



Universidad
del País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea



ZTF-FCT
Zientzia eta Teknologia Fakultatea
Facultad de Ciencia y Tecnología



FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA. LEIOA

TRABAJO FIN DE GRADO

INGENIERÍA QUÍMICA

DISEÑO PRELIMINAR DE UN EQUIPO
DE GENERACIÓN DE MEZCLAS
AEROSOL/VAPOR

Alumno: Júdez López, Xabier

Fecha: Junio 2015

Director

Dr. José Antonio González Marcos

Curso Académico

2014/2015

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVOS.....	1
3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	2
3.1 DEFINICIÓN DE AEROSOL.....	2
3.2 ESTABILIDAD DE AEROSOLES.....	2
3.3 GENERACIÓN DE AEROSOLES.....	3
3.4 PRESIÓN DE VAPOR.....	3
3.5 CÁLCULO DE LA CONCENTRACIÓN DE SATURACIÓN.....	4
3.6 VARIACIÓN DE TAMAÑO DE PARTÍCULA.....	5
3.7 LÍMITES DE EXPOSICIÓN.....	6
3.8 DIAGRAMA PSICOMÉTRICO.....	6
3.9 VARIACIÓN DE TEMPERATURA.....	8
3.10 ESTIMACIÓN DE COSTES.....	9
3.10.1 Método de Lang.....	9
4. PROCEDIMIENTO DEL DISEÑO.....	10
4.1 OBTENCIÓN DEL COMPUESTO CLAVE.....	11
4.1.1 Familia de los isocianatos.....	11
4.1.1.1 Tolueno 2,4-diisocianato.....	11
4.1.2 Familia de los glicoles.....	12
4.1.2.1 Etilenglicol.....	13
4.1.2.2 Trietilenglicol.....	13
4.1.2.3 Dietilenglicol.....	13
4.1.2.4 Propilenglicol.....	16
4.1.3 Otras alternativas.....	16
4.1.4 Conclusión.....	16
4.2 DIFERENTES ALTERNATIVAS DE GENERACIÓN.....	17
4.2.1 Bombeo y acondicionamiento del aire.....	17
4.2.2 Dosificación de compuesto y agua.....	17
4.2.2.1 Mediante un baño térmico.....	17
4.2.2.2 Mediante una válvula Venturi con regulación.....	17
4.2.2.3 Mediante una bomba de jeringa.....	18
4.2.3 Generación de aerosol.....	18
4.2.3.1 Mediante condensación.....	18

4.2.3.2 Mediante descompresión con válvula	18
4.3 SELECCIÓN DE TÉCNICA.....	19
4.4 DESARROLLO DE LA TÉCNICA.....	20
4.4.1 Cálculos preliminares	20
4.4.1.1 Balance de masa	20
4.4.1.2 Balance de energía	21
5. EQUIPOS	23
5.1 EQUIPOS PRINCIPALES	23
5.2 CONEXIONES	24
5.3 ELEMENTOS DE CONTROL	24
5.4 ELEMENTOS AUXILIARES.....	24
6. ESTIMACIÓN DE COSTES	27
6.1 COSTE LOS EQUIPOS.....	27
6.2 COSTE TOTAL DEL PROYECTO.....	30
7. CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN.....	30
8. NOMENCLATURA.....	31
9. BIBLIOGRAFÍA	32

1. INTRODUCCIÓN

El Centro Nacional de Verificación de Maquinaria del Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (CNVM-INSHT) está interesado en profundizar en el diseño, verificación y estandarización de equipos de protección para ambientes laborales en los que coexisten vapores y aerosoles de contaminantes. Para esta línea precisa dotarse de un equipo generador de mezclas aerosol/vapor.

El objetivo de este proyecto es establecer, mediante un prediseño, las especificaciones y requisitos que deberá cumplir el sistema para satisfacer las necesidades que tiene el CNVM-INSHT, detectar cuáles serían las mejores soluciones para su configuración y realizar una preselección de los componentes principales para preparar un informe que permitan cuantificar el esfuerzo necesario para el diseño, adquisición de componentes, montaje y puesta en marcha del equipo.

Este informe deberá recoger información de las distintas opciones para generar estas mezclas en condiciones de presión, temperatura y humedad seleccionadas y proponer un diseño preliminar que abarque la etapa de generación aerosol/vapor.

2. OBJETIVOS

Para alcanzar los objetivos perseguidos se propone realizar las siguientes tareas:

- Selección de los compuestos modelo.
- Selección de las variables de diseño claves.
- Valoración de las medidas de seguridad asociadas a dichos productos.
- Balances de materia y energía preliminares para el diseño.
- Análisis de las distintas alternativas para los componentes del equipo atendiendo a criterios de facilidad de uso y control, estabilidad, reproducibilidad, versatilidad, coste,...
- Priorización de criterios y selección de componentes. Fijación de las características del equipo.
- Prediseño del sistema de generación de mezclas aerosol/vapor.

3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

En este apartado se desarrollarán los conceptos teóricos necesarios para el desarrollo de este proyecto.

3.1 DEFINICIÓN DE AEROSOL

Como describe el propio CNVM-INSHT (2006) los aerosoles son suspensiones de partículas (de entre 0,001 μm y 100 μm) sólidas o líquidas en un gas. Enfocado en el ámbito laboral, los contaminantes químicos presentes en los lugares de trabajo se pueden encontrar en forma de suspensiones de partículas sólidas o líquidas en el aire, es decir en forma de aerosol. Los aerosoles se pueden generar en una gran variedad de actividades y procesos industriales, por lo que la naturaleza, tamaño y concentración de partículas que constituyen un aerosol industrial es de una enorme variedad, ya que dependen de las características de los productos utilizados y de las operaciones implicadas en la actividad industrial.

Considerando el procedimiento mediante el cual se generan las partículas o si las partículas generadas son sólidas o líquidas se utilizan diferentes términos para los aerosoles. Así, se llama “polvo” (dust) a una suspensión de partículas sólidas en el aire generadas por procesos mecánicos; “niebla” (mist), a una suspensión de partículas líquidas en el aire generadas por una acción mecánica sobre un líquido (arrastre de gas, salpicaduras, pulverización) y “humo” (smoke), a una suspensión de partículas sólidas en el aire generada en los procesos de combustión incompleta. El humo metálico (fume) corresponde a la suspensión de partículas sólidas en el aire, generadas por la condensación de un estado gaseoso originado tras la sublimación o la volatilización del metal. Este proyecto se centrará en la generación de nieblas.

Para evaluar la exposición a un aerosol es importante tener en cuenta la forma, naturaleza, composición y origen del aerosol, así como los efectos para la salud que pueden resultar de la exposición.

3.2 ESTABILIDAD DE AEROSOLES

La estabilidad de un aerosol es la capacidad de sus partículas para permanecer en suspensión. Depende de la forma, la densidad y carga de la partícula, pero sobre todo de su tamaño (Barrueto, 2006).

Por lo tanto, cuanto más ligera y pequeña sea una partícula mayor será su estabilidad. Las partículas más grandes se depositan, por efecto de la gravedad, en periodos cortos de tiempo, pero las partículas microscópicas pueden permanecer largos periodos de tiempo en suspensión.

Una partícula suspendida en un fluido se ve sometida al bombardeo continuo de las moléculas de éste. Una sola molécula difícilmente podría tener suficiente capacidad para que el efecto sobre la partícula fuera apreciable. En cambio, cuando muchas moléculas chocan con la partícula en la misma dirección y simultáneamente, producen una deflexión observable en su trayectoria, generando en las mismas trayectorias aleatorias. A este movimiento aleatorio se le denomina movimiento Browniano (Lavenda, 1985). Una partícula ligera y pequeña será más susceptible de sufrir variaciones en su trayectoria. Cuando el efecto de estas colisiones es mayor que el de la gravedad estas partículas no tienen a depositarse, por lo que el tiempo que permanecen suspendidas en el fluido es mayor.

De todas formas, como describe el CNVM-INSHT (2006), los aerosoles no son constantes en su composición por tamaño de partícula. El número de partículas por volumen de aire se modifica con el tiempo como consecuencia de la sedimentación de las partículas más grandes, el movimiento browniano y la formación de aglomerados de las partículas más pequeñas. Esto, unido a la variedad de procesos industriales en los que se generan aerosoles, hace que la forma y el tamaño de las partículas que se pueden encontrar en los lugares de trabajo sean muy variables.

3.3 GENERACIÓN DE AEROSOLES

Como se explica en el punto 3.1. los aerosoles en el ámbito de trabajo se pueden generar por diferentes causas, como puede ser la condensación de compuestos presentes en el aire, o el arrastre de partículas sólidas por una corriente gaseosa.

Por otra parte, un ejemplo de equipos de uso diario cuyo objetivo es generar un aerosol son los sprays. Kubo y cols. (2014) emplean un equipo basado en el funcionamiento de estos. El elemento que genera la dispersión de un líquido se denomina atomizador o nozzle. Su funcionamiento es el siguiente: Cuando un líquido se choca perpendicularmente con una corriente gaseosa, se ve obligado a tomar una trayectoria curvada, que dispersa la corriente líquida. Además, esta corriente sufre una fuerte pérdida de carga al verse forzada a pasar por el orificio del atomizador, de un tamaño muy pequeño. Cuanto mayor es la pérdida de carga mayor es la dispersión de este líquido, obteniendo partículas de menor tamaño.

Pese a que Lee y cols. (2008) eligen un método similar en el desarrollo de un equipo de generación de aerosoles, plantean diferentes métodos como:

-Vaporización y condensación: Vaporización del compuesto del que se desea obtener el aerosol y posterior condensación de éste para obtener pequeñas partículas líquidas en suspensión.

-Mediante reacciones químicas: Tras dosificar dos o más compuestos químicos estos reaccionan entre ellos, obteniendo productos en estado líquido o sólido. El pequeño tamaño de estos hace que se mantengan en suspensión. De todas formas, este método tiene aplicaciones muy limitadas, ya que es necesario que el compuesto de interés se sintetice en las condiciones de trabajo.

Otros estudios emplean equipos de microondas (Liu y cols., 2014) o nebulizadores ultrasónicos (Bridges y Taylor, 1998). Estos equipos transmiten energía mediante ondas mecánicas o electromagnéticas intensas que consiguen romper los enlaces moleculares y dividir mezclas líquidas en partículas pequeñas. Estos equipos quedaron inicialmente descartados por el CNVM-INSHT en la reunión mantenida en 1 de octubre de 2014, puesto que son equipos para compuestos muy específicos (diferentes compuestos requieren diferentes frecuencias y longitudes de onda) y que no pueden usarse con mezclas de compuestos.

3.4 PRESIÓN DE VAPOR

Como se describen (Seader y Henley, 2006) la presión de vapor es la presión de la fase gaseosa sobre una mezcla de la fase gaseosa de un líquido/sólido para una temperatura determinada. La P^{vap} indica la presión a la que las velocidades de condensación y la de

evaporación se igualan. A mayor presión que la presión de vapor del compuesto, éste se condensará y a menor presión, éste se evaporará.

Esto indica, a una determinada temperatura, la presión parcial de saturación de un compuesto químico. Si se consigue superar mediante el aumento de la concentración esa presión parcial de saturación, el compuesto se condensará en parte, manteniendo el equilibrio entre las fases gaseosa y líquida/sólida, generando una atmósfera de aerosol.

