
7 DISEÑO DE EQUIPOS

A continuación se presenta el diseño de los distintos equipos que componen el sistema de reducción de óxidos de nitrógeno, desde la descarga de la solución de amoníaco del camión cisterna hasta la inyección del mismo en la cámara del horno. El sistema incluye:

7.1 TANQUE DE ALMACENAMIENTO

En este apartado se va a incluir la legislación aplicable al almacenamiento de solución acuosa de amoníaco, elementos de seguridad, una breve descripción del proceso de llenado del tanque (descarga del camión cisterna) y otras consideraciones a tener en cuenta en el diseño.

7.1.1 Legislación aplicable al almacenamiento de solución de amoníaco

- Real Decreto 379/2001, de 6 de abril, por el que se aprueba Reglamento de almacenamiento de productos químicos y sus instrucciones técnicas complementarias MIE-APQ-001, MIE-APQ-002, MIE-APQ-003, MIE-APQ-004, MIE-APQ-005, MIE-APQ-006 y MIE-APQ-007; que deroga a los R.D. 668/1980 y R.D. 3485/1983 de regulación del almacenamiento de productos químicos.

El reactivo que se almacena está clasificado como producto tóxico y corrosivo, por tanto, para el diseño se tendrán en cuenta las MIE-APQ-006 y MIE-APQ-007. Se diseñará atendiendo a la más restrictiva.

7.1.2 Llenado del tanque (descarga del camión cisterna)

El proceso de llenado del tanque o descarga del camión cisterna, comienza con la conexión de la estación de descarga a las bridas de la cisterna (manguera de líquido y retorno de vapor), que por seguridad deberá estar puesta a tierra antes de iniciar la operación. Ambas mangueras estarán conectadas al tanque de almacenamiento.

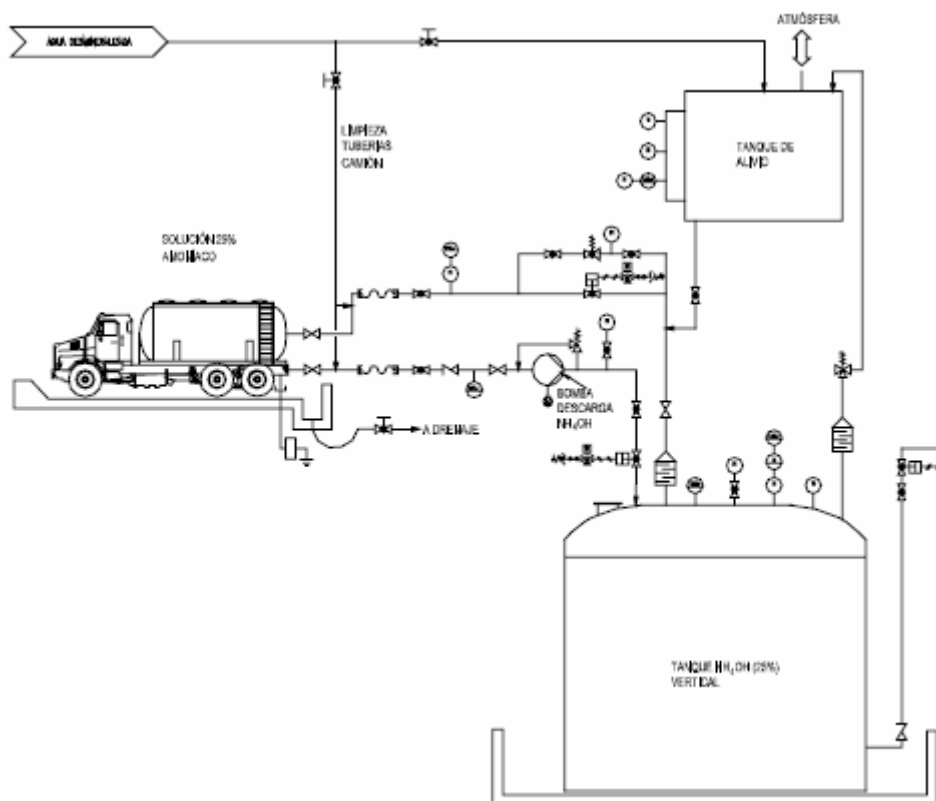
La zona de conexión de mangueras a la cisterna dispondrá de una losa rebajada que servirá de balsa de retención de posibles derrames de amoníaco.

