

Teoría básica y problemas propuestos de Calor y Termodinámica

Por George Castle

Al analizar situaciones físicas, la [atención](#) generalmente se enfoca en alguna porción de la [materia](#) que se separa en forma imaginaria del [medio ambiente](#) que le rodea. A tal porción se le denomina el [sistema](#). A todo lo que esta fuera del sistema, y que tiene una participación directa en su [comportamiento](#), se le llama medio [ambiente](#) o entorno. Después, se determina el comportamiento del sistema, encontrando la forma en que interactúa con su entorno.

Un [concepto](#) esencial de la [termodinámica](#) es el de sistema macroscópico, que se define como un conjunto de materia que se puede aislar espacialmente y que coexiste con un entorno infinito e imperturbable. [El estado](#) de un sistema macroscópico en [equilibrio](#) puede describirse mediante propiedades medibles como la [temperatura](#), la [presión](#) o el [volumen](#), que se conocen como [variables](#) termodinámicas. Ahora bien, en el [análisis](#) de [sistemas](#) tiene vital importancia la cuantificación del "[calor](#)", el cual se refiere a la transferencia de energía de una parte a otra de un cuerpo, o entre diferentes cuerpos, en virtud de una diferencia de temperatura.

En este material instruccional se introducirá primero la diferencia entre temperatura y calor, para luego presentar las escalas termométricas. En forma sucinta se discutirá el efecto de la temperatura sobre la materia, enfatizando en las dilataciones térmicas: lineal, superficial y cúbica. Un apartado sobre los mecanismos de transferencia de calor se incluirá a fin de introducir las [ecuaciones](#) generales que gobiernan la conducción, convección y [radiación](#).

Por otro lado, se estudiará la manera de cuantificar el calor latente, de vaporización, de [fusión](#), de [combustión](#) y sensible en los [procesos](#) físicos, asimismo, se introducirá el concepto de calor específico. Por último, se explicará la [ley](#) cero y la primera ley de la termodinámica y como a partir de ellas se caracterizan los procesos térmicos que involucren [gases](#) ideales. Al final, se ofrecerá una recopilación de algunos [problemas](#) que han formado parte de las evaluaciones de cohortes precedentes.

OBJETIVO GENERAL

Al término de éste módulo, el estudiante tendrá la habilidad y pericia necesaria para aplicar los conceptos básicos de calor y termodinámica a problemas prácticos que involucren sistemas en donde se transfiera energía térmica.

CONTENIDOS

1. Calor y Temperatura.
2. Escalas termométricas.
3. Dilatación: lineal, superficial y volumétrica.
4. Calor: latente y sensible.
5. Ley cero de la termodinámica.
6. Primera ley de la termodinámica.
7. Mecanismos de transferencia de calor: conducción, convección y radiación.
8. Procesos con gases ideales: isobárico, isocórico, isotérmico y adiabático.
9. Calor específico: a volumen constante y presión constante.

CONOCIMIENTOS PREVIOS

1. Cálculo integral: aplicaciones de [integrales](#) definidas con condiciones iniciales.
2. Ley de conservación de la energía.
3. Operaciones con logaritmos: suma, resta, multiplicación y división.

DESARROLLO TEÓRICO

1.1 ¿Qué es la temperatura y el calor?

El calor en [física](#) se refiere a la transferencia de energía de una parte a otra de un cuerpo, o entre diferentes cuerpos, en virtud de una diferencia de temperatura. El calor es energía en tránsito; siempre fluye de una zona de mayor temperatura a una zona de menor temperatura, con lo que eleva la temperatura de la segunda y reduce la de la primera, siempre que el volumen de los cuerpos se mantenga constante. La energía no fluye desde un objeto de temperatura baja a un objeto de temperatura alta si no se realiza [trabajo](#).

La sensación de calor o frío al tocar una sustancia depende de su temperatura, de la capacidad de la sustancia para conducir el calor y de otros factores. Aunque, si se procede con cuidado, es posible comparar las temperaturas relativas de dos sustancias mediante el tacto, es imposible evaluar la magnitud absoluta de las temperaturas a partir de reacciones subjetivas.

