) + 0,6 \cdot \left(\frac{10}{4}\right) = 2,6$$

Figura 3 - Gráfico de temperaturas adiabáticas de chama.



Fonte: Gasnet ®, (2017).

A modelagem foi utilizada com os mesmos dados do gráfico da Figura 1 para fins de verificação da sua aplicabilidade, considerando-se um excesso de ar em torno de 5% (linha laranja no gráfico da Figura 3) e uma temperatura de alimentação de ar de combustão em torno de 38°C. Os cálculos da modelagem apresentaram um resultado de temperatura de chama em torno de 1.963,1°C, conforme ilustra a interface do programa por meio da Figura 4.

Figura 4 - Interface com resultados da modelagem para a temperatura de chama.

| Dados Gerais de Entrada | | |
|--|-----------|--------------------|
| GAQ-1 | | |
| Altitude | 556,00 | m |
| T _{amb.} | 38,00 | °C |
| UR% | 60,00% | % |
| P _{Local} | 94.822,02 | Pa |
| % Propano (C ₃ H ₈) | 40,00% | % |
| % Butano (C ₄ H ₁₀) | 60,00% | % |
| Excesso de Ar (%) | 5,00% | % |
| GAQ-1 | | |
| Queimador GAG-1 | 67,03% | % |
| Consumo GLP | 11,86 | kg/h |
| Vazão GAQ-1 | 3.000,00 | Nm ³ /h |
| Vazão GAQ-1 (local) | 3.746,03 | m ³ /h |
| Vazão VE04 | 9.023,51 | m ³ /h |
| % Abert Valv | 48,78 | % |
| Vazão Total Ar Sec-1 | 12.769,55 | m ³ /h |
| RESULTADOS DE CALCULOS | | |
| GAQ-1 | | |
| T _{chama} | 1.963,11 | °C |

Fonte: Suave (2017).

O resultado obtido aproxima-se do resultado encontrado no gráfico da Figura 1 (~1.944°C) por interpolação pelas curvas do gráfico para a relação H/C= 2,6, e o resultado representa uma margem de erro de 0,97%:

$$Er = \frac{|1.963 - 1.944|}{1.963} \cdot 100 = 0,97\%$$

Utilizando a modelagem para o cálculo de temperatura de chama, com um excesso de ar de 20% (linha verde no gráfico da Figura 3), a margem de erro se situa em torno de 1,79%, conforme é demonstrado abaixo.

$$Er = \frac{|1.783 - 1.815|}{1.783} \cdot 100 = 1,79\%$$

3.1 Parâmetros atuais e reais levantados do sistema gerador de ar quente

Os parâmetros reais do sistema operante, foram levantados de junho a novembro/2016, a partir da implantação do sistema de geração de ar quente com uso de GLP para a secagem. Esses dados são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetros reais médios apurados de junho a novembro/2016.

| PARÂMETRO | UNID. | VALOR MD |
|---|-------|----------|
| Temperatura real (média ponderada) na entrada dos Secadores | °C | 62,51 |
| Temperatura real média externa local | °C | 22,54 |
| Consumo real total de GLP (taxa média do período) | kg/h | 17,69 |
| Consumo estimado de GLP para GAQ-1 (67%) | kg/h | 11,86 |
| Consumo estimado de GLP para GAQ-2 (33%) | kg/h | 5,83 |

Fonte: Suave (2017).

Com os dados reais apresentados, conclui-se que durante os meses citados, os Secadores apresentaram uma temperatura média ponderada de operação de 62,51°C, enquanto a planta de granulados produziu uma variedade total de 07 produtos diferentes.

Nesse mesmo período, o consumo real de gás GLP dos Queimadores apresentou uma taxa *média* real de 17,69 kg/h. Desse total, foram estimados 11,86 kg/h para o GAQ-1 e 5,83 kg/h para o GAQ-2, mantendo-se a proporção original de projeto, ou seja, 67% e 33% respectivamente para cada Queimador.

3.2 Resultados da modelagem para o GAQ-1

Na Tabela 4 são mostrados os parâmetros reais de operação do Queimador-1 (GAQ-1), sendo estes os dados de entrada no programa de modelagem aplicada ao sistema em questão, cuja incógnita é a temperatura de entrada do Secador-1, a ser calculada iterativamente e comparada com a temperatura medida efetivamente no processo.

Tabela 4 - Parâmetros atuais de operação do Queimador-1 (GAQ-1).

| PARÂMETROS PARA GAQ-1 | UNID. | VALOR MD |
|--|-------------------|--------------|
| Pressão atmosférica ambiente | (Pa) | 94.822,00 |
| Temperatura média ambiente | °C | 22,54 |
| Umidade Relativa do ar ambiente | % | 60,00 |
| Vazão de ar frio do GAQ-1 no Queimador-1 | m ³ /h | 3.506,66 |
| Vazão de ar frio do Insuflador VE004 | m ³ /h | 8.951,34 |
| Vazão total de ar (VE004+GAQ-1) | m ³ /h | 12.458,00 |
| Perdas térmicas calculadas | kJ/h | 32.063,77 |
| Vazão de GLP no Queimador-1 (67%) | kg/h | 11,86 |
| Vazão de GLP no Queimador-2 (33%) | kg/h | 5,83 |
| Vazão total de GLP (GAQ-1 + GAQ-2) | kg/h | 17,69 |
| Potência do ventilador VE004 (C/ 85% rendimento) | kJ/h | 38.709,00 |
| Potência do ventilador GAQ-1 (C/ 85% rendimento) | kJ/h | 16.830,00 |
| Temperatura média do ar medida no Secador-1 | °C | 62,51 |

Fonte: Suave (2017).

