



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

# SISTEMAS TERMODINÁMICOS ABIERTOS

**Apellidos y nombre:** Velázquez Martí, Borja ([borvemar@dmta.upv.es](mailto:borvemar@dmta.upv.es))<sup>1</sup>

**Departamento/Centro:** <sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Rural y Agroalimentaria  
Universitat Politècnica de València

## Índice general

1. Resumen de las ideas clave	2
2. Introducción	2
3. Objetivos	2
4. Ecuaciones generales de balance de masas y balance de energía en STA	2
5. Sistemas estacionarios	3
6. Estado no estacionario	5
7. Cierre	8
8. Ejercicios propuestos	8
9. Bibliografía	10

## 1 Resumen de las ideas clave

En este artículo se muestra cómo se aplican el balance de masas y el balance de energía en un sistema termodinámico abierto (STA) con el objetivo de predecir las condiciones con las que los fluidos salen del sistema (volumen de control) a partir de las condiciones de entrada, conociendo la energía intercambiada; o bien, determinar las condiciones a las que deben entrar los fluidos en el sistema para lograr unas condiciones de salida prefijadas. Se analizan primeramente sistemas en estado estacionario, es decir, sistemas en los que los flujos de masas y energía que entran y salen del sistema son equivalentes, por tanto la energía contenida en el volumen de control es constante. Posteriormente, se analizan sistemas no estacionarios, sistemas en los que la energía interna del volumen de control se modifica con el tiempo.

## 2 Introducción

El control climático de un recinto, tal como un invernadero, una sala de curación de embutidos, una granja o un edificio de oficinas, implica aplicar balances de masas y energía en un sistema termodinámico abierto. Por otra parte, los mismos principios aplicados en el control climático se pueden aplicar a procesos industriales, tales como control térmico de reactores, salas de secado o dispositivos de acondicionamiento de fruta.

## 3 Objetivos

Una vez que el alumno se lea con detenimiento este documento, será capaz de:

1. Aplicar las ecuaciones generales del balance de masas y balance de energía en sistemas termodinámicos abiertos.
2. Analizar sistemas termodinámicos estacionarios con mezclas de fluidos
3. Analizar sistemas termodinámicos estacionarios sin mezclas de fluidos
4. Analizar sistemas termodinámicos no estacionarios

## 4 Ecuaciones generales de balance de masas y balance de energía en STA

a) Balance de masas: La variación de la masa contenida en el volumen de control es igual a la diferencia entre el flujo que entra y sale del mismo.

$$\frac{dm_{vc}}{dt} = \dot{m}_e - \dot{m}_s \quad (1)$$

b) Balance de energía: La variación de energía contenida en el volumen de control por unidad de tiempo ( $\frac{dE_{vc}}{dt}$ ) es igual al calor que entra menos el trabajo que sale, más la energía asociada al flujo másico de entrada, menos la energía asociada al flujo de salida.

La energía asociada a los flujos másicos es el producto de cada flujo por su entalpía, más la energía cinética y potencial del mismo.

$$\frac{dE_{vc}}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \dot{m}_e \cdot (h_e + \frac{1}{2} \cdot c_e^2 + g \cdot z_e) - \dot{m}_s \cdot (h_s + \frac{1}{2} \cdot c_s^2 + g \cdot z_s) \quad (2)$$

## Simbología

$m_{vc}$  es la masa contenida en el volumen de control.  
 $\dot{m}_e$  y  $\dot{m}_s$  es el flujo másico de entrada y salida respectivamente (kg/s).  
 $t$  es el tiempo (s).  
 $E_{vc}$  es la energía total contenida en el volumen de control (J).  
 $\dot{Q}$  es el flujo de calor que intercambia el volumen de control con el exterior (W).  
 $\dot{W}$  es el trabajo introducido o extraído del volumen de control por unidad de tiempo (W).  
 $h_e$  y  $h_s$  es la entalpía específica del fluido de entrada y salida del volumen de control (J/kg).  
 $c_e$  y  $c_s$  es la velocidad del flujo de entrada y salida del volumen de control respectivamente (m/s).  
 $g$  es la gravedad (m/s<sup>2</sup>).  
 $z_e$  y  $z_s$  es la cota de entrada y salida de los flujos en el volumen de control (m).

