

Introducción a la sección I “Reglas para la Construcción de Calderas de Potencia” del código ASME 2023 para calderas y recipientes a presión

Ing. Pablo Barral[†]

Sistemas de Almacenamiento


16 de enero de 2025

Resumen

Esto es el resumen del texto.

Palabras clave: ASME, BPVC, calderas.

Disclaimer: El contenido de este apunte tiene como única finalidad ser una introducción somera al código en el marco de una asignatura de grado, apoyándose en una exposición oral. Este apunte no constituye, bajo ningún tipo de concepto, un reemplazo del código, ni en su versión 2023 ni en la última vigente. Este apunte no sustituye de ninguna manera al juicio criterioso en el diseño ni a las reglas del buen arte y la experiencia en el diseño, la fabricación, el ensayo, la inspección y la operación. El autor no asume responsabilidad por ninguna acción tomada basada en la información proporcionada en este apunte, y prohíbe enfáticamente el uso de este apunte para el diseño. Finalmente, se recuerda que el diseño de recipientes a presión sin una validación empírica o siguiendo los lineamientos de un ente reconocido constituye un serio peligro para la seguridad, la integridad de los equipos y las instalaciones y la vida de las personas, con consecuencias posiblemente fatales o incapacitantes de modo permanente.

[†]Departamento de Ing. Mecánica, Universidad de Buenos Aires; pbarral@fi.uba.ar; 

Índice

1. Introducción	3
1.1. alcance del código	3
1.2. calderas acuotubular y pirotubular	3
1.3. limites de jurisdiccion	3
2. Diseño	4
2.1. Componentes cilíndricos bajo presión exterior	4
2.1.1. Relación con los esfuerzos teóricos	7
2.1.2. Ejemplo de cálculo	8
2.2. Material	9
2.3. MAWP	10
2.3.1. Comentarios adicionales	12
2.4. Temperatura de diseño	12
2.5. Tensión admisible	13
2.6. Eficiencia	13
2.7. Coeficiente de temperatura	13
3. Ligamentos	14
4. Derivaciones y compensaciones	15
5. Válvulas de seguridad	16
5.1. Calderas	16
6. Comentarios finales y conclusiones	18
7. Anexo	19
7.1. Incluir Archivo Binario	19

1. Introducción

1.1. alcance del código

Acá hablar de la estructura

Poner qué es y qué no es el código.

Cómo interactúa con un mercado, con un arbitraje, que es diseño y fabricación, estampas parciales y completas.

La diferencia con hacer un hermoso cálculo con la teoría de las cáscaras o con los elementos finitos, pero hay partes que después quedan descubiertas. El código es integral.

Código es como empírico, ojo con los márgenes que toma, ASME lo cambia, y los americanos son conocidos por sobredimensionar. Los europeos lo hicieron mejor y tuvieron que achicar el margen de seguridad.

1.2. calderas acuotubular y pirotubular

Mostrar caldera paquete, fotos, mostrar fotos internas de domos



Figura 1: *TBD*.

1.3. limites de jurisdiccion

diferenciar con codigo ASME B31.1

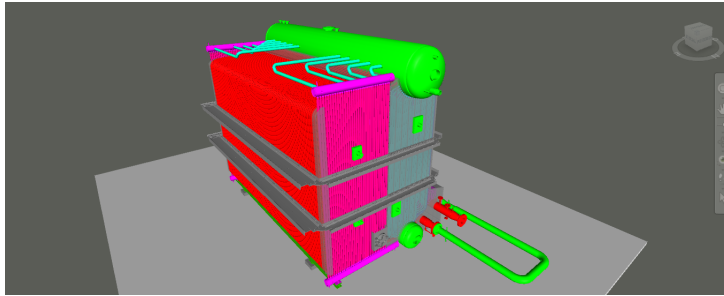


Figura 2: TBD.

