

Consideraciones en el diseño de autoclaves

Álvaro Delgado Mejía

Ingeniero Mecánico, Docente investigador del Instituto Tecnológico Pascual Bravo

Resumen

En este trabajo se presenta una guía para el cálculo de los principales parámetros a tener en cuenta en la etapa de diseño de equipos para esterilización mediante la aplicación de calor húmedo (más conocidos como autoclaves), los cuales básicamente se centran en el diseño de la cámara de esterilización propiamente dicha y del sistema de generación de vapor, así como los elementos de seguridad y control del proceso. Al final, a manera de resultado, se especifican los parámetros de diseño de un autoclave para uso a nivel de laboratorio, los cuales fueron obtenidos mediante los procedimientos expuestos en este artículo.

Palabras Clave. *Autoclave, diseño mecánico, recipientes a presión, esterilización, vapor*

Abstract

This paper presents a guideline to calculate the main parameters included in the design of equipments for sterilization by means of hot steam (commonly called Autoclave) which basically consists in the design of the sterilization chamber, the steam generation unit and the security and control devices. At last, as a result, the design parameters for a laboratory application autoclave are specified. This parameters were obtained using the procedures detailed in this work.

Key Words: *Autoclaves, Mechanics Design, Pressure Container, Sterilisation, Steam*

I. INTRODUCCIÓN

No es raro encontrar que muchos de los artefactos o máquinas que disfrutamos hoy día, han sido desarrollados a partir del empirismo y el ingenio de sus ideadores, bien sea por el escaso conocimiento científico del tema o bien por la total confianza depositada en la experiencia personal que se tenga. Esto de ninguna manera ha representado un obstáculo para el mejoramiento de nuestra calidad de vida. Sin embargo, también es cierto que muchos de estos diseños resultan sobredimensionados al tener involucrados altos factores de seguridad, lo cual no implica necesariamente un diseño óptimo, por lo menos en términos económicos.

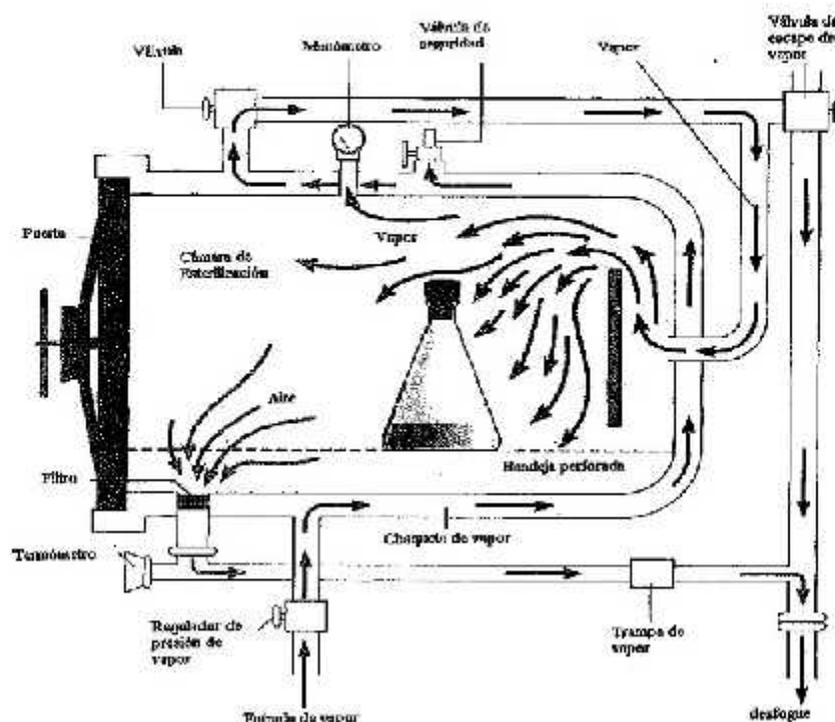
Por fortuna, todo este conocimiento experimental, junto con la metodología científica, ha sido sintetizada en normas o estándares de diseño que le evitan al diseñador ir dando "paños de ciego". Así pues, cuando se tiene en mente diseñar un autoclave debe quedar

claro que este en esencia es un recipiente hermético dentro del cual se hace circular vapor de agua a altas temperaturas (se tiene que a 121°C se puede eliminar hasta las esporas más resistentes) y alta presión, razón por la cual el diseño deberá garantizar una operación confiable y segura que no represente ningún peligro de explosión [1].