Antes de comenzar el proceso, la presión de vapor en la cisterna debe ser controlada. En caso de superarse el valor establecido en el set point, la sobrepresión se elimina a través de la válvula de alivio del tanque.

Una bomba de descarga se encarga del trasvase de la solución de la cisterna al tanque de almacenamiento.

Un panel ubicado en la zona de descarga, permite el control de la operación incluyendo señales de alarma y de nivel de llenado del tanque. El área dispondrá de ducha de seguridad y lavaojos para actuar rápidamente en caso de accidente.

Figura 7.1. Esquema del almacenamiento de amoníaco



7.1.3 Elementos de seguridad

- Conexiones: las conexiones de llenado y vaciado tendrán válvulas de cierre instaladas lo más cerca posible del punto de conexión.
- Válvula de seguridad
- Indicador de nivel
- Alarma de alta y baja presión: se dispondrán alarmas independientes de alta y baja presión con señalización óptica y acústica.
- Toma de tierra

7.1.4 Construcción

- Material: el almacenamiento de la solución de amoníaco se realiza en un tanque de acero al carbono (ASTM A-105).
- Diseño del tanque: se va a realizar mediante la norma API estándar 650, según el Apéndice A de diseño para tanques pequeños.

La fórmula a aplicar para calcular el espesor de pared, en unidades SI, en operación es la siguiente:

$$t_d = \frac{4,9 \cdot D \cdot (H - 0,3) \cdot G}{S_d} + CA$$

Donde:

t_d : espesor de las placas por condición de diseño en operación (mm)

D: diámetro nominal de tanque (m)= 2,5

H: nivel de diseño del líquido (m)=5

G: densidad relativa del líquido almacenado=0,9

S_d : esfuerzo permisible en condición de diseño (MPa), tabla 3-2 API-650

CA: corrosión permisible en condiciones de diseño (MPa)= 3

mm(almacenamiento de líquidos corrosivos)

$$t_d = \frac{4,9 \cdot 2,5 \cdot (5 - 0,3) \cdot 0,9}{157} + 3 = 3,33 \text{ mm}$$

En prueba hidrostática:

$$t_t = \frac{4,9 \cdot D \cdot (H - 0,3)}{S_t}$$

Donde:

t_t : espesor de las placas por condición de diseño en operación (mm)

D: diámetro nominal de tanque (m)= 2,5

H: nivel de diseño del líquido (m)=5

S_t : esfuerzo permisible en condición de diseño (MPa), tabla 3-2 API-650

$$t_t = \frac{4,9 \cdot 2,5 \cdot (5 - 0,3)}{171} = 0,34 \text{ mm}$$

Estos son los espesores mínimos obtenidos, ahora hay que ir a la Tabla A-1a de la norma para ver cual es el espesor mínimo que tendrá el tanque. En esta tabla se entra con el valor de capacidad del tanque, se necesita un almacenamiento superior a 22 m^3 , con un margen de, al menos, el 20 % ($26,4 \text{ m}^3$). En la tabla el primer valor superior que aparece es 38 m^3 . Para este valor, con un diámetro de 3 m y una altura de 5,4 m se obtienen 3 anillos de 1800 mm.

En la tabla siguiente, Tabla A-2a, se indica el espesor mínimo. Entrando con los datos anteriores, diámetro de 3 m y una altura de 5,4 m, el espesor mínimo es de 5,0 mm.

A-2

API STANDARD 650

Table A-1a—Typical Sizes and Corresponding Nominal Capacities (m³)
for Tanks with 1800 mm Courses