En resumidas cuentas, si a una determinada temperatura la presión parcial de un compuesto supera la presión de vapor de ese compuesto, este se condensará; si la presión parcial del compuesto es menor que la presión de vapor, éste se evaporará. En ambos casos, el proceso acabará alcanzando el equilibrio.

La presión de vapor es una característica de cada compuesto químico y varía en función de la temperatura. Para determinar ésta, hay diferentes ecuaciones empíricas como las de Raoult, o la de Raoult extendida. En este caso se va a emplear la segunda, cuyo aspecto es:

$$\ln(P^{vap}) = C_1 + \frac{C_2}{T} + C_3 \cdot \ln(T) + C_4 T^{C_5} \quad (1)$$

Las constantes, en este caso, se determinarán (para el rango de temperaturas más adecuado) mediante la base de datos del simulador PRO/II. Las unidades de la presión y la temperatura varían en función de las constantes. La presión de vapor de muchos compuestos se encuentra tabulada; en estos casos se priorizarán los datos experimentales frente a los obtenidos con el simulador.

3.5 CÁLCULO DE LA CONCENTRACIÓN DE SATURACIÓN

Para el cálculo de la concentración de saturación a diferentes temperaturas se partirá de la presión de vapor de cada compuesto en éstas. La presión de vapor es, en otras palabras, la presión de saturación, por lo que mediante la ley de gases ideales se calculará la concentración de saturación de cada compuesto.

En este caso, la cámara de muestreo operará a presión atmosférica, por lo que la ley de gases ideales será aplicable sin necesidad de correcciones. Ya que, como afirman Seader y Henley (2006) las mezclas de gases a bajas presiones (<3.5 atm) y con estructura molecular similar se comportan de manera cercana a los modelos ideales.

Los modelos ideales no tienen en cuenta el volumen que ocupa la molécula, ni las fuerzas que aparecen entre ellas. Las diferentes ecuaciones de estado no ideales incluyen estos aspectos, corrigiendo la ecuación ideal mediante factores. Ejemplo de esto son la ecuación generalizada, la ecuación de Redlich-Kwong, la de Soave-Redlich-Kwong o la de Peng-Robinson. En ellas, los factores de corrección empleados varían con la presión de sistema y la presión crítica y con la temperatura del sistema y la temperatura crítica.

Partiendo de la ley de gases ideales:

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (2)$$

Definiendo P_i como la presión parcial del compuesto, que debe ser igual o superior a la presión de vapor para que este se encuentre, en parte, en fase condensada; n_i como la cantidad de moles del compuesto y V como el volumen total, obtener la concentración de saturación. Para ello P_i será igual a la presión de vapor. Definiendo la concentración molar como n_i/V

(número de moles del compuesto i por unidad de volumen), se podrá obtener a partir de que concentración de compuesto éste saturará el aire y comenzará a condensarse.

$$\frac{n_i}{V} = \frac{P_i}{R \cdot T} \quad (3)$$

Y multiplicando la concentración molar por el peso molecular, PM , se obtendrá la concentración másica. En este caso, por unificar los términos con los empleados por el centro la concentración másica se denominará como SVC .

$$SVC = PM \cdot \frac{n_i}{V} = PM \cdot \frac{P_i}{R \cdot T} \quad (4)$$

3.6 VARIACIÓN DE TAMAÑO DE PARTÍCULA

Como describe el propio CNVM-INSHT (2006) la evaluación de la exposición a los agentes químicos presentes en el aire en forma de partículas requiere considerar, además de su naturaleza, el tamaño de las partículas. Los aerosoles pueden estar constituidos por partículas de similar o de diferente tamaño, denominándose ‘monodispersos’ y ‘polidispersos’, respectivamente. Normalmente, los aerosoles de los lugares de trabajo presentan partículas de tamaño muy diferente y, por lo tanto, se tratará de aerosoles polidispersos.

El tamaño de éstas es importante porque determina la proporción de partículas que penetran en el tracto respiratorio. Además, también determina el lugar de deposición en el aparato respiratorio, es decir, la zona del tracto respiratorio en la que se producen los efectos adversos y en cierta medida los propios efectos depende del tamaño de las partículas. Por esta razón, los valores límite de exposición se pueden definir para una determinada fracción de tamaño de partículas.

En 1985, la ACGIH, siguiendo criterios ISO, desarrollo unos valores límites selectivos que varían con el tamaño de partícula: Particle Size Selective Threshold Limit Value ($PSS-TLV$). Que incluyen la categorías: inspirable, torácica y respirable.

Consecuentemente, los equipos que se utilicen para las tomas de muestra con el fin de evaluar la exposición a los agentes químicos, presentes en el aire en forma de partículas, deberían recoger la fracción de partículas de interés con relación a la definición del correspondiente valor límite.

El tamaño y la forma de las partículas pueden ser muy complejos. Hay, por tanto, muchas formas de definir el tamaño y la forma de las partículas dependiendo de la técnica de medida o de su uso posterior. Uno de los parámetros más utilizados en el estudio de los aerosoles es el diámetro equivalente, que es el diámetro de una esfera que tiene el mismo valor de la propiedad física específica que la partícula irregular que se está midiendo.

La distribución acumulada, para un tamaño de partícula concreto, da el percentil o cantidad total de partículas del aerosol cuyo tamaño de partícula es inferior al dado. En las distribuciones logarítmico-normales acumuladas, la mediana, es decir, el diámetro aerodinámico de la mediana, corresponde al tamaño de partícula del percentil 50 (d_{50}). La distribución de tamaño puede darse número de partículas, ‘diámetro aerodinámico mediana

del recuento' (CMAD) o en masa, se denomina "diámetro aerodinámico mediana de la masa" (MMAD),(CNVM-INSHT 2006).

La estimación de la distribución del tamaño de partícula que se obtendrá cuando se genera artificialmente una atmósfera de aerosol y la evolución de ésta con el tiempo son uno de los mayores desafíos de este campo. Por ejemplo Kalani y Christofides (2002) desarrollaron simulaciones, estimaciones y sistemas de control de procesos en los que se generaban aerosoles mediante reacciones químicas, procesos de nucleación, condensación y coagulación.

Voutilainen y Kaipio (2005), más tarde, trabajaron en simulación de la distribución del tamaño de partícula de aerosoles mediante el método Monte Carlo, ya que la evolución de la distribución con el tiempo sigue tendencias no lineares y no Gaussianas.

De todas formas, la imposibilidad de obtener resultados más allá del ámbito empírico y la dificultad de aplicar los resultados obtenidos más allá de ensayos muy específicos hacen que sea un campo con una evolución muy lenta, y de poco interés en la última década.

Como conclusión, el estudio de este factor es de gran complejidad, y está fuera de lugar en una etapa de prediseño. Simplemente, el equipo deberá tener mecanismos que ayuden a regular el tamaño de partícula y además, estos deben garantizar la reproducibilidad de los ensayos. Si se llevan a cabo diferentes ensayo en condiciones muy similares, la distribución será similar en todos ellos.

3.7 LÍMITES DE EXPOSICIÓN

Para el desarrollo de este equipo los límites de exposición se definirán mediante los valores *TLV*, Threshold Limit Value. Como se ha nombrado en el anterior punto estos valores pueden ser selectivos según el tamaño de partícula, pero en este proyecto se debe emplear el *TLV* más estricto, el que tiene en cuenta todo el rango de tamaño de partículas.

Los valores *TLV* indican la concentración de compuestos químicos a los que un trabajador puede verse sometido día tras día durante una jornada laboral (CNVM-INSHT, 2006).

3.8 DIAGRAMA PSICOMÉTRICO

El diagrama psicométrico sirve para conocer las propiedades termodinámicas del aire húmedo. Los valores del diagrama varían según la altitud, pero habitualmente se emplea el diagrama para nivel del mar (Seader y Henley, 2006). En la Figura 1 (Universidad Tecnológica Nacional, 2010), se muestra un diagrama psicométrico adecuado para los márgenes de trabajo de este proyecto. Si fuera necesario el cálculo de propiedades cuyos valores encuentren fuera del margen de este diagrama, simplemente habría que emplear diagramas similares pero con diferentes límites.

En este diagrama se representan seis propiedades e introduciendo dos de estas seis, se pueden conocer las otras cuatro. En este proyecto interés se centra en calcular la humedad absoluta del aire partiendo de la temperatura y la humedad relativa. La temperatura se introducirá en la escala horizontal, y la humedad relativa se introducirá mediante las líneas curvadas. En el punto en el que las dos trazadas se unen, se trazará una línea horizontal y se leerá en el eje vertical de la derecha, el valor de la humedad absoluta. Mediante este diagrama se calculará la cantidad de agua que debe tener el agua para que la humedad relativa sea la deseada a una temperatura determinada.

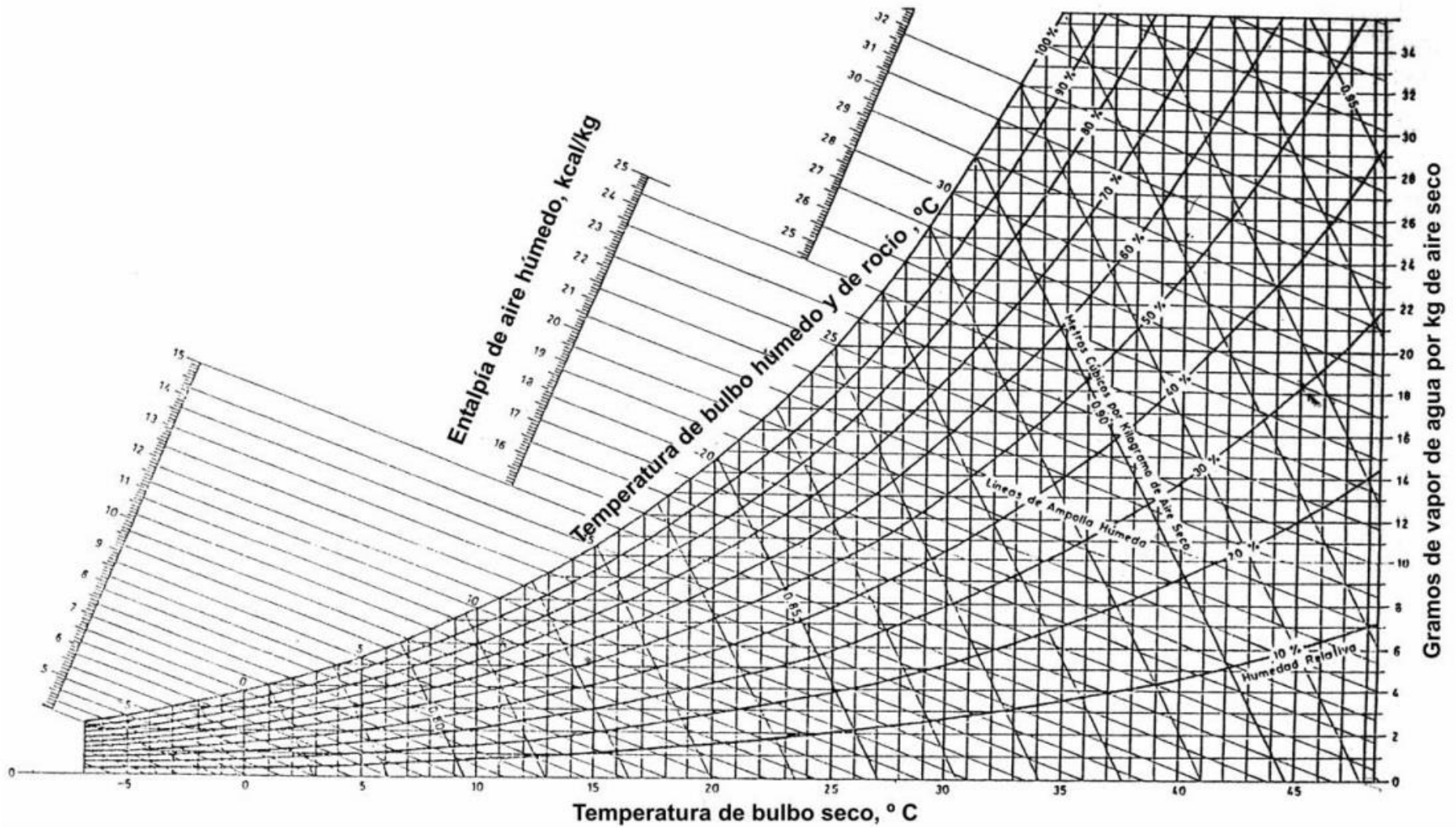


Figura 1 Diagrama psicrométrico para presión atmosférica (Universidad Tecnológica Nacional, 2010)