Cuando se aporta calor a una sustancia, no sólo se eleva su temperatura, con lo que proporciona una mayor sensación de calor, sino que se producen alteraciones en varias propiedades físicas que pueden medirse con precisión. Al variar la temperatura, las sustancias se dilatan o se contraen, su [resistencia](#) eléctrica cambia, y (en el caso de un [gas](#)) su presión varía. La variación de alguna de estas propiedades suele servir como base para una [escala](#) numérica precisa de temperaturas.

A manera de conclusión: la temperatura es una [propiedad](#) física de la materia que mide el grado de calor que un cuerpo posee.

1.2 Escalas para medir la temperatura

Una de las primeras escalas de temperatura, todavía empleada en los países anglosajones, fue diseñada por el físico alemán Gabriel Daniel Fahrenheit. Según esta escala, a la presión atmosférica normal, el punto de solidificación del [agua](#) (y de fusión del hielo) es de 32 ° F, y su punto de ebullición es de 212 ° F. La escala centígrada o

Celsius, ideada por el astrónomo sueco Anders Celsius y utilizada en casi todo el mundo, asigna un [valor](#) de 0 ° C al punto de congelación del agua y de 100 ° C a su punto de fusión. En [ciencia](#), la escala más empleada es la escala absoluta o Kelvin, inventada por el matemático y físico británico William Thomson, Lord Kelvin. En esta escala, el cero absoluto, que está situado en – 273,15 ° C, corresponde a 0 K, y una diferencia de un kelvin equivale a una diferencia de un grado en la escala centígrada.

La existencia de diferentes escalas termométricas hace necesario conocer las relaciones entre ellas:

(1)

Donde:

° C: grados centígrados

° F: grados Fahrenheit

° R: grados Rankine

Para transformar grados centígrados a grados Fahrenheit se usa la siguiente expresión:

(2)

Para transformar grados Fahrenheit a grados centígrados se usa la siguiente expresión:

(3)

Para transformar grados centígrados a grados Kelvin se usa la siguiente expresión:

(4)

Para transformar grados Fahrenheit a grados Rankine se usa la siguiente expresión:

(5)

Para realizar conversiones que involucren incrementos de temperatura, se emplea:

$$1,8 \text{ } ^\circ \text{F} = 1 \text{ } ^\circ \text{C} \quad (6)$$

$$1,8 \text{ R} = 1 \text{ K} \quad (7)$$

$$1 \text{ } ^\circ \text{F} = 1 \text{ R} \quad (8)$$

$$1 \text{ } ^\circ \text{C} = 1 \text{ K} \quad (9)$$

1.3 Efecto de la temperatura sobre la materia.

La temperatura desempeña un papel importante para determinar las condiciones de supervivencia de los seres vivos. Así, las [aves](#) y los [mamíferos](#) necesitan un rango muy limitado de temperatura corporal para [poder](#) sobrevivir, y tienen que estar protegidos de temperaturas extremas.

Las especies acuáticas sólo pueden existir dentro de un estrecho rango de temperaturas del agua, diferente según las especies. Por ejemplo, un aumento de sólo unos grados en la temperatura de un río como resultado del calor desprendido por una central eléctrica puede provocar la [contaminación del agua](#) y matar a la mayoría de los [peces](#) originarios.

Los cambios de temperatura también afectan de forma importante a las propiedades de todos los [materiales](#). A temperaturas árticas, por ejemplo, el [acero](#) se vuelve quebradizo y se rompe fácilmente, y los líquidos se solidifican o se hacen muy viscosos, ofreciendo una elevada resistencia por rozamiento al flujo. A temperaturas próximas al cero absoluto, muchos materiales presentan características sorprendentemente diferentes. A temperaturas elevadas, los materiales sólidos se licúan o se convierten en gases; los compuestos químicos se separan en sus componentes.

La temperatura de la [atmósfera](#) se ve muy influida tanto por las zonas de [tierra](#) como de mar. En enero, por ejemplo, las grandes masas de tierra del hemisferio norte están mucho más frías que los océanos de la misma latitud, y en julio la situación es la contraria. A bajas alturas, la temperatura del [aire](#) está determinada en gran medida por la temperatura de la superficie terrestre. Los cambios periódicos de temperatura se deben básicamente al calentamiento por la radiación del Sol de las zonas terrestres del planeta, que a su vez calientan el aire situado por encima. Como resultado de este fenómeno, la temperatura disminuye con la altura, desde un nivel de referencia de 15 ° C en el nivel del mar (en latitudes templadas) hasta unos – 55 ° C a 11.000 m aproximadamente. Por encima de esta altura, la temperatura permanece casi constante hasta unos 34.000 m.

