

INTRODUCCIÓN

La evaluación de la exposición proporciona la base de las decisiones que los higienistas industriales deben tomar en la práctica de su profesión. Algunos ejemplos de este tipo de decisiones son:

- Evaluar el cumplimiento con los límites de exposición para fines de salud y regulación legal.
- Evaluar la gestión de un plan de control de un producto químico antes de que este sea incorporado a un proceso productivo, teniendo en cuenta:
 - Necesidad de control administrativo y de ingeniería
 - Adecuados procedimientos y prácticas de trabajo
 - Necesidad de elementos de protección personal (EPP) incluido el tipo de protección respiratoria
 - Comunicación de peligros y necesidades de entrenamiento adicional
 - Disposición adecuada de los residuos generados por los materiales usados en los procesos
- Impacto por un cambio de proceso
- Impacto por la introducción de un nuevo proceso
- Adecuación de controles de ingeniería existente o la eficacia esperada de un nuevo control para proteger la salud de los trabajadores
- Vigilancia médica y requerimientos de monitoreo en salud
- Investigaciones
 - Revisión de procesos peligrosos
 - Falla en procesos
 - Soporte para planes de emergencias
 - Estudios formales
 - Estudios de prevalencia para evaluar si los resultados médicos adversos pueden estar asociados con determinantes del sitio de trabajo como el área de procesos, trabajo desarrollado y agentes higiénicos presentes.
 - Estudios de mortalidad y morbilidad epidemiológica.
 - Brotes de enfermedad
 - Quejas alegando deterioro en la salud por exposiciones actuales o anteriores.

Muchas de estas evaluaciones de la exposición (> 95 %) deben hacerse sin mediciones cuantitativas ya que las decisiones deben llevarse a cabo antes de la introducción del agente en el lugar de trabajo, o en aquellos casos en los cuales las evaluaciones de la exposición de forma retrospectiva no resultan representativas. Algunas evaluaciones resultan hipotéticas tales como las inspecciones de riesgos en los procesos, la planificación de situaciones de emergencia o impacto por fallas en los procesos que puede traer sorpresas. También en el caso de cierto grupo de enfermedades, puede desconocerse que un agente en particular tiene un potencial de causar efectos adversos para la salud. Los juicios deben darse de forma oportuna, en muchos casos en cuestión de minutos u horas en lugar de días que por lo general se requieren para recolectar mediciones cuantitativas. Por último, la recolección de muestras y su análisis resulta muy costosa y consume mucho tiempo. Una decisión consciente debe estar hecha mediante la asignación de recursos a través de todos los requisitos relacionados con el mantenimiento del programa de Higiene. La calidad del programa de evaluación de la exposición debe estar en equilibrio entre las mediciones cuantitativas, el modelamiento y los juicios cualitativos para que todos sean cumplidos y reforzados mutuamente.

Con el fin de soportar todas las decisiones y determinaciones anteriores, se necesita una estrategia integral de evaluación de la exposición como la establecida por la AIHA, que evalúa la exposición a todos los agentes, para todos los trabajadores. No es usual que un Higienista Industrial deba evaluar cientos o incluso miles de escenarios y que los escenarios puedan cambiar gradualmente con el tiempo requiriendo reevaluaciones.

Dentro de los diferentes enfoques para mejorar el juicio profesional, algunos autores presentan resultados de estudios formales que demuestran que incluso algunos Higienistas Industriales (HI) experimentados tuvieron mal desempeño cuando se le preguntó cuál sería la correcta categoría de control de la exposición (ECC, por sus siglas en inglés), incluso cuando se disponía de mediciones cuantitativas. El accionar del HI en la toma de decisiones se puede mejorar de manera significativa con el entrenamiento en la interpretación de las mediciones cuantitativas.

Cuando el HI no tiene mediciones cuantitativas, su capacidad para identificar el correcto control de la exposición - ECC –está determinado por el azar, con la excepción de que podría tender a subestimar la exposición.

Algunos expertos presentan un enfoque muy disciplinar. La asignación adecuada de una ECC se puede hacer de una forma similar a la conseguida con los datos cuantitativos y capacitación. Incluso cuando los HI tienen mediciones cuantitativas, es importante que se apliquen los métodos de evaluación cualitativa y semicuantitativa para evaluar y ajustar sus juicios profesionales. De esta manera, el conocimiento y la experiencia obtenida de las situaciones en las mediciones cuantitativas que están disponibles se pueden utilizar para mejorar sus juicios cuando las mediciones no están disponibles.