## 5 Sistemas estacionarios

Se dice que un sistema está en estado estacionario cuando la masa y la energía interna contenidas en el volumen de control permanecen constantes. Esto significa que se cumplen dos condiciones:

$$\frac{dm_{vc}}{dt} = 0$$

$$\frac{dE_{vc}}{dt} = 0$$

- Todo el flujo de masa que entra en el sistema es igual al que sale

$$\dot{m}_e = \dot{m}_s$$

- Toda la energía que entra en el sistema es igual a la que sale

$$0 = \dot{Q} - \dot{W} + \dot{m} \cdot (h_e - h_s + \frac{1}{2} \cdot (c_e^2 - c_s^2) + g \cdot (z_e - z_s))$$

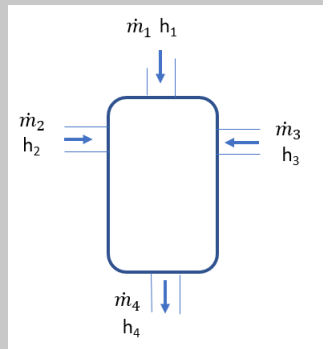
En numerosos sistemas las diferencias de energía cinética y potencial son despreciables en comparación de las transferencias de energía en forma de calor y trabajo. Es por ello que pueden eliminarse de la ecuación resultando:

$$0 = \dot{Q} - \dot{W} + \dot{m} \cdot (h_e - h_s)$$

Procedamos a mostrar como se aplican estos balances con un ejemplo.

### Ejemplo 1

Se dispone de un depósito mezclador que funciona a 10 bares de presión y posee tres entradas y una salida. Por la primera entrada circula un flujo de agua de 2 l/min a 100°C; por el segundo circula un flujo de 3 l/min a 45°C; y por la tercera entrada circula un flujo de agua de 5 l/min a 220°C. ¿Cual es el caudal y la temperatura del flujo de salida? ¿Cual es el estado de ese flujo: líquido, vapor o mezcla de ambos? En caso de ser mezcla, calcula el título de la mezcla.



### Resolución

Hay que advertir que la mezcla de caudales sólo es posible si todos ellos están a la misma presión. En este caso están todos a 10 bares. La temperatura de saturación del agua a esta presión es 179,9 °C. Esto significa que los flujos 1 y 2 se encuentran en estado líquido subenfriado. El flujo 3 se encuentra en estado vapor sobrecalentado.

Inicialmente buscamos las entalpías de los fluidos que entran en el mezclador (volumen de control). En el caso de líquidos las entalpías se pueden calcular mediante la expresión:

$$h = C_p \cdot T$$

Donde para el agua  $C_p = 4,18 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}$ , tal que

$$h_1 = 4,18 \cdot 45 = 188,1 \text{ kJ/kg}$$

$$h_2 = 4,18 \cdot 100 = 418 \text{ kJ/kg}$$

Para la determinación de la entalpía del flujo 3, que está en estado vapor, nos ayudamos de las tablas de las propiedades termodinámicas del agua. Interpolando se comprueba que  $h_3 = 2874,15 \text{ kJ/kg}$