3.9 VARIACIÓN DE TEMPERATURA

La temperatura de la corriente gaseosa puede variar por diferentes razones como la transferencia de calor con el exterior, los cambios de presión de la corriente o la evaporación de compuestos.

La primera razón, la transferencia con el exterior, es el efecto de la combinación de los efectos de convección y conducción del gas y las tuberías o los diferentes componentes del equipo con el exterior. El alcance de esta transferencia se puede corregir aislando correctamente el equipo y sus elementos, pero jamás se puede eliminar completamente.

Por otra parte, la variación de la presión de la corriente gaseosa en equipos como compresores, expansores o válvulas puede generar importantes cambios de temperatura. De todas formas, la estimación teórica de esta variante es muy compleja, ya que las características de los elementos, como los materiales, la magnitud, el correcto aislamiento o la conductividad de los materiales de los que están fabricados son de suma importancia.

Finalmente cuando se dosifica una cantidad de cualquier compuesto químico en una corriente de aire está se evaporará hasta saturar la corriente gaseosa. Para que el compuesto cambie de fase será necesario una cantidad de calor. Según el primer principio de la termodinámica, si el proceso sucede a presión constante y si las variaciones de energía cinética y potencial se pueden despreciar respecto a las demás, esta cantidad se puede cuantificar mediante la entalpia de vaporización, ΔH_{vap} , y la cantidad de compuesto que cambia de fase, n_{vap} (Ayastuy, 2008).

$$Q = n_{vap} \cdot \Delta H_{vap} \quad (5)$$

Los núcleos líquidos deben ser diminutos, esto es, con una gran superficie de transferencia de materia. Así la transferencia de materia se verá muy favorecida y se dará en un periodo de tiempo muy corto; esto es, el proceso será casi instantáneo.

El calor necesario, Q , será absorbido del aire, generando un descenso de temperatura en éste. Este descenso puede cuantificarse partiendo de esta ecuación. Donde m es la cantidad de aire, c_p es el calor específico y T_0 y T las temperaturas final e inicial.

$$Q = \int_{T_0}^T m \cdot c_p \cdot dT \quad (6)$$

Si las cantidades de aire y compuesto se dosifican de una manera constante en el tiempo, el calor específico se toma como constante, ya que su variación en las temperaturas de trabajo no es considerable, y el descenso de temperatura, ΔT , se define como la diferencia entre la temperatura final e inicial:

$$T - T_0 = \Delta T = \frac{Q}{m \cdot c_p} \quad (7)$$

Así se puede estimar el descenso de temperatura generado por la evaporación.

3.10 ESTIMACIÓN DE COSTES

Como describen Turton y cols. (2003) es importante conocer la inversión que va a suponer un proyecto. El capital total de inversión, C_{TOT} , es la suma del capital inmovilizado, I , y el capital circulante, P_c .

$$C_{TOT} = I + P_c \quad (8)$$

El inmovilizado, I , es el coste necesario para construir el proceso. Es decir, son los bienes que se adquieren una sola vez y se usan durante todo el proceso. Ejemplo de esto son el gasto en adquisición de maquinaria y aparatos, la instalación de éstos, los equipos de instrumentación y control, las tuberías y uniones y los equipos y materiales eléctricos.

Por su parte, el capital circulante, P_c , es el capital necesario para operar la planta. Ejemplo de esto son las compras de materias primas o el dinero en metálico para hacer frente a gastos como salarios. En el caso de este proyecto, la magnitud este factor es despreciable, ya que la adquisición de compuestos químicos para el CNVM-INSHT está incluida en una partida presupuestaria diferente, y no será necesario ningún gasto extra en nóminas de empleados. Por lo que el total de la inversión será el valor del inmovilizado.

Las estimaciones del capital de inversión se hacen en determinados momentos de la vida del proyecto, dependiendo de la información que se posee en ese momento y del coste que se supondrá la misma. Normalmente se consideran tres tipos de estimaciones: del orden de magnitud, preliminares y definitivas.

En una etapa de prediseño, se estudia la viabilidad de diferentes opciones y se desarrolla a grandes rasgos aquellas viables, por lo que la información disponible permite llevar a cabo estimaciones preliminares. El error permitido en estas etapas suele ser alrededor del 15%.

3.10.1 Método de Lang

Pese a que el total del inmovilizado, I , se puede calcular de mediante diferentes métodos, como el del coeficiente de circulación, el de la inversión unitaria o el método de Williams, lo más correcto en el diseño de equipos de laboratorio (equipos que no producen ingresos tras ser instalados) es el empleo de métodos de factores. Estos métodos se basan en multiplicar el coste de los equipos principales por factores.

El más común es el método de Lang. En este método se suma el coste total de los principales equipos, C_E , y se por el factor apropiado, f_L , en cada caso (Turton y cols., 2003)

$$I = f_L \cdot \sum C_E \quad (9)$$

Según Lang, este factor es 3,10 para plantas que procesas sólidos, 3,63 para plantas que procesas sólidos y líquidos, y 4,74 para las que procesan fluidos. Más tarde en 1981 revaluó el factor de Lang basándose en datos reales, y encontró que un factor de 3,45 podría ser útil para todo tipo de plantas, puesto que la desviación estándar es de 0,47.

En resumen, este método permite estimar mediante la partida de los equipos principales el coste total del inmovilizado, puesto que tiene en cuenta elementos como el coste elementos de control e instrumentación, el coste de tuberías, el coste del sistema eléctrico y el coste de la construcción y puesta en marcha.

Este método no incluye el coste de la parcela donde se edifica el equipo, pero en el caso de este proyecto se construirá en un lugar ya habilitado, sin necesidad de adquirir nuevos terrenos.

4. PROCEDIMIENTO DEL DISEÑO

El 1 de octubre de 2014, tras la reunión en el CNVM-INSHT, se acordó lo siguiente:

- Este proyecto tiene como objetivo la realización de un prediseño. El proyecto debe estudiar las diferentes alternativas de generación y desarrollar aquellas que sean viables de manera preliminar, sin profundizar en la ingeniería de detalles, para definir finalmente que opción a desarrollar.
- El diseño se centrará únicamente en la generación de aerosoles líquidos, pues ya existe en el centro un sistema generador de aerosoles de partículas sólidas.
- Se busca que la mezcla aerosol/vapor llegue a una cámara de muestreo, con salidas para introducir sondas, filtros y diferentes medidores.
- Las pruebas se llevan a cabo a 15°C y 40°C y en ambos casos a humedades relativas del 20% y 80%. El caudal de aire será de alrededor de 10 NI/min.
- Las concentraciones de los compuestos deben estar en el rango $0.1 \cdot TLV - 2 \cdot TLV$, por lo que se emplearán compuestos que formen aerosoles en este rango en las condiciones establecidas en el anterior punto.
- Como punto de partida se investigará la posibilidad de trabajar con la familia de los isocianatos. Si esto no es posible, se investigará la posibilidad de trabajar con la familia de los glicoles.

El esquema general del equipo completo sería el descrito en la Figura 2:

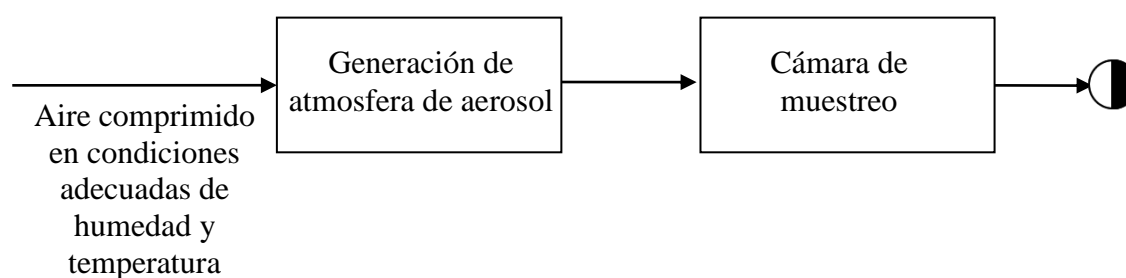


Figura 2 Esquema general de equipo mediante diagrama de bloques

En la reunión se acordó, además, que este proyecto se centrara exclusivamente en la generación de la atmosfera de aerosol. El acondicionamiento del aire se llevará a cabo mediante los equipos actualmente disponibles en el CNVM- INSHT. Además, la cámara y equipos de muestreo serán totalmente análogos a los empleados en un equipo similar de generación de aerosoles de partículas sólidas. Finalmente, la mezcla será emitida a la atmosfera sin tratamiento previo, por decisión exclusiva del CNVM- INSHT.

En el diseño se seleccionará un compuesto clave, se compararán diferentes técnicas de generación y se elegirá la más adecuada. Finalmente, se desarrollarán los puntos más básicos del diseño, para cuantificar el esfuerzo necesario para su realización.

4.1 OBTENCIÓN DEL COMPUESTO CLAVE

Siguiendo las pautas del CNVM- INSHT, inicialmente la búsqueda se centrará en la familia de los isocianatos. Si esto no fuera posible, la búsqueda del compuesto clave se centrará en la familia de los glicoles.

En la reunión se facilitó una tabla con todos los compuestos con los que se trabaja en el CNVM- INSHT. En esta aparecen diferentes compuestos, sus códigos CAS, los valores de los límites de exposición (*TLV*), calculados mediante sus presiones de vapor a 20 o 30°C, su concentración de saturación a esas temperaturas (*SVC*), y la relación entre ambas.

Los datos de esta tabla servirán a modo orientativo para una preselección de los compuestos que pueden resultar adecuados. Además, desde el centro se comentó que sería recomendable trabajar solo con compuestos presentes en la tabla, ya que disponen de los medios de análisis adecuados para trabajar con todos ellos.

