



MODELAGEM MATEMÁTICA PARA SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA TÉRMICA

SUAVE S.¹, LIMA E. A. P. LIMA²

^{1,2} Universidade de Uberaba, PPGEQ da Universidade de Uberaba UNIUBE

RESUMO – *A implantação de um novo sistema de geração de energia térmica a base de queima de GLP, em substituição a uma caldeira a base de queima óleo vegetal, teve por objetivo modernizar e melhorar o desempenho térmico para atender a demanda de calor para um secador de leito vibro-fluidizado da empresa em estudo. O secador é utilizado para a secagem de granulados agroquímicos. Este novo sistema viabilizou a implantação de modernos controles de automação, inclusive proporcionando melhorias de processo com a estabilidade da temperatura. Foi possível a elaboração de uma modelagem matemática, com a utilização de equações da literatura da Engenharia Química (Smith et al., 2007), e também o uso de um software acessível, como o MS Excel® da Microsoft. A modelagem foi testada por meio de dados de projeto fornecidos pela empresa projetista (Liquigás®, 2017) e validada por meio de parâmetros operacionais atuais da etapa de secagem, tendo apresentado uma margem de erro abaixo de 6,6%, mostrando, dessa forma, que é bastante aplicável. A modelagem tem a finalidade de prever as temperaturas relevantes de processo do novo sistema, além predizer consumos do GLP para diferentes situações concorrentes e simultâneas de processo, como a temperatura ambiente, a umidade relativa do ar e diferentes vazões de ar frio dos ventiladores do processo. Nunes (2017) utilizando o software EES® (Engeneering Equation Solver) desenvolveu para o mesmo sistema, uma modelagem que apresentou margem de erro similar.*

1. INTRODUÇÃO

A ideia do investimento em um sistema moderno de geração de energia térmica se deu com a necessidade da substituição de uma caldeira flamotubular (Alfa-Laval Aalborg®, 2015) com mais de 30 anos de operação, que utilizava óleo vegetal como combustível por um moderno sistema de geração de ar quente a base de queima de gás liquefeito de petróleo (GLP). A necessidade de geração de energia térmica visa o atendimento da demanda de calor para a etapa de secagem de granulados por meio de leito vibro-fluidizado. Uma vez que o sistema de geração de energia térmica implementado tem maiores facilidades de controle, quando comparado com o sistema baseado na caldeira, julgou-se apropriado o desenvolvimento de uma modelagem matemática capaz de prever as temperaturas relevantes do processo, como a temperatura adiabática de chama, a temperatura da câmara de combustão, a temperatura de tubulação e a temperatura de ar quente na entrada dos

secadores. O objetivo foi trabalhar com a simulação do processo, objetivando ajustes operacionais, previsões de consumos de combustível na busca de sua economia.

O novo sistema gerador de ar quente adquirido para fornecer energia térmica produz uma corrente de gases quentes provenientes da combustão de GLP a alta temperatura, que se mistura diretamente com a corrente de ar frio dos ventiladores do sistema de secagem. Esta mistura de ar aquecido é utilizada diretamente na secagem do produto e, dessa forma obtém-se um sistema de melhor desempenho energético. Esse tipo de sistema, por meio de queima do GLP, apresenta maior facilidade de automação e propicia um ótimo controle da temperatura e da umidade percentual final do produto acabado. A necessidade de economia operacional por meio de um melhor desempenho energético e a melhoria de processo de secagem com facilidades de automação foram os fatores fundamentais para a tomada de decisão do novo projeto de investimento do sistema gerador de ar quente.

2. CARACTERIZAÇÃO DO ESTUDO

Até abril de 2015 a empresa em estudo utilizava uma caldeira do tipo flamotubular (Alfa-Laval Aalborg®, 2015) para gerar vapor na capacidade total de 1.600 kg/h para suprir a energia térmica necessária ao aquecimento do ar para a secagem de produtos agroquímicos na forma de grânulos dispersíveis em água. O aquecimento do ar era realizado por meio da troca de calor entre ar soprado e vapor, por intermédio de um radiador posicionado na entrada dos secadores de leite 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 também 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), por meio da queima de gás GLP.