$T$ °C	$v$ m <sup>3</sup> /kg	$u$ kJ/kg	$h$ kJ/kg	$s$ kJ/kg K
$p = 10,0 \text{ bar} = 1,0 \text{ MPa}$ ( $T_{\text{sat}} = 179,91 \text{ } ^\circ\text{C}$ )				
Sat	0,1944	2583,6	2778,1	6,5865
200	0,2060	2621,9	2827,9	6,6940
240	0,2275	2692,9	2920,4	6,8817
280	0,2480	2760,2	3008,2	7,0465
320	0,2678	2826,1	3093,9	7,1962
360	0,2873	2891,6	3178,9	7,3349
400	0,3066	2957,3	3263,9	7,4651
440	0,3257	3023,6	3349,3	7,5883
500	0,3541	3124,4	3478,5	7,7622
540	0,3729	3192,6	3565,6	7,8720
600	0,4011	3296,8	3697,9	8,0290
640	0,4198	3367,4	3787,2	8,1290

El flujo de salida se calcula como

$$\dot{m}_4 = \dot{m}_1 + \dot{m}_2 + \dot{m}_3 = 3 + 2 + 5 = 10 \text{ kg/min}$$

Y la entalpía del flujo de salida ( $\dot{m}_4$ ) se calcula como

$$h_4 = \frac{\dot{m}_1 \cdot h_1 + \dot{m}_2 \cdot h_2 + \dot{m}_3 \cdot h_3}{\dot{m}_4} = 1599,2 \text{ kJ/kg}$$

Se observa que la entalpía del flujo de salida se encuentra entre las entalpías de líquido saturado y la de vapor saturado a 10 bares.

$$h_{liqsat} = 762,81 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{vapsat} = 2778,11 \text{ kJ/kg}$$

Eso significa que la temperatura del flujo de salida es exactamente 179,9 °C, siendo una mezcla de líquido y vapor.

$$h_4 = x \cdot h_{vapsat} + (1 - x) \cdot h_{liqsat}$$

$$x = \frac{h_4 - h_{liqsat}}{h_{vapsat} - h_{liqsat}} = \frac{1599,2 - 762,81}{2778,11 - 762,81} = 0,415$$

Esto significa que el 41,5% del flujo saliente es vapor y un 59,5% es líquido.

## 6 Estado no estacionario

En un estado no estacionario bien la masa contenida en el sistema varía con el tiempo, o la energía acumulada en el sistema varía con el tiempo. También se puede dar el caso de que ambos varíen con el tiempo.

Dado que la variación de energía almacenada del sistema a presión constante se puede expresar como la ecuación (3), donde  $m$  es la masa del sistema y  $C_p$  es el calor específico (J/kg °C), el análisis de estos sistemas generalmente requiere resolver una ecuación diferencial de primer orden, bien de variables separables o una ecuación diferencial lineal.

$$\frac{dE}{dt} = m \cdot C_p \cdot \frac{dT}{dt} \quad (3)$$

Vamos a ilustrar este caso con un ejemplo.

### Recordatorio resolución ecuaciones diferenciales lineales de primer orden

La ecuación general de una ecuación diferencial lineal de primer orden es:

$$y' + a(x) \cdot y = b(x)$$

Este tipo de ecuación siempre tiene solución a través de la fórmula:

$$y(x) = e^{-\int a(x) \cdot dx} \cdot \int b(x) \cdot e^{\int a(x) \cdot dx} + C \cdot e^{-\int a(x) \cdot dx}$$

Si la ecuación diferencial lineal es de coeficientes constantes se tiene

$$y' + a \cdot y = b$$

Por tanto la resolución es sencilla

$$y(x) = e^{-\int a \cdot dx} \cdot \int b \cdot e^{\int a \cdot dx} + C \cdot e^{-\int a \cdot dx}$$

$$y(x) = e^{-a \cdot x} \cdot \frac{b}{a} \cdot e^{a \cdot x} + C \cdot e^{-a \cdot x}$$

$$y(x) = \frac{b}{a} + C \cdot e^{-a \cdot x}$$

La  $C$  es una constante de integración que se calcula a partir de las condiciones de contorno.