En este capítulo se ampliarán algunas las normas y directrices y se discutirán otros determinantes de la exposición que podrán utilizarse en escenarios de exposición más complejos como aquellos relacionadas con las mezclas. Se incluirán varios estudios de caso para ilustrar cómo aplican las reglas y están previstas hojas en formato EXCEL para realizar los cálculos. Las hojas de cálculo

Traducción y Adaptación

Magda L. Góngora Guaje QI, ESO ; José Luqués Serna IQ ;
Álvaro Araque García, IQ ESHI.

*Rules and Guidelines to Facilitate Professional Judgments . Chapter 26. AIHA.
A Strategy for Assessing and Managing Occupational Exposures. Fourt Edition.
2016*

3

complementan la lista de verificación e incluye algunas características que si bien corresponde a la lista de verificación proporciona más flexibilidad para personalizar las evaluaciones cuando se trabaja en escenarios complejos. Las hojas de cálculo requieren un conocimiento práctico de EXCEL ya que la herramienta lista de verificación no lo incluye.

Los expertos presentan tres heurísticas (métodos) fundamentales que tienen amplia aplicación. Incluye la regla de diez (Rule of Ten - ROT), la razón de riesgo o peligro del vapor (VHR) y la razón de riesgo de las partículas (PHR). La ROT y la VHR se aplican a los agentes que son líquidos volátiles o semi-volátiles y un número limitado de sólidos que tienen una presión de vapor apreciable a las condiciones de interés. La concentración de la exposición se expresa en partes por millón (ppm) o partes por billón (ppb). Si dos agentes químicos tienen la misma concentración de exposición (por ejemplo, 100 ppm) ambos tendrían el mismo número de moléculas en una unidad de volumen de aire, pero si los agentes tienen un peso molecular diferente, su masa por unidad de volumen de aire serían diferentes. La concentración expresada en ppm se puede calcular utilizando la ecuación 26.1.

Concentración de vapor saturado (SVC) = [Presión de vapor del agente en mm Hg de / 760 mm Hg de (presión atmosférica)] * 1.000.000 **(26.1)**

Por ejemplo, si un agente tiene una presión de vapor, VP = 10 mm Hg, la concentración de vapor saturado será:

SVC del agente = (10 mm de Hg / 760 mm de Hg) * 1.000.000 = 13.160 ppm **(26.2)**

Para los agentes que son partículas, se utiliza la PHR como heurística. La métrica de la exposición se expresa en miligramos por metros cúbicos (mg / m³) o microgramos por metro cúbico (ug/m³) y se refiere a la masa presente en lugar de moléculas. A continuación se presenta una discusión de cada heurística.

REGLA DE DIEZ (ROT)

La regla de diez correlaciona la fracción de la presión de vapor saturado con el nivel de control y se resume en el cuadro adjunto **26.1**. La Regla de diez se basa en la reducción gradual del potencial máximo de concentración en el aire de un químico volátil resultante de niveles progresivamente más altos de contención. Por cada cambio de nivel en la contención (mediante el uso de controles de ingeniería), la concentración máxima se reduce en un orden de 10. La base de la norma es la observación empírica de los escenarios de exposición que se dispone de mediciones cuantitativas.

La fracción de saturación es un aproximado del percentil 95. No se debe considerar como un nivel de exposición absoluta y sólo permite al HI disponer de una estimación de la exposición razonable.

TABLA 26.1 – REGLA DE DIEZ

NIVEL DE CONTROL	FRACCION DE SATURACION DEL VAPOR (SVC)
Espacio Confinado – sin ventilación	1/10 de saturación
Ventilación mala o limitada	1/100 de saturación
Buena ventilación ~ 6 cambios de aire por hora	1/1,000 de saturación
Captura del contaminante	1/10,000 de saturación
Contención	1/1,000,000 de saturación

Por ejemplo, el benceno tiene una presión de vapor saturado a 25°C de 95,2 mm de Hg y la presión atmosférica es de 760 mm de Hg. La presión de vapor saturado (VP) de benceno a 25°C se calcula de la siguiente manera:

PV saturado de benceno =

$$(95,2 \text{ mm de Hg} / 760 \text{ mm de Hg}) * 1.000.000 = 125.000 \text{ ppm benceno (26.3)}$$

Por lo tanto, si el benceno se utiliza en una habitación con buena ventilación general, las exposiciones se esperan del orden de 125 ppm. La mayoría de los HI, que han trabajado con los escenarios de exposición asociados con benceno saben que el benceno requiere controles de ingeniería como la contención para reducir la exposición a un orden de magnitud del OEL (1 ppm PEL, OSHA, 0,5 ppm TLV, ACGIH).