A partir de lo anterior, el diseño de un autoclave se reduce al diseño mecánico de un recipiente sometido a presión interna, de los ductos de suministro de vapor y de los accesorios de seguridad. Dependiendo de la aplicación para la cual será empleado el autoclave, se tiene que el vapor se puede producir en una unidad acoplada al autoclave mismo o se alimenta directamente desde una caldera externa.

No obstante debe aclararse que existen otras técnicas por las cuales es posible efectuar procedimientos de esterilización, como el uso de radiación, agentes químicos o filtración selectiva, cada uno de ellos con sus ventajas y desventajas.

Figura 1. Esquema de un autoclave y principio de funcionamiento [1]



II. DISEÑO MECÁNICO DE RECIPIENTES A PRESIÓN

Lo más común para este tipo de aplicaciones es encontrarse con recipientes que caen en la categoría de los llamados "recipientes de pared delgada", cuya geometría generalmente es cilíndrica o esférica, aunque también es posible encontrarlos en formas cúbicas.

La normatividad existente sobre el diseño de estos recipientes está basada en el código ASME para el diseño de recipientes a presión (secciones VII y VIII) el cual considera las siguientes como las variables más influyentes en el proceso [5]:

A. Presión de operación

Es la presión a la que está sometido realmente el equipo. Se ha podido establecer que la esterilización se alcanza cuando la temperatura está entre 120 y 130°C, para lo cual termodinámicamente se corresponde una presión de entre 200 y 270 kPa absolutos (unos 180 kPa manométricos en Medellín)[7].

B. Presión de diseño

Es el valor de la presión para el cual se realiza el cálculo del espesor mínimo. Normalmente se

especifica como un 10% mayor que la presión de operación o se establece un factor de seguridad mayor, (para tener en cuenta el efecto de las cargas cíclicas), según el criterio del diseñador.

No obstante por norma y en el caso más sencillo, cuando el factor que rige el diseño es la presión interna, se añade a la presión interna máxima que se espera dentro del recipiente el valor que resulte mayor del 10% de la misma o 30 psig (200 kPa).

C. Temperatura de diseño

Es el valor para el cual se evalúa el esfuerzo máximo permisible del material utilizado en el diseño del recipiente, ya que éste es función de la temperatura.

D. Materiales

La selección del material depende de la disponibilidad y de la compatibilidad de éste con las especies químicas que se manejan en el proceso específico. Particularmente para aplicaciones de esterilización se emplean los aceros inoxidables.

E. Esfuerzo máximo permisible

Para propósitos de diseño es necesario evaluar el esfuerzo máximo permisible del material de

construcción, el cual es una función de la temperatura de operación. A mayor temperatura, menor esfuerzo máximo permisible. Para el Acero inoxidable SAE 240 316L, por ejemplo, se tiene la siguiente variación [2]:

Tabla 1. Variación del esfuerzo máximo permisible con la temperatura para el Acero SAE 240- 316 L

Temperatura (°F)	-20 0 100	200	300	400	500	600	700	800
Esfuerzo permisible (ksi)	16.7	16.7	16.0	15.6	14.8	14.0	13.5	13.0

F. Eficiencia de la soldadura

La resistencia de una junta depende del tipo de unión y de la calidad de la soldadura. Según sea el grado de inspección de la soldadura la cual puede realizarse de una manera visual o mediante métodos no destructivos (radiográficos), se utilizan diferentes valores para la eficiencia de la misma.