Os parâmetros operacionais indicados na Tabela 4 são parâmetros efetivamente medidos durante o processo para o GAQ-1 e foram considerados como parâmetros de entrada da modelagem em Excel®, cujos resultados de cálculos iterativos são apresentados na Figura 5, que representa a imagem da interface do programa da modelagem com os resultados de cálculos para o GAQ-1.

Figura 5 - Interface com resultados da modelagem do GAQ-1 com parâmetros atuais.

| GAQ-1 | | |
|----------------------------|-----------|--------------------|
| Queimador GAG-1 | 67,03% | % |
| Consumo GLP | 11,86 | kg/h |
| Vazão GAQ-1 | 3.000,00 | Nm ³ /h |
| Vazão GAQ-1 (local) | 3.506,66 | m ³ /h |
| Vazão VE04 | 8.951,34 | m ³ /h |
| % Abert Valv | 47,38 | % |
| Vazão Total Ar Sec-1 | 12.458,00 | m ³ /h |
| RESULTADOS DE CALCULOS | | |
| GAQ-1 | | |
| T _{chama} | 2.068,78 | °C |
| T _{cam} | 161,99 | °C |
| T _{tub} | 154,14 | °C |
| T _{EntSec} | 60,95 | °C |
| T _{orv=} | 20,15 | °C |
| T _{entsec Medida} | 62,51 | °C |
| Erro% = | 2,56% | |

Fonte: Suave (2017).

A temperatura média real na entrada do Secador-1 (62,51°C) é considerada o parâmetro de comparação de cálculo de temperatura da modelagem para o Secador-1. Os mesmos percentuais de projeto com relação ao consumo de GLP foram mantidos para os dois Queimadores, ou seja, 67% do consumo para o GAQ1 e 33% do consumo para o GAQ2 visando manter a consistência da análise e garantir a confiabilidade dos resultados da modelagem.

Face aos cálculos apresentados na Figura 5, verifica-se que a modelagem entrega um resultado de cálculo de temperatura de 60,95°C na entrada do Secador-1, versus 62,51°C, que representa a média real com que trabalhou o Secador-1 nos 8 meses de operação, de acordo com a Tabela 4, demonstrando o ótimo desempenho da modelagem, cuja margem de erro é de 2,56%, como está calculada a seguir:

$$E_r = \frac{|60,95 - 62,51|}{60,95} \cdot 100 = 2,56\%$$

Conclui-se que a modelagem do sistema é válida para a linha do GAQ-1 ao utilizar-se os dados operacionais reais de processo e apresenta-se aplicável.

3.3 Resultados da modelagem matemática para o GAQ-2

Na Tabela 5 são mostrados os parâmetros reais de operação do Queimador-2 (GAQ-2) considerados parâmetros de entrada para programa da modelagem, aplicada ao sistema em questão, cuja incógnita é a temperatura de entrada do Secador-2, a ser calculada iterativamente e comparada com a temperatura medida efetivamente no processo.

Tabela 5 - Parâmetros atuais de operação do Queimador-2(GAQ-2).

| PARÂMETROS PARA GAQ-2 | UNID. | VALOR MD |
|--|-------------------|-----------------|
| Pressão atmosférica ambiente | (Pa) | 94.822,00 |
| Temperatura média ambiente | °C | 22,54 |
| Umidade Relativa do ar ambiente | % | 60,00 |
| Vazão de ar frio do GAQ-2 no Queimador-2 | m ³ /h | 3.943,63 |
| Vazão de ar frio dos Insufladores VE005+006+007 | m ³ /h | 1.937,11 |
| Vazão total de ar (VE005,6,7+GAQ-2) | m ³ /h | 5.880,74 |
| Perdas térmicas calculadas | kJ/h | 39.950,88 |
| Vazão de GLP no Queimador-1 (67%) | kg/h | 11,86 |
| Vazão de GLP no Queimador-2 (33%) | kg/h | 5,83 |
| Vazão total de GLP (GAQ-1 + GAQ-2) | kg/h | 17,69 |
| Potência do ventilador VE004 (C/ 85% rendimento) | kJ/h | 57.834,00 |
| Potência do ventilador GAQ-2 (C/ 85% rendimento) | kJ/h | 28.152,00 |
| Temperatura média do ar medida no Secador-2 | °C | 62,51 |

Fonte: Suave (2017).

Os parâmetros operacionais indicados na Tabela 5 são parâmetros efetivamente medidos durante o processo para o GAQ-2 e foram considerados como parâmetros de entrada da modelagem em Excel®, cujos resultados de cálculos são apresentados na Figura 6, que representa a imagem da interface do programa de modelagem com os resultados de cálculos para o GAQ-2.