Sendo assim, a partir de maio/2016 foi implantado o sistema composto de dois geradores de ar quente (GAQ) da marca RayBurners®, sendo o GAQ-1 o secador-1, de capacidade 375.000 kcal/h e o GAQ-2 para o secador-2, de capacidade instalada de 790.000 kcal/h. Porém esse último, atualmente trabalha com uma capacidade limitada à capacidade do GAQ-1.

3. METODOLOGIA

Modelagem matemática

Para esses cálculos estimativos de temperaturas, foram utilizadas as equações descritas nos Capítulos 1, 2 e 4 do livro do Smith, Van Ness e Abbott (2007), bem como as tabelas do Apêndice C



do mesmo, e também a correlação empírica relacionada para as estimativas de capacidade calorífica das substâncias e os calores padrão de formação. A Figura 1 mostra o volume de controle (VC) considerado do queimador de gases, para o qual foram aplicados os balanços de massa e energia.

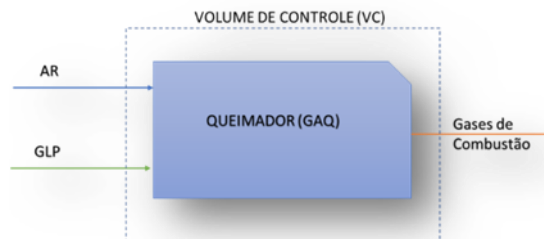


Figura 1 - Esboço do volume de controle (VC) para um queimador de GLP (Suave, 2017)

A partir do estabelecimento do volume de controle, foi realizado o balanço de massa e energia, com a obtenção das equações para o cálculo da temperatura adiabática de chama e da temperatura da câmara de combustão (Smith et al., 2007).

Temperatura adiabática de chama (T_{ch}).

$$T_{ch} = T_o + \frac{R \cdot \sum_{Reag} v_i \cdot Cp_i \cdot (T_a - T_o) - [\sum_{Prod} v_i \cdot \Delta H_{298,15}^i - \sum_{Reag} v_i \cdot \Delta H_{298,15}^i]}{R \sum_{Prod} v_i \cdot Cp_i} \quad (1)$$

Temperatura da câmara de combustão (T_c). É calculado através da Equação (2).

$$T_c = T_o + \frac{R \sum_{Reag} v_i \cdot Cp_i \cdot (T_a - T_o) - [\sum_{Prod} v_i \cdot \Delta H_{298,15}^i - \sum_{Reag} v_i \cdot \Delta H_{298,15}^i] + W_s}{R \sum_{Prod} v_i \cdot Cp_i} \quad (2)$$

Temperatura da tubulação (T_t).

A temperatura da tubulação é calculada considerando adicionalmente as perdas térmicas em todas as partes planas das paredes dos queimadores e das tubulações (Bird et al., 2004).

$$T_t = T_o + \frac{\sum_{Reag} (v_i \cdot \Delta H_i^{298,15}) + R \cdot \sum_{Reag} v_i \cdot Cp_i \cdot (T_a - T_o) + (m_i \cdot \frac{u^2}{2000})_{Reag}}{R [\sum_{Prod} v_i \cdot Cp_i]} - \frac{\sum_{Prod} (v_i \cdot \Delta H_i^{298,15}) - (m_i \cdot \frac{u^2}{2000})_{Prod} + W_s - q_o}{R \cdot [\sum_{Prod} v_i \cdot Cp_i]} \quad (3)$$

Sendo para as Equações (1), (2) e (3):



T_{ch}	Temperatura de chama	(K)
T_a	Temperatura ambiente	(K)
T_c	Temperatura da câmara de combustão	(K)
T_t	Temperatura da tubulação	(K)
v_i	Vazão molar do componente i	(kmol/h)
T_0	Temperatura de referência	(298,15 K)
T_a	Temperatura ambiente	(K)
Cp_i	Capacidade calorífica do componente i	(kJ/kmol)
q_0	Taxa de calor devido a perda térmica em parede plana	(kJ/h)
$\Delta H_{298,15}^i$	Entalpia do componente i na temperatura de referência	(298,15 K)
R	=8,314462	(Pa.m ³ /kmol. K)
W_s :	Taxa de trabalho de eixo de ventilador industrial (soprador)	(kJ/h)
W_{S1}	Taxa de trabalho do ventilador a montante do sistema	(kJ/h)
W_{S2}	Taxa de trabalho realizado pelo exaustor a jusante no sistema	(kJ/h)
$(m_i \cdot \frac{u^2}{2000})$	Parcela referente à taxa de energia cinética da corrente i	(kJ/h)