Column 1	Column 2	Column 3	Column 4	Column 5	Column 6	Column 7	Column 8	Column 9	Column 10	Column 11
Tank Diameter m	Capacity per m of Height m ³	Tank Height (m) / Number of Courses in Completed Tank								
		3.6 / 2	5.4 / 3	7.2 / 4	9 / 5	10.8 / 6	12.6 / 7	14.4 / 8	16.2 / 9	18 / 10
3	7.07	25	38	51	64	76	—	—	—	—
4.5	15.9	57	86	115	143	172	—	—	—	—
6	28.3	102	153	204	254	305	356	407	—	—
7.5	44.2	159	239	318	398	477	557	636	716	795
9	63.6	229	344	458	573	687	802	916	1,031	1,145
10.5	86.6	312	468	623	779	935	1,091	1,247	1,403	1,559
12	113	407	611	814	1,018	1,221	1,425	1,629	1,832	2,036
13.5	143	515	773	1,031	1,288	1,546	1,804	2,061	2,319	2,576
15	177	636	954	1,272	1,590	1,909	2,227	2,545	2,863	3,181
18	254	916	1,374	1,832	2,290	2,748	3,206	3,664	4,122	4,580
										<i>D = 18</i>
21	346	1,247	1,870	2,494	3,117	3,741	4,364	4,988	5,609	—
24	452	1,629	2,443	3,257	4,072	4,886	5,700	6,514	<i>D = 20</i>	—
27	573	2,061	3,092	4,122	5,153	6,184	7,215	<i>D = 22</i>	—	—
30	707	2,545	3,817	5,089	6,362	7,634	<i>D = 26</i>	—	—	—
36	1,018	3,664	5,497	7,329	9,161	<i>D = 30</i>	—	—	—	—
					<i>D = 36</i>					
42	1,385	4,988	7,481	9,975	—	—	—	—	—	—
48	1,810	6,514	9,772	11,966	—	—	—	—	—	—
54	2,290	8,245	12,367	<i>D = 46</i>	—	—	—	—	—	—
60	2,827	10,179	15,268	—	—	—	—	—	—	—
66	3,421	12,316	18,303	—	—	—	—	—	—	—
										<i>D = 62</i>

Note: The nominal capacities given in this table were calculated using the following formula:

In SI units:

$$C = 0.785D^2H$$

where

C = capacity of tank, in m³,
 D = diameter of tank, in m (see A.4.1),
 H = height of tank, in m (see A.4.1).

The capacities and diameters in italics (Columns 4–11) are the maximums for the tank heights given in the column heads, based on a maximum permissible shell-plate thickness of 12.5 mm, a maximum allowable design stress of 145 MPa, a joint efficiency of 0.85, and no corrosion allowance (see A.4.1).

A-4 API STANDARD 650

Table A-2a—Shell-Plate Thicknesses (mm) for Typical Sizes of Tanks with 1800 mm Courses

Column 1	Column 2	Column 3	Column 4	Column 5	Column 6	Column 7	Column 8	Column 9	Column 10	Column 11	Column 12
Tank Diameter m	Tank Height (m) / Number of Courses in Completed Tank										Maximum Allowable Height for Diameter ^a m
	1.8/1	3.6/2	5.4/3	7.2/4	9/5	10.8/6	12.6/7	14.4/8	16.2/9	18/10	
3	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	—	—	—	—	—
4.5	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	—	—	—	—	—
6	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	—	—	—
7.5	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.3	—
9	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.7	6.3	—
10.5	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.1	5.9	6.6	7.4	—
12	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.9	6.7	7.6	8.4	—
13.5	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.6	6.6	7.6	8.5	9.5	—
15	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.3	7.3	8.4	9.5	10.6	—
18	6.0	6.0	6.0	6.0	6.2	7.5	8.8	10.1	11.4	—	17.8
21	6.0	6.0	6.0	6.0	7.3	8.8	10.3	11.8	—	—	15.3
24	6.0	6.0	6.0	6.6	8.3	10.0	11.7	—	—	—	13.4
27	6.0	6.0	6.0	7.4	9.3	11.3	—	—	—	—	11.9
30	6.0	6.0	6.0	8.2	10.4	12.5	—	—	—	—	10.8
36	8.0	8.0	8.0	9.9	12.5	—	—	—	—	—	9.0
42	8.0	8.0	8.5	11.5	—	—	—	—	—	—	7.8
48	8.0	8.0	9.7	—	—	—	—	—	—	—	6.9
54	8.0	8.0	10.9	—	—	—	—	—	—	—	6.1
60	8.0	8.0	12.2	—	—	—	—	—	—	—	5.5
66	10.0	10.0	—	—	—	—	—	—	—	—	5.1

^aBased on a maximum permissible shell-plate thickness of 12.5 mm, a maximum allowable design stress of 145 MPa, a joint efficiency of 0.85, and no corrosion allowance.
Note: The plate thicknesses shown in this table are based on a maximum allowable design stress of 145 MPa, a joint efficiency of 0.85, and no corrosion allowance (see A.4.1).