1.4 Dilatación térmica.

Cuando una varilla metálica es sometida a calentamiento sufre una dilatación lineal, la cual puede cuantificarse a través de la siguiente expresión:

$$(10)$$

Donde.

Lo: longitud inicial de la varilla, m

Lf: longitud final de la varilla, m

Tf: temperatura final de la varilla, ° C

To: temperatura inicial de la varilla, ° C

: coeficiente de expansión térmica α lineal del material, ° C ⁻¹

El coeficiente de expansión térmica lineal se expresa en $1/^{\circ}\text{C}$ ó $1/^{\circ}\text{F}$ dependiendo de las unidades usadas para expresar la temperatura. Cuando los [metales](#) se someten a enfriamiento progresivo sufren una contracción, por lo que la longitud final será inferior a la longitud inicial. La Tabla 1 resume el coeficiente de expansión térmica lineal de algunos materiales.

Tabla 1. Coeficientes de expansión de algunos materiales cerca de la temperatura ambiente.

Material	Coeficiente de expansión lineal ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)
Aluminio	24×10^{-6}
Latón y bronce	19×10^{-6}
Cobre	17×10^{-6}
Vidrio (ordinario)	9×10^{-6}
Vidrio (Pirex)	$3,2 \times 10^{-6}$
Plomo	29×10^{-6}
Acero	11×10^{-6}
Invar(aleación de Níquel – Cromo)	$6,9 \times 10^{-6}$
Concreto	12×10^{-6}

Las superficies metálicas al someterse a calentamiento se dilatan. El área final puede calcularse a través de la siguiente expresión:

$$(11)$$

Donde:

A_o : área inicial de la superficie, m^2

A_f : área final de la superficie, m^2

T_f : temperatura final de la superficie, $^{\circ}\text{C}$

T_o : temperatura inicial de la superficie, $^{\circ}\text{C}$

α : coeficiente de expansión térmica lineal del material, $^{\circ}\text{C}^{-1}$

Se debe señalar que cuando las superficies metálicas son sometidas a enfriamiento sufren una contracción.

Los líquidos se dilatan al someterse a calentamiento (la mayoría), la expansión volumétrica de estos se puede calcular a través de la siguiente expresión:

(12)

Donde:

Vo: volumen inicial del líquido, m³

Vf: volumen final del líquido, m³

Tf: temperatura final del líquido, ° C

To: temperatura inicial del líquido, ° C

: coeficiente de expansión térmica α lineal del líquido o gas, ° C⁻¹

: coeficiente de expansión β volumétrico del líquido o gas, ° C⁻¹

Nótese que:

(13)

La Tabla 2 resume el coeficiente de expansión volumétrica de algunos líquidos y gases.

Tabla 2. Coeficientes de expansión volumétricos de algunos líquidos y gases.

Material	Coeficiente de expansión volumétrico (° C ⁻¹)
Alcohol etílico	1,12 x 10 ⁻⁴
Benceno	1,12 x 10 ⁻⁴
Acetona	1,5 x 10 ⁻⁴
Glicerina	4,85 x 10 ⁻⁴
Mercurio	1,82 x 10 ⁻⁴
Trementina	9 x 10 ⁻⁴
Gasolina	9,6 x 10 ⁻⁴
Aire a 0 ° C	3,67 x 10 ⁻⁴
Helio a 0 ° C	3,665 x 10 ⁻⁴

Un caso especial de dilatación térmica lo constituye el fenómeno de barras empotradas. Las barras empotradas en paredes indeformables son sometidas a esfuerzos mecánicos como una consecuencia de la dilatación térmica inherente al material constitutivo de la misma. O sea, la dilatación térmica es contrarrestada por la expansión [mecánica](#).

desarrollando...