En el caso de otra sustancia química como metil etil cetona química (MEK), un producto común utilizado como disolvente, en pinturas y recubrimientos, tiene una presión de vapor de 89,7 mm de Hg (25°C), un valor comparable al benceno. Análogo al ejemplo del benceno anteriormente, puede demostrarse que la concentración del vapor saturado alcanza 118.000 ppm. En este caso, una buena ventilación general resultaría en exposiciones en el orden de 120 ppm, que está por debajo de límite de exposición OEL del MEK, (200 ppm, según OSHA y ACGIH). La regla de los diez ilustra por qué el MEK es aceptable en los disolventes, pinturas y aplicaciones de recubrimiento mientras que el benceno no es permitido.

El ROT es especialmente útil en situaciones en las que un OEL formal no se ha establecido ya que el resultado de aplicar la regla es una estimación de la exposición en lugar de la asignación de un correcto control de la exposición ECC, relacionada con el OEL.

El ROT es una muy buena herramienta de detección que se puede aplicar muy rápidamente, por ejemplo, cuando las evaluaciones de las exposiciones parten del proceso de aprobación de productos químicos.

Traducción y Adaptación

Magda L. Góngora Guaje QI, ESO ; José Luqués Serna IQ ;
Álvaro Araque García, IQ ESHI.

Razón de riesgo de Vapor (VHR, por sus siglas en inglés)

La VHR es una indicación del potencial de un agente de exceder los niveles aceptados. Tratándose de vapores, la importancia de la exposición está relacionada tanto por la tendencia de un material para vaporizarse como del nivel de concentración en el aire que pueden causar efectos perjudiciales. La VHR es la medida de la capacidad de un agente puro para volatilizarse (expresada como presión de vapor) dividido por el nivel de exposición ocupacional del material (OEL), según se encuentra expresado en la ecuación 26.4

$$VHR \text{ del Agente} = VP \text{ del Agente} / OEL \text{ del Agente} \text{ (26.4)}$$

Dónde:

VHR es la razón de riesgo de vapor del agente

VP es la presión de vapor del agente puro

OEL es el límite de exposición ocupacional permitido del agente

Por ejemplo, el benceno con una presión de vapor de 95,2 mm de Hg a 25°C y un OEL de 0,5 ppm, utilizando la Ecuación 26.4, da como resultado un VHR de 190.

La razón de riesgo del vapor puede vincularse a un nivel requerido de control necesario para asegurar una zona aceptable para la salud de los trabajadores. Para mayor comprensión observemos la escala de valores VHR de 1 a 6, mostrada en la tabla 26.2

TABLA 26.2 –RAZÓN DE RIESGO DEL VAPOR RELACIONADO CON VENTILACIÓN

ESCALA DE VHR	RAZON DE RIESGO DEL VAPOR (VHR)	NIVELES DE CONTROL REQUERIDO
1	<0,05	Ventilación general ~ 3 to 6 cambios de aire / hora.
2	0,05 to < 1	Buena ventilación general (BVG) ~ 6 to 12 cambios de aire /hora.
3	1 to < 25	BVG con puntos de captura en sitios de emisión del contaminante.
4	25 to < 500	Puntos de captura más contención o aislamiento parcial.
5	500 to < 3000	Contención primaria de focos de emisión
6	> 3000	Contención primaria y secundaria de focos de emisión

Traducción y Adaptación

Magda L. Góngora Guaje IQ, ESO ; José Luqués Serna IQ ;
Álvaro Araque García, IQ ESHI.

Reglas y Guías para Facilitar el Juicio Profesional en Higiene Industrial

Rules and Guidelines to Facilitate Professional Judgments . Chapter 26. AIHA.
A Strategy for Assessing and Managing Occupational Exposures. Fourt Edition.
2016

6

La relación entre VHR y el nivel requerido de control se basa en observaciones empíricas de los supuestos de exposición por mediciones cuantitativas que estaban disponibles. Ejemplos de la ventilación necesaria para los diversos agentes en función de su correspondiente VHR incluyen los siguientes:

- MEK tiene un PV = 86,7 mm de Hg y una OEL de 200 ppm, VHR = 0,42 - requiere una buena ventilación general ~ 6 a 12 cambios de aire / hora. (BVG)
- El cloruro de metileno tiene una VP = 430 mm de Hg y una OEL de 25 ppm, VHR = 17,2 - requiere BVG con captura en los puntos de emisión.
- Hexaclorociclopentadieno (C56) tiene una VP = 0,06 mm de HG y un OEL de 0,01 ppm, VHR = 6 - requiere BVG con captura en los puntos de emisión
- El benceno tiene un VP = 95,2 mm de Hg y una OEL de 0,5 ppm, VHR = 190.4- requiere captura en los puntos de emisión y contención donde sea necesario.
- El tolueno tiene un VP = 28.4 de Hg y una OEL de 20 ppm, VHR = 1,42 - BVG con captura en los puntos de emisión

Si dos productos químicos tienen la misma VHR, requerirán el mismo nivel de control para asegurar que la exposición no resulte excesiva. El VHR permite al HI utilizar los datos de los productos químicos para estimar la exposición. Considere el siguiente ejemplo que ilustra el uso de los VHRs.

Ejemplo:

Supongamos que una planta tiene una confiable evaluación de la exposición que indica que la exposición a ciclohexano es de 25 ppm (percentil 95) en un área de proceso específico. El OEL del ciclohexano es de 100 ppm y su presión de vapor a 25 °C es 96,9 mm de Hg (VHR = 0,96 que corresponde a una escala VHR de 2(Tabla 26.2). En la planta les gustaría utilizar MEK en el proceso en lugar del ciclohexano. Cuál sería el nivel de exposición a MEK como producto de la sustitución?

Como se ha indicado anteriormente el MEK tiene una VP = 86,7 mm de Hg y un OEL de 200 ppm y por lo tanto un VHR = 0,42.

Reglas y Guías para Facilitar el Juicio Profesional en Higiene Industrial

Traducción y Adaptación

Magda L. Góngora Guaje QI, ESO ; José Luqués Serna IQ ;
Álvaro Araque García, IQ ESHI.

Rules and Guidelines to Facilitate Professional Judgments . Chapter 26. AIHA.
A Strategy for Assessing and Managing Occupational Exposures. Fourt Edition.
2016

7

1. Calcular la relación VHR del MEK y ciclohexano:

$$VHR_{MEK} / VHR_{Ciclohexano}$$

$$= 0,42 / 0,96 = 4,44 \text{ (26,5)}$$

2. Calcular la exposición del ciclohexano como% del OEL:

$$25 \text{ ppm} / 100 \text{ ppm} = 25\% \text{ (26.6)}$$

3. La MEK tiene un VHR inferior y por lo tanto el% de OEL será menor, por lo anterior:

$$\% \text{ OEL MEK} = 25\% * 0,42 / 0,96 = 10,9\% \text{ (26,7)}$$

El nivel de exposición del MEK esperado será 10,9% del OEL del MEK Nivel

$$\text{de exposición esperado será} = 10,9\% * 200 \text{ PPM} = 21,9 \text{ ppm (26,8)}$$

No está claro donde fue formulado por primera vez el concepto de razón de riesgo del vapor. Popendorf (3) define en 1984 los términos de vapor de riesgo de vapor (VHR) y el log (VHR) como índice de riesgo de vapor (VHI). Dunham, et al. (4) utilizaron el VHI en una evaluación de la exposición para establecer sustitutos de disolventes adecuados y Stenzel (5) utilizo el VHR en un esquema de evaluación semi-cuantitativa de la exposición junto con el nivel de control y la frecuencia y duración de las tareas para clasificar la exposición en estratos definidos como una fracción o múltiplo del OEL. Stenzel utilizo el concepto VHR para estimar el índice de olor que se define como la presión de vapor del agente dividido por umbral de olor del agente. (6)

Hay algunas situaciones de exposición complejas que requieren pasos adicionales para determinar el VHR o aplicar la tabla ROT. Estos escenarios incluyen mezclas, procesos en condiciones no ambientales, polímeros, productos químicos sometidos a descomposiciones químicas y serán discutidos más adelante en este capítulo.

Relación de partículas peligrosas (PHR, por sus siglas en ingles)

Aquellos agentes que generen partículas aéreas, aerosoles o fibras, la heurística apropiada es la relación de peligro potencial en vez de VHR. La exposición métrica está dada en miligramos por metro cubico (mg/m³) o microgramos por metro cubico (ug/m³) y está relacionada a la masa del agente o al número de partículas por unidad de volumen de aire, en cambio en el caso de las moléculas se expresan de unidades de volumen (ppm) con el VHR.

$$PHR = WT\%/OEL \text{ (mg/m}^3\text{)} \text{ (26.9)}$$

Traducción y Adaptación

Magda L. Góngora Guaje QI, ESO ; José Luqués Serna IQ ;
Álvaro Araque García, IQ ESHI.