Figura 6 - Interface com resultados da modelagem do GAQ-2 com parâmetros atuais.

| GAQ-2 | | |
|----------------------------------|-----------------|--------------------|
| Queimador GAG-2 | 32,97% | % |
| Consumo GLP | 5,83 | kg/h |
| Vazão GAQ-2 | 3.373,83 | Nm ³ /h |
| Vazão GAQ-2 (local) | 3.943,63 | m ³ /h |
| Vazão VE-05-06-07 | 1.937,11 | m ³ /h |
| % Abert Valv | 4,98 | % |
| Vazão Total Ar Sec-2 | 5.880,74 | m ³ /h |
| RESULTADOS DE CALCULOS | | |
| GAQ-2 | | |
| T_{chama} | 2.068,78 | °C |
| T_{cam} | 88,62 | °C |
| T_{tub} | 79,77 | °C |
| T_{EntSec} | 60,76 | °C |
| T_{orv=} | 17,15 | °C |
| T_{entsec Medida} | 62,51 | °C |
| Erro% = | 2,87% | |

Fonte: Suave (2017).

A temperatura média real na entrada do Secador-2 foi considerada como parâmetro de comparação estatística com cálculo de temperatura entregue pelo programa da modelagem para o Secador-2.

Pelos resultados apresentados na interface da modelagem da Figura 6, verifica-se que a modelagem entrega um resultado de cálculo de temperatura de 60,76°C na entrada do Secador-2, versus 62,51°C, que representa a média com que trabalhou o Secador-2 nos 8 meses de operação, de acordo com os dados da Tabela 5, demonstrando um bom desempenho da modelagem para a linha do GAQ-2, cuja margem de erro é de 2,87%, conforme calculada a seguir:

$$E_r = \frac{|60,76 - 62,51|}{60,76} \cdot 100 = 2,87\%$$

Portanto, conclui-se que a modelagem matemática do sistema também pode ser validada para a linha do GAQ-2, ao se utilizarem os dados operacionais reais de processo e apresenta-se aplicável.

3.4 Resultados da regressão linear múltipla para os cálculos de consumo de GLP

Os diversos pontos de consumo de GLP para diferentes situações podem ser representados graficamente com o objetivo de se estudar o comportamento das variáveis envolvidas no processo.

Nas Tabelas 6 e 7 são apresentados os cálculos de vazões em função da variação da temperatura ambiente (T_a) (°C) e da vazão (m³/h) do ventilador (VE004), considerando as temperaturas de 60° e 70°C, respectivamente, na entrada do Secador-1, de acordo com o número de discreções já apresentados na Tabela 1. O *software Matlab®* foi utilizado com a finalidade de desenvolver os respectivos gráficos apresentados nas Figuras 7 e 8 para as temperaturas de 60° e 70°C, referentes ao Queimador GAQ-1.

Tabela 6 - Consumo de GLP no Queimador-1 para manter 60°C no secador-1.

| Tamb = 20°C / Tsec = 60°C / UR=60% | | Tamb = 22,5°C / Tsec = 60°C / UR=60% | | Tamb = 25°C / Tsec = 60°C / UR=60% | | Tamb = 27,5°C / Tsec = 60°C / UR=60% | | Tamb = 30°C / Tsec = 60°C / UR=60% | |
|------------------------------------|-------|--------------------------------------|-------|------------------------------------|-------|--------------------------------------|-------|------------------------------------|-------|
| VE004 | Qgjp | VE004 | Qgjp | VE004 | Qgjp | VE004 | Qgjp | VE004 | Qgjp |
| 7.000 | 9,77 | 7.000 | 9,07 | 7.000 | 8,38 | 7.000 | 7,70 | 7.000 | 7,03 |
| 7.500 | 10,28 | 7.500 | 9,55 | 7.500 | 8,81 | 7.500 | 8,09 | 7.500 | 7,39 |
| 8.000 | 10,78 | 8.000 | 10,00 | 8.000 | 9,24 | 8.000 | 8,49 | 8.000 | 7,75 |
| 8.500 | 11,27 | 8.500 | 10,45 | 8.500 | 9,66 | 8.500 | 8,88 | 8.500 | 8,11 |
| 9.000 | 11,75 | 9.000 | 10,92 | 9.000 | 10,09 | 9.000 | 9,28 | 9.000 | 8,47 |
| 9.500 | 12,25 | 9.500 | 11,38 | 9.500 | 10,52 | 9.500 | 9,67 | 9.500 | 8,83 |
| 10.000 | 12,74 | 10.000 | 11,83 | 10.000 | 10,94 | 10.000 | 10,06 | 10.000 | 9,19 |
| 10.500 | 13,24 | 10.500 | 12,30 | 10.500 | 11,37 | 10.500 | 10,46 | 10.500 | 9,55 |
| 11.000 | 13,73 | 11.000 | 12,76 | 11.000 | 11,80 | 11.000 | 10,85 | 11.000 | 9,91 |
| 11.500 | 14,23 | 11.500 | 13,23 | 11.500 | 12,23 | 11.500 | 11,24 | 11.500 | 10,27 |