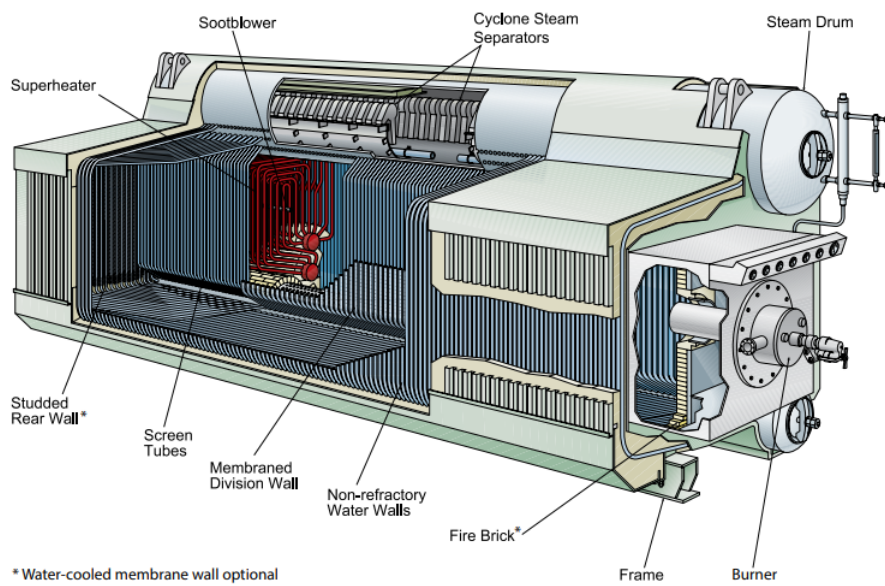


Figura 3: TBD.

2. Diseño

2.1. Componentes cilíndricos bajo presión exterior

El código indica, en el apartado **PG-27.2.2**, la expresión que debe utilizarse para determinar el espesor mínimo requerido para los caños (*pipings*), los domos (*drums*), las envueltas (*shells*) y los colectores (*headers*).

$$t = \frac{P \cdot D}{2 \cdot S \cdot E + 2 \cdot y \cdot P} + C \quad (1)$$

Aquí:

- **D** es el diámetro exterior del componente cilíndrico. Una denominación alternativa es **OD** (*outside diameter*).



Figura 4: *TBD*.

El diámetro que debe utilizarse es el real, no el nominal. La unidad en que debe expresarse en la ecuación 1 es mm.

Por ejemplo, para un caño de $NPS = 10$ in (*nominal pipe size*), el diámetro nominal es $DN = 250$ mm mientras que el diámetro exterior es $OD = 273,1$ mm. En este ejemplo, este último es el que debe utilizarse.

Estos diámetros se establecen en el estándar **ASME B36.10M**, representando la M al estándar en el sistema métrico.

- **P** es la máxima presión admisible de trabajo (*MAWP* o *maximum allowable working pressure*). La presión que debe utilizarse, interna en este caso, es la manométrica o relativa al ambiente, ya que el esfuerzo sobre la pared del componente se genera a partir de la diferencia de fuerzas entre las originadas por la presión absoluta interior y la exterior (la atmosférica). Su definición se encuentra en el apartado **PG-21**. La unidad en que debe expresarse en la ecuación 1 es MPa(g).
- **S** es la máxima tensión admisible a la temperatura de diseño del metal. En el apartado **PG-23** se indica que este valor máximo de tensión admisible puede encontrarse en la **sección II, parte D, subparte 1, tablas 1A y 1B** del **BPVC**.

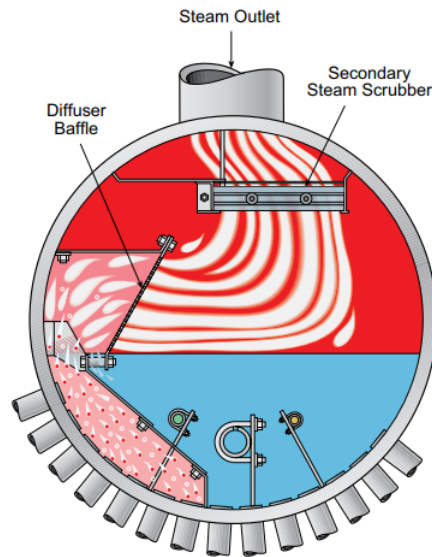


Figura 5: TBD.

La unidad en que debe expresarse en la ecuación 1 es MPa.

Más detalles pueden encontrarse en el apartado **PG-27.4.2**.

