



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
PTC3418 – Laboratório de Automação

LAB3

Controle de Processo Industrial

Nota Técnica

Modelo da Unidade de Aquecimento de Água de Alimentação

V2022a

Sumário

1	Resumo executivo	3
2	Introdução.....	3
3	O Modelo	4
3.1	Tanque de Acumulação (TAC).....	4
3.2	Tanque de Alimentação (TAL).....	5
3.3	Trocador de Calor (QTR)	6
3.4	Linha de Água Geral (LAG) e Válvula de Alimentação (VAL).....	7
3.5	Volumes, Níveis, Parâmetros e Limitações do Modelo	7
4	Referências.....	8

1 Resumo executivo

Este documento apresenta o equacionamento do modelo dinâmico para a Unidade de Aquecimento de Água de Alimentação (UAAA)

2 Introdução

A UAAA, descrita em termos gerais em [1], é um processo industrial que se destina a prover uma instalação industrial (não descrita neste documento) de água à temperatura constante de 40 °C nas vazões demandadas pela instalação.

Ela é composta de um tanque de alimentação com uma linha de entrada de vazão ajustável e uma linha de saída. O tanque de alimentação possui um agitador para uniformização da temperatura e está ligado a um trocador de calor, utilizado para aquecer a água do processo. A Figura 1 apresenta um diagrama da UAAA.

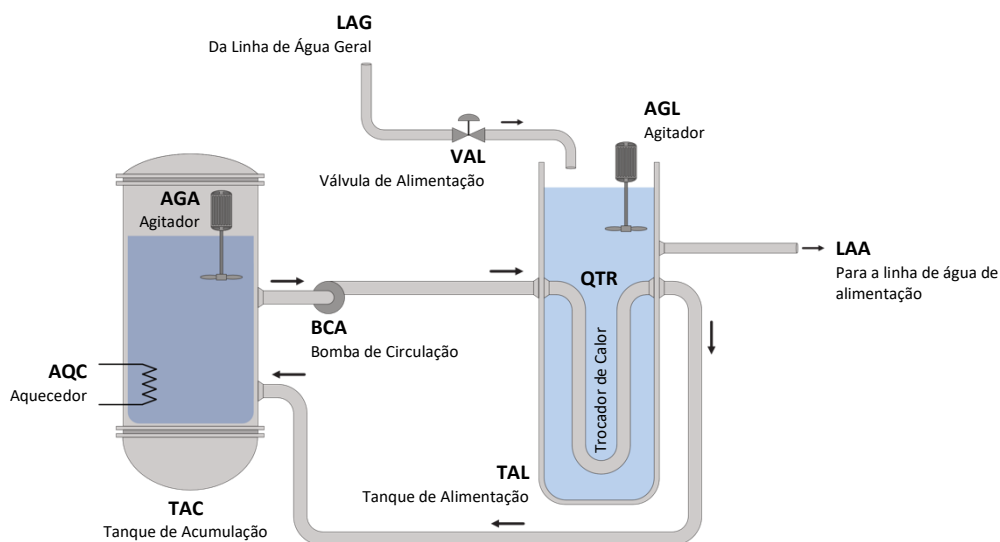


Figura 1 – Diagrama da UAAA

3 O Modelo

A Figura 2 mostra o diagrama de modelagem da UAAA. O sistema encontra-se à pressão ambiente p_{amb} e o fluido utilizado é água, com propriedades dadas pela formulação IAPWS-IF97 [2].