Perdas térmicas nos queimadores (q_0).

$$q_0 = \frac{(T_g - T_a) \cdot A \cdot 3,6}{\left(\frac{1}{h_0} + \frac{(x_1 - x_0)}{k_{01}} + \frac{(x_2 - x_1)}{k_{12}} + \frac{1}{h_2}\right)} \quad (4)$$

Perdas térmicas nos trechos de tubulação (q_0')

$$q_0' = \frac{2 \cdot \pi \cdot L \cdot (T_g - T_a) \cdot 3,6}{\left(\frac{1}{r_0 \cdot h_0} + \frac{\ln\left(\frac{r_1}{r_0}\right)}{k_{01}} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{k_{12}} + \frac{1}{r_2 \cdot h_2}\right)} \quad (5)$$

Sendo para as Equações (4) e (5):

q_0, q_0'	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)

Temperatura na entrada dos secadores (T_m)

Para o cálculo da temperatura do ar de mistura, aquecido na entrada dos secadores, leva-se em conta o balanço de massa e de energia realizado no volume de controle da câmara de mistura, conforme demonstrado na Figura 2. A Equação (6) é utilizada para o cálculo da temperatura de mistura (T_m).

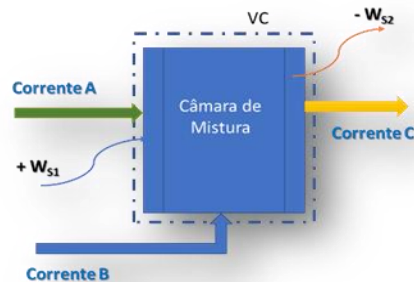


Figura 2 - Volume de controle para balanço de massa e energia
(Suave, 2017)

$$T_m = T_o + \frac{\sum_i^n (v_i \cdot \Delta H_{298,15}^i + v_i \cdot R \cdot C_{p_i} \cdot (T_a - T_o))^A + \sum_i^n (v_i \cdot \Delta H_{298,15}^i + v_i \cdot R \cdot C_{p_i} \cdot (T_c - T_o))^B}{R \cdot (\sum_i^n v_i \cdot C_{p_m})^C} + \frac{(\sum_i^n \frac{m_i}{2000} u^2)^A + (\sum_i^n \frac{m_i}{2000} u^2)^B - (\sum_i^n \frac{m_i}{2000} u^2)^C - \sum_i^n (v_i \cdot \Delta H_{298,15}^i)^C + (W_{s1}) - W_{s2}}{R \cdot (\sum_i^n v_i \cdot C_{p_m})^C} \quad (6)$$

Sendo:

C_{p_i} Capacidade calorífica do componente i (kJ/kmol)

Cálculo de Variâncias

Cálculo da variância de temperaturas por meio da Equação (4.8):

$$E_r = \frac{|(T_{MOD} - T_{EXP})|}{T_{MOD}} \cdot 100 \quad (7)$$

Sendo:



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

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para a finalidade da modelagem, considerou-se, por indicação do projetista, que o propano (C_3H_8) e o butano (C_4H_{10}) participam com 40 e 60%, respectivamente, na reação química com o O_2 .

Na Figura 3 são ilustradas várias curvas de temperatura adiabática de chama, calculadas para vários componentes variando a relação $\frac{H}{C}$ (hidrogênio/carbono), conforme dados da Gasnet (2017). Fazendo-se o cálculo da relação de hidrogênio e carbono (H/C), de acordo com o que foi considerado na modelagem tem-se:

$$H/C = 0,4 \cdot (8/3) + 0,6 \cdot (10/4) = 2,6$$

A modelagem matemática foi utilizada com os mesmos dados do gráfico da Figura 1 para fins de verificação da sua aplicabilidade, ou seja, considerando um excesso de ar em torno de 5% (ver a linha laranja no gráfico da Figura 3) e uma temperatura de alimentação de ar de combustão em torno de 38°C.