- **E** es un valor adimensional denominado eficiencia. Más detalles pueden encontrarse en el apartado **PG-27.4.1**.
- **y** es un coeficiente adimensional de temperatura. Más detalles pueden encontrarse en el apartado **PG-27.4.6**.
- **C** es un ajuste o margen mínimo para que el componente tenga rigidez estructural (por ejemplo, que no sea sensible a posibles abolladuras por golpes en la manufactura, el transporte, en el caso de que algún operario se pare sobre este), y para tener en cuenta el roscado.

Este margen se suma de manera directa, es un agregado al espesor requerido por el cálculo basado en la presión, el diámetro, la tensión admisible, la eficiencia y el coeficiente de temperatura.

Más detalles pueden encontrarse en el apartado **PG-27.4.3**.

En **PG-27.4.3** se establece que *C* no incluyen ningún margen por una posible corrosión o erosión, por lo que este margen debe aplicarse en los casos en que sea necesario.

El código indica, en el mismo apartado, la expresión que debe utilizarse para determinar el espesor mínimo requerido a partir del radio interior (en lugar de determinarlo respecto del diámetro exterior). Además, incluye las expresiones para determinar la presión interior máxima admisible de trabajo que soportan los componentes a partir de su espesor, tanto para el caso en que se conoce el diámetro exterior como el caso en que se conoce el radio interior.

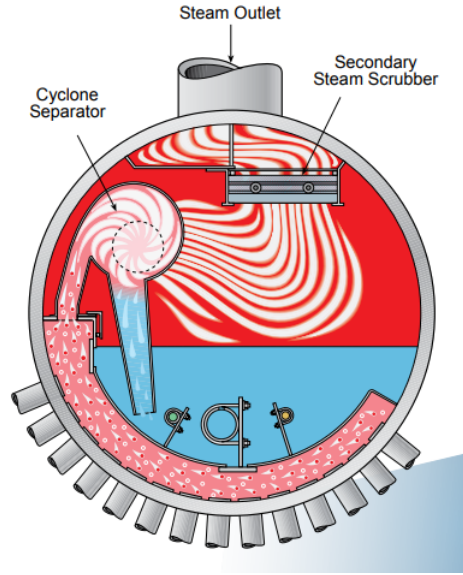


Figura 6: TBD.

2.1.1. Relación con los esfuerzos teóricos

La ecuación 1 puede relacionarse con la expresión de cálculo de la tensión en la dirección circunferencial σ_θ (*hoop or circumferential stress*), a veces llamada tensión tangencial, para un cilindro de pared delgada sometido a una presión interior manométrica o relativa al ambiente:

$$\sigma_\theta = \frac{P \cdot d}{2 \cdot t} \quad (2)$$

Reagrupando,

$$t = \frac{P \cdot d}{2 \cdot \sigma_\theta} \quad (3)$$

La expresión 2 se deriva de un equilibrio estático de fuerzas entre la inducida por la presión interior (calculada a partir de la superficie proyectada) y la tensión que se genera en el espesor, por lo que aquí d es el diámetro interior. Ver la figura 8.

Un recipiente puede considerarse de pared delgada si el diámetro es, al menos, unas 20 veces el diámetro. Por lo tanto, para estos casos, la diferencia entre adoptar d como el diámetro interior o exterior es despreciable.

La tensión en la dirección longitudinal σ_L (*longitudinal stress*), en el caso de que el cilindro tenga tapas, se calcula como

$$\sigma_L = \frac{P \cdot d}{4 \cdot t} \quad (4)$$

La expresión 4 se deriva de un equilibrio estático de fuerzas entre la inducida por la presión interior (calculada a partir de la superficie proyectada) y la tensión que se genera en el espesor, por lo que aquí d es el diámetro interior. Ver la figura 9.