### Ejemplo 2

Se posee un calentador de agua de 500 l en el que existe una resistencia de 2000 W. La temperatura inicial del depósito es 80 °C. El flujo de entrada y salida de agua del mismo permanece constante, siendo de 1 litro/min. El agua que entra en el depósito es de 15 °C. ¿Cual se la temperatura del agua de salida al cabo de 3 min? ¿Cual es la temperatura a la que se estabiliza en sistema?

#### Resolución:

Se aplica la ecuación del balance de energía en STA, donde  $\dot{W} = 0$  y se consideran despreciables las variaciones de energía cinética y potencial.

$$\frac{dE_{vc}}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \dot{m} \cdot (h_e - h_s)$$

La entalpía de los líquidos puede calcularse como  $h = C_p \cdot T$ . En caso del agua  $C_p = 4,18$  kJ/kg °C. Por otra parte, téngase en cuenta que la temperatura de salida ( $T$ ) es igual a la temperatura de mezcla en el depósito. Entonces se tiene que:

$$m \cdot C_p \cdot \frac{dT}{dt} = \dot{Q} + \dot{m} \cdot C_p (T_e - T)$$

Ordenando términos se tiene

$$\frac{dT}{dt} + \frac{\dot{m}}{m} \cdot T = \frac{\dot{Q}}{m \cdot C_p} + \frac{\dot{m}}{m} \cdot T_e$$

que es una ecuación diferencial lineal de coeficientes constantes:  $y' + a \cdot y = b$ , donde

$$y = T, \quad a = \frac{\dot{m}}{m}, \quad y \quad b = \frac{\dot{Q}}{m \cdot C_p} + \frac{\dot{m}}{m} \cdot T_e$$

Este tipo de ecuación siempre tiene solución a través de la fórmula:

$$y(x) = \frac{b}{a} + C \cdot e^{-a \cdot x}$$

Sustituyendo:

$$T = \frac{\dot{Q}}{\dot{m} \cdot C_p} + T_e + C \cdot e^{-\frac{\dot{m}}{m} \cdot t}$$

Para calcular  $C$  nos fijamos en las condiciones de contorno. En el tiempo inicial,  $t = 0 \Rightarrow T = T_1$

$$T_1 = \frac{\dot{Q}}{\dot{m} \cdot C_p} + T_e + C$$

$$C = (T_1 - T_e) - \frac{\dot{Q}}{\dot{m} \cdot C_p}$$

$$T = \frac{\dot{Q}}{\dot{m} \cdot C_p} + T_e + \left[ (T_1 - T_e) - \frac{\dot{Q}}{\dot{m} \cdot C_p} \right] \cdot e^{-\frac{\dot{m}}{m} \cdot t}$$

Esta ecuación también se puede escribir del siguiente modo:

$$T = \frac{\dot{Q}}{\dot{m} \cdot C_p} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{\dot{m}}{m} \cdot t} \right) + T_e \cdot \left( 1 - e^{-\frac{\dot{m}}{m} \cdot t} \right) + T_1 \cdot e^{-\frac{\dot{m}}{m} \cdot t}$$

Fíjense que la temperatura en el volumen de control tiende a un valor fijo con el tiempo suficiente, 'por lo que pasaría de un estado no estacionario (transitorio) a un estado estacionario.

$$t \rightarrow \infty \Rightarrow T = \frac{\dot{Q}}{\dot{m} \cdot C_p} + T_e$$

Sustituyendo las variables por su valor se tiene que

$$t = 180 \text{ s}$$

$$m = 1000 \text{ l} = 1000 \text{ kg}$$

$$\dot{m} = 1 \text{ kg/min} = 0,0166 \text{ kg/s}$$

$$C_p = 4,18 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}$$



$$T = \frac{2}{0,0166 \cdot 4,18} + 15 + \left[ (80 - 15) - \frac{2}{0,0166 \cdot 4,18} \right] \cdot e^{-\frac{0,0166}{1000} \cdot 180} = 50^{\circ}\text{C}$$

A los 3 min la temperatura de salida del agua del depósito será 50°C

$$T = \frac{2}{0,0166 \cdot 4,18} + 15 = 43,71^{\circ}\text{C}$$

Con el tiempo suficiente la temperatura del agua de salida se estabilizará en 43,71 °C

Si se representa gráficamente la ecuación del transitorio se puede estimar fácilmente la duración del transitorio.