(14)

Donde:

Lo: longitud de la barra empotrada a la temperatura inicial, m

Tf: temperatura final del sistema, ° C

To: temperatura inicial del sistema, ° C

P: [fuerza](#) de compresión generada en los apoyos, N/m²

E: módulo de [elasticidad](#) del material constitutivo de la barra, N/m²

A: área de la sección transversal de la barra, m²

: coeficiente de dilatación α térmica lineal del material de la barra, ° C⁻¹

El esfuerzo mecánico al cual es sometida la barra se calcula, a través de la siguiente expresión:

(15)

Donde:

P: fuerza de compresión generada en los apoyos, N/m²

A: área de la sección transversal de la barra, m²

: esfuerzo mecánico, σ N/m²

La Tabla 3 resume los módulos de elasticidad de algunos materiales.

Tabla 3. [Valores](#) comunes del módulo de elasticidad (conocido como módulo de Young).

Sustancias	Módulo de Young (N/m ²)
Aluminio	7,0 x 10 ¹⁰
Latón	9,1 x 10 ¹⁰
Cobre	11 x 10 ¹⁰
Acero	20 x 10 ¹⁰
Tungsteno	35 x 10 ¹⁰
Vidrio	6,5 a 7,8 x 10 ¹⁰

Cuarzo	5,6 x 1010
--------	------------

Nota: el módulo de Young mide la resistencia de un sólido a un [cambio](#) en su longitud.

1.5 Mecanismo de transferencia de calor

Los procesos físicos por los que se produce la transferencia de calor son la conducción y la radiación. Un tercer [proceso](#), que también implica el [movimiento](#) de materia, se denomina convección. La conducción requiere contacto físico entre los cuerpos (o las partes de un cuerpo) que intercambian calor, pero en la radiación no hace falta que los cuerpos estén en contacto ni que haya materia entre ellos. La convección se produce a través del movimiento de un líquido o un gas en contacto con un cuerpo de temperatura diferente.

1.5.1 Mecanismo de transferencia de calor por conducción

El proceso de transferencia de energía térmica más sencillo de describir de manera cuantitativa recibe el nombre de conducción. En este proceso, la transferencia de energía térmica se puede ver a una escala atómica como un intercambio de energía cinética entre moléculas, donde las partículas menos energéticas ganan energía al chocar con las partículas más energéticas. A pesar de que la transferencia de energía térmica a través de un metal puede explicarse de modo parcial por las vibraciones atómicas y el movimiento de electrones, la tasa de conducción depende también de las propiedades de la sustancia que es calentada.

La transferencia de calor por conducción es explicada satisfactoriamente por la Ley de [Fourier](#):

(16)

Donde:

q: [velocidad](#) de transferencia de calor por conducción, Cal/s

A: área transversal a la [dirección](#) de flujo de calor, m²

: gradiente de temperatura en la sección de flujo de calor, ° C/m

k: conductividad térmica del material a través del medio por donde se transfiere el calor, Cal/s.m.° C

Cuando se desea calcular la velocidad de transferencia de calor por conducción a través de una placa o pared, se usa:

(17)

Donde:

q: velocidad de transferencia de calor por conducción, Cal/s

A: área transversal a la dirección de flujo de calor, m²

L: espesor de la placa, m

k: conductividad térmica del material a través del medio por donde se transfiere el calor, Cal/s.m.° C

T_f: temperatura de la superficie caliente, ° C

T_o: temperatura de la superficie fría, ° C

El término $L/(k.A)$ se conoce con el nombre de resistencia térmica del material.

En el caso de transferencia de calor por conducción en tuberías se usa la siguiente expresión:

(18)

Donde:

q: velocidad de transferencia de calor por conducción radial, Cal/s

r_o: [radio](#) externo de la tubería, m

r_i: radio interno de la tubería, m

L: largo del tubo, m

k: conductividad térmica del material a través del medio por donde se transfiere el calor, Cal/s.m.° C

T_f: temperatura de la superficie caliente, ° C

T_o: temperatura de la superficie fría, ° C

$\ln(r_o/r_i)$ es conocido como El término $\ln(r_o/r_i)/(2\pi k.L)$ como resistencia térmica del material constitutivo del tubo.

La Tabla 4 resume las conductividades térmicas de algunas sustancias.

Tabla 4. Conductividades térmicas de algunas sustancias.