4.1.1 Familia de los isocianatos

4.1.1.1 Tolueno 2,4-diisocianato

Dado el gran interés del CNVM-INSHT la búsqueda del compuesto clave comenzó con la familia de los isocianatos. Dentro de estos el TDI (Tolueno 2,4-diisocianato) es el de mayor interés ya que es el isocianato más empleado y el que crea mayor número de manifestaciones patológicas, porque es extremadamente volátil y a menudo se utiliza en elevadas concentraciones.

Como se describe en la ficha internacional del TDI (INSHT, 2005) el TDI tiene un punto de inflamación superior a los 125°C, sin embargo, arderá fácilmente si se expone a una fuente de ignición a una temperatura igual al punto de inflamación o más alta. Otro dato importante que se debe tener en cuenta a la hora de realizar el diseño es el punto de fusión, ya que es necesario que las partículas del aerosol estén en fase líquida. La ficha de seguridad lo sitúa en 22°C, por lo que a 15°C se formaría un aerosol de partículas sólidas, pero a 40°C estaría formado por partículas líquidas.

El TDI es más denso que el agua y se depositará en el fondo de los contenedores llenos de agua. Aunque reacciona exotérmicamente con agua, la velocidad de reacción es muy lenta a temperaturas debajo de 50°C (122°F). A temperaturas mayores la reacción se vuelve progresivamente más vigorosa y puede ser violenta. La reacción del TDI con agua forma tanto dióxido de carbono como compuestos insolubles de poliurea (BASF Corporation, 2000).

Las constantes para la fórmula de Raoult extendida se han obtenido en el simulador PRO II (En el el TDI aparece como Methylphenylene Isocyanate). Los datos obtenidos son, para la temperatura en Kelvin y la presión en Pascales: $C_1=194,22$, $C_2=-14314$, $C_3=-26,701$, $C_4=0,022518$ y $C_5=1$, para el rango de 287,04 a 72,0 K.

Se calculará inicialmente la presión de vapor a diferentes temperaturas en el rango de 5-40°C. Después, con este dato se calculará la concentración de saturación a presión atmosférica y a la

temperatura definida. Y finalmente, se calculará la relación SVC/TLV . Así, se podrá conocer si es posible formar una atmosfera de aerosol en el rango $0,1 \cdot TLV - 2 \cdot TLV$.

El peso molecular del TDI es de 174,15 g/mol y su TLV $0,036 \text{ mg/m}^3$ (INSHT, 2005). En la Tabla 1 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 1 Relación entre la concentración de saturación y el valor de umbral límite del TDI en el rango de temperaturas 5-40°C.

T (°C)	P ^{vap} (Pa)	SVC (mg/m ³)	SVC/TLV
5,00	0,28	21,47	601,15
10,00	0,49	36,40	1019,06
15,00	0,83	60,30	1688,39
20,00	1,37	97,77	2737,63
25,00	2,21	155,34	4349,44
30,00	3,50	242,10	6778,69
35,00	5,45	370,52	10374,60
40,00	8,33	557,42	15607,72
45,00	12,52	825,07	23102,04

En la tabla se aprecia a simple vista que a 15°C y 40°C las concentraciones necesarias para obtener una atmosfera de aerosol son muy superiores a los valores límite, por lo que trabajando en el margen del $0,1 \cdot TLV - 2 \cdot TLV$ sería imposible obtener el efecto deseado.

Esto sucede porque el TDI es un compuesto químico muy nocivo, con el valor de umbral límite es muy bajo. Además, el TDI es un compuesto muy volátil, por lo que es necesario obtener altas concentraciones de este para lograr que se condense. Por estas dos razones, las concentraciones necesarias para obtener el efecto deseado son muy superiores a los valores límites.

Tras trasladar estos resultados al CNVM- INSHT se ha descartado totalmente trabajar con este compuesto, así como con compuestos menos comunes como con los compuestos Difenilmetano diisocianato (MDI), Hexametileno diisocianato (HDI), Naftaleno diisocianato (NDI) o Isoforona diisocianato (IPDI).

Dado que con unos sencillos cálculos puede verse que ciertos compuestos no son válidos, primero se calculará la relación SVC/TLV , y solo en el caso en el que éstos se encuentren en el margen deseado se procederá a hacer un estudio de ellos.

4.1.2 Familia de los glicoles

Tras descartar trabajar con la familia de los isocianatos el interés se centrará en la familia de los glicoles, Las referencias facilitadas por el centro indican que en éste se trabaja con etilenglicol, dietilenglicol, y trietilenglicol.

Siguiendo el procedimiento empleado en el punto anterior se evaluarán los tres casos. Con los datos del simulador PRO II se calcularán la relación entre el SVC y el TLV en ambos límites.

En el caso de que los valores sean cercanos al margen 0,1-2 se hará un estudio más detallado de los éstos.

4.1.2.1 Etilenglicol

El etilenglicol (EG) tiene un peso molecular de 62,07 g/mol y un *TLV* de 52 mg/m³ (Datos facilitados por el centro). Empleando el mismo procedimiento empleado en la Tabla 1 se calculará la relación *SVC/TLV* para el etilenglicol. Los resultados se muestran a continuación en la Tabla 2.

Tabla 2 Relación entre la concentración de saturación y el valor de umbral límite del EG en las temperaturas 15°C y 40°C.

T (°C)	P ^{vap} (Pa)	SVC (mg/m ³)	SVC/TLV
15,00	5,02	130,07	2,50
40,00	44,12	1052,63	20,24

En este caso el compuesto también se encuentra fuera del margen 0,1-2,0 por su alta volatilidad. A temperaturas bajas su valor se acerca al margen deseado, por lo que pese a no ser un compuesto válido, los valores son mucho más adecuados que en el caso del TDI. Esto sugiere que con compuestos similares, pero de mayor tamaño molecular (con su consiguiente pérdida de volatilidad) los valores del *SVC/TLV* pueden estar en el margen necesario.

4.1.2.2 Trietilenglicol

El trietilenglicol (TEG) tiene un peso molecular de 150,2 g/mol y un *TLV* de 1000 mg/m³ (Datos facilitados por el centro), lo que sugiere que es un componente no peligroso. Los resultados del *SVC/TLV* son los mostrados en la Tabla 3.

Tabla 3 Relación entre la concentración de saturación y el valor de umbral límite del TEG en las temperaturas 15°C y 40°C.

T (°C)	P ^{vap} (Pa)	SVC (mg/m ³)	SVC/TLV
15,00	0,06	3,76	0,01
40,00	0,77	44,57	0,04

Los valores *SCV/TLV* son bajos y fuera del margen deseado. El valor de la presión de vapor es muy bajo, mucho menor que los estudiados anteriormente, y su valor de umbral es mucho mayor que los anteriores, por lo que el compuesto se condensa en concentraciones mucho menores que el umbral límite.

La baja peligrosidad de este compuesto, además, hace que su estudio carezca de interés, por la baja incidencia en el ambiente laboral.

4.1.2.3 Dietilenglicol

El dietilenglicol (DEG) tiene un peso molecular de 106,12 g/mol y un *TLV* de 44 mg/m³ (Datos facilitados por el centro). Los resultados del *SVC/TLV* en las temperaturas de 15°C y 40°C son los mostrados en la Tabla 4.

Tabla 4 Relación entre la concentración de saturación y el valor de umbral límite del DEG en las temperaturas 15°C y 40°C.

T (°C)	P ^{vap} (Pa)	SVC (mg/m ³)	SVC/TLV
15,00	0,26	11,40	0,26
40,00	3,32	135,32	3,08

Los resultados son muy interesantes, ya que la relación *SVC/TLV* a 15°C se encuentra dentro del límite a 15°C, y pese a que a 40°C se encuentra fuera, el valor es cercano al límite superior. Por lo tanto, es conveniente hacer un estudio más detallado de este compuesto, ya que es, por ahora, el más adecuado para llevar acabo el diseño. Para ello se desarrollara el cálculo *SVC/TLV* en el rango 15-40°C en la Tabla 5.

Tabla 5 Relación entre la concentración de saturación y el valor de umbral límite del DEG en el rango de temperaturas 15- 40°C.

T (°C)	P ^{vap} (Pa)	SVC (mg/m ³)	SVC/TLV
15,00	0,26	11,40	0,26
16,00	0,29	12,71	0,29
17,00	0,32	14,16	0,32
18,00	0,36	15,76	0,36
19,00	0,40	17,53	0,40
20,00	0,45	19,48	0,44
21,00	0,50	21,62	0,49
22,00	0,55	23,98	0,55
23,00	0,62	26,58	0,60
24,00	0,68	29,43	0,67
25,00	0,76	32,56	0,74
26,00	0,84	36,00	0,82
27,00	0,93	39,77	0,90
28,00	1,04	43,89	1,00
29,00	1,15	48,41	1,10
30,00	1,27	53,35	1,21
31,00	1,40	58,75	1,34
32,00	1,54	64,65	1,47
33,00	1,70	71,08	1,62
34,00	1,88	78,10	1,77
35,00	2,07	85,75	1,95
36,00	2,28	94,07	2,14
37,00	2,50	103,13	2,34
38,00	2,75	112,99	2,57
39,00	3,02	123,69	2,81
40,00	3,32	135,32	3,08

Para que los resultados sean más visuales se muestran en la Figura 3. Los datos calculados en el simulador PRO II se muestran en la curva continua, mientras que las líneas discontinuas indican los valores límite de SVC/TLV de 0,1 y 2,0.

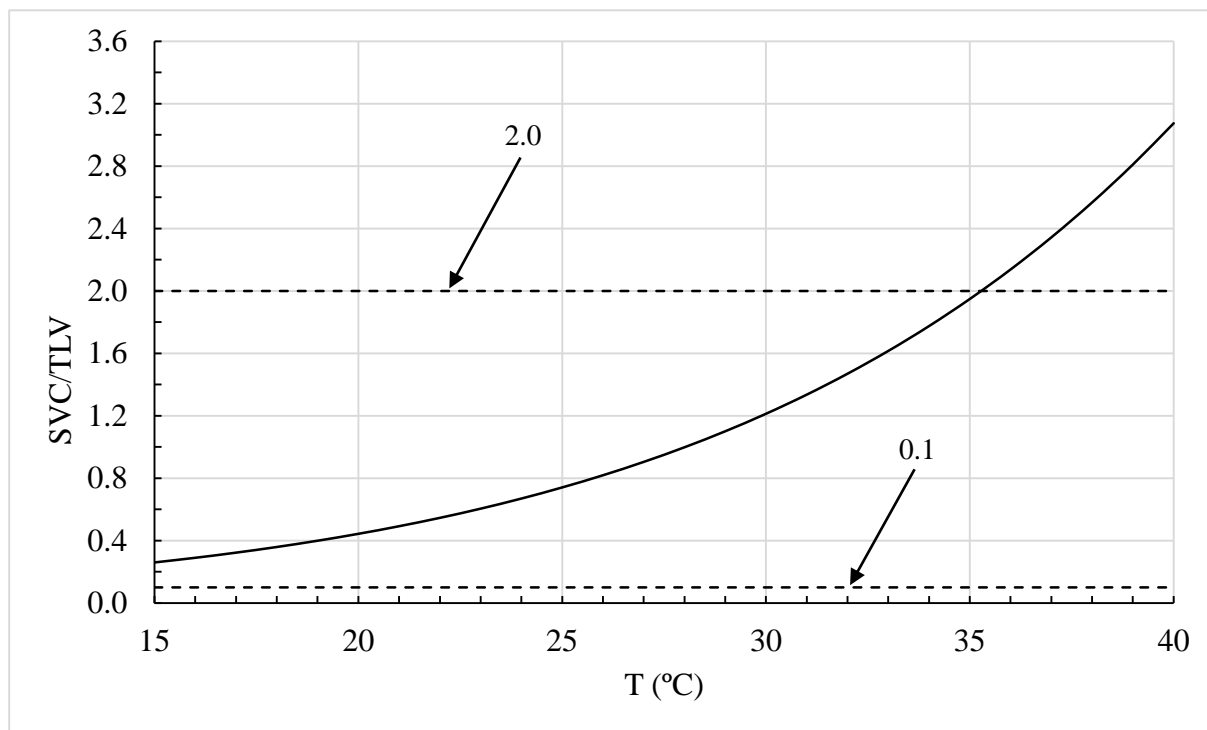


Figura 3 Relación entre la concentración de saturación y el valor de umbral límite del DEG en el rango de temperaturas 15- 40°C,

En el rango de 15-35°C los valores de SVC/TLV se encuentran en el rango deseado, por lo que este compuesto parece muy adecuado.