## 7 Cierre

El análisis de los sistemas termodinámicos abiertos requiere la aplicación de las ecuaciones de balance de materia y energía.

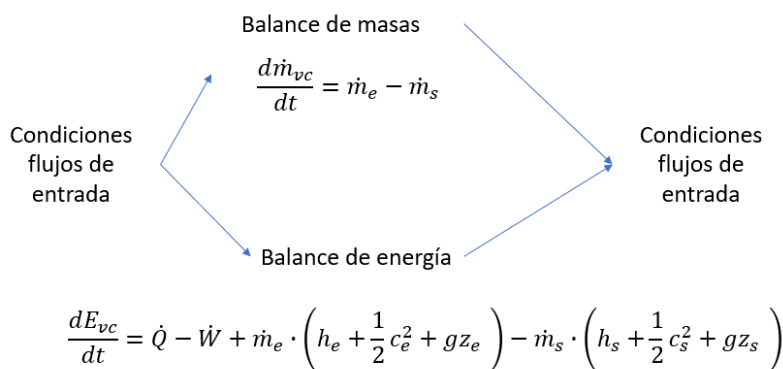


Figura 1: Análisis del sistema

En caso que el sistema esté en estado estacionario, la determinación de las variables suele obtenerse mediante la resolución de un sistema de ecuaciones lineales. En caso que el sistema esté en estado no estacionario (transitorio), la determinación de las variables suele obtenerse mediante la resolución de un sistema de ecuaciones diferenciales.

Tras el periodo transitorio la temperatura del sistema se estabiliza alcanzando un estado estacionario.

## 8 Ejercicios propuestos

### Ejercicio 1

Un mezclador de agua que funciona en estado estacionario, tiene 2 entradas y una salida. En la entrada 1 el vapor entra a presión  $p_1=7$  bar, con temperatura  $T_1 = 200^{\circ}\text{C}$ , y un flujo másico de 0,10 kg/s. En la entrada 2 entra agua líquida a  $p_2=7$  bar y  $T_2=40^{\circ}\text{C}$ , un flujo másico de 0,04 kg/s. Determinese la salida del flujo, temperatura y el título a la salida del mezclador.

Sol:  $\dot{m}_s = 0,14$  kg/s,  $T_s = 165^{\circ}\text{C}$ ,  $x = 0,33$

## Ejercicio 2

Un mezclador de agua que funciona en estado estacionario, tiene 2 entradas y una salida y una resistencia de 150 kW. En la entrada 1 el vapor entra a presión  $p_1=7$  bar, con temperatura  $T_1=200^\circ\text{C}$ , y un flujo másico de 0,10 kg/s. En la entrada 2 entra agua líquida a  $p_2=7$  bar y  $T_2=40^\circ\text{C}$ , un flujo másico de 0,04 kg/s. Determínese temperatura a la salida.

$$\text{Sol: } \dot{m}_s = 0,14 \text{ kg/s, } T_s = 344,21^\circ\text{C, } x = 1$$

## Ejercicio 3

En un intercambiador de un condensador entra vapor a 1 bar con título 0,45 y el condensado líquido sale a 1 bar y  $45^\circ\text{C}$ . El agua de refrigeración entra como líquido saturado al condensador a  $20^\circ\text{C}$  y sale a  $35^\circ\text{C}$  sin cambio de presión. Determínese la relación de flujos másicos entre el agua de refrigeración y el vapor a condensar y la energía transferida entre fluidos por unidad de masa. (Los flujos no se mezclan, sólo intercambian calor).