Sustancia	Conductividad térmica (W/m °C)
-----------	--------------------------------

Metales (a 25 °C)	
Aluminio	238
Cobre	397
Oro	314
Hierro	79,5
Plomo	34,7
Plata	427
Gases (a 25 °C)	
Aire	0,0234
Helio	0,138
Hidrógeno	0,172
Nitrógeno	0,0234
Oxígeno	0,0238
No metales (valores aproximados)	
Asbestos	0,08
Concreto	0,8
Diamante	2.300
Vidrio	0,8
Hielo	2
Hule	0,2
Agua	0,6
Madera	0,08

Por lo general, se suelen encontrar paredes compuestas por diferentes materiales o tubos recubiertos con una variedad de aislantes, en estos casos se suman las [resistencias](#) térmicas dependiendo de su configuración.

Si las resistencias térmicas se encuentran en serie:

(19)

Si las resistencias están dispuestas en paralelo:

(20)

1.5.2 Mecanismo de transferencia de calor por convección

Es probable que usted alguna vez haya calentado sus manos sometiéndolas sobre una flama descubierta. En esta situación, el aire directamente encima de la flama se calienta y expande. Como resultado, la [densidad](#) del aire disminuye y éste asciende. Esta masa de aire caliente le da calor a sus manos cuando fluye por ellas.

Se afirma que la energía térmica transferida por el movimiento de la sustancia calentada se ha transferido por convección. Cuando el movimiento se produce por diferencia en la densidad, como en el ejemplo del aire alrededor del fuego, esta se conoce como convección natural. Cuando la sustancia calentada es obligada a moverse mediante un ventilador o bomba, como en algunos sistemas de calefacción de aire caliente y agua caliente, el proceso se denomina convección forzada.

La velocidad de transferencia de calor por convección se calcula a través de la siguiente expresión:

(21)

Donde:

q: velocidad de transferencia de calor por convección, Cal/s

A: área transversal a la dirección de flujo de calor, m²

hc: coeficiente convectivo de transferencia de calor del medio, Cal/s.m².° C

T_f: temperatura de la zona caliente, ° C

T_o: temperatura de la zona fría, ° C

1.5.3 Mecanismo de transferencia de calor por radiación

La tercera forma de transferencia de energía térmica es denominada radiación. Todos los objetos radian energía continuamente en forma de [ondas](#) electromagnéticas. El tipo de radiación asociado a la transferencia de energía térmica de un lugar a otro se conoce como radiación infrarroja.

La tasa a la cual un objeto emite energía radiante es proporcional a la cuarta [potencia](#) de su temperatura absoluta. Esto se conoce como la Ley de Stefan y se expresa en forma de ecuación como:

(22)

Donde:

P: potencia radiada por el cuerpo, watt

σ : constante igual a $5.6696 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\cdot\text{K}^4$

A: área superficial del objeto, m^2

e: emisividad del cuerpo, adimensional

T: temperatura del cuerpo, K

La emisividad depende de la [naturaleza](#) de la superficie del objeto, pudiendo variar de 0 a 1. Si se desea cuantificar la velocidad de transferencia de calor por radiación entre dos objetos, se usará:

(23)

Donde:

q: velocidad de transferencia de calor por radiación, Btu/h

σ : constante de Stefan – Boltzman igual a $0,1714 \times 10^{-8} \text{ Btu/Hr.Ft}^2\cdot\text{R}^4$