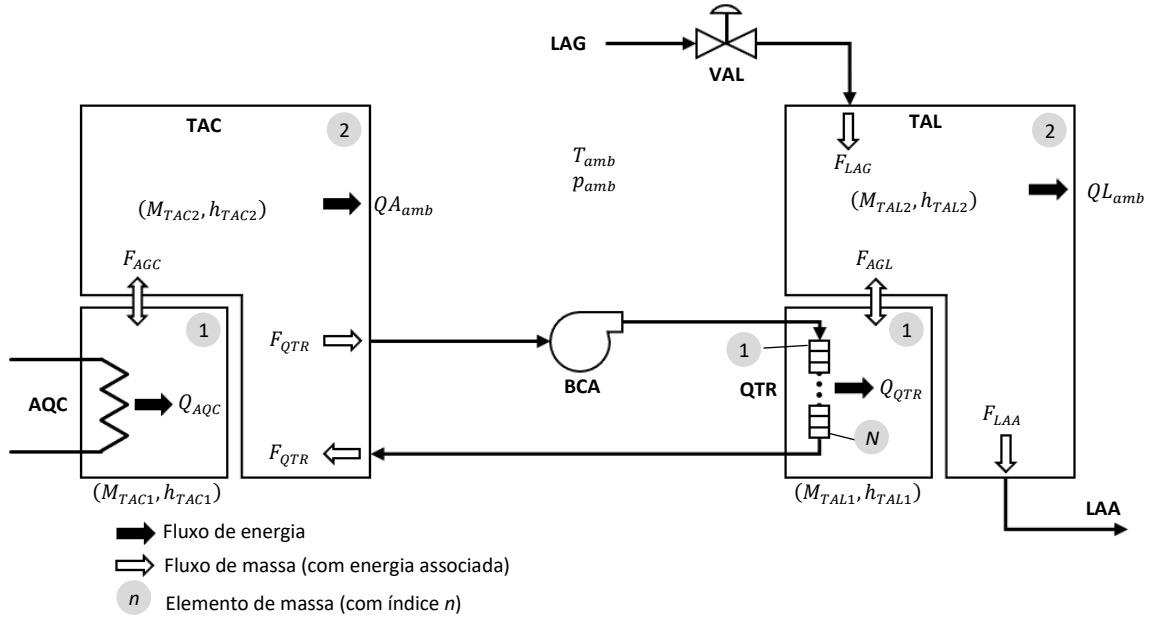


Figura 2 – Diagrama de modelagem da UAAA

3.1 Tanque de Acumulação (TAC)

O tanque opera em circuito fechado e sua massa é constante e igual a M_{TAC} , sendo dividido em dois elementos de massa 1 e 2 com massas M_{TAC1} e M_{TAC2} tais que $M_{TAC1} + M_{TAC2} = M_{TAC}$. O elemento 1 se refere à massa de água nas vizinhanças do aquecedor, e o elemento 2 ao restante do tanque, incluindo a superfície de contato com as paredes.

O balanço de energia é dado por

$$\frac{dh_{TAC1}}{dt} = \frac{1}{M_{TAC1}} (Q_{AQC} + F_{AGC}(h_{TAC2} - h_{TAC1}))$$

$$\frac{dh_{TAC2}}{dt} = \frac{1}{M_{TAC2}} (F_{AGC}(h_{TAC1} - h_{TAC2}) + F_{QTR}(h_{QTR} - h_{TAC2}) - Q_{A_{amb}}),$$

onde h_{TAC1} e h_{TAC2} são as entalpias específicas dos elementos 1 e 2, Q_{AQC} é a potência do aquecedor (um termo exógeno) e $Q_{A_{amb}}$ é a perda de calor para o ambiente, à qual é atribuída uma dinâmica linear de primeira ordem, expressa em termos da transformada de Laplace e dada por

$$\Xi A_{amb}(s) = \frac{K_1 S_{TAC} (\Theta_{TAC2}(s) - T_{amb})}{\tau_{amb1} s + 1},$$

onde ΞA_{amb} e Θ_{TAC2} são as transformadas de $Q A_{amb}$ e T_{TAC2} (a temperatura no elemento 2, calculada a partir de h_{TAC2} pela formulação IAPWS-IF97). K_1 , τ_{amb1} são parâmetros da troca térmica e S_{TAC} é a superfície de contato efetiva do tanque TAC, considerando somente a parte coberta por líquido. T_{amb} é a temperatura ambiente.

F_{QTR} é a vazão mássica do trocador de calor, imposta pela rotação da bomba de circulação de água BCA (outro termo exógeno). F_{AGC} é a vazão mássica de circulação entre os elementos 1 e 2. Por simplicidade assume-se que $F_{AGC} = G_{min}$ quando o agitador AGA está desligado e $F_{AGC} = G_{max}$ quando ele está ligado. h_{QTR} é a entalpia específica da linha de retorno do trocador de calor.