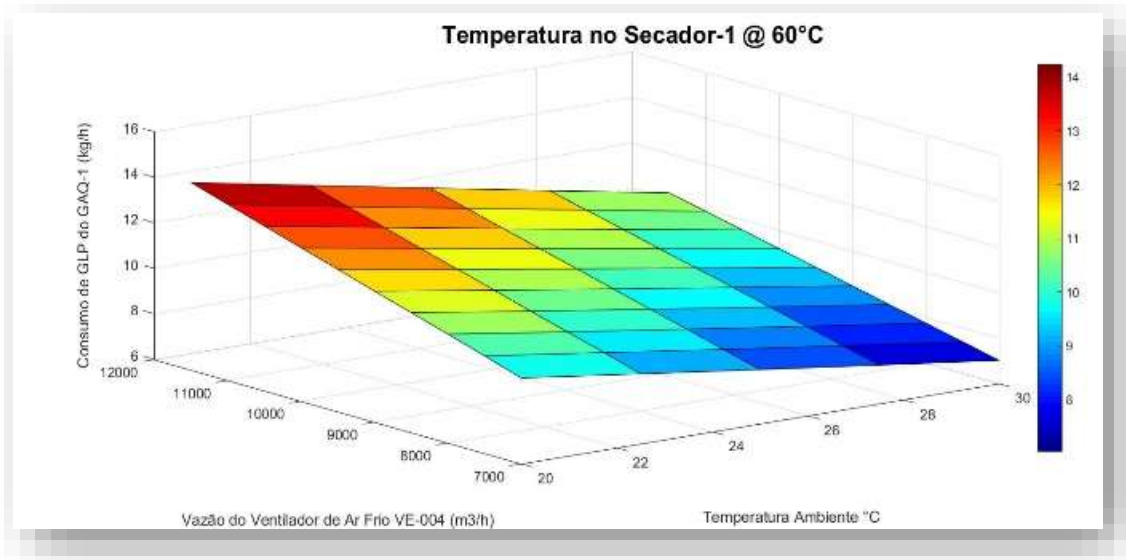
Fonte: Suave (2017).

Tabela 7 - Consumo de GLP no Queimador-1 para manter 70°C no secador-1.

| Tamb = 20°C / Tsec = 70°C / UR=60% | | Tamb = 22,5°C / Tsec = 70°C / UR=60% | | Tamb = 25°C / Tsec = 70°C / UR=60% | | Tamb = 27,5°C / Tsec = 70°C / UR=60% | | Tamb = 30°C / Tsec = 70°C / UR=60% | |
|------------------------------------|-------|--------------------------------------|-------|------------------------------------|-------|--------------------------------------|-------|------------------------------------|-------|
| VE004 | Qglp | VE004 | Qglp | VE004 | Qglp | VE004 | Qglp | VE004 | Qglp |
| 7.000 | 12,40 | 7.000 | 11,68 | 7.000 | 10,98 | 7.000 | 10,29 | 7.000 | 9,60 |
| 7.500 | 13,01 | 7.500 | 12,26 | 7.500 | 11,53 | 7.500 | 10,80 | 7.500 | 10,10 |
| 8.000 | 13,63 | 8.000 | 12,85 | 8.000 | 12,08 | 8.000 | 11,32 | 8.000 | 10,56 |
| 8.500 | 14,25 | 8.500 | 13,43 | 8.500 | 12,63 | 8.500 | 11,83 | 8.500 | 11,05 |
| 9.000 | 14,87 | 9.000 | 14,02 | 9.000 | 13,18 | 9.000 | 12,35 | 9.000 | 11,53 |
| 9.500 | 15,48 | 9.500 | 14,60 | 9.500 | 13,73 | 9.500 | 12,86 | 9.500 | 12,01 |
| 10.000 | 16,11 | 10.000 | 15,19 | 10.000 | 14,28 | 10.000 | 13,38 | 10.000 | 12,49 |
| 10.500 | 16,73 | 10.500 | 15,77 | 10.500 | 14,83 | 10.500 | 13,89 | 10.500 | 12,97 |
| 11.000 | 17,35 | 11.000 | 16,36 | 11.000 | 15,38 | 11.000 | 14,41 | 11.000 | 13,45 |
| 11.500 | 17,97 | 11.500 | 16,94 | 11.500 | 15,93 | 11.500 | 14,92 | 11.500 | 13,93 |

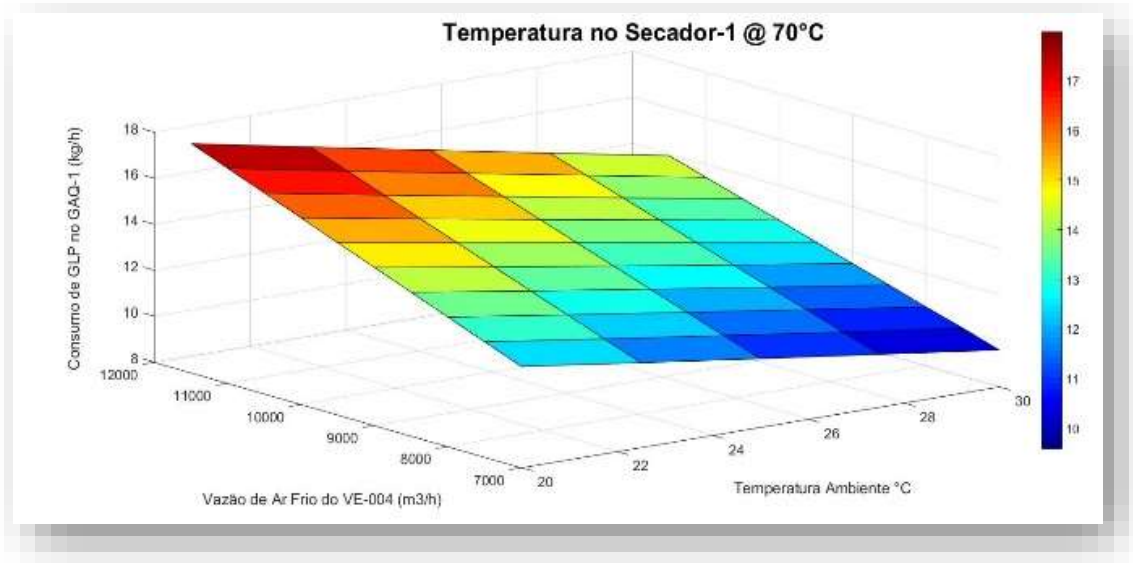
Fonte: Suave (2017).