- Palca de identificación: el tanque debe estar identificado con una placa en la que aparecen varios datos del mismo y que es suministrada por el fabricante. En la Figura 7.2 se puede ver dicha placa.

Figura 7.2. Placa de identificación del tanque de almacenamiento

API STANDARD 650			
APPENDIX		YEAR COMPLETED	
EDITION		ADDENDUM NO.	
NOMINAL DIAMETER		NOMINAL HEIGHT	
MAXIMUM CAPACITY		DESIGN LIQUID LEVEL	
DESIGN SPECIFIC GRAVITY		DESIGN METAL TEMP.	
DESIGN PRESSURE		MAXIMUM OPERATING TEMP.	
MANUFACTURER'S SERIAL NO.		PARTIAL STRESS RELIEF	
		PURCHASER'S TANK NO.	
FABRICATED BY			
ERECTED BY			
SHELL COURSE	MATERIAL		

7.1.5 Obra civil

- **Cimentación:** los tanques se cimentarán sobre un anillo de hormigón armado según el perímetro del tanque, con material de relleno compactado en el espacio interior. cuando las condiciones del terreno no lo permitan, se construirá una losa de apoyo de hormigón armado soportada por pilotes. Entre fondo y cimentación se dispondrá un aislamiento resistente a la compresión y con bajo coeficiente de fricción que permita los desplazamientos relativos del fondo.

- **Cubeto:** la pared del cubeto será de hormigón, serán estancas y deberán resistir, como mínimo, la presión correspondiente a la altura de líquido. Se dispondrá de los medios necesarios para drenar el agua que pueda quedar embalsada en caso de lluvia. La superficie tendrá una pendiente mínima del 1 por 100 hacia el pozo de drenaje. El cubeto tendrá la capacidad suficiente como para retener el volumen de líquido almacenado en el tanque. La distancia mínima horizontal entre la pared mojada del recipiente y el borde interior de coronación del cubeto será como mínimo de 1,5 metros. Las paredes del cubeto deben tener una altura máxima de 1,8 m y la capacidad debe ser de 38 m³, la base del cubeto será cuadrada, teniendo en cuenta el espacio que ocupa el tanque, resultan unas dimensiones de 1,8 x 7,6 x 7,6 m.

- **Distancia a otras instalaciones:** se distinguen dos casos:

- Entre las propias instalaciones de almacenamiento de líquidos tóxicos no existen requisitos mínimos de distancias.

- Con respecto a otras instalaciones, en la tabla siguiente se indican las distancias exigidas.

	Clase de producto		
	T+	T	Xn
Unidades de proceso, edificios propios, hornos, calderas, estaciones contra incendios, bombas, balsas separadoras de inflamables y cargadero de inflamables (clases A y B).	15	8	4
Vallado de la planta.	10	5	3
Límites de propiedades exteriores en las que puedan edificarse y vías de comunicación pública (ver nota).	20	10	5
Locales y establecimientos exteriores de pública concurrencia (ver nota).	30	15	10

7.1.6 Sistema de venteo y alivio de presión

El tanque dispondrá de un venteo o alivio de presión, que tendrá un tamaño igual al mayor de las tuberías de llenado o vaciado, en ningún caso inferior a 35 mm. Este venteo va a un tanque de recuperación, que contiene una solución ácida

7.2 BOMBAS

En principio el tipo de bomba adecuada para este proyecto sería una centrífuga, pero debido a los pequeños caudales resultantes no se ha encontrado ningún modelo que satisficiera las necesidades.

Después de consultar varios catálogos, se ha seleccionado una bomba dosificadora, pues reúne las características requeridas. El modelo de bomba se elige a partir del caudal y altura que debe proporcionar.

El caudal que debe proporcionar la bomba es de 30,7 L/h y la altura, calculada en el apartado 6.7, 60.6 metros, en términos de presión resultan 5,5 bars.

Con estos datos, el modelo más apropiado es PS 18/25 a 88 r.p.m., que es capaz de dar 39 L/h a 32 bars.

En el Anexo II se incluye el catálogo.

7.3 TUBERÍAS, VÁLVULAS, OTROS

7.3.1 Tuberías

El sistema consta de dos redes de tuberías, una para el abastecimiento de la solución de amoniaco y otra para el vapor.