*Rules and Guidelines to Facilitate Professional Judgments . Chapter 26. AIHA.
A Strategy for Assessing and Managing Occupational Exposures. Fourth Edition.
2016*

Para materiales puros el % WT es igual a 100: Cuando se comparan dos sustancias químicas, aquella con el más alto PHR será considerado el de riesgo más significativo.

TABLA 26.3 - RELACIÓN DE PARTÍCULAS PELIGROSAS Y EL USO DE VENTILACIÓN

Relación de partículas peligrosas (PHR) Escala	Rango de los límites de exposición ocupacional de los agentes (mg/m3)	Niveles de Control Requerido
1	>5	Ventilación General ~ 2 a 4 renovaciones de aire/hora
2	≤ 5 a 1	Buena ventilación general + Ventiladores ~ 4 a 6 renovaciones de aire/hora
3	≤ 1 a 0.1	Buena ventilación general + Ventiladores ~ 6 a 8 renovaciones de aire/hora
4	≤ 0.1 a 0.01	Captura en el punto de emisión con la contención donde sea posible
5	≤ 0.01 a 0.001	Contención
6	≤ 0.001	Contención Primaria y Secundaria

La base del PHR es el rango de potencia usado con el desempeño basado en los límites del control de exposición relacionados a los ingredientes farmacéuticos activos publicados por Naumann. El concepto presentado ha mostrado aplicaciones más allá de la industria farmacéutica.

En la tabla 26.3 se ha hecho un ajuste si el agente es polvoriento. Estos agentes están relacionados con el tamaño de la partícula, forma, carga electrostática, contenido de humedad y densidad del material lo que da como resultado un polvo estable o un aerosol en el aire. Por lo tanto las partículas de polvo o aerosol no se asientan con facilidad. Una discusión técnica de los agentes polvorientos puede ser encontrada en el estudio de NIOSH (ECTB 154-11A [1986]) reportado por Cooper⁽⁸⁾. Como una simple regla de oro el autor recomienda que si un agente tiene un polvo muy fino el control de ingeniería requerido debería incrementarse un nivel. Por ejemplo, si un agente tiene un valor de 3 en la escala PHR, el control recomendado debería ser asignado como si tuviera un valor de 4 en la escala PHR.

Traducción y Adaptación

Magda L. Góngora Guaje QI, ESO ; José Luqués Serna IQ ;
Álvaro Araque García, IQ ESHI.

*Rules and Guidelines to Facilitate Professional Judgments . Chapter 26. AIHA.
A Strategy for Assessing and Managing Occupational Exposures. Fourt Edition.
2016*

Presión de Vapor (PV, presión de vapor)

La presión de vapor del agente es usado para calcular el ROT y VHR. Las presiones de vapor son dependientes de la temperatura. Normalmente las presiones de vapor son reportadas a una temperatura estándar de 25°C. Para ajustar la PV por temperatura, la temperatura de interés sera la temperatura del líquido del que proviene y no del ambiente. Por ejemplo, si un trabajador está desengrasando partes usando un baño desengrasante a 35°C, en un cuarto a 25°C la presión de vapor usada en el cálculo de ROT y del VHR es la presión de vapor a 35°C., Considerando que la temperatura del proceso no es comúnmente a temperatura ambiente, hay necesidad de calcular las presiones de vapor a temperaturas diferentes a las reportadas a 25° C.

Las dos formas más comunes para calcular las presiones de vapor son la ecuación de Antoine y la ecuación de Clausius Clapeyron.

Una muy buena fuente de información sobre las propiedades físicas y químicas es el banco de información de sustancias peligrosas (HSDB) localizado en TOXNET el cual está disponible gratis y es mantenido por la NIH, U.S. en la librería nacional de medicina (<http://toxnet.nlm.nih.gov/>).

LA ECUACIÓN DE ANTOINE

La relación de PV con la temperatura usada en la ecuación Antoine es definida a continuación:

$$\log_{10}(p) = A - (B / (t + C))$$

p=presión de vapor (mmHg)

t= temperatura (°C)

A, B & C son contantes únicas para cada producto químico

En este capítulo se proporciona una hoja de EXCEL con el nombre de Antoine-template.xls, la cual cuenta con las constantes para varios sustancias con el fin de asistir en los cálculos. Esta hoja puede ser actualizada para incluir otros químicos cuyas constantes pueden ser encontradas en los manuales de química y física. También, la herramienta de lista de chequeo localizada en la AIHA, Comité estratégico de la evaluación de la exposición (EASC, por sus siglas en inglés) que proporciona la posibilidad de calcular presiones de vapor bajo condiciones no ambientales utilizando la ecuación de Antoine.