Figura 7 - Consumo de GLP no Queimador-1 - 60°C.



Fonte: Suave (2017).

Figura 8- Consumo de GLP no Queimador-1 - 70°C.



Fonte: Suave (2017).

Da mesma forma, nas Tabelas 8 e 9 são apresentados os cálculos de vazões em função da variação da temperatura ambiente (T_a) ($^{\circ}C$) e da vazão (m^3/h) dos ventiladores (VE005/006/007), considerando as temperaturas de 60° e 70°C, respectivamente, na entrada do Secador-2.

O software *Matlab*® foi também utilizado com a finalidade de desenvolver os respectivos gráficos apresentados nas Figuras 9 e 10 para as mesmas temperaturas de 60° e 70°C, referentes ao Queimador GAQ-2.

Tabela 8 - Consumo de GLP no queimador-2 para manter 60°C no secador-2.

| Tamb = 20°C / Tsec = 60°C / UR=60% | | Tamb = 22,5°C / Tsec = 60°C / UR=60% | | Tamb = 25°C / Tsec = 60°C / UR=60% | | Tamb = 27,5°C / Tsec = 60°C / UR=60% | | Tamb = 30°C / Tsec = 60°C / UR=60% | |
|------------------------------------|-------|--------------------------------------|------|------------------------------------|------|--------------------------------------|------|------------------------------------|------|
| VE-005/006/007 | Qgip | VE-005/006/007 | Qgip | VE-005/006/007 | Qgip | VE-005/006/007 | Qgip | VE-005/006/007 | Qgip |
| 2.000 | 5,63 | 2.000 | 5,26 | 2.000 | 4,89 | 2.000 | 4,52 | 2.000 | 4,15 |
| 2.500 | 6,13 | 2.500 | 5,72 | 2.500 | 5,32 | 2.500 | 4,92 | 2.500 | 4,51 |
| 3.000 | 6,63 | 3.000 | 6,18 | 3.000 | 5,74 | 3.000 | 5,31 | 3.000 | 4,87 |
| 3.500 | 7,12 | 3.500 | 6,64 | 3.500 | 6,17 | 3.500 | 5,71 | 3.500 | 5,23 |
| 4.000 | 7,62 | 4.000 | 7,10 | 4.000 | 6,59 | 4.000 | 6,10 | 4.000 | 5,59 |
| 4.500 | 8,11 | 4.500 | 7,57 | 4.500 | 7,02 | 4.500 | 6,50 | 4.500 | 5,95 |
| 5.000 | 8,61 | 5.000 | 8,03 | 5.000 | 7,45 | 5.000 | 6,89 | 5.000 | 6,31 |
| 5.500 | 9,10 | 5.500 | 8,49 | 5.500 | 7,87 | 5.500 | 7,29 | 5.500 | 6,67 |
| 6.000 | 9,60 | 6.000 | 8,95 | 6.000 | 8,30 | 6.000 | 7,68 | 6.000 | 7,03 |
| 6.500 | 10,09 | 6.500 | 9,41 | 6.500 | 8,73 | 6.500 | 8,07 | 6.500 | 7,39 |

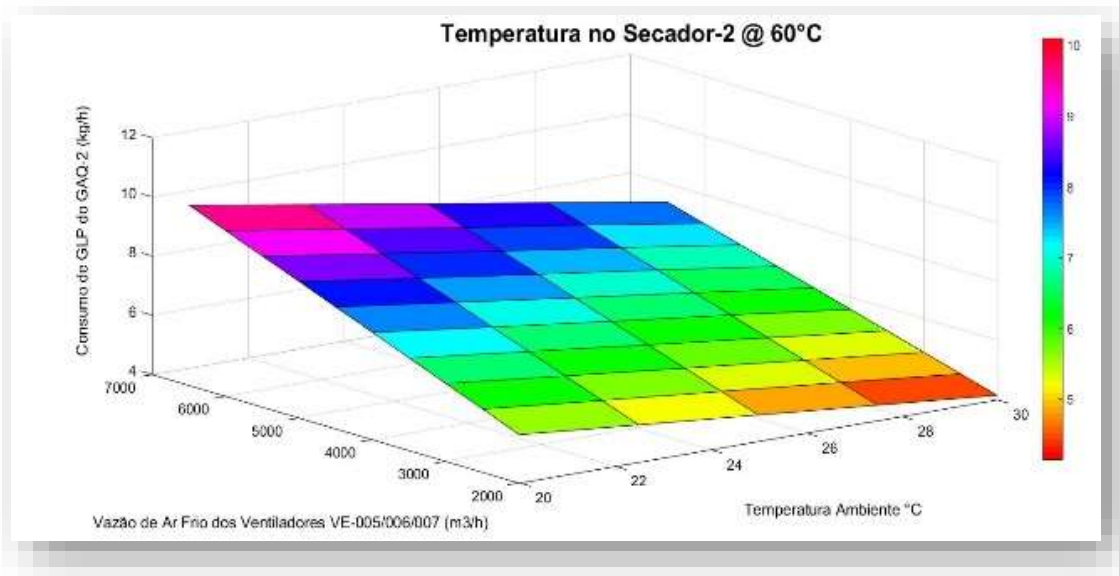
Fonte: Suave (2017).