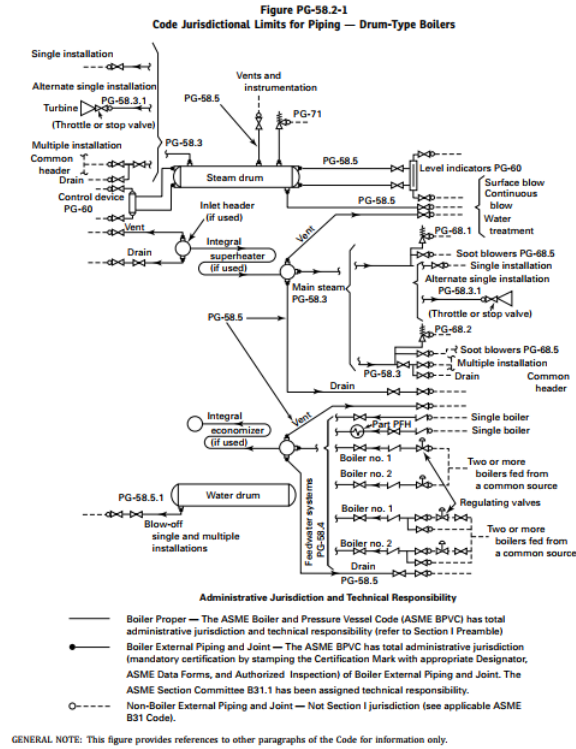


Figura 7: *Límite de la jurisdicción del BPVC para las cañerías. Para calderas con domo.*

Para un recipiente de pared delgada, la tensión en la dirección radial σ_r (*radial stress*) es mucho menor que las otras dos tensiones, y puede desestimarse. Por lo tanto, el sistema conforma un estado plano de tensiones perpendiculares entre sí, siendo σ_θ y σ_L las tensiones principales de ese sistema.

Nota importante: Si bien las ecuaciones 1 y 2 están relacionadas, la que debe utilizarse al diseñar según el código es 1, ya que esta contiene las características del material y sus propiedades, los efectos de la merma de resistencia del material por el efecto de la temperatura de diseño, la adopción de un coeficiente de seguridad, el debilitamientos en el caso de que el cilindro esté agujereado, el debilitamiento por las costuras de la soldadura, la adopción de un margen para una resistencia estructural propia ante golpes o abolladuras, el efecto del estado plano de tensiones, etc.

2.1.2. Ejemplo de cálculo

Supongamos que se quiere dimensionar el espesor del domo de una caldera acuotubular. Consideremos una MAWP = 75 bar(g), una temperatura de diseño $T = 290^\circ\text{C}$, que el diámetro exterior es $D = 69,5 \text{ in} = 1765,3 \text{ mm}$ que el material es SA-516 Gr. 70 y, únicamente para los fines de este ejemplo, que el domo no posee costuras de soldadura.

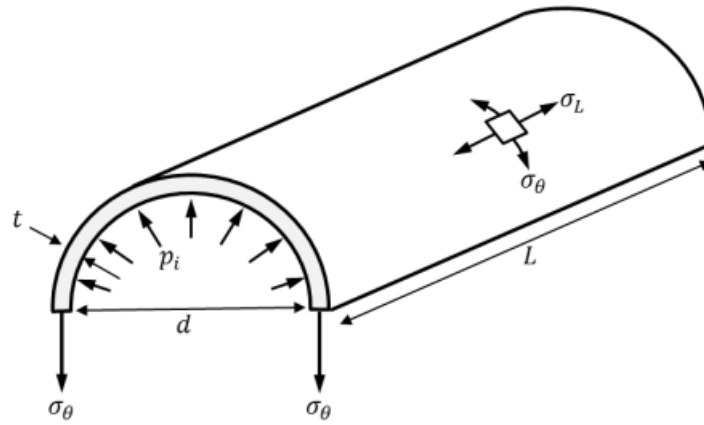


Figura 8: *Cilindro sometido a una presión interior.*

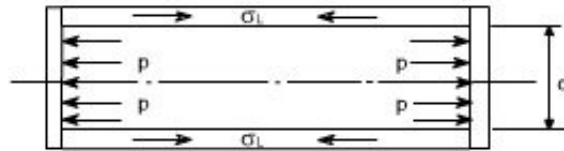


Figura 9: *Cilindro sometido a una presión interior.*

Determinando la eficiencia, el coeficiente de temperatura, la máxima tensión admisible a la temperatura de diseño del metal y considerando que no debe adicionarse el margen C , al reemplazar en 1, resulta

$$t = \frac{7,5 \text{ MPa(g)} \cdot 1765,3 \text{ mm}}{2 \cdot 137,6 \text{ MPa} \cdot 1,0 + 2 \cdot 0,4 \cdot 7,5 \text{ MPa(g)}}$$

$t = 47,08 \text{ mm}$

2.2. Material

Acá quiero mostrar:

1. La limitación de que el material tiene que estar en ASME II. PG-5.
2. Para chapa (plate), veo PG-6.
3. Para el ejemplo, dar las características del acero que utilizo. Sus valores de resistencia mecánica, las notas que lo rigen, el gráfico que hice, el valor de resistencia mecánica. ASME Parte 2
4. Los apéndices no mandatorios del código ASME II sobre grafitización.
5. La composición y el estándar ASTM que me rige. Esta en ASME II Parte A.