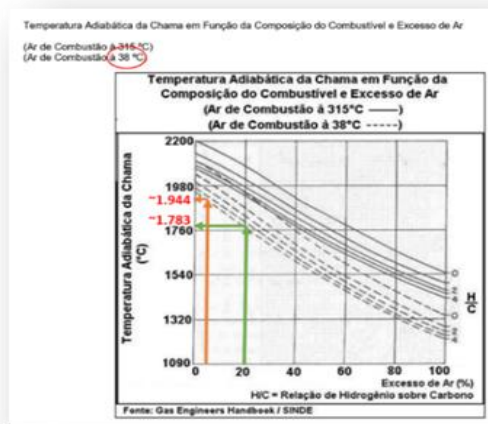


Figura 3 - Gráfico de temperaturas adiabáticas de chama (Gasnet ®, 2017)



Dados Gerais de Entrada		
Altitude	556,0	m
T _{Local}	38,00	°C
UR%	60,0%	%
P _{Local}	94.822,02	Pa
% Propano (C ₃ H ₈)	40%	%
% Butano (C ₄ H ₁₀)	60%	%
Excesso de Ar (%)	5,0%	%

GAQ-1		
Queimador GAG-1	67,03%	%
Consumo GLP	9,77	kg/h
Vazão GAQ-1	3.000,0	Nm ³ /h
Vazão GAQ-1 (local)	3.746,03	m ³ /h
Vent VE-004	7.000,00	m ³ /h
% Abert Valv	9,5303	%
Vazão Total Ar Gaq1	10.746,03	m ³ /h

RESULTADOS DE CALCULOS		
GAQ-1		
T _{chama}	1.963,1	°C

Figura 4 - Interface com resultados da modelagem para a temperatura de chama (Suave, 2017)

O resultado aproxima-se do resultado encontrado no gráfico da Figura 3 (~1.944°C), obtido por interpolação, por meio 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 da temperatura adiabática de chama, porém agora com um excesso de ar de 20%, a margem de erro é de 1,79%, conforme é demonstrado a seguir. Portanto, a modelagem apresenta-se aplicável.

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

Parâmetros atuais levantados do novo sistema gerador de ar quente

Os parâmetros reais do sistema foram levantados de junho a novembro/2016, a partir da implantação do novo sistema de geração de ar quente para a secagem e são mostrados na Tabela 1.

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 os normalmente um total de 07 produtos.



Tabela 1 - Parâmetros reais médios apurados de junho a novembro/2016

Temperatura real (média ponderada) na entrada dos secadores (°C)	62,51
Temperatura real média externa local (°C)	22,54
Consumo real total (taxa média do período) (kg/h)	17,69
Consumo estimado para o GAQ-1 (67% do total) (kg/h)	11,86
Consumo estimado para o GAQ-2 (33% do total) (kg/h)	5,83

(Suave, 2017)

Nesse mesmo período, o consumo real medido do 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, assim, a mesma proporção original de projeto, ou seja, 67% e 33%, respectivamente, para os queimadores 1 e 2.

Resultados da modelagem para o GAQ-1

Na Tabela 2 são mostrados os parâmetros atuais de operação do queimador-1 (GAQ-1).

Estes foram os dados considerados como dados de entrada no programa da modelagem aplicada ao sistema em questão, cuja incógnita é a temperatura na entrada do secador.

Tabela 2 - Parâmetros atuais de operação do queimador-1 (GAQ-1)

PARÂMETRO	UN	VALOR
Pressão ambiente	(Pa)	94.822,00
Temperatura média ambiente	(°C)	22,54
Umidade Relativa do ambiente	(%)	60,00
Vazão de ar frio (GAQ-1) no queimador-1	(m ³ /h)	3.506,66
Vazão de ar frio no ventilador VE004	(m ³ /h)	8.951,34
Vazão Total de ar (VE004+GAQ-1)	(m ³ /h)	12.458,00
Perdas térmicas	(kJ/h)	32.063,77
Vazão de GLP no queimador-1 (67% do total)	(kg/h)	11,86
Vazão de GLP no queimador-2	(kg/h)	5,83
Vazão Total de GLP GAQ1+GAQ2	(kg/h)	17,69
Potência do ventilador VE004 (c/ 85% rendimento)	(kJ/h)	38.709,00
Potência do ventilador do GAQ-1 (c/ 85% rendimento)	(kJ/h)	16.830,00
Temperatura medida no secador-1	(°C)	62,51