Tabela 9 - Consumo de GLP no queimador-2 para manter 70°C no secador-2.

| Tamb = 20°C / Tsec = 70°C / UR=60% | | Tamb = 22,5°C / Tsec = 70°C / UR=60% | | Tamb = 25°C / Tsec = 70°C / UR=60% | | Tamb = 27,5°C / Tsec = 70°C / UR=60% | | Tamb = 30°C / Tsec = 70°C / UR=60% | |
|------------------------------------|-------|--------------------------------------|-------|------------------------------------|-------|--------------------------------------|-------|------------------------------------|------|
| VE-005/006/007 | Qglp | VE-005/006/007 | Qglp | VE-005/006/007 | Qglp | VE-005/006/007 | Qglp | VE-005/006/007 | Qglp |
| 2.000 | 7,11 | 2.000 | 6,74 | 2.000 | 6,36 | 2.000 | 5,99 | 2.000 | 5,62 |
| 2.500 | 7,73 | 2.500 | 7,32 | 2.500 | 6,91 | 2.500 | 6,50 | 2.500 | 6,10 |
| 3.000 | 8,35 | 3.000 | 7,91 | 3.000 | 7,46 | 3.000 | 7,03 | 3.000 | 6,58 |
| 3.500 | 8,97 | 3.500 | 8,49 | 3.500 | 8,01 | 3.500 | 7,54 | 3.500 | 7,06 |
| 4.000 | 9,59 | 4.000 | 9,07 | 4.000 | 8,56 | 4.000 | 8,06 | 4.000 | 7,55 |
| 4.500 | 10,22 | 4.500 | 9,66 | 4.500 | 9,11 | 4.500 | 8,57 | 4.500 | 8,03 |
| 5.000 | 10,84 | 5.000 | 10,24 | 5.000 | 9,66 | 5.000 | 9,09 | 5.000 | 8,51 |
| 5.500 | 11,46 | 5.500 | 10,83 | 5.500 | 10,21 | 5.500 | 9,60 | 5.500 | 8,99 |
| 6.000 | 12,08 | 6.000 | 11,41 | 6.000 | 10,76 | 6.000 | 10,12 | 6.000 | 9,47 |
| 6.500 | 12,70 | 6.500 | 12,00 | 6.500 | 11,31 | 6.500 | 10,63 | 6.500 | 9,95 |

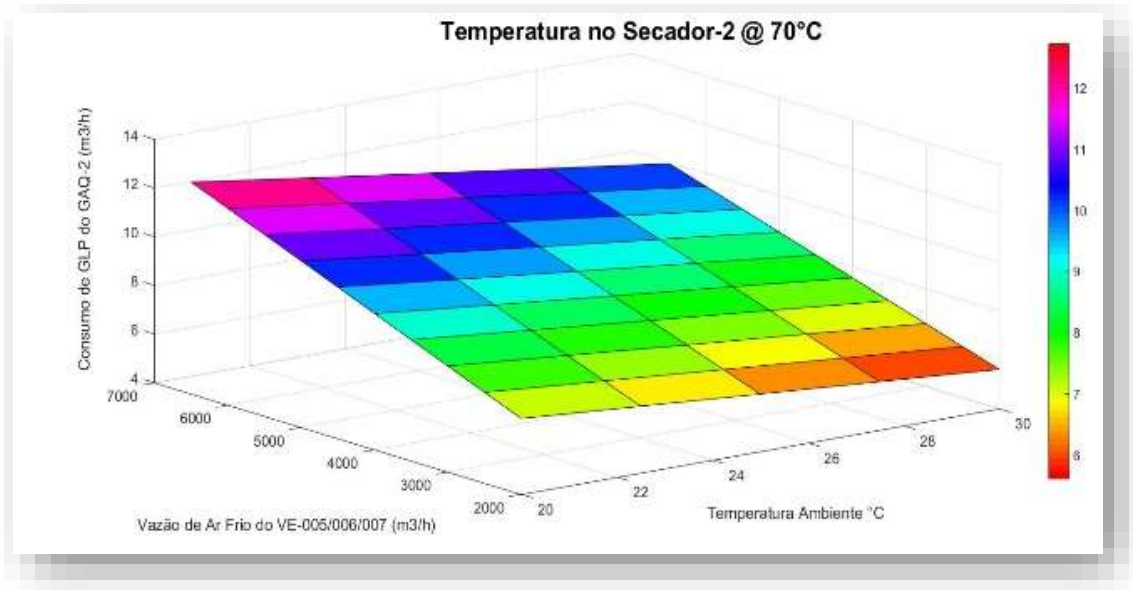
Fonte: Suave (2017).

Figura 9 - Consumo de GLP no Queimador-2 - 60°C.



Fonte: Suave (2017).

Figura 10 - Consumo de GLP no Queimador-2 - 70°C.



Fonte: Suave (2017).