6. Valor máximo de temperatura debe respetarse, a pesar de que esté listadas más temperaturas.
7. En nota general de tabla IA me permite interpolar.
8. STATEMENT OF POLICY ON INFORMATION PROVIDED IN THE STRESS TABLES. Acá figura esto del limite de temperatura, que no debe superarse. Ponerlo como nota al pie, o algo ais.
9. Marcar que el código ya nos da los coeficientes de seguridad. Comparar la tensión que usamos contra el valor informado de fluecnia y de resistencia mecánica.
10. Dar las características completas del material. Mencionar que está incorporado el estándar ASTM.
11. El estándar ASTM está asociado a la forma en la que el material es comercializado (si es en chapa o barras, por ejemplo).
12. Cada estándar tiene grados, que se relacionan con la resistencia.
13. Creo que el código permite interpolar pero con la misma cantidad de decimales que el valor más chico, por lo que acá si no tengo decimales redondeo a 138. Hacer la cuenta con 138.
- 14.

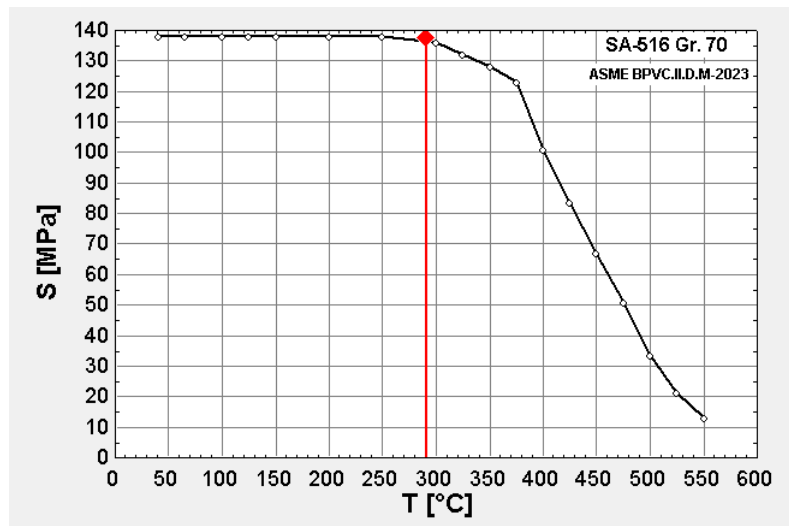


Figura 10: TBD.

2.3. MAWP

El código define, en el apartado **PG-21**, a la presión máxima admisible de trabajo (**MAWP**, *maximum allowable working pressure*) como la presión

T [°C]	S [MPa]
40	138
65	138
100	138
125	138
150	138
200	138
250	138
300	136
325	132
350	128
375	123
400	101
425	83,8
450	67,1
475	51,0
500	33,6
525	21,3
550	12,9

Cuadro 1: Poner qué es. De dónde la extraigo. Poner el límite de uso que figura, para usos según código ASME I.

determinada al emplear los valores admisibles de tensión (*allowable stress values*), las reglas de diseño y las dimensiones que se designan en la sección de diseño (apartados **PG-16** a **PG-31** inclusive).

A continuación, el código brinda algunas precisiones. En el apartado **PG-21**, indica

*Ninguna caldera (excepto algún caso particularísimo) debe operarse a una presión superior que la presión máxima admisible de trabajo (u operación), excepto cuando la o las válvulas de alivio de presión están descargando. En ese momento, la **MAWP** no debe superarse en más de un 6 %.*

Esto impone un requerimiento para el o los dispositivos de alivio de presión, aunque no alcanza a definirlos completamente.