(Suave, 2017)

A Figura 5 apresenta a interface do programa de modelagem com os resultados de cálculos levando em conta os parâmetros reais atuais de processo da linha do GAQ-1 como dados de entrada do programa, conforme mostrados na Tabela 2.



Dados Gerais de Entrada		
GAQ-1		
Altitude	556,00	m
T _{Local}	22,54	°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 (%)	0,00%	%
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)	3.506,66	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% =	-2,49%	

Figura 5 - Interface com resultados da modelagem do GAQ-1 com parâmetros atuais (Suave, 2017)

Vale lembrar que para a modelagem, a massa total de ar frio foi mantida em 12.458,00 m³/h, isto porque o ventilador de ar de combustão do GAQ-1 que adquirido pela empresa, possui uma vazão real (3.506,66 m³/h) diferente da vazão considerada no projeto (2.900 m³/h). Por essa razão, foi feito o ajuste no balanço global de massa de ar. Além disso, os parâmetros operacionais reais atuais que foram efetivamente medidos no processo, o consumo real médio do GLP e a temperatura média ambiente, foram considerados como parâmetros operacionais atuais de entrada da modelagem em Excel®. A temperatura média real na entrada dos secadores (62,51°C) foi considerada como um parâmetro de comparação com cálculo de temperatura do programa da modelagem para o secador-1. Além disso, 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 para manter a consistência à análise e garantir a confiabilidade dos resultados da modelagem. Face aos resultados apresentados na Figura 5, verifica-se que a modelagem produz um cálculo de temperatura de 60,95°C na entrada do secador-1, versus 62,51°C, que representa a média com que trabalhou o secador-1 nos 8 meses de operação, de acordo com a Tabela 3, demonstrando o bom desempenho da modelagem, cuja margem de erro está calculada conforme a seguir:

$$E_r = \frac{|(60,95 - 62,51)|}{60,95} \cdot 100 = 2,49\%$$



Portanto, conclui-se que a modelagem matemática do sistema é validada para a linha do GAQ-1 ao utilizar-se os dados operacionais atuais de processo, e apresenta-se aplicável.

Resultados da modelagem matemática para o GAQ-2

Na Tabela 3 são mostrados os parâmetros atuais de operação do queimador-2 (GAQ-2) considerados para uso no programa da modelagem aplicada ao sistema em questão, cuja incógnita será a temperatura na entrada do secador-2.

Da mesma forma que no GAQ-1, a massa total de ar fria foi mantida com uma vazão de 5.880,74 m³/h. Isto porque o ventilador de ar de combustão do GAQ-2 comprado pela empresa possui uma vazão real diferente (3.943,6 m³/h) da vazão considerada no projeto (1.500 m³/h) para as mesmas condições de projeto. Dessa forma, será feito o ajuste no balanço global de massa de ar. Os mesmos parâmetros operacionais atuais medidos no processo, como o consumo real médio do GLP e a temperatura média ambiente também foram considerados como parâmetros operacionais atuais de entrada da modelagem matemática em Excel®. As temperaturas médias reais na entrada dos secadores foram considerados como parâmetros de comparação estatística com cálculo de temperatura entregue pelo programa da modelagem para o secador-2. Os mesmos percentuais de 67% e de 33% consumo de GLP foram mantidos, respectivamente, para o GAQ-1 e para o GAQ-2 para a consistência e confiabilidade nos resultados da modelagem. A Figura 6 apresenta a interface do programa de modelagem com os resultados de cálculos com os parâmetros atuais do GAQ-2 como dados de entrada do programa da modelagem.