Tabla 2. Valores típicos de eficiencia de soldadura [5]

Grado de radiografía	Factor de eficiencia (E)
Completa	1.0
Parcial	0.85
Ninguna	0.60

G. Corrosión permisible

Es el desgaste máximo permitido para un material de construcción, debido a la reacción electroquímica que se efectúa entre la superficie de ésta y su medio circundante. Este desgaste del material de construcción debido a la corrosión debe ser adicionado al espesor de placa requerido. El factor de corrosión se determina en base a la vida útil del equipo, las condiciones de operación y los criterios de resistencia a la corrosión que ofrecen diversos autores.

Considerando una vida útil de un equipo igual a diez años y una velocidad media de corrosión de 10 mpy (milipulgadas por año), el desgaste total experimentado por el material es igual a 0.1 pulg (2.5 mm). Por lo tanto el factor de corrosión normalmente utilizado es igual a 1/8 de pulgada (3.175 mm).

Tabla 3. Resistencia a la corrosión [5]

Velocidad de corrosión (mpy)	Resistencia
Menor que 2	Excelente
2 a 10	Buena
10 a 20	Satisfactoria
20 a 50	Pobre
Mayor que 50	Mala

Para fluidos poco corrosivos, se acostumbra añadir 1/8" (3.175 mm) para corrosión si el recipiente se construye de acero al carbono o de baja aleación (10 a 15 mpy) para una vida útil de 10 años del equipo.

H. Cargas involucradas

En el diseño del recipiente deben considerarse las cargas debidas a la presión interna, las cargas sísmicas y las debidas al peso del recipiente, aún cuando no todas pueden estar presentes simultáneamente.

I. Geometría

Para propósitos de diseño mecánico, un recipiente sometido a presión se considera constituido por dos partes: cuerpo y tapas:

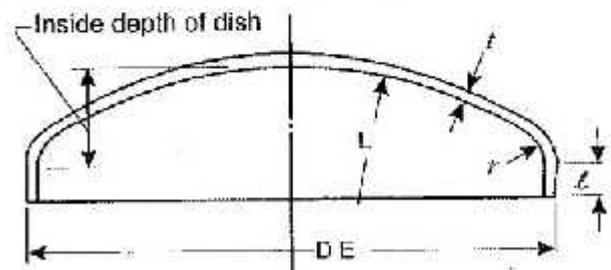
- Cuerpo: aun cuando la mayoría de equipos de este tipo son de forma cilíndrica, también es posible encontrarlos de forma esférica y muy ocasionalmente de forma rectangular.
- Tapas: la forma de las tapas puede ser muy variadas, entre las que se encuentran: planas, toriesféricas, elipsoidales, esféricas, cónicas, etc.

Las tapas con geometría toriesférica se diseñan según las siguientes relaciones [6]:

$$t = \frac{pLM}{SE - 0.2p} \quad \text{con las restricciones de } r \geq 0.06 DE \text{ y } L \leq DE$$

$$\text{donde } M = \frac{1}{4} [3 + (L/r)^2]$$

Figura 2. Parámetros de diseño para una tapa toriesférica, DE diámetro externo del recipiente, L radio de curvatura de la tapa, t espesor de la tapa, r radio de empalme, r/pestaña o trazo recto [4]



Este tipo de tapas se utilizan ampliamente en el intervalo de presiones internas de 100 kPa a 1 MPa, pero pueden utilizarse a presiones mayores cuando el costo y la fabricación lo permitan.