En el apartado **PG-22**, indica

Se espera que las condiciones máximas sostenidas esperadas de presión y temperatura se seleccionen con un margen suficiente por encima de cualquier condición de operación esperada (no necesariamente continua) para permitir el funcionamiento satisfactorio de la caldera sin que se activen los dispositivos de protección contra sobrepresión.

Esto es importante: no es una práctica avalada por el código depender en algún caso esperado de el o los dispositivos de alivio de presión. Estos dispositivos se reservan para casos imprevisibles (por ejemplo, alguna rotura¹) o imprevistos.

¹La interpretación acerca de si una posible rotura es un evento previsible o previsto o no, o si debiera así considerarse escapa del alcance de este apunte introductorio. Para ahondar en esto, se debe recurrir a la bibliografía especializada.

Reiteramos, porque es importante: cualquier evento esperado de aumento de presión o temperatura debe poder tomarse con las reglas de diseño, por más que este aumento sea transitorio. El o los dispositivos de alivio de presión cumplen una función de seguridad y deben utilizarse en lo que podríamos denominar una emergencia (aunque esta no es una denominación que el código utilice). Vale decir que no necesariamente los dispositivos de alivio de presión resisten un accionamiento sin sufrir modificaciones permanentes que resulten en una merma de su performance. Siempre debe consultarse el manual del fabricante, y seguir al pie de la letra el cronograma de mantenimiento.

Como conclusión podemos decir que el código en ningún lugar define cuál debe ser el margen entre cualquier condición operación esperable (incluyendo el arranque y la parada, todos los grados de carga sostenidos y los transitorios de cambio entre uno y otro) y la presión que debe utilizarse para el cálculo, la **MAWP** (la máxima admisible de operación o trabajo). La elección de este margen es una responsabilidad del fabricante, y debe elegirse de manera acorde a la certidumbre que se tenga con el cálculo y a su validación empírica.

Finalmente, entonces, la **MAWP** es la presión más alta a la que puede operar el equipo de manera segura, y esta seguridad está garantizada por el diseño siguiendo las reglas del código, y por los dispositivos de alivio de presión.

2.3.1. Comentarios adicionales

- la presión hidrostática debe tenerse en cuenta donde aplique. Por ejemplo, en el domo inferior de una caldera, especialmente las de mucha altura.
- El aparatado de diseño del código no afronta otro tipo de cargas (por ejemplo, entre otros, las que surgieran de una restricción al movimiento generado por la dilatación térmica de los materiales, o bien algún efecto producido por la exposición del componente sometido a presión a un evento sísmico). El código indica que estos efectos deben tenerse en cuenta.
- En el apartado 16.1 el código indica que las reglas de esta sección no cubren todos los posibles detalles de diseño y, para los casos en donde una regla no es provista, el fabricante debe ofrecer la inspección (quien es el que revisa que el diseño es de acuerdo con el código) el detalle de diseño que pruebe que el diseño es tan seguro como lo es el diseño según el código. Esto puede hacerse por métodos analíticos, utilizando otros códigos de diseño o mediante una validación empírica.

2.4. Temperatura de diseño

PG-27.4.2 The temperature of the metal to be used in selecting the S value for tubes shall not be less than the maximum expected mean wall temperature, i.e., the sum of the outside and inside tube surface temperatures divided by 2. For tubes that do not absorb heat, the metal temperature may be taken as the temperature of the fluid within the tube but not less than the saturation temperature.

Para un domo que está aislado, ojo. Tener en cuenta la aislación. O para sobrecalentadores, que tenemos temperaturas muy distintas en ambas caras (lado gases, que pueden estar a 900°C, por ejemplo, y lado vapor, que puede estar a un máximo de 500°C, por ejemplo)

2.5. Tensión admisible

2.6. Eficiencia

2.7. Coeficiente de temperatura

1. Acá voy a poner la temperatura de diseñp

3. Ligamentos

Acá tengo que poner los casos simples y algunos de los casos complejos.

Ver cuando haga ese mini ejercicio para que entreguen, qué quiero poner, como para que tengan algo de variedad.

PG-52 estamos hablando.

4. Derivaciones y compensaciones

PG-32

Como recomendación de diseño es dable pensar que no vamos a poner los cordones de soldadura, como hace Sobral.