Esto hace que sea de interés un estudio más en profundidad de este compuesto. Como se describe en la ficha internacional del TDI (INSHT, 2007b) el DEG es un líquido viscoso, incoloro e inodoro, higroscópico y miscible en agua a concentraciones muy superiores a las necesarias en el equipo a diseñar.

Se utiliza en la fabricación de resina poliéster insaturada (UPR), resinas alquidálicas, resina PET, sistemas de poliuretano, aditivos para concreto y molienda, aditivos para lubricantes, aditivos para textiles, agroquímicos y biocidas, tintas y solventes, líquidos automotrices (anticongelantes, líquido para frenos, etc.), polietilenglicoles, pigmentos y colorantes, entre otros. Solvente selectivo para aromáticos en la refinación del petróleo. Agente deshidratador de gas natural (IDESSA Petroquímica, 2012).

En la atmósfera está presente como vapor y como partículas. El primero se degrada mediante reacciones fotoquímicas, con una vida media aproximada de 13 horas. La fase particulada es eliminada de la atmósfera por precipitación húmeda. No es susceptible a la fotólisis y no se espera que se volatilice desde las superficies húmedas o secas del suelo. Se degrada rápidamente por acción de los microorganismos del suelo. En el agua no se espera que se

adsorba a los sólidos suspendidos y al sedimento, pero si puede ser biodegradado (IDESA Petroquímica, 2012).

La sustancia puede afectar al riñón, dando lugar a alteraciones renales. También puede afectar al sistema nervioso central y al hígado por ingestión. La exposición por ingestión puede producir dolor abdominal, náuseas, vómitos, diarrea, vértigo, somnolencia, confusión, pérdida del conocimiento e incluso la muerte (INSHT, 2007b).

Aunque sus efectos por inhalación no parecen ser nocivos, sería interesante estudiar su efecto cuando se inhalan en forma de partículas, esto es, en forma de aerosol.

En cualquier caso, se deberán tomar las medidas básicas de seguridad, y evitar en todo momento el contacto directo con el compuesto mediante los equipos de protección adecuados.

En cuanto a sus propiedades químicas el punto de fusión se encuentra a $-6,5^{\circ}\text{C}$, por lo que en el rango $15-40^{\circ}\text{C}$ se trabajaría con partículas líquidas, es miscible en agua, y su temperatura de inflamación y autoignición es de 124°C y 229°C , fuera del rango de trabajo de este proyecto. Es no inflamable y no explosivo (INSHT, 2007b).

Químicamente es estable, excepto en contacto con fuertes agentes oxidantes, originando peligro de incendio y explosión, (INSHT, 2007b).

Por todo esto, el DEG es un compuesto adecuado para ser utilizado como compuesto clave en el diseño. Aun y todo, se estudiarán más compuestos por si alguno fuera más adecuado.

4.1.2.4 Propilenglicol

El propilenglicol o propano-1,2-diol podría ser otro compuesto a estudiar, pero su baja toxicidad hace que este compuesto sea de bajo interés, ya que el síntoma más grave que produce es la leve irritación de la piel tras largas exposiciones o la irritación de los ojos, Este compuesto reacciona con oxidantes fuertes, originando riesgo de incendio, pero a temperaturas moderadas no se alcanza, o se alcanza muy lentamente, una concentración peligrosa en el aire. Su *TLV* no está establecido por su bajo interés, (INSHT 2007a)

4.1.3 Otras alternativas

Siguiendo el procedimiento de los anteriores compuestos se han estudiado diferentes compuestos pertenecientes a la lista facilitada por el CNVM- INSHT como la dietanolamina, la glicerina, el resorcinol, la formamida, el ftalato de dibutilo o la p-nitroanilina. Todos ellos han sido descartados por diferentes razones, como que a las temperaturas de 15°C y/o 40°C se encontraban en estado sólido, o que sus valores de *SVC/TLV* se alejaban considerablemente de los límites establecidos.

4.1.4 Conclusión

Tras estudiar diferentes compuestos en los anteriores puntos se ha decidido que el dietilenglicol es el más adecuado para continuar con el estudio, Por lo tanto el diseño que hará basándose en éste, siempre intentando que el equipo se pueda utilizar con otros compuestos también.

4.2 DIFERENTES ALTERNATIVAS DE GENERACIÓN

Para la generación de atmosferas de aerosoles se han planteado diferentes alternativas, basándose en lo planteado por el CNVM- INSHT y en la bibliografía. En los siguientes puntos se desarrollarán las diferentes etapas del equipo y las diferentes alternativas para estas. Las etapas serán: bombeo y acondicionamiento del aire, dosificación de compuesto y agua y finalmente, generación de aerosol.

4.2.1 Bombeo y acondicionamiento del aire

La alternativa más sencilla para este punto sería que el aire comprimido entre al equipo mediante las líneas de aire comprimido del CNVM- INSHT. Este aire pasaría un sistema de filtrado y secado para entrar al sistema sin impurezas y con una humedad muy baja. Después, se acondicionaría su temperatura mediante sistemas de calefacción o refrigeración.

De todas formas, este sistema sería completamente análogo a otros empleados en el centro, por lo que este proyecto no debe detenerse en el diseño de éste.

4.2.2 Dosificación de compuesto y agua

Se deberá dosificar al sistema la cantidad de agua necesaria para que la humedad de la corriente gaseosa sea del 20% o del 80% a las temperaturas de 15 y 40°C. Además, se deberá añadir la cantidad de compuesto necesaria para que se forme aerosol, en los límites de $0,1 \cdot TLV - 2 \cdot TLV$. Para esto se han barajado 3 opciones diferentes: Mediante un baño térmico, mediante una válvula de Venturi con regulación y con una bomba de jeringa.

4.2.2.1 Mediante un baño térmico

En este caso la mezcla de compuesto y agua se encontrará en un recipiente. El aire entrante se hará pasar por un baño donde estará el compuesto químico de interés. Mediante la velocidad de calentamiento y conociendo el caudal de aire, se controlará la cantidad de compuesto que se evapora. Para dosificar el agua necesaria se empleará el mismo método.

Este proceso de humidificación y posterior enriquecimiento se puede plantear para que sucedan simultáneamente en el mismo recipiente, pero probablemente al calentar la mezcla la corriente gaseosa que se generaría tendría diferente composición que la mezcla líquida, como ocurre en las destilaciones no azeótropas.

De todas formas no sería sencillo dosificar la cantidad deseada, y se necesitaría un complejo sistema de análisis de la corriente gaseosa y control de ambos baños térmicos.

4.2.2.2 Mediante una válvula Venturi con regulación

En este caso la mezcla de compuesto y agua se encontrará en un recipiente graduado. La corriente gaseosa pasará por una válvula de Venturi, acelerándose y generando un vacío, que arrastrará la mezcla y se mezclará con la corriente gaseosa en la propia válvula. Para dosificar la cantidad de disolución arrastrada se colocará una válvula reguladora. En el caso en que el compuesto no sea miscible en agua se pondrán ambos en recipientes independientes.

El problema de esta alternativa es que regular la cantidad arrastrada mediante el recipiente graduado es muy difícil, ya que las medidas a simple vista no serían precisas. Además, los

valores *SVC* del compuesto de referencia sugieren que las cantidades a dosificar son muy bajas, por lo que un pequeño error de medida supondría un gran error porcentual.

Para ello, se podría emplear un regulador másico en vez de una válvula reguladora, pero sería mucho más sencillo y económico emplear una bomba de jeringa, que haría las dos funciones (bombear y dosificar) simultáneamente.

4.2.2.3 Mediante una bomba de jeringa

En este caso la mezcla de agua y compuesto se dosificaría mediante una bomba de jeringa y se mezclaría con la corriente gaseosa mediante una unión T de tres vías. Las bombas de jeringa tienen la ventaja de trabajar con una gran precisión en tramos de caudal muy amplios.

En el caso de que el compuesto fuera inmisible en agua las dos corrientes se dosificarían mediante dos bombas independientes.

4.2.3 Generación de aerosol

La corriente gaseosa contendrá el agua y compuesto necesario, y el último paso debe ser que el compuesto se disperse en pequeños núcleos condensados, generando la atmósfera de aerosol.

4.2.3.1 Mediante condensación

Para esto se ha pensado en dosificar el agua y el compuesto a una corriente de aire con la suficiente temperatura para evaporar ambos completamente y posteriormente enfriarla bruscamente, generando pequeños núcleos de condensación. Para enfriar la mezcla se han barajado dos alternativas: el enfriamiento mediante un cuerpo frío y mediante corriente de aire fría.

Si el enfriamiento es mediante un cuerpo frío, la corriente gaseosa se pondrá en contacto con un éste, enfriándose así, y el aire se saturará en el compuesto y éste se condensará. El problema de esta alternativa sería que lo más probable es que gran cantidad de compuesto se condense únicamente en la superficie del cuerpo frío y no en la totalidad de la masa de aire, generando una atmósfera no homogénea.

Como alternativa a esto la masa gaseosa puede enfriarse con una corriente de aire frío, con la ayuda de algún elemento mecánico para mejorar su mezcla.

El problema de ambas alternativas es la necesidad de trabajar con elementos de refrigeración, como podría ser el aire frío, para lo que es necesario una elevada inversión, ya que el precio de éstos es elevado y requieren mantenimiento continuo. Además, por su complejidad en el uso los ensayos serían difícilmente reproducibles.

4.2.3.2 Mediante descompresión con válvula

La mayoría de pulverizadores se basan en crear la dispersión de un líquido mediante una fuerte descompresión, haciendo pasar la mezcla a dispersar por un elemento que genere una gran pérdida de carga. En este caso mezcla se hará pasar por una válvula regulable, generando la dispersión de este y consiguiendo una suspensión de partículas.