Traducción y Adaptación

Magda L. Góngora Guaje QI, ESO ; José Luqués Serna IQ ;
Álvaro Araque García, IQ ESHI.

Reglas y Guías para Facilitar el Juicio Profesional en Higiene Industrial

*Rules and Guidelines to Facilitate Professional Judgments . Chapter 26. AIHA.
A Strategy for Assessing and Managing Occupational Exposures. Four Edition.
2016*

10

ECUACIÓN DE CLAUSISUS CLAPEYRON

Si la constante de Antoine no está disponible un estimado de la presión de vapor puede obtenerse utilizando la ecuación de Clausius Clapeyron. Esta ecuación establece que graficando el logaritmo LOG₁₀ (P) vs. 1/T resulta una línea recta con la ecuación:

$$\log_{10}(p) = m (1/T) + C$$

Donde:

P = presión de vapor en mmHg

T= temperatura en grados absolutos (K)

m = pendiente de la línea

C = intersección de la línea

Si la PV se conoce en dos puntos, se puede determinar la pendiente y el punto de intersección, para calcular la presión de vapor a cualquier temperatura para esa sustancia. Uno de los puntos que se puede utilizar es la presión de vapor reportada en el HSDB (normalmente a 25°C). El segundo punto que puede ser usado es el punto de ebullición de la sustancia. La presión de vapor de una sustancia a su punto de ebullición es 760 mm Hg. Ocasionalmente para algunas sustancias con un punto de ebullición muy alto, se reporta un punto de ebullición con la presión reducida, por ejemplo, el HSDB puede reportar un punto de ebullición de 100°C a 200 mmHg. En este caso, 200 mmHg a 100°C es el segundo punto. El capítulo proporciona una hoja de Excel con el nombre de Claus.-Clap. Template.xls para calcular la pendiente de la línea y la presión de vapor en cualquier temperatura deseada.

En el material complementario se suministra un grupo de problemas (VP- Problem Set 1-Answers.doc) al igual que las correspondientes hojas de Excel (VP –Set-1-SS.xls)) para ilustrar el uso de las hojas de la presión de vapor.

Una tercera manera de estimar la presión de vapor es con una simple regla de oro, la cual es útil pero solo sobre un rango específico de temperaturas y debería ser considerado como un estimado inicial. La regla dice: “la presión de vapor se duplica cada vez que se incrementa 10 ° C la temperatura”. Por lo tanto, si un agente tiene una presión de vapor de 100 mmHg a 25°C, su presión de vapor sería aproximadamente 200 mmHg a 35°C.

Traducción y Adaptación

Magda L. Góngora Guaje QI, ESO ; José Luqués Serna IQ ;
Álvaro Araque García, IQ ESHI.

Reglas y Guías para Facilitar el Juicio Profesional en Higiene Industrial

*Rules and Guidelines to Facilitate Professional Judgments . Chapter 26. AIHA.
A Strategy for Assessing and Managing Occupational Exposures. Fourth Edition.
2016*

MEZCLAS

Es muy común para escenarios de exposición involucrar mezclas en cambio de solamente materiales puros. El ROT, VHR, y PHR son heurísticos aplicables, pero se necesitan cálculos adicionales para determinar la presión de vapor para cada componente. En las mezclas la presión de vapor asociada con cada componente es menor que la presión de vapor observada en líquidos puros. En soluciones no acuosas, la presión de vapor ajustada para cada componente puede ser determinada aplicando la ley de Raoult y en soluciones acuosas, el ajuste es hecho utilizando la ley de Henry. Se adjunta una hoja de Excel junto con las instrucciones y los casos de estudio para ilustrar el uso de las leyes de Henry o Raoult para determinar los ajustes en la presión de vapor.

LEY DE RAOULT

La presión de vapor de cualquier componente específico de una mezcla se reduce en proporción a la fracción molar de cada componente específico en la mezcla. La siguiente ecuación expresa la relación.

$$P_A = X_A * P^{\circ}_A$$

Donde:

P_A es la presión de vapor del componente A sobre la solución

X_A es la fracción molar del componente A en la mezcla, y P^o_A es la presión de vapor del componente puro a 25 °C

La ley de Raoult asume un comportamiento ideal de los gases, por lo tanto, las fuerzas entre todas las moléculas (el mismo y los otros componentes) de la mezcla son los mismos, hay algunas situaciones en las cuales esto no aplica. Reinke incluye una discusión donde la ley de Raoult no soporta ni provee una guía para abordar la desviación.