En el caso del reactivo, hay una rama principal que sale del tanque de almacenamiento y posteriormente se bifurca en tres, una para cada nivel de inyección; éstas a su vez se dividen en cuatro tramos que llevarán el amoniaco a las lanzas de pulverización. El diámetro de las tuberías será el mínimo posible, 1/8", debido al bajo caudal que van a transportar. Por este problema la velocidad de diseño no es la óptima, sino la resultante según el caudal y el diámetro que se tienen.

El material empleado es acero al carbono, ASTM A-106 de schedule 40.

Para el vapor, la distribución es similar, ya que también se suministra dicho fluido a cada una de las lanzas, junto con el reactivo. El diámetro de estas tuberías será de 1/8", para que el vapor circule a una velocidad de 15 m/s, aproximadamente. El material para estas tuberías también es acero al carbono ASTM A-106.

7.3.2 Válvulas

En este proyecto se emplean válvulas de bola (válvula de corte) y de asiento (válvula de regulación).

Válvula de globo: el material será acero al carbono, ASTM A-105 con entrada de 1/4", necesitará un elemento de ajuste a la tubería.

Válvula de retención: será de acero al carbono, ASTM A-105 con entrada de 1/4", necesitará elemento de ajuste a la tubería.

7.3.3 Otros

Otros elementos que se van a emplear son:

- o Codos de 90°: serán de acero al carbono ASTM A-105.
- o Elementos de expansión: acero al carbono ASTM A-105.
- o Elementos de reducción: acero al carbono ASTM A-105.

7.4 CONTROL

El sistema de reducción SNCR se desarrolla como consecuencia de la limitación, por parte de la administración, de las emisiones de óxidos de nitrógeno a la atmósfera en instalaciones donde se da una combustión, en este caso una planta incineradora de residuos. Por tanto, esa es una de las variables a controlar: la concentración de NO_x a la salida de chimenea.

Para reducir esa concentración se emplea una solución de amoníaco, compuesto tóxico cuya emisión no está específicamente limitada por la legislación, pero sí hay una concentración de referencia dada por el documento BREF para este tipo de instalaciones.

Por tanto, los objetivos del sistema de control diseñado son:

- Conseguir que el percentil 97 de los valores medios semihorarios de emisiones de NO_x estén por debajo de 200 mg/Nm^3 al 11 % de oxígeno y gas seco en condiciones normales, límite impuesto por la legislación.
- Lograr que el escabullimiento de amoníaco no supere los 10 mg/Nm^3 , emisión de referencia dada por el BREF de incineradoras de residuos municipales.

Para conseguir los objetivos de control se van a emplear las estrategias de control: control anticipativo, control por realimentación y control por proporción, en un sistema de control automático. Se diseña un sistema manual para el caso de fallo del control automático.

Las válvulas de control, tanto las de accionamiento manual como las de accionamiento automático, serán de asiento. Las de corte serán válvulas de bola.

El sistema de control se regirá por las siguientes reglas:

- Si la concentración de NO_x en chimenea es superior a 180 mg/Nm^3 , se abre la válvula de control, aumenta el caudal de solución de amoníaco y disminuye la cantidad de NO_x .

- Si la concentración de NO_x en chimenea es inferior a 180 mg/Nm^3 , se cierra la válvula de control, disminuye el caudal de solución de amoníaco.
- Si la concentración de NH_3 en chimenea es superior a 8 mg/Nm^3 , se cierra la válvula de control disminuyendo el aporte de solución de amoníaco.

7.4.1 Sistema manual

El sistema de control manual se utilizará en caso de fallo del sistema automático, operará de forma similar a éste, con la diferencia de que un operario tendrá que actuar como controlador, es decir, accionará las válvulas manualmente.

7.4.2 Sistema automático

El control automático medirá en continuo con analizadores de proceso, tanto el contenido de NO_x como de amoníaco a la salida de los gases y actuará sobre el caudal de reactivo y el caudal de aire, accionando las válvulas automáticas de control.

Para la acción de control se va a utilizar un controlador PI, que asegura una respuesta energética y, además, elimina los errores en régimen permanente gracias a la acción integral. No se introduce acción derivativa, porque ésta ralentiza mucho la acción de control y sólo se debe aplicar cuando se den cambios rápidos. Puesto que se trata de un proceso térmico, la acción derivativa no aportaría ninguna ventaja.