Tabela 3 - Parâmetros atuais de operação do queimador-2 (GAQ-2)

PARÂMETRO	UN	VALOR
Pressão ambiente	(Pa)	94.822,00
Temperatura média ambiente	(°C)	22,54
Umidade relativa do ambiente	(%)	60,00
Vazão de ar frio (GAQ-2) no queimador-2	(m ³ /h)	3.943,63
Vazão de ar frio ventiladores VE005; VE006; VE007	(m ³ /h)	1.937,11
Vazão total de ar (VE004+GAQ-1)	(m ³ /h)	5.880,74
Perdas térmicas	(kJ/h)	39.950,88
Vazão de GLP no queimador-1	(kg/h)	11,86
Vazão de GLP no queimador-2 (33% do total)	(kg/h)	5,83
Vazão total de GLP GAQ1+GAQ2	(kg/h)	17,69
Potência ventiladores VE005-006-007 (85% rendim.)	(kJ/h)	57.834,00
Potência do ventilador do GAQ-2 (85% rendim.)	(kJ/h)	28.152,00
Temperatura medida no secador-2	(°C)	62,51

(Suave, 2017)



Dados Gerais de Entrada		
GAQ-2		
Altitude	556,00	m
T _{Local}	22,54	°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 (%)	0,00%	%
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}	58,38	°C
T _{orv}	17,15	°C
T _{entsec Medida}	62,51	°C
Erro% =	-6,61%	

Figura 6 - Interface com resultados da modelagem do GAQ-2 com parâmetros atuais (Suave, 2017)

Pelos resultados apresentados na interface da modelagem da Figura 6, verifica-se que a modelagem entrega um cálculo de temperatura de 58,38°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 4, demonstrando um bom desempenho da modelagem para a linha do GAQ-2, cuja margem de erro é calculada a seguir:

$$E_r = \frac{|(58,38 - 62,51)|}{58,38} \cdot 100 = 6,61\%$$

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 atuais de processo e apresenta-se aplicável.

5. CONCLUSÕES

Levando-se em consideração todos os resultados alcançados com o novo sistema gerador de ar quente, as seguintes conclusões são obtidas:

A elaboração, verificação e aplicação da modelagem matemática do sistema de geração de ar quente, por meio do software MS Excel®, condizente com o seu uso corrente na empresa, permitiram



cálculos de avaliação do sistema, cujos resultados foram bastante próximos de valores medidos na prática, com margem de erro máxima de 6,61%, portanto, aplicável.

A modelagem auxilia grandemente no treinamento operacional e com demonstração de que reduzindo as vazões excessivas de ar frio nos secadores, há economia significativa de gás combustível utilizado no sistema de secagem. A aplicação desta redução gera economias para a empresa.

A modelagem é capaz de prever os consumos de combustível para estudos de novos produtos a serem secados no leito vibro-fluidizado, de acordo com a temperatura requerida de secagem e a demanda energética que é requerida para o mesmo.

Essa modelagem pode oferecer também outras formas de avaliação do sistema, inclusive ser útil quando uma modelagem própria do sistema de secagem for desenvolvida.

6. REFERÊNCIAS

ALFA-LAVAL AALBORG®. **Poder Calorífico Inferior**. Petrópolis,RJ:
<http://www.alfalaval.com.br/> 2015.

BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. **Fenômenos de transporte**. 2º. Rio de Janeiro, RJ: LTC Livros técnicos e científicos Editora S.A., 2004. 840.

GASNET ®. **Seção - Temperatura adiabática de Chama**. O site do gás natural:
http://www.gasnet.com.br/gasnatural/combust_completo.asp (acessado em 25.04.2017) p. 2017.

LIQUIGÁS ®, D. S. A. **LIQUIGÁS, disponível em** <http://www.liquigas.com.br/wps/portal>. Acesso em: 26 mar. 2017 2017.

SMITH, J. M.; VAN NESS, H. C.; ABBOTT, M. M. **Introdução à Termodinâmica da Engenharia Química**. 7o. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2007. 626.

SUAVE, S.; LIMA, E. A. P. **Modernização do sistema de geração de energia térmica para secador de leito vibro-fluidizado**. Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química - Mestrado Profissional da Universidade de Uberaba (PPGEQ-MP/UNIUBE). Uberaba, MG: Universidade de Uberaba - UNIUBE: 148 p. 2017.