Una válvula de regulación estándar puede ir ensuciándose con el tiempo, por lo que la pérdida de carga a través de esta variaría. Para solucionar este problema se empleará una válvula de contrapresión (elemento para regular la presión de la zona alta del sistema; una válvula similar a las válvulas de alivio) mediante la que se podrá regular la pérdida de carga que sufre la mezcla.

El tamaño de partícula varía con la magnitud de la descompresión a través de la válvula, por lo que regulando está se podrá variar sencillamente el tamaño de partícula. Este método es más sencillo y económico que los anteriores.

Además, la descompresión generaría un enfriamiento, que haría que disminuyese la temperatura de la corriente gaseosa, generando núcleos de condensación.

Sea cual sea el método de generación, tras el regulador se colocará una cámara de homogenización para amortiguar las posibles variaciones de concentración. Finalmente, la corriente se llevará a una cámara de muestreo, equivalente a la que actualmente se emplea en el instituto en el equipo de generación de aerosoles sólidos. Aquí se harán las pertinentes mediciones.

4.3 SELECCIÓN DE TÉCNICA

Si se resumen las propiedades de cada alternativa en la Tabla 6:

Tabla 6 Resumen de las diferentes propiedades de las diferentes alternativas para la dosificación del compuesto y el agua y la generación del aerosol

Factores	Dosificación			Generación Aerosol		
	Baño Térmico	Válvula Venturi	Bomba Jeringa	Cuerpo Frio	Aire Frio	Válvula
Simplicidad	No	Sí	Sí	Sí	No	Sí
Facilidad de uso	No	Si	Sí	Sí	Sí	Sí
Estabilidad	Sí	No	Sí	No	Sí	Sí
Reproducibilidad	No	No	Sí	No	No	Sí
Versatilidad	No	Sí	Sí	No	No	Sí
Coste	Alto	Bajo	Medio	Medio	Alto	Bajo

Basándose en la simplicidad, la facilidad de uso, la estabilidad, la reproducibilidad de los ensayos, la versatilidad y el coste se ha decidido dosificar mediante una bomba de jeringa y generar la suspensión de partículas mediante una válvula de contrapresión.

Tras el regulador se colocará una cámara de homogenización para amortiguar las posibles variaciones de concentración. Finalmente, la corriente se llevará a una cámara de muestreo, equivalente a la que actualmente se emplea en el instituto en el equipo de generación de aerosoles sólidos). Aquí se harán las pertinentes mediciones.

Mediante un sencillo esquema se muestra en la Figura 4 la configuración básica del equipo a diseñar

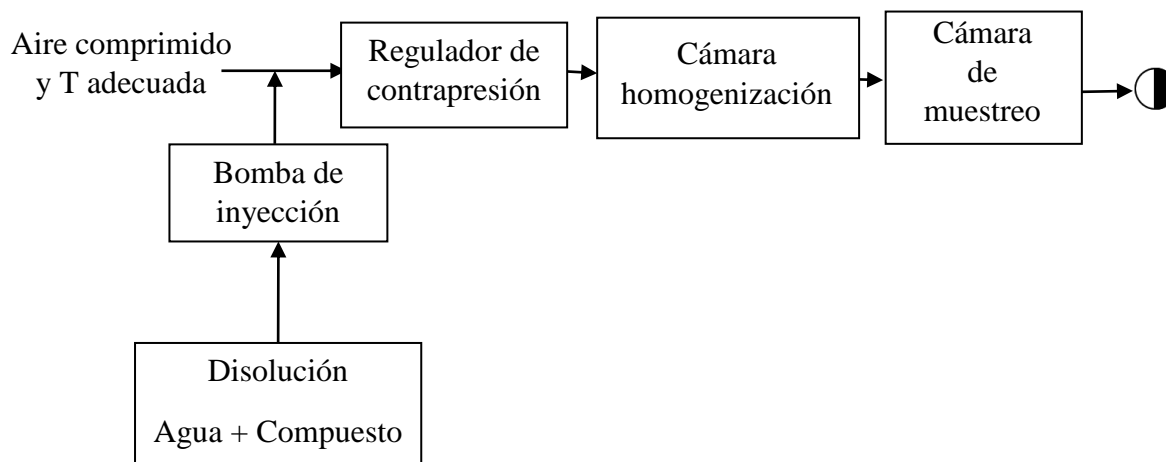


Figura 4 Esquema simplificado del equipo a diseñar

4.4 DESARROLLO DE LA TÉCNICA

En este apartado se desarrollarán los puntos necesarios para el diseño del sistema.

4.4.1 Cálculos preliminares

Es necesario el cálculo de las cantidades de mezcla que se deben introducir al sistema, para una idea general de la magnitud del equipo y sobretodo, de la capacidad de la bomba de jeringa. Además, es necesario estimar la magnitud del cambio de temperatura que sufrirá la corriente gaseosa, para hacerse una idea de las necesidades de calefacción o refrigeración.

4.4.1.1 Balance de masa

Siguiendo los procedimientos del apartado teórico primero se calcularán las presiones de vapor a las temperaturas deseadas. Después, se calculará la concentración necesaria en el aire para que se dé la saturación de éste. Conociendo el caudal de aire podrá calcularse la cantidad de compuesto necesaria por unidad de tiempo.

Seguidamente, se calculará mediante en diagrama psicométrico la concentración necesaria de agua para obtener la humedad deseada y la cantidad a dosificar por unidad de tiempo. Mediante estas dos cantidades se conocerán, por tanto, las proporciones necesarias de agua y compuesto a dosificar por la bomba. Finalmente, estas cantidades máxicas se convertirán a unidades volumétricas mediante las fracciones y densidades de la mezcla, ya que en estos equipos se debe introducir la cantidad a dosificar en estas unidades.

Pese a las variaciones de temperatura y presión que pueda sufrir la mezcla antes de la cámara de muestreo, si se dosifica la cantidad necesaria para que al final se obtengan las propiedades deseadas, las variaciones intermedias no alterarán el resultado final.

Para calcular entre qué rango debe trabajar la bomba de jeringa se calcularán los se calcularán las cantidades de los dos casos límites, esto es, menor temperatura y menor humedad (15°C y

80%) y mayor temperatura y mayor humedad (40°C y 20%) ya que todas las cantidades a introducir en diferentes experimentos estarán entre esos valores.

La humedad de entrada del aire se va a estimar que es muy baja, cercana al 0%, puesto que sale de un compresor. Además cabe la posibilidad de someterlo a procesos de secado. De todas formas, esta variable debe medirse, y tener en cuenta las desviaciones en los cálculos.

El caso de menor humedad, %20, menor temperatura, 15°C, se denominará caso mínimo y el caso de mayor humedad, %80, y mayor temperatura, 40°C, se denominará caso máximo. En ambos el caudal de aire empleado será de 10 NI/min.

Las presiones de vapor del compuesto modelo, el DEG, se han calculado previamente en la Tabla 5. Por otra parte la fracción de la mezcla a dosificar indica que en casi la totalidad la mezcla está compuesta por agua, por lo que la densidad de la mezcla será prácticamente la del agua. Los datos de densidad a diferentes se han obtenido de la enciclopedia de la Ingeniería Química Perry (Poling y cols., 2008). Además se ha calculado la cantidad total a dosificar suponiendo que el equipo esté en marcha durante 8 horas, la duración de una jornada laboral.

Los resultados se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7 Cantidades a introducir al sistema en los dos casos límites.

	Caso Mínimo	Caso Máximo
Entrada DEG (mg/min)	0,11	1,35
Entrada agua (mg/min)	20,02	363,03
Entrada mezcla (mg/min)	20,13	364,39
X_{DEG}	0,006	0,004
X_{Agua}	0,994	0,996
ρ(mg/μl)	0,999	0,992
Entrada mezcla (μl/min)	20,15	367,32
Entrada 8 horas (ml)	9,67	176,32

Todos los demás casos se encontrarían dentro de estos dos márgenes, por lo que la bomba de jeringa debe tener la capacidad, como mínimo, de dosificar en el margen 20,15- 367,32 μ l/min.

4.4.1.2 Balance de energía

Pese a que los ensayos se realizaran en el rango 15-40°C los equipos de acondicionamiento térmico del aire deben ser capaces de calentar o enfriar en un rango superior. Por un lado, aunque el equipo deberá estar debidamente aislado, es inevitable la transferencia de calor con el exterior.

Por otro lado, para que la disolución, en parte, pase a fase gaseosa será necesaria una cantidad importante de calor, que producirá un descenso de la temperatura en la corriente gaseosa. El aire entrante viene prácticamente seco y con gran capacidad para absorber humedad y además, el tamaño de estas partículas es diminuto, por lo que la superficie de transferencia de materia en cada núcleo de condensación es enorme, dándose una transferencia instantánea.

Es necesario tener en cuenta también que la fuerte descompresión enfriará la corriente. De todas formas, esto aún no se puede cuantificar, ya que no se sabe con exactitud la magnitud de ésta y tampoco se conoce la temperatura de la corriente gaseosa en la etapa previa a la descompresión. Además, dentro del equipo la mezcla dosificada se encontrará parte en estado gaseoso y parte en estado líquido, por lo que la en la estimación serían necesarios modelos termodinámicos complejos. Otra variable es la válvula, puesto que es de suma importancia la capacidad conductora o adiabática de esta en la transferencia de calor.

Como estimación general se puede suponer que el la vaporización de la mezcla será el proceso con mayor efecto en el descenso de la temperatura.

Si tomamos en cuenta que el calor específico del aire es $1,007 \text{ (J/g}\cdot\text{K)}$ (Poling y cols., 2008) a 20°C , en el caso en el que se dosifica la menor cantidad (15°C y 20% humedad) el descenso provocado será únicamente de aproximadamente 4°C . Pero en el caso en el que haya que dosificar la mayor cantidad (40°C y 80%) el calor necesario para vaporizar el total de la mezcla sería capaz provocar un descenso de hasta 75°C en la corriente gaseosa. Todo ello sin tener en cuenta la variación del calor específico del aire con la temperatura, puesto que solo se pretende estimar la magnitud de la variación, y la dependencia de éste con la temperatura en el rango de trabajo no es considerable.

De todas formas, las estimaciones que puedan hacerse en la etapa de prediseño siempre serán insuficientes. Puesto que habrá intercambio de calor con el exterior, por pequeño que sea, en todos los tubos y conexiones y en la cámara de homogenización y muestreo. Además de esto, pese a que la capacidad de conducción de calor de válvula de descompresión sea alta siempre se producirá un enfriamiento de la corriente en el proceso.

Además, al modificar el tamaño de partícula deseado mediante la variación de la pérdida de carga en la válvula variarían las condiciones de la descompresión, y en cada caso la variación de temperatura sería diferente.

Por lo que la conclusión de éste apartado del prediseño es que será necesario emplear un calentador con un margen suficiente (de unos 100°C , aproximadamente), y colocar una sonda de temperatura en la cámara de muestreo. En la fase de puesta a punto se regulará la potencia del equipo calefactor con el fin de que en la cámara de muestreo se obtenga la temperatura deseada. Si en la cámara final se tiene la temperatura deseada y anteriormente se ha dosificado la cantidad necesaria, se formará el aerosol, independientemente de las variaciones de temperatura anteriores.