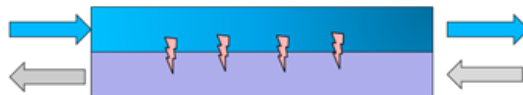


Figura 2: Esquema de un intercambiador de calor

$$\text{Sol: } \dot{m}_2 = -45,72 \cdot \dot{m}_1 \text{ kg/s, } \dot{Q} = 2276,96 \text{ kJ/kg}$$

## Ejercicio 4

Un tanque tiene inicialmente 45 kg de agua a  $45^\circ\text{C}$ . Tiene una entrada y una salida de flujos másicos iguales de 270 kg/h. El agua líquida de entrada está a  $45^\circ\text{C}$ . Un serpentín refrigerante inmerso en el agua captura 7,6 kW de energía. Por otra parte el tanque tiene un agitador que proporciona 0,6 kW. Determínese como varía la temperatura en función del tiempo.

$$\text{Sol: } T = 23,63 + 21,38 \cdot e^{-0,0016 \cdot t}$$

## Ejercicio 5

Dado el calentador de la figura, siendo el rendimiento de la instalación del 80 %, determina:

- El flujo y la temperatura de salida y potencia de la caldera
- El consumo específico de combustible si se utilizan pélets con poder calorífico de 25 MJ/kg
- Volumen del silo de almacenamiento de pélets para una autonomía de 7 días si poseen una densidad aparente de  $500 \text{ kg/m}^3$

$$\text{Sol: } \dot{m}_s = 20 \text{ l/s, } T_s = 50^\circ\text{C, } \dot{Q}_c = 4762 \text{ W}$$

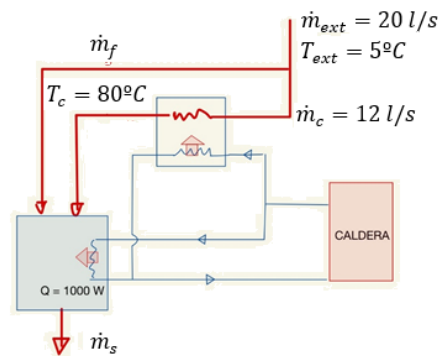


Figura 3: Sistema de calefacción de agua

## 9 Bibliografía

Albright, L. D. (1990). Environment control for animals and plants. Ed. American Society of Agricultural Engineers.

ATECYR (2010). Fundamentos de climatización: para instaladores e ingenieros recién titulados. Ed. Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración (Atecyr)

ATECYR (2016). Fundamentos de refrigeración. Ed. Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración (Atecyr)(Fernández Seara, J. et al.)

Bakker, J. C., Bot, G. P. A., Challa, H., van de Braak, N. J. (Eds.). (1995). Greenhouse climate control: an integrated approach. Wageningen Academic Publishers.

Carbó Ballester, J. (2021). Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios. Ed. Marcombo.

DTIE 3.01, psicrometría (Pinazo Ojer, José Manuel | García Lastra, Arcadio | ATECYR)

DTIE 7.05, cálculo de cargas térmicas (Pinazo Ojer, José Manuel | Soto Francés, Víctor Manuel | García Lastra, Arcadio | ATECYR)

Fenton, Donald L. (2010). Fundamentals of refrigeration I-P. Ed. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE).

Pinazo, JM (1996) Cálculo de instalaciones frigoríficas. Editorial UPV

[Real Decreto 1027/2007](#), de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios.

[Real Decreto 552/2019](#), de 27 de septiembre, por el que se aprueban el Reglamento de seguridad para instalaciones frigoríficas y sus instrucciones técnicas complementarias.

Stoecker, Wilbert F. (1998). Industrial refrigeration handbook. Ed. McGraw-Hill Education

Velázquez Martí, B. (2017). Aprovechamiento de la biomasa para uso energético. Ed. UPV-Reverté. 885 pp.