Mandárselo para que le pegue una mirada.

5. Válvulas de seguridad

Entre los apartados **PG-67** y **PG-73**, el código se dedica a establecer los requerimientos para los dispositivos de protección contra la sobrepresión^{2,3}.

El código genera requerimientos para lo que llama caldera (*boiler*) en el apartado **PG-67** y para los sobrecalentadores y recalentadores en **PG-68**. Los requerimientos para los dispositivos de alivio de presión para los economizadores (en los casos en los que apliquen) se encuentran también en el apartado **PG-67**. La denominación de "caldera" que aquí se usa debe entenderse como la parte del equipo en donde se genera vapor (sea el hogar, sean los tubos pantalla o el haz convectivo si los hubiere).

5.1. Calderas

El primer requerimiento que genera el código (en el apartado **PG-67.1**) es que todas las calderas tienen que tener por lo menos una válvula de alivio de presión. Más aún: las calderas de tubos lisos/desnudos (*bare tubes*), es decir, sin la superficie extendida generada por las aletas, cuya superficie calefactora supere los $A = 47 \text{ m}^2$ deben tener, por lo menos, dos válvulas de alivio de presión. Cuando la superficie calefactora se logra con tubos aletados, el requerimiento de contar con al menos dos válvulas de seguridad se indica para calderas cuya máxima generación de vapor de diseño (establecida por el fabricante) supere $G = 1800 \text{ kg/h}$. Esto es porque la superficie extendida se utiliza con fuentes térmicas de bajo nivel, por lo que puede haber diseños con temperaturas bajas, mucha superficie calefactora y poca generación de vapor para los que el requerimiento de dos válvulas por lo menos es demasiado estricto.

El segundo requerimiento es sobre la capacidad del conjunto de válvulas y sobre el set⁴ de cada una de ellas. Esto es: el punto en el que se inicia la apertura.

El código requiere en el apartado **PG-67.2.1** que la capacidad de descarga, de alivio (*relieving capacity*), combinada entre todas las válvulas, sea equivalente a todo el caudal de vapor que puede generar la caldera para todos sus combustibles y de acuerdo con su sistema de combustión, *cuando la caldera está a la MAWP*. Este es un valor que debe informar el fabricante, y puede ser superior que el caudal generable de diseño (*MCR o maximum continuous rating*), debido a los márgenes con los que se diseña la caldera.⁵

Naturalmente, una válvula (que no es otra cosa que un orificio calibrado) chica necesita más presión interna para poder descargar ese caudal de vapor que una más grande. Por otra parte, es esperable que la presión crezca mientras la válvula comienza a actuar y hasta que llegue a su capacidad máxima de descarga, ya que estas no actúan inmediatamente.

Para dar cuenta de esto, el código requiere en el apartado **PG-67.2** que la presión en el interior de la caldera cuando se descarga al exterior toda la

²Se sobreentiende que la sobrepresión se refiere a un valor por encima de la *MAWP*. Más detalles se presentan más adelante.

³El código utiliza la denominación de válvula de alivio de presión (*pressure relief valves*) de manera general, sin entrar en ninguna distinción con la denominación de válvula de seguridad (*pressure safety valve*).

⁴Algunas denominaciones comunes son: timbre, tarado de la válvula, punto de disparo.

⁵El código presenta algunas sutilezas más en el apartado **PG-67.2.1** acerca de la capacidad de descarga de las válvulas. Estas reglas debe tenerse en cuenta para el diseño. En [5] se encuentra una explicación acerca de esto.

capacidad de generación de vapor no supere el 6 % del mayor valor de set de las válvulas. Y, además, que esta presión no supere el 6 % de la **MAWP**.

Supongamos como ejemplo que una caldera tiene dos válvulas: una con set de 95 bar(g) y otra de 100 bar(g). Es decir: la primera comienza a abrir cuando la presión interna supera los 95 bar(g), y la segunda cuando se superan los 100 bar(g). El código requiere que la capacidad total combinada de descarga sea alcanzable cuando la presión interior sea 106 bar(g) (como máximo). Este valor debe ser menor que el 106 % de la **MAWP**.