3.2 Tanque de Alimentação (TAL)

O tanque de alimentação também é dividido em dois elementos. O elemento 1 com massa constante M_{TAL1} se refere às vizinhanças do trocador de calor QTR, enquanto o elemento 2 tem massa variável M_{TAL2} e se refere ao restante do tanque.

O balanço de massa no tanque TAC é dado por

$$\frac{dM_{TAL2}}{dt} = F_{LAG} - F_{LAA},$$

onde F_{LAG} é a vazão mássica de entrada da linha de água geral (LAG) e F_{LAA} é a vazão mássica de saída da linha de água de alimentação (LAA), que é um termo exógeno. A massa total de água do tanque M_{TAL} é dada por $M_{TAL} = M_{TAL1} + M_{TAL2}$.

O balanço de energia é dado por

$$\begin{aligned} \frac{dh_{TAL1}}{dt} &= \frac{1}{M_{TAL1}} (Q_{QTR} + F_{AGL}(h_{TAL2} - h_{TAL1})) \\ \frac{dh_{TAL2}}{dt} &= \frac{1}{M_{TAL2}} (F_{LAG}h_{LAG} - F_{LAA}h_{TAL2} + F_{AGL}(h_{TAL1} - h_{TAL2}) - \frac{dM_{TAL2}}{dt}h_{TAL2} - QL_{amb}), \end{aligned}$$

onde h_{TAL1} e h_{TAL2} são as entalpias específicas dos elementos 1 e 2 e Q_{QTR} é a potência transferida pelo trocador de calor. QL_{amb} é a perda de calor para o ambiente, à qual é modelada de forma similar à do tanque TAC e é dada por

$$\Xi L_{amb}(s) = \frac{K_2 S_{TAL} (\Theta_{TAL2}(s) - T_{amb})}{\tau_{amb2} s + 1},$$

com ΞL_{amb} , Θ_{TAL2} , K_2 , S_{TAL} e τ_{amb2} definidos de maneira similar às contrapartes do tanque TAC. F_{AGL} é a vazão mássica de circulação entre os elementos 1 e 2. Por simplicidade assume-se que $F_{AGL} = H_{min}$ quando o agitador AGA está desligado e $F_{AGL} = H_{max}$ quando ele está ligado.

3.3 Trocador de Calor (QTR)

O trocador de calor é dividido em N elementos iguais, com a entalpia específica h_i em cada elemento i , para $i = 1, \dots, N$, dada por:

$$i = 1: \quad h_1 = h_{TAC2} - \Delta Q_1$$

$$i = 2, \dots, N: \quad h_i = h_{i-1} - \Delta Q_i$$

onde $h_{QTR} = h_N$ e ΔQ_i é a transferência de calor entre os fluidos através do trocador de calor para cada elemento por unidade de vazão, com

$$\Delta Q_i = K_{QTR}(T_i - T_{TAL1})\varphi(F_{QTR}),$$

onde T_i é a temperatura do elemento i (calculada a partir de h_i), K_{QTR} é um coeficiente de troca térmica e $\varphi(F_{QTR})$ é um termo de correção para a vazão, que reflete o fato da transferência de calor ser mais pronunciada quanto maior a vazão no trocador de calor. Uma curva típica de efetividade (veja [3] para mais detalhes) para este fator é apresentada na Figura 3.