Control por realimentación: se mide la concentración de NO_x en chimenea, si es superior a 180 mg/Nm^3 , el controlador actúa sobre la electroválvula, abriéndose de manera que se aporta una mayor cantidad de solución de amoníaco. En el caso contrario, si disminuye la emisión por debajo de un cierto valor, el controlador actuará también, disminuyendo el caudal de reactivo, para optimizar el proceso reduciendo coste y la emisión de amoníaco por chimenea. El control de emisión de amoníaco se realizará de igual modo; si aumenta el

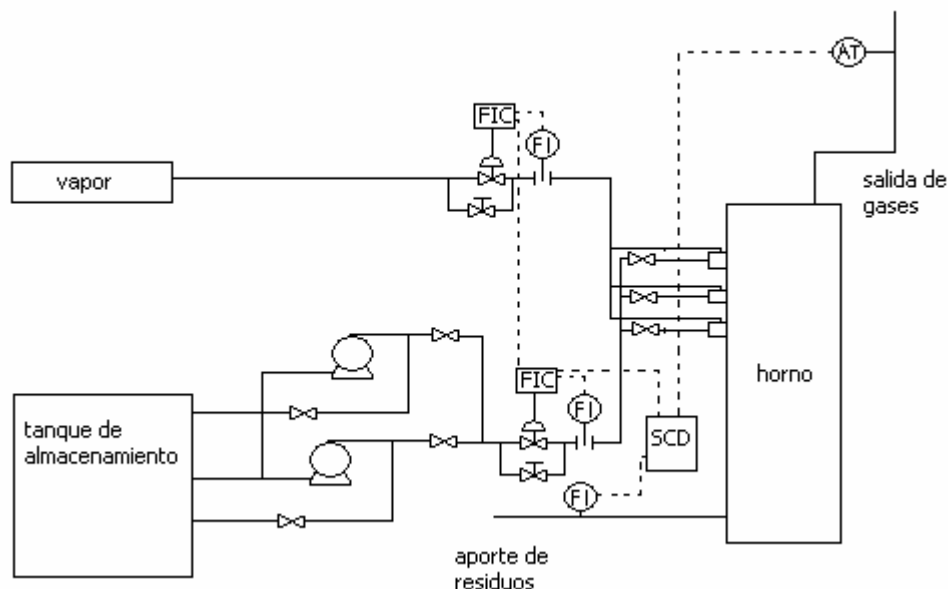
amoníaco por chimenea, se reducirá su aporte accionando sobre la válvula de control.

Control anticipativo: la cantidad de NO_x generada en el horno depende directamente de la masa de residuos introducidos, con lo cual si se mide dicho parámetro, cualquier variación que se produzca se detecta mucho antes que el cambio en la concentración en chimenea, así el controlador actuará más rápidamente, evitando que en algún momento no se cumpla la legislación.

Control por proporción: a medida que se varía el caudal de aporte de solución de amoníaco al horno, también se debe variar el caudal de aire que lo acompaña para la pulverización. Este tipo de control hace que se mantenga la proporción entre ambos fluidos, de manera que si aumenta el caudal de reactivo, también lo hará el de aire comprimido, y viceversa.

En la Figura 7.3 se muestra un esquema simplificado del sistema de control diseñado.

Figura 7.3. Esquema del sistema de control



7.5 P&I

El P&I es un diagrama donde se representan las tuberías y elementos de instrumentación de la instalación. En el Plano 7.1 se muestra el P&I correspondiente al sistema SNCR.

PLANO 7.3

P&I DE LA INSTALACIÓN

7.6 BOQUILLAS

Aquí se especifica el modelo de boquilla seleccionado. Como ya se indicó anteriormente, es una boquilla de doble fluido (twin- fluid) con aporte de vapor para la atomización.

En concreto es el modelo SU13, de acero inoxidable y con entrada de 1/8". Es un inyector de atomización con aire, en este caso vapor, de mezcla interna. El caudal que puede pulverizar es de 4,5 L/h a 2,8 bars (manométrica), con un consumo de vapor de 10,76 L/min.

En la figura 7.4 se puede ver que tipo de atomizador es. En el Anexo III aparece el catálogo con sus especificaciones.

Figura 7.4. Atomizador de doble fluido con mezcla interna