Esto no implica necesariamente que la **MAWP** sea mayor que todos los valores de set de las válvulas. Podría suceder que fuera menor que alguno. En el ejemplo, si la capacidad de descarga total se lograra en 102 bar(g) (es decir: permitiendo sólo un 2 % -menor al 6 % máximo- de incremento de presión para la válvula que abre última), podría darse el valor $MAWP = 95 \text{ bar(g)}$.

En el apartado **PG-67.2**

Cabe recordar aquí que el código requiere que cualquier presión operativa, permanente o transitoria, no debe superar la **MAWP**, y que el uso de los dispositivos de alivio es únicamente para situaciones imprevistas.

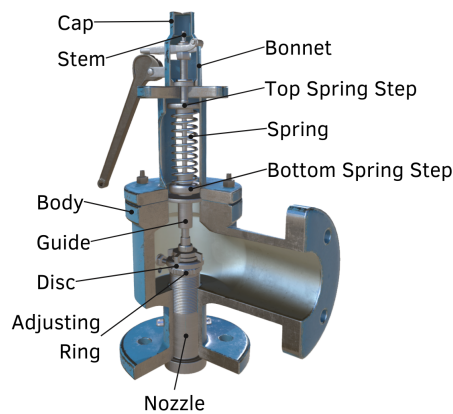


Figura 11: *TBD*.

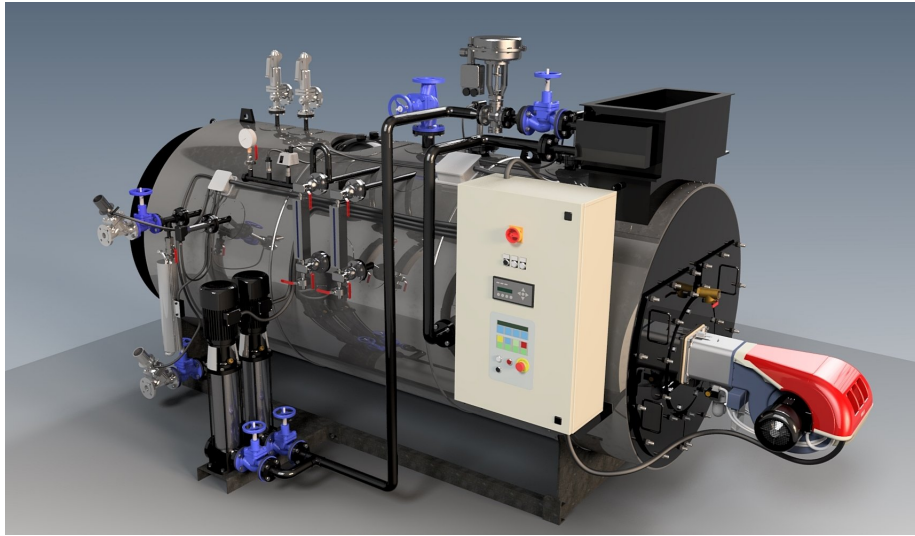


Figura 12: *TBD*.

6. Comentarios finales y conclusiones

Poner aca todo lo que dejamos por afuera, o mencionar algunas de las partes.
Concluir algo.

7. Anexo

7.1. Incluir Archivo Binario

Puedes descargar el archivo binario haciendo clic en el enlace a continuación:



graph.EES

Referencias

- [1] ASME (2023), *Boiler and Pressure Vessel Code (An International Code) - Section I "Rules for Construction of Power Boilers"*, ASME.
- [2] ASME (2023), *Boiler and Pressure Vessel Code (An International Code) - Section II "Materials" - Part A "Ferrous Material Specifications Volume 1 & 2"*, ASME.
- [3] ASME (2023), *Boiler and Pressure Vessel Code (An International Code) - Section II "Materials" - Part D "Properties (Metric)"*, ASME.
- [4] ASME (2023), *Boiler and Pressure Vessel Code (An International Code) - Section VII "Rules for Construction of Pressure Vessels" - Division 1*, ASME.
- [5] MacKay, J. & Pillow, J. (2011), *Power Boilers - A guide to Section I of the ASME Boiler and Pressure Vessel Code*, 2nd ed., ASME Press.
- [6] Rao, K. R. (ed.) (2018) *Companion Guide to the ASME Boiler and Pressure Vessel Codes - Vol. 1*, 5th ed., ASME Press.