Se puede llegar a la conclusión de que pese a que inicialmente se pensaba que el aerosol se formaría por la pulverización de una corriente líquida, la condensación debido al enfriamiento generado por la descompresión también influirá. Por ello, el aerosol se generará por una acción combinada de ambos.

También queda claro que la temperatura de la corriente gaseosa va a variar en diferentes puntos del equipo. Por lo que lo más correcto es regular el caudal de ésta según sale de la línea de aire comprimido del edificio, antes de que sucedan cambios bruscos de temperatura, puesto que los reguladores de caudal están limitados a rangos de temperatura moderada ($5\text{-}60^\circ\text{C}$ los controladores de caudal másico de la marca Brooks (Información facilitada por el distribuidor oficial).

5. EQUIPOS

Tras la elección de la técnica en el punto 4.3 y el desarrollo de ésta en el punto 4.4 los elementos principales del sistema se dividirán en tres grupos: Los equipos principales, las conexiones entre ellos y los elementos de control. También se especificarán los diversos elementos auxiliares para el correcto funcionamiento del sistema.

5.1 EQUIPOS PRINCIPALES

Los equipos más importantes de este equipo son los siguientes:

-Bomba de infusión: Se ha elegido este tipo de bomba por su sencillez de uso y su precisión. Antes de comenzar a operar se deberá preparar una disolución con la cantidad de agua y compuesto de interés necesaria. Ésta se introducirá en una jeringa de vidrio y será debidamente dosificada por la jeringa. Las jeringas pueden contener una gran cantidad de disolución, por lo que pueden estar operando durante largos periodos de tiempo sin ser rellenadas. Las jeringas más habituales son de 20, 30 o 40 ml y en el caso de mayor caudal, según los cálculos del punto 4.4.1.1, habría que introducir al sistema alrededor de 22 ml/h.

De todas formas, el proceso de relleno y cambio de las jeringas es muy simple, y puede ser llevado a cabo en segundos.

Es necesario emplear una bomba de jeringa capaz de dosificar en el 20,15- 367,32 $\mu\text{l}/\text{min}$, fácilmente adquirible en el mercado.

En el caso de que la mezcla no sea debidamente arrastrada por el aire cabe la posibilidad de calentar de manera puntual en punto de dosificación.

-Regulador de contrapresión: Mediante la cabeza de éstos se puede regular la presión del equipo. Cuanto mayor sea el número de vueltas, mayor descompresión sufrirá la corriente entrante, y la pulverización de la parte líquida será mayor. Gracias a esto será sencillo regular el tamaño de partícula para mejorar la estabilidad del aerosol. El aire comprimido entra teóricamente al equipo a una presión de 10 bares en condiciones ideales, pero por pérdidas de carga generadas por los componentes de la instalación y el deterioro de dichos elementos cabe esperar que sea notablemente menor. Por lo que probablemente con un regulador que sea capaz de trabajar entre 0 y 3,4 bares será suficiente (modelos comerciales). Si no lo fuera, se podría emplear el siguiente modelo comercial, 0-6,8 bares, con la consiguiente pérdida de precisión.

-Cámara de homogenización: Pese a que la bomba de jeringa dosifica la disolución de manera lineal, puede que ésta llegue a la corriente gaseosa en forma de impulsos. Además, diferentes imperfecciones del sistema, pueden generar pequeñas variaciones de concentración en la corriente de salida. Por todo esto, es conveniente la instalación de una cámara de homogenización para la amortiguación de estas pequeñas variaciones y la obtención de una corriente de salida de mayor estabilidad. El tamaño de ésta tiene que ser suficiente para que la corriente entrante puede mezclarse, pero no excesivamente grande, ya que las partículas podrían empezar a depositarse. Los recipientes 2 litros o 3,78 litros (1 galón) podrían ser adecuados ya que el tiempo de residencia sería de 12 segundos o 23 segundos respectivamente.

5.2 CONEXIONES

El material de los tubos será acero inoxidable. Esto se justifica por el trabajo a presiones moderadas y sobre todo por la necesidad de materiales inertes. El tamaño de éste será de ½ pulgada en zonas de donde se necesiten incorporar sensores y el regulador (por la mayor disponibilidad comercial en estos tamaños), y de ¼ de pulgada en la zona de mezcla de aire y disolución, para que la mayor velocidad de la corriente gaseosa asegure una mezcla óptima.

Además de los tubos, serán necesarios adaptadores para los cambios de sección o para la unión de diferentes elementos; así como uniones de tres vías para introducir las sondas o la corriente alimentada por la bomba.

5.3 ELEMENTOS DE CONTROL

En este apartado se incluyen los sensores, indicadores y controladores

El aire entrará al sistema mediante las líneas de distribución de aire comprimido del edificio. El caudal de aire entrante al sistema se controlará mediante un controlador másico térmico, cuyo valor se podrá leer y regular mediante un módulo local. Se ha elegido este sistema por su sencillez. Como se ha comentado en el balance de energía del punto 4.4.1.2 es necesario que esté situado antes de que la corriente gaseosa sufra cualquier cambio de temperatura. Este controlador, deberá medir la temperatura de la corriente gaseosa, para convertir la medida del caudal de l/min (a una temperatura) a NI/min (a temperatura estándar de 20°C).

Para evitar problemas por altas temperaturas, la humedad absoluta del aire comprimido se medirá antes del acondicionador de temperatura. Los sensores de temperatura y humedad tendrán un rango de 0-100°C y 0-100%, ya que son modelos comerciales muy comunes.

Después, justo antes del regulador de contrapresión, se medirá la presión de la corriente (mediante sensores de 0-10 bar), ya que así se podrá cuantificar la magnitud de la descompresión y repetir los ensayos en las mismas condiciones de días anteriores.

Finalmente, en la cámara de muestreo, se medirán la temperatura y la humedad.

El ajuste de la potencia del calentador a la entrada al sistema permitirá adecuar la temperatura en la cámara de muestreo y el dato de la humedad de entrada (muy cercana a cero) permitirá calcular sencillamente el agua que debe introducirse al sistema mediante la bomba de jeringa.

La señal de los sensores de humedad, presión y temperatura podrá mostrarse en indicadores individuales, o en un solo indicador con 4 inputs. Además, los datos registrados por estos se podrán enviar a un ordenador, para una visualización y gestión de datos más cómoda mediante softwares específicos.

Finalmente, como se acordó, el sistema de medición de la concentración de compuestos químicos y distribución de tamaño de partículas será diseñado por el CNVM-INSHT, siendo independiente a este proyecto.

5.4 ELEMENTOS AUXILIARES

Para el correcto funcionamiento del equipo será necesaria la instalación de diferentes elementos auxiliares.

Por una parte, los tubos, las uniones, manguitos y demás adaptadores deberán estar debidamente aislados para minimizar el intercambio de calor con el exterior.

Por otro lado, será necesaria una correcta instalación eléctrica que asegure el buen funcionamiento y el cumplimiento de las necesarias medidas de seguridad, con elementos como protecciones contra derivaciones y sobreintensidades (diferenciales y magnetotérmicos de intensidades adecuadas), puesta a tierra de elementos metálicos, seta de seguridad con enclavamiento mecánico, etc...

Como punto adicional sería recomendable el montaje en panel de este sistema. Esto supondría un coste adicional, pero mejoraría la estética y la comodidad a la hora de operar.

Con todo esto se obtendría el diagrama de flujo simplificado que se presenta a continuación en la Figura 5.

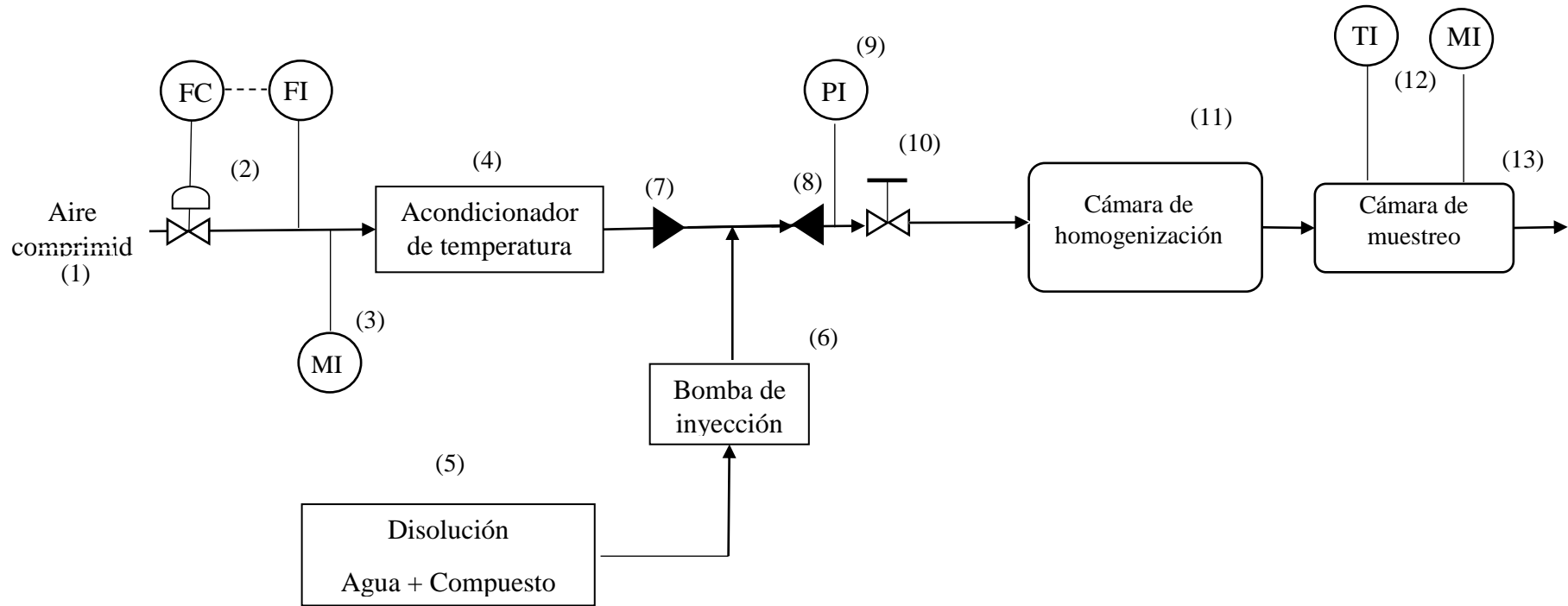


Figura 5 Diagrama de flujo simplificado del sistema con principales equipos, indicadores y controlador

Donde:

- (1) Entrada de aire comprimido por la línea del edificio, Presión teórica= 10 bar
- (2) Sistema de control de caudal mediante controlador másico térmico con display incorporado
- (3) Sensor de humedad 0-100%. El propio indicador convierte el dato de humedad relativa absoluta.
- (4) Sistema de acondicionamiento térmico del aire, hasta aproximadamente 140°C. Los equipos para calefacción y refrigeración pueden ser independientes.
- (5) Jeringa de vidrio de 20, 30 o 40 ml con mezcla de agua y compuesto de interés.
- (6) Bomba de jeringa de alta precisión con posibilidad de caudal de entre 20,15- 367,32 $\mu\text{l}/\text{min}$.
- (7) Adaptador de $\frac{1}{2}$ a $\frac{1}{4}$ de pulgada.
- (8) Adaptador de $\frac{1}{4}$ a $\frac{1}{2}$ de pulgada.
- (9) Sensor e indicador de presión 0-10 bar
- (10) Regulador de contrapresión de alto caudal/sensibilidad, 0 a 3,4 bar.
- (11) Cámara de homogenización de acero inoxidable de 1, 2 o 3,78 l.
- (12) Sensor único de humedad y temperatura, 0-100% y 0-100°C.
- (13) Cámara de muestreo, Análoga a la empleada por el CNVM-INSHT en el equipo de generación de aerosoles de partículas sólidas.