Fe: factor de emisividad, adimensional

F: factor de format

Th: temperatura de la zona caliente, R

Tc: temperatura de la zona fría, R

A: área a través de la cual se da la transferencia de calor, Ft^2

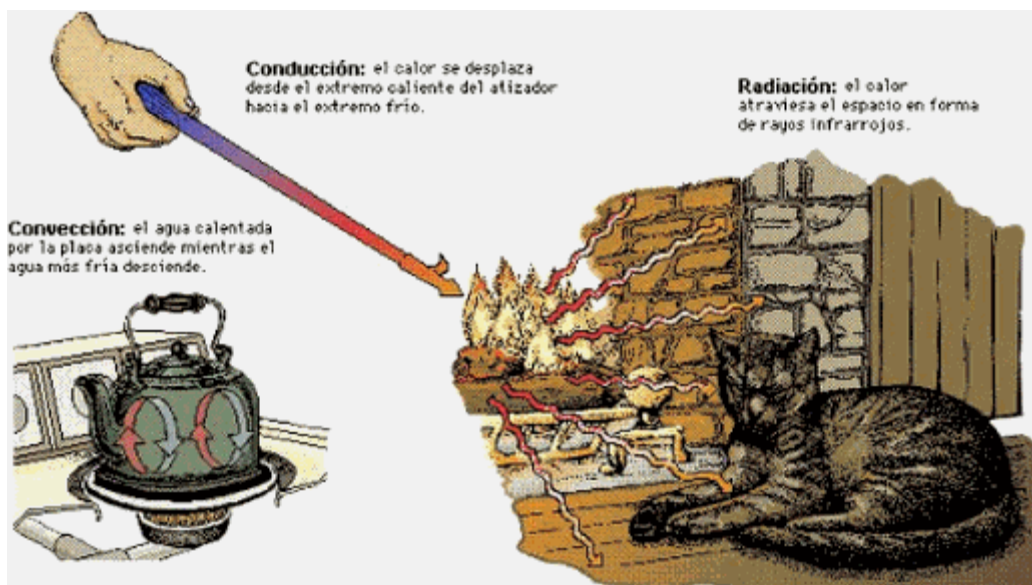


Figura 1. El calor puede transferirse de tres formas: por conducción, por convección y por radiación. La conducción es la transferencia de calor a través de un objeto sólido: es lo que hace que el asa de un atizador se caliente aunque sólo la punta esté en el fuego. La convección transfiere calor por el intercambio de moléculas frías y calientes: es la causa de que [el agua](#) de una tetera se caliente uniformemente aunque sólo su parte inferior esté en contacto con la llama. La radiación es la transferencia de calor por [radiación electromagnética](#) (generalmente infrarroja): es el principal mecanismo por el que un fuego calienta la habitación.

1.6 Calor latente y calor sensible

El cambio de temperatura de una sustancia conlleva una serie de cambios físicos. Casi todas las sustancias aumentan de volumen al calentarse y se contraen al enfriarse. El comportamiento del agua entre 0 y 4 ° C constituye una importante excepción a esta regla. Se denomina fase de una sustancia a su [estado](#), que puede ser sólido, líquido o gaseoso. Los cambios de fase en sustancias puras tienen lugar a temperaturas y presiones definidas.

El paso de sólido a gas se denomina sublimación, de sólido a líquido fusión, y de líquido a vapor vaporización. Si la presión es constante, estos procesos tienen lugar a una temperatura constante. La cantidad de calor necesaria para producir un cambio de fase se llama calor latente; existen calores latentes de sublimación, fusión y vaporización.

Si se hierve agua en un recipiente abierto a la presión de 1 atmósfera, la temperatura no aumenta por encima de los 100 °C por mucho calor que se suministre. El calor que se absorbe sin cambiar la temperatura del agua es el calor latente; no se pierde, sino que se emplea en transformar el agua en vapor y se almacena como energía en el vapor.

Cuando el vapor se condensa para formar agua, esta energía vuelve a liberarse. Del mismo modo, si se calienta una mezcla de hielo y agua, su temperatura no cambia hasta que se funde todo el hielo. El calor latente absorbido se emplea para vencer las fuerzas que mantienen unidas las partículas de hielo, y se almacena como energía en el agua. Para fundir 1 kg de hielo se necesitan 19.000 julios, y para convertir 1 kg de agua en vapor a 100 °C, hacen falta 129.000 julios.

1.6.1 Calor de vaporización

Es la cantidad de calor que es suministrado a una sustancia para llevarlo de estado líquido a estado gaseoso sin incremento de temperatura. Se calcula a través de la siguiente expresión:

(24)

Donde:

Q: calor de evaporación, Cal

m: masa de la sustancia que se evapora, Kg

e: calor de evaporación de la sustancia, Cal/Kg

1.6.2 Calor de fusión

Es la cantidad de calor que es suministrado a una sustancia para llevarla de estado sólido al líquido sin incrementar su temperatura. Se calcula a través de la siguiente expresión:

(25)

Donde:

Q: calor de fusión, Cal

m: masa de la sustancia que se fusiona, Kg

f: calor de fusión de la sustancia, Cal/Kg

1.6.3 Calor de combustión

Es la cantidad de calor desprendida en la combustión completa de un mol de sustancia.

La Tabla 5 resume los calores de fusión y evaporación de algunas sustancias. La Tabla 6 [muestra](#) los calores específicos de algunas sustancias a 25 ° C y a presión atmosférica.