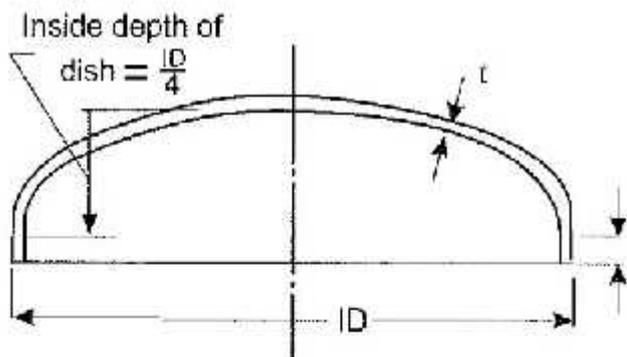
La geometría de las tapas elípticas se obtiene a partir de

$$t = \frac{pDK}{2SE - 0.2p} \quad y \quad p = \frac{2SEt}{KD + 0.2t}$$

donde $K = \frac{1}{8} \left[2 + \left(\frac{D}{2h} \right)^2 \right]$ con la restricción usual de $D/2h = 2$

Siendo $D/2h$ la relación entre los semiejes de la elipse; aunque estas tapas son ampliamente utilizadas a partir de 150 psig (1 MPa) se suelen utilizar más exclusivamente de 1.4 a 3.5 MPa.

Figura 3. Parámetros de diseño de una tapa elíptica: ID diámetro externo del recipiente, t espesor de la tapa, h postaña o tramo recto [4]



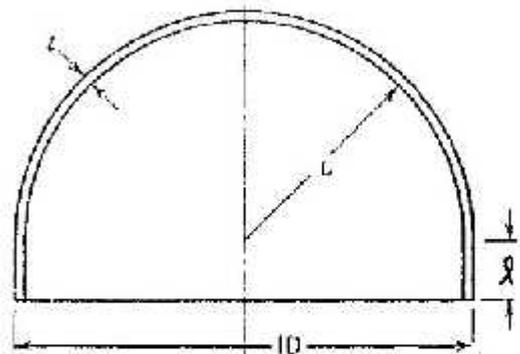
Aún cuando las tapas hemisféricas pueden considerarse como las tapas ideales, ya que el espesor requerido es la mitad del correspondiente (para la misma presión interna), que para un cuerpo cilíndrico por ejemplo, su uso queda restringido para presiones superiores a los 500 psig (3.6 Mpa manométricos), debido a los altos costos involucrados. Para estas tapas los factores de intensificación de esfuerzos valen la unidad.

El espesor, en términos de sus dimensiones internas cuando se cumple que $t > 0.356L$ ó $p > 0.665SE$, es

$$t = \frac{pL}{2SE - 0.2p} \quad y \quad p = \frac{2SEt}{L + 0.2t}$$

siendo L el radio del hemisferio

Figura 4. parámetros de diseño de una tapa hemisférica: ID diámetro externo del recipiente, L radio del hemisferio, t espesor de la tapa, h postaña o tramo recto [4]



J. Espesor mínimo requerido o espesor de reemplazo (t)

El Código ASME sección VII, división 1, proporciona las fórmulas que relacionan el espesor mínimo requerido para el cuerpo con el diámetro, la presión, el esfuerzo máximo permisible, la eficiencia de soldadura y los diferentes tipos de carga según sea el caso [2].

$$t = \frac{pR}{SE - 0.6p} \quad \text{para cuerpos cilíndricos, cuando } t < R/2 \text{ y } p < 0.385SE$$

$$t = \frac{pR}{2SE - 0.2p} \quad \text{para cuerpos esféricos, cuando } t > 0.356R \text{ ó } p > 0.665SE$$

K. Espesor de diseño⁽²⁾

Es el espesor mínimo más el sobre-espesor para corrosión

L. Espesor nominal⁽²⁾

Es el espesor de diseño llevado al espesor comercial inmediatamente superior. La norma recomienda que el espesor nominal de un recipiente que opera a presión interna tanto para cuerpos cilíndricos como esféricos, no debe ser menor a 3/16 pulg (4.76 mm), cuando el material utilizado sea un acero al carbón de baja aleación. En el caso de materiales de alta aleación se permiten espesores hasta de 1/8 pulg (3.175 mm) sin tolerancia a la corrosión.