Observa-se que as superfícies dos gráficos das Figuras 7 a 10 possuem um comportamento não-linear, porém bastante similares. Pelo fato das superfícies se assemelharem a um plano foi possível, portanto, tratá-las por meio da regressão linear múltipla para a obtenção de uma equação do tipo da Equação (12) para cada plano apresentado (Nunes & Carvalho, 2017).

Portanto, as Equações (22) a (25) a seguir foram o resultado de cálculo das regressões lineares múltiplas de duas variáveis reais aplicadas ao Secador-1, sendo a vazão de GLP uma função da temperatura ambiente (T_a) e da vazão de ar frio do Secador-1 (Q_{VE4}), de acordo com os intervalos de discreções apresentados na Tabela 1.

Logo, para produtos secados a 60°C no Secador-1, tem-se a Equação (22) desenvolvida:

$$Q_{GLP} = 10,7992 - 0,3354 \cdot T_a + 8,5423E^{-4} \cdot Q_{VE4} \quad (22)$$

Para produtos secados a 70°C no Secador-1, tem-se a Equação (23) desenvolvida:

$$Q_{GLP} = 11,8176 - 0,3411 \cdot T_a + 0,0011 \cdot Q_{VE4} \quad (23)$$

Para produtos secados a 60°C no Secador-2, tem-se a Equação (24) desenvolvida:

$$Q_{GLP} = 8,4046 - 0,2089 \cdot T_a + 8,5423E^{-4} \cdot Q_{VE567} \quad (24)$$

Para produtos secados a 70°C no Secador-2, tem-se a Equação (25):

$$Q_{GLP} = 9,4529 - 0,2117 \cdot T_a + 0,00113E^{-4} \cdot Q_{VE567} \quad (25)$$

O consumo total de GLP na planta de secagem é a soma dos consumos de GLP do Queimador-1 mais o consumo do Queimador-2, conforme a Equação (26), ou seja:

$$Q_{GLPTot} = QGLP_{GAQ1} + QGLP_{GAQ2} \quad (1)$$

Os resultados representam uma importância relevante ao se estabelecerem equações utilizáveis pelo pessoal de produção no lugar do uso de tabelas para cada Secador e para cada temperatura de processo.

4. Considerações Finais

A elaboração e aplicação da modelagem matemática do sistema de geração de ar quente por meio do software MS Excel®, condizente com o uso corrente deste software na empresa, permitiram cálculos de avaliação do sistema, cujos resultados foram bastante significativos. Para a temperatura adiabática de chama os resultados apresentaram uma margem de erros de 1,79% em comparação com dados encontrados na literatura e para a temperatura de ar na entrada dos Secadores, os resultados foram condizentes com aqueles medidos na prática da operação, tendo apresentado uma margem de erro de 2,56% e 2,87% respectivamente para o primeiro e segundo Secadores, portanto aplicável.

A previsão de consumo de GLP para diferentes produtos a partir das temperaturas requeridas de secagem deles, que se apresentam em diferentes condições de processo, também é um importante resultado da aplicação da modelagem, pois se pode prever com antecedência os consumos e os custos desse insumo para cada item produzido, além de se poder prever condições operacionais do sistema, para cada exigência térmica de novos produtos, permitindo um estudo antecipado bem interessante e útil.

A modelagem auxilia muito proveitosamente em treinamentos operacionais com as demonstrações típicas de que alterações indevidas, ou mal controladas de alguns parâmetros de processo, tais como as vazões de ar frio para os Secadores, podem afetar significativamente o controle correto da temperatura e conseqüentemente da umidade do produto acabado. Com isso, é possível efetivamente realizar um ótimo controle e uma economia operacional anual, pois é uma questão de manter o grupo operacional bem treinado e conscientizado, para se obter a economia esperada para a empresa. Por meio dos resultados obtidos neste estudo, pode-se concluir que a modelagem matemática é uma ferramenta muito importante para a simulação e posterior comparação entre resultados, apresentando erros dentro dos limites permissíveis na engenharia.

As sugestões para trabalhos futuros são as seguintes: a) fazer interpolações para cálculos de consumos de GLP entre as temperaturas de interesse de 60° a 90°C e disponibilizá-las em uma tabela mais ampla; b) tornar a modelagem matemática mais abrangente com a inclusão dos cálculos de balanço material e energético para os produtos, após o levantamento dos parâmetros físico-químicos de cada produto processado da planta, como: capacidade calorífica, densidade média, a fim de que se tenha um balanço material e energético completo de todo o leito de secagem e não apenas as temperaturas relevantes do processo.

Agradecimentos

Os autores agradecem à UNIUBE – Universidade de Uberaba, à FAPEMIG – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais e à SIPCAM NICHINO BRASIL S.A. pelo apoio disponibilizado para o desenvolvimento deste estudo.

Referências

- Alfa-Laval Aalborg®. (2015). *Poder Calorífico Inferior*. Petrópolis, RJ. <http://www.alfalaval.com.br/>
- Bärmann A., Martin A., & Schneider O. (2017). *A comparison of performance metrics for balancing the power consumption of trains in a railway network by slight timetable*. adaptation In: *Public Transport 9* (2017), p. 95-113 ISSN: 1613-7159. 10.1007/s12469-017-0160-4
- Bird, R. B., Stewart, W. E., & Lightfoot, E.N. E. N. (2004). *Fenômenos de transporte*. Livros técnicos e científicos editora S.A.