Figura A2 Correção da troca térmica em função da vazão

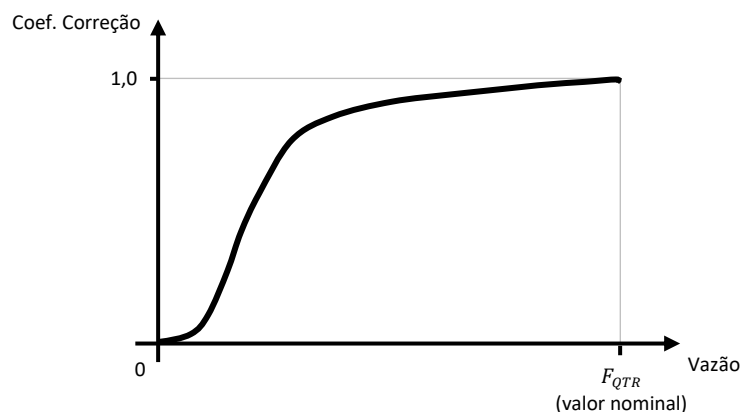


Figura 3 – Correção da troca térmica em função da vazão

Finalmente, a potência transferida pelo trocador de calor é dada por $Q_{QTR} = h_{QTR} - h_{TAC2}$. Alternativamente, poderia se calcular a potência implicitamente usando a média logarítmica entre

as temperaturas de saída e retorno da linha do trocador de calor, porém o método acima é mais conveniente para simulação numérica.

3.4 Linha de Água Geral (LAG) e Válvula de Alimentação (VAL)

A vazão mássica na linha de água geral F_{LAG} é dada por

$$F_{LAG} = \phi(a)v(h_{LAG})K_f\sqrt{p_{LAG} - p_{amb}}$$

onde p_{LAG} é a pressão da linha de água geral, p_{amb} é a pressão ambiente, K_f é o coeficiente de descarga da válvula para vazões volumétricas, e $v(h_{LAG})$ é o volume específico da água da linha, calculado a partir de sua entalpia específica h_{LAG} (ou temperatura) pela formulação IAPWS-IF97. $\phi(a)$ é a curva característica de vazão da válvula em função da abertura a . A Figura A3 apresenta uma curva característica típica para válvulas do tipo globo [4].

Figura A3 Curva característica típica de vazão para válvulas globo.

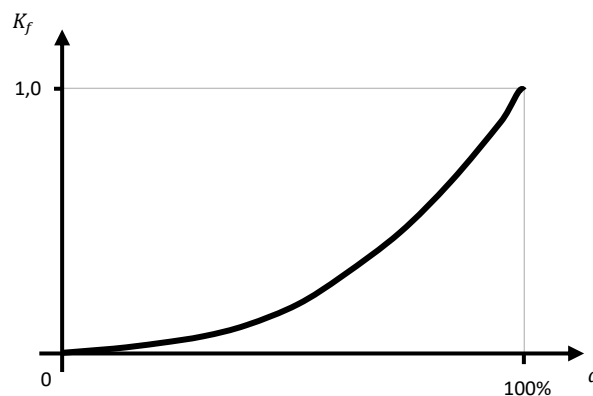


Figura 2 – Correção da troca térmica em função da vazão

3.5 Volumes, Níveis, Parâmetros e Limitações do Modelo

Os volumes de água nos tanques são calculados a partir das massas e entalpias (ou temperaturas) dos tanques e os níveis a partir dos volumes e da geometria dos tanques.

O modelo não prevê mudanças de fase, portanto a temperatura máxima de operação não pode exceder o ponto de ebulição da água (aprox. 100 °C). Da mesma forma, a massa de água nos tanques não pode assumir valores negativos e esquemas de saturação devem ser empregados para impedir tais situações. Note-se que tais condições excedem de muito os parâmetros operacionais da UAAA.

O comportamento global da dinâmica do modelo dependerá dos valores dos parâmetros tais como coeficientes de troca térmica, constantes de tempo, dimensões físicas, etc., que podem ser

definidos conforme o contexto específico do problema. Os valores efetivamente utilizados na implementação do modelo encontram-se no código disponibilizado.

4 Referências

- [1] Memorial Descritivo: Unidade de Aquecimento de Água de Alimentação (material disponibilizado para o curso PTC3418).
- [2] Revised Release of the IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam.
International Association for the Properties of Water and Steam
<http://www.iapws.org/relguide/IF97-Rev.pdf>. (acessado em novembro/2021).
- [3] Design and Operation of Heat Exchangers.
W. Roetzel, X. Luo, D. Chen.
Academic Press, 2020.
- [4] Control Valve Handbook, 5a. ed.
Emerson Automation Solutions
<https://www.emerson.com/documents/automation/control-valve-handbook-en-3661206.pdf>. (acessado em novembro/2021).

V2022a (RPM)