Para el diseño de recipientes con cuerpo cilíndrico, el volumen total queda establecido por:

$$V_{total} = V_{cuerpo} + 2V_{tapa}$$

siendo V_{cuerpo} el volumen de un cilindro de longitud L y diámetro interno D

Cuando se manejen tapas con diámetros comerciales, el volumen del recipiente queda en términos de la longitud (L) y el diámetro del cuerpo (D). Estos parámetros se relacionan mediante la razón L/D , la cual toma valores de 2 a 5 para recipientes con tapas semiesféricas o toriesféricas [3]. Así pues, suponiendo una relación L/D conveniente y eligiendo el tipo de tapas apropiado, se puede expresar una única incógnita en términos de los otros parámetros, por ejemplo

$$L = \frac{V_{tot} - 0.001132D^3}{0.7854D^2} \quad \text{para tapas elípticas}$$

$$L = \frac{V_{tot} - 0.0007D^3}{0.7854D^2} \quad \text{para tapas con geometría toriesférica}$$

A continuación se elige un diámetro de tapa (externo o interno) que es igual al diámetro del cuerpo cilíndrico (interno o externo) y se itera hasta que se cumple que $2 < L/D < 5$

III. RESULTADO: DISEÑO PROPUESTO DE UN AUTOCLAVE

Con base en los parámetros y los lineamientos anteriores, se procederá a determinar un diseño conveniente para un equipo de esterilización por vapor para uso a nivel de laboratorio, aplicación típica en la que se manejan capacidades de esterilización del orden de 100 litros (capacidad de la cámara de esterilización). Con este valor y sabiendo que la temperatura de operación del equipo en condiciones normales de operación es de 120°C, se tienen los siguientes datos:

- Presión de operación: 200 kPa absolutos (115 kPa manométricos) según lo establecido en las tablas de saturación para el agua.

$$P_{operación} = 115 \text{ kPa}$$

- Presión de diseño: se toma el valor mayor de $1.1 * P_{diseño} = 127 \text{ kPa}$ manométricos ó 200 kPa manométricos, por lo que

$$P_{diseño} = 200 \text{ kPa}$$

- Temperatura de diseño: como se dijo antes se toma como 120°C y a esta temperatura se evalúa el esfuerzo máximo permisible del material de la cámara de esterilización.

- Material de construcción. De acuerdo a la experiencia y al tipo de aplicación en cuestión, en la que se requieren ambientes altamente estériles, se propone el Acero inoxidable SAB 240 grado 316L, para el cual se tiene

esfuerzo máximo permisible de 13.5 ksi (113 MPa)

esfuerzo de fluencia = 25 ksi (178.6 MPa)

esfuerzo de tensión = 70 ksi (500 MPa)

- Eficiencia de la soldadura: según la tabla 2 se toma el valor de 0.6 para una inspección visual, sin ningún tipo de examen radiográfico este es el valor más conservador
- Corrosión permisible: suponiendo una vida útil de 10 años para el equipo y una velocidad de corrosión de 10 mpy, entonces el espesor necesario para corrosión es de 1/8 de pulg (3.175 mm).
- Geometría: para esta aplicación se opta por una geometría de cuerpo cilíndrico con tapas toriesféricas.

Con estas consideraciones presentes entonces se determinan las dimensiones de la cámara esterilizadora, asumiendo una relación $L/D = 2$, así:

El volumen en función del diámetro es

$$0.1 \text{ m}^3 = \pi/4 D^2 2D$$

Por lo que $D = 0.4 \text{ m}$, luego con la relación para tapas toriesféricas se obtiene la longitud que dará un volumen de 100 litros incluyendo el volumen de las tapas, esto es:

$$L = \frac{V_{tot} - 0.0007D^3}{0.7854D^2} = \frac{0.1 \text{ m}^3 - 0.0007 * 0.4^3 \text{ m}^3}{0.7854 * 0.4^2 \text{ m}^2} = 0.795 \text{ m} (79.5 \text{ cm})$$

entonces la longitud del cuerpo cilíndrico será de $2 * 0.795 \text{ m} = 1.59 \text{ m}$