Traducción y Adaptación

Magda L. Góngora Guaje QI, ESO ; José Luqués Serna IQ ;
Álvaro Araque García, IQ ESHI.

Rules and Guidelines to Facilitate Professional Judgments . Chapter 26. AIHA.
A Strategy for Assessing and Managing Occupational Exposures. Fourt Edition.
2016

El ajuste de la presión de vapor proveniente de la ecuación de la ley de Raoult para cada componente puede entonces ser utilizada para calcular el correspondiente VHR del componente y aplicarlo al ROT. Se proporciona una

Hoja de Excel titulada “Mixture Template – Raoult’s Law” para completar todos los cálculos.

Considere una mezcla con las siguientes composiciones:

TABLA 26.4. EJEMPLO MEZCLAS

Componentes Químicos	Porcentaje en Peso (%WT, siglas en inglés)
Tolueno	40
Xileno	20
Etil Acetato	20
Benceno	2
Cloruro de Metileno	3
Tetracloruro de Carbono	15

La Tabla 26.5 presenta las columnas pertinentes de la mezcla – Plantilla Ley de Raoult

TABLA 26.5 – EJEMPLO DE CÁLCULO DE MEZCLAS USANDO LA LEY DE RAOULT

CAS	Sustancia Química	A	B	C	D	E	F	G	H	I
		WT (%)	OEL (ppm)	MW	VP (mm)	Moles	Fracción Molar	VP Ajustada	VHR Ajustado	VHR %
Numero		MSDS	Averiguar	Averiguar	Averiguar	A/C	E/total E	F* D	(G/B)	(H/MaxH)* 100
108-88-3	Tolueno	40	20	92.1	28.44	0.434	0.431	12.229	0.611	12.70%
106-42-3	Xileno	20	100	106.2	8.74	0.188	0.187	1.632	0.016	0.34%
141-78-6	Etil Acetato	20	400	88.1	93.2	0.227	0.225	20.977	0.052	1.09%
71-43-2	Benceno	2	0.5	78.1	94.8	0.026	0.025	2.407	4.814	100.00%
75-09-2	Cloruro de Metileno	3	25	84.9	435	0.035	0.035	15.239	0.610	12.66%
56-23-5	Tetracloruro de Carbono	15	5	153	115	0.098	0.097	11.178	2.236	46.44%
	Total	100.0				1.009	1.000	63.662	8.339	

Los siguientes pasos deben ser seguidos por el uso de la hoja de cálculo. Las columnas están resaltadas en rojo para referencia.

La tercera fila de la tabla indica donde que los datos pueden averiguarse o proporciona la fórmula para obtener el valor en la columna.

- El IH debe completar las celdas en rosado
- Los nombres de los componentes y WT (%) (COLUMNA A) puede ser encontrado en las hojas de datos para mezclas SDS
- El numero CAS es opcional pero es una información muy útil. Muchos químicos tienen nombres muy similares y el mismo químico puede tener múltiples nombres válidos. El numero CAS es un identificador único y algunas base de datos tales como el HSDB pueden ser buscada por el numero CAS
- La información en las columnas B, C y D podrían estar en la SDS pero algunas veces la calidad de los datos SDS son cuestionables. El autor recomienda preferiblemente que el IH use la HSDB localizada en el TOXNET mencionado arriba.
- El número de moles (columna E) es determinado dividiendo el WT (%) entre los componentes MW, de la columna C. Para simplicidad, se asume que hay 100 gr de mezcla lo cual indicara que el % WT es igual al número en gr De cada componente.
- El número en la base de la columna E (1.009) es el número total de moles en la mezcla
- La fracción molar en la columna F es entonces determinada por la división de cada número de moles de los componentes entre el número total de moles.
- La ley de Raoult que se calcula en la columna G, se obtiene de multiplicar la fracción molar en la columna F y la presión de vapor del componente puro encontrado en la columna D
- La columna H contiene el VHR tal como se describe en la sección VHR explicada anteriormente, con la excepción de que el ajuste de la ley de Raoult se usa para mezclas. El número en rojo en el fondo de esta columna (8.339) es el total de los VHR de cada componente en la mezcla.
- La columna I contiene el % VHR. El porcentaje VHR indica cual VHR es el más alto (100%) y el porcentaje relativo de cada otro VHR en la mezcla. El componente que tiene VHR igual al 100% es considerado el componente predominante.