Con todo esto el equipo, sin tener en cuenta el tamaño de la cámara de muestreo, el equipo podrá ser instalado en una superficie reducida, no mayor de 1 m x 1 m x 1 m.

6. ESTIMACIÓN DE COSTES

Por un lado debe estimarse el coste de todos los equipos de necesarios para la construcción del equipo. Tras ello debe identificarse en coste de los principales equipos y mediante el método del apartado 3.10.1 cuantificarse el desembolso necesario para la adquisición de equipos, montaje y la puesta en marcha de éstos, es decir, el total del inmovilizado.

6.1 COSTE LOS EQUIPOS

Para llevar a cabo la estimación de costes de los elementos de un equipo de estas características, se han identificado todos los componentes necesarios para la construcción del equipo y después se ha contactado con proveedores de marcas de referencia en este tipo de mercado, como Hoke, Swagelok, Almemo o Brooks para obtener una referencia del precio de cada uno de ellos.

Cabe destacar que en esta fase solo es necesaria una estimación inicial del precio, por lo que como referencia no se van a tomar los elementos o equipos más económicos ni los de mejores prestaciones, si no el precio por el que se puede adquirir elementos de características medias.

En la Tabla 8 se enumeran todos ellos, ordenados en secciones, y se especifica la cantidad necesaria para construir el equipo. Finalmente, se calcula el precio estimado total del equipamiento necesario.

Tabla 8 Estimación de costes y cantidades de los diferentes equipamientos necesarios

Sección	Elemento	Cantidad	Precio aproximado (€)
Elementos principales	Bomba de infusión y complementos	1	1500
	Regulador de contrapresión	1	600
	Cámara de homogenización	1	200
Conexiones	Tubos, conexiones, adaptadores, etc.	Variable	400
Elementos de control	Sensor de presión	1	300
	Sensor de temperatura y humedad	2	700
	Indicador y software	1	800
	Controlador de caudal	1	1300
Otros	Equipo eléctrico, cableado, enchufes, etc.	-	500
	Aislamiento	-	50
	Estructura de construcción	1	50
		Total (€)	6400

La sección de los elementos de control es la más variable, ya que podría variar según el equipamiento y las marcas empleadas en el CNVM-INSHT habitualmente para aplicaciones similares. El grado de control sobre el sistema encarecería o abarataría el precio final. Por ejemplo, como alternativa más económica, se podría eliminar el controlador de caudal y regular éste mediante una válvula, de un precio aproximado de 200€.

El precio del equipamiento ascendería a alrededor de 6400€ (IVA no incluido)

6.2 COSTE TOTAL DEL PROYECTO

Pese a que el precio del equipamiento asciende a 6400€ (IVA no incluido), también es necesario tener en cuenta el coste de las etapas de construcción y puesta en marcha, y para ello, se partirá de la Ecuación (8). En la Tabla 8 el coste de los elementos principales, C_E , asciende a 2300€ (IVA no incluido), por lo que empleando el método de Lang con un factor de $f_L = 3,45$ el coste total del proyecto, el inmovilizado, ascendería a:

$$I = f_L \cdot \sum C_E = 3,45 \cdot 2300€ \approx 8000€ \quad (10)$$

Por lo tanto el coste de montaje y puesta en marcha sería de alrededor de 1600€ (IVA no incluido)

7. CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN

Los puntos tratados en esta etapa de prediseño indican que esta configuración sería totalmente viable.

En el apartado 3.3 de la teoría se nombraba como Lee y cols. (2008) empleaban también el método del spray para generar aerosoles, poniendo especial atención en el control del tamaño de partícula.

En su caso el soluto no era soluble en agua por lo que emplearon dos bombas de jeringa para la dosificación. Para controlar el tamaño de partícula variaron la longitud de la zona de mezcla y la cantidad dosificada. Como previsible mejora este equipo ha sido diseñado para variar el tamaño de partícula mediante la magnitud de la descompresión, lo que parece a simple vista más sencillo de operar.

Lee y cols. (2008) obtuvieron resultados muy positivos, ya que sus intentos para intentar generar aerosoles con distribuciones de partículas deseado fueron exitoso, obteniendo resultados estables y reproducibles.

Pese a que el equipo diseñado en este documento sería más complejo, ya que las condiciones de operación (caudal, concentración, temperatura, etc...) deben ser regulables, todo parece indicar que este método de generación sería viable. Además, debido a su sencillez podrían emplearse para diversos compuestos, siempre y cuando generen mezclas de aerosol en los márgenes deseados.

En cuanto al coste del proyecto, dada la simplicidad de éste, el precio estimado es menor que el de equipos con similares características pero menor versatilidad (puesto que están diseñados para un solo compuesto). Por ejemplo, equipos con principios similares suelen rondar los 12.000€ (Por ejemplo los de la serie ATM de la marca topas). Por lo tanto, es muy

positivo que esta opción además de adecuarse más a las necesidades del CNVM-INSHT, sea económicamente más viable.

Aun así, el precio aún puede ser muy variable, ya que un mayor nivel de automatización y control haría necesario un mayor desembolso.

En el proceso de construcción será necesario invertir alrededor de unas 70 horas y en el de puesta en marcha alrededor de unas 30. Por lo que el valor estimado para la puesta en marcha (1600€, IVA no incluido) parece adecuado.

Por lo tanto, la opción escogida y prediseñada parece ser viable tanto técnica como económicamente.

8. NOMENCLATURA

- C_i = Constantes de la ecuación de Raoult
- C_E = Coste total de los principales equipos (€)
- c_p = Calor específico (J/ mol·K)
- C_{TOT} = Capital total (€)
- f_L = Factor de Lang
- I = Inmovilizado (€)
- m = Cantidad de aire (kg/min)
- n = Cantidad de materia (mol)
- n_i = Cantidad de materia del compuesto i (mol)
- n_{vap} = Cantidad de materia vaporizada (mol)
- P = Presión ambiente (Pa o mmHg)
- P_c = Capital circulante (€)
- P_i = Presión parcial del compuesto i (Pa o mmHg)
- P^{vap} = Presión de vapor (Pa o mmHg)
- PM = Peso molecular (g/mol)
- Q = Calor (J)
- R = Constante universal de los gases (atm·l/K·mol)
- SVC = Concentración de saturación (ppm o mg/m³)
- T = Temperatura (K o °C)

- TLV = Threshold limit value/ Valor de umbral límite (ppm o mg/m^3)
- V = Volumen (l)
- x_i = Fracción másica de compuesto i

Símbolos griegos:

- ΔH_{vap} = Entalpía de vaporización (J/mol)
- ΔT = Variación de temperatura (K o $^{\circ}\text{C}$)

9. BIBLIOGRAFÍA

- 1) Ayastuy, J.L. 2008. *Ingeniaritza Kimikoaren Oinarriak*. España: Euskara errektoreordetzaren sare argitalpena.
- 2) Barrueto, L. 2006. “Aerosolterapia.” Departamento de Medicina Respiratoria Infantil, Hospital CRS El Pino.
- 3) BASF Corporation. 2000. “Poliuretano, Manual Del TDI.”
- 4) Bridges, P.A., y K.M.G. Taylor. 1998. “Nebulisers for the Generation of Liposomal Aerosols.” *International Journal of Pharmaceutics* 173 (1–2): 117–25. doi:10.1016/S0378-5173(98)00212-9.
- 5) CNVM-INSHT. 2006. “Toma de Muestras de Aerosoles. Muestreadores de La Fracción Inhalable de Materia Particulada.” Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales, Gobierno de España.
- 6) IDESA Petroquímica. 2012. “Dietilenglicol.” Hoja de datos de seguridad de materiales.
- 7) INSHT. 2005. “2,4-Diisocianato de Tolueno Fichas, Internacionales de Seguridad Química.” Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales, Gobierno de España.
- 8) ———. 2007a. “Propano-1,2-Diol, Fichas Internacionales de Seguridad Química.” Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales, Gobierno de España.
- 9) ———. 2007b. “Dietilenglicol, Fichas Internacionales de Seguridad Química.” Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales, Gobierno de España.
- 10) Kalani, A., y P.D. Christofides. 2002. “Simulation, Estimation and Control of Size Distribution in Aerosol Processes with Simultaneous Reaction, Nucleation, Condensation and Coagulation.” *Computers & Chemical Engineering* 26 (7–8): 1153–69. doi:10.1016/S0098-1354(02)00032-7.
- 11) Kubo, M., A. Nakaoka, K. Morimoto, M. Shimada, M. Horie, Y. Morimoto, y T. Sasaki. 2014. “Aerosol Generation by a Spray-Drying Technique Under Coulomb Explosion and Rapid Evaporation for the Preparation of Aerosol Particles for Inhalation Tests.” *Aerosol Science and Technology* 48 (7): 698–705. doi:10.1080/02786826.2014.918930.

- 12) Lavenda, B.H. 1985. "El Movimiento Browniano." *Investigación Y Ciencia* N° 103.
- 13) Lee, Yao-Chuan, Fu-Tien Jeng, y Chih-Chieh Chen. 2008. "Technique for Aerosol Generation with Controllable Micrometer Size Distribution." *Chemosphere* 73 (5): 760–67. doi:10.1016/j.chemosphere.2008.06.023.
- 14) Liu, G., D.A. Lowy, A. Kahrim, C. Wang, Z. Dilli, N. Kratzmeier, W. Zhao, y M. Peckerar. 2014. "A Low Cost Micro-Heater for Aerosol Generation Applications." *Microelectronic Engineering* 129 (November): 46–52. doi:10.1016/j.mee.2014.07.011.
- 15) Poling, B.E., G.H. Thomson, D.G. Friend, R.L. Rowley, y W.V. Wilding. 2008. "Section 2, Physical and Chemical Data." In *Perry's Chemical Engineers' Handbook*, 8th edition. Vol. 2. United States of America: The McGraw-Hill Companies.
- 16) Seader, J.D., y E.J. Henley. 2006. *Separation Process Principles*. Second Edition. United States of America: John Wiley & Sons, Inc.
- 17) Turton, R., R.C. Bailie, W.B: Whiting, J.A. Shaeiwitz, y D. Bhattacharyya. 2003. *Análisis Synthesis and Design of Chemical Processes*. Second Edition. United States of America: Pearson.
- 18) Universidad Tecnológica Nacional. 2010. "Higrometría." Departamento de Ingeniería Química.
- 19) Voutilainen, A., y J.P. Kaipio. 2005. "Sequential Monte Carlo Estimation of Aerosol Size Distributions." *Computational Statistics & Data Analysis* 48 (4): 887–908. doi:10.1016/j.csda.2004.03.011.