- Bizzo, W.A. (2003). EM 722 – *Geração, distribuição e utilização de vapor*. 30 de setembro de 2003. 128 p. Notas de aulas. Impresso. <http://www.fem.unicamp.br/~em672/GERVAP0.pdf> e <https://www.fem.unicamp.br/~em672/GERVAP2.pdf>
- Bucek, E. U., Finzer, J. R. D., & Cavallaro, R. J. (2020) *Mathematical Model for Determining the Coffee Leaf Area*. *American Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences*, 71, 11-19.
- Cavallaro, R. J., Uber Bucek, E., & Finzer, J. R. D. (2020). *Inativação enzimática de folhas de café para uso em bebidas*. *Research, Society and Development*, 9, 1-17, <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v9i7.4598>.
- Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2007). *Termodinâmica*. (5ª Ed.). McGraw-Hill Brasil.
- Chein, F. (2019). *Introdução aos modelos de regressão linear*. Coleção Metodologias de Pesquisa. Enap Fundação Escola Nacional de Administração Pública. Cap 3.
- Faria, I. D., et al. (2010). *A utilização de Óleo Vegetal como Combustível - Aspectos legais, técnicos, econômicos, ambientais e tributários*. Centro de Estudos da Consultoria do Senado. p 16-17.
- Finzer, J. R. D., & Kieckbusch, T. G. (1989). *Desenvolvimento de um Secador de leito vibro-jorrado*. Campinas, SP: UNICAMP: p. 258.
- Finzer, J. R. D., Menezes, E. A., & Limaverde, J. R. (1997). *Drying coffee beans in vibrated trays dryer*. *Drying Technology*. 15: 6-8, 1983–1994.
- Finzer, J. R. D., Limaverde, J. R., Freitas, A. O., Limaverde Jr., J. R., & Sfredo, M. A. (2003). *Drying of coffee berries in a vibrated tray dryer operated with solids recycle and single-stage*. *Journal of Food Process Engineering*, 26: 2, 207–222.
- Finzer, J. R. D., Sfredo, M. A., Sousa, G. D. B., & Limaverde, J. R. (2007). *Dispersion coefficient of coffee berries in vibrated bed dryer*. *Journal of Food Engineering*, 79:3, 905–912.
- Gasnet®. (2017). Seção - *Temperatura adiabática de Chama*. O site do gás natural: http://www.gasnet.com.br/gasnatural/combust_completo.asp
- Lourenço, G. A., & Finzer, J. R. D. (2013). *Secagem parcial de tomate-cereja em secador de bandejas vibradas com reciclo*. *Brazilian Journal of Food Technology (Online)*, 16, 334-345.
- Lima, C. G. (2000). *Modelos Lineares*. Apostila LCE 5861-3. cap.7, 379 p.
- Liquigás ®. (2017). D. S. A. Liquigás. <http://www.liquigas.com.br/wps/portal>.
- Maciel Júnior, U. F., & Finzer, J.R.D. (2021). *Secador contínuo em leito fluidizado de dispersivos solúveis*. *Brazilian Journal of Development*, Curitiba. 7(4), 33967-33976. 10.34117/bjdv7n4-041
- Maya, M., Atsuki, K., Kazuo, N., & Kiichi, N. (2018). *Design trade-off between spatial resolution and power consumption in CMOS biosensor circuit based on millimeter-wave LC oscillator array*. *Japanese Journal of Applied Physics*.
- Menezes, E. A., Finzer, J. R. D., & Oliveira, D. L. (1998). *A study of the drying performance of a vibrating tray dryer*. *Drying Technology*, 16: 9-10, 1987–1998.
- Nunes, F. H. B., & Carvalho, S. R. (2017). *Análise de Eficiência Energética da Geração de Ar Quente para o Processo de Secagem de Granulados em Leito Fluidizado* - Trabalho de Conclusão de Curso da Faculdade de Engenharia Mecânica da UFU - Uberlândia.
- Rayburners®. (2017). *Sistemas de combustão industrial*. <http://www.rayburners.com.br/menu.htm>
- Ross, S. A., Westerfield, R. W., & Jordan, B. D. (2010). *Princípios de administração financeira*. Editora Atlas.
- Sfredo, M. A., Finzer, J. R. D., & Limaverde, J. R. (2005). *Heat and mass transfer in coffee fruits drying*. *Journal of Food Engineering, Oxford*, 70, 15-25.
- Smith, J. M., Van Ness, H. C., & Abbott, M. M. (2007). *Introdução à Termodinâmica da Engenharia Química*. LTC Editora.
- Suave, S. (2017). *Modernização do sistema de geração de energia térmica para Secador de leito vibro-fluidizado*. Dissertação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química - Mestrado Profissional da Universidade de Uberaba (PPGEQ-MP/UNIUBE). 148 p.
- Seung-Jun, S., Jungyub, W., Sudarsan, R., & Prita, M. (2018). *Standard Data-Based Predictive Modeling for Power Consumption in Turning Machining*, (in English), *Sustainability Journal*, Research Article p. 19.
- Sulistio, H. (2017). *Effect of Traffic Flow, Proportion of Motorcycle, Speed, Lane Width, and the Availabilities of Median and Shoulder on Motorcycle Accidents at Urban Roads in Indonesia.*, *The Open Transportation Journal*.