Empleando ahora las fórmulas sugeridas para determinar el espesor mínimo requerido, se obtiene que

$$t_{mínimo} = \frac{pR}{SE - 0.6p} = \frac{200 \text{ kPa} * 0.2 \text{ m}}{(0.60 * 117130 \text{ kPa} - 0.6 * 200 \text{ kPa})} = 5.7 * 10^{-4} \text{ m}$$

que serían un poco más de 1/64 de pulgada

el espesor de diseño es entonces $t_D = (0.57 + 3.175) \text{ mm} = 3.745 \text{ mm}$ ó un poco más de *1/8 de pulg.* Si embargo el espesor comercial más cercano sería de *3/16 de pulg.* Que es precisamente el menor espesor recomendado por norma para cualquier recipiente sometido a presión interna.

Así pues el espesor nominal será de
 $t_N = 3/16 \text{ pulg.} = 4.7625 \text{ mm}$

Por la forma misma en que opera el equipo se sugiere enchaquetar la cámara dejando un espacio interior de *1 pulgada (25.4 mm)*, para lo cual se emplea el mismo material y el mismo espesor calculado para la cámara de esterilización

IV. CONCLUSIONES

Se ha presentado una metodología para el diseño de recipientes sometidos a presión interna, el cual puede ser empleado entre otras cosas en el diseño de esterilizadores a vapor o autoclaves.

Aunque sólo se ha abordado el caso de los recipientes con forma cilíndrica, el análisis presentado es aplicable a otras geometrías (rectangulares por ejemplo), haciendo las consideraciones requeridas en la deducción de los esfuerzos y a partir de estos la deducción de la expresión para el diámetro óptimo del recipiente.

Los resultados presentados se limitan al de un equipo en el que las exigencias no son tan severas como en una aplicación hospitalaria, en el que el volumen de esterilización manejado puede complicar de alguna forma el diseño de la cámara esterilizadora.

El diseño de este tipo de equipos no es para nada complejo, en esencia se remite a cumplir las normativas propuestas para cada condición particular,

cosa que simplifica en gran medida la etapa de cálculo y análisis.

NOMENCLATURA

- D : diámetro de la coraza del recipiente
- E : Eficiencia de la costura de soldadura
- K : factor de intensificación de esfuerzos para tapas elípticas
- t : espesor de la coraza o cuerpo del recipiente y de las tapas
- p : presión manométrica en el interior del recipiente
- R : radio interno de la coraza o cuerpo del recipiente
- S : esfuerzo máximo permisible para el material utilizado
- L : longitud del cuerpo cilíndrico del recipiente
- M : Factor de intensificación de esfuerzos para tapas torisféricas y elípticas
- K : factor de intensificación de esfuerzos para tapas hemisféricas

Referencias

- [1] TORTORA, Gerard et al. "Microbiology, an Introduction", 7^a Edición. Addison Wesley. New York, 2001.
- [2] ASME: Boiler and Vessels committee. "Boiler and Pressure Vessels Code", sección VII, división 1 y división 2. 1983
- [3] MURILLO, Iván, Et al. "Diseño y Construcción de un Equipo de Esterilización". Trabajo de grado Universidad de Antioquia, Medellín. 1995.
- [4] OBANDO B. M^a Eugenia, Piedrahita Oscar. "Diseño de recipientes a presión". Trabajo de grado. Universidad de Antioquia, Medellín, 1971.
- [5] QUINTANA HERNÁNDEZ, P. et al. "Diseño Mecánico de Recipientes a Presión y Torres Altas", Revista Ingeniería Química (Madrid), Vol 32 # 372, Octubre de 2000.
- [6] ROGEL RAMÍREZ, Alejandro. "Elementos para el Diseño de Recipientes a Presión". UNAM, 1998.
- [7] WARK, Kenneth. "Termodinámica", 5^a Edición. Editorial McGraw-Hill. México, 1991.