COMPONENTE PREDOMINANTE

El componente predominante de una mezcla es el componente que tendrá la más alta probabilidad de exceder su correspondiente OEL. En este caso el benceno es el componente predominante. Si las exposiciones al benceno son conocidas (por ejemplo una exposición de 0,5 ppm, OEL de benceno), entonces la concentración de cada otro componente puede ser calculada usando el VHR % en la columna I. Por ejemplo, en esta mezcla de tetracloruro de carbono el porcentaje VHR es del 46.4%. Esto significa que si las exposiciones al tetracloruro de carbono fueran medidas, estas se observarían en aproximadamente 46,4% de su OEL de 5 ppm o sea 2,32 ppm. Si la exposición de por lo menos un componente de la mezcla es medido el IH puede calcular los niveles de exposición de los otros componentes. Esto podría reducir el costo del monitoreo debido a que no todos los componentes de la mezcla necesitan ser monitoreados. Otra situación aplicable ocurre cuando un componente específico es muy difícil de analizar. El IH puede en vez de ello puede seleccionar un componente sustituto para medir aquel que requiera un proceso analítico simple. Finalmente el ejemplo muestra que los componentes de la mezcla en concentraciones mucho mayores (% WT) podrían, desde una perspectiva de exposición, no ser el componente de interés. Cada componente de la mezcla (excepto el benceno) estaría adecuadamente controlado con una buena ventilación general. Una exposición significativa podría haber sido omitida por el IH si ellos solo consideran los componentes de la mezcla que se encuentran en las mayores proporciones de WT %

La tabla 26.6 es generada de la hoja de cálculo de la ley de Raoult. Esta presenta la exposición esperada para cada componente de la mezcla asociada con cada nivel de control.

Note que a pesar de que la mezcla solo contiene el 2% de benceno, el ROT indica que la ventilación de captura es necesaria para asegurar que la exposición a todos los componentes de la mezcla sean controlados apropiadamente. Esto es consistente con el ajuste real VHR (8.339) en la tabla 26.5 la cual tiene una escala VHR igual a 3.

TABLA 26.6 – EJEMPLO DE CÁLCULOS PARA MEZCLAS – REGLA DE DIEZ

Componente	OEL ppm	VP Corregida mm Hg	Grado de Ventilación – Concentraciones en ppm					
			VP Saturada	Muy limitada	Pobre	Buena	Captura	Contención
Tolueno	20	12.229	16090.57	1609.1	160.9	16.1	1.61	0.16
Xileno	100	1.632	2147.19	214.72	21.5	2.15	0.215	0.022
Etil acetato	400	20.977	27600.86	2760.1	276.0	27.6	2.76	0.28
Benceno	0.5	2.407	3166.94	316.7	31.7	3.2	0.32	0.032
Cloruro de metileno	25	15.239	20051.90	2005.2	200.5	20.05	2.01	0.201
Tetracloruro de carbono	5	11.176	14707.89	1470.8	147.1	14.7	1.47	0.147

Traducción y Adaptación

Magda L. Góngora Guaje QI, ESO ; José Luqués Serna IQ ;
Álvaro Araque García, IQ ESHI.

Rules and Guidelines to Facilitate Professional Judgments . Chapter 26. AIHA.
A Strategy for Assessing and Managing Occupational Exposures. Fourt Edition.
2016

Ley de Henry

Como se indicó anteriormente la ley de Rault asume condiciones de gas ideal. Esto es, las fuerzas entre todas las moléculas (el mismo componente y diferentes componentes) de la mezcla es la misma. Este no es el caso con las moléculas polares especialmente en soluciones acuosas. Las moléculas de agua están atadas a porciones específicas de las moléculas de varias sustancias en solución. Para estas soluciones, la ley de Henry se utiliza para calcular las presiones de vapor ajustadas.

$$P = k_H C$$

P = Presión parcial de la sustancia en el agua por encima del líquido

k_H = Constante de Henry para una sustancia química

C = es la concentración molar de la sustancia en la solución acuosa.

Considere una mezcla del 10% de metanol y 5% de acetona en agua. La presión de vapor ajustada de la ecuación de Henry para cada componente puede utilizarse para calcular la VHR del componente y aplicar la ROT. La hoja de cálculo “Mixture Template – Henry’s Law” se utiliza para realizar todos los cálculos. La tabla 26.7 proporciona las columnas pertinentes de la hoja de cálculo.

TABLA 26.7 – EJEMPLO DE CALCULO DE MEZCLAS USANDO LA LEY DE HENRY

CAS	Sustancia Química	A	B	C	D	E	G	H	I	J
		WT (%)	OEL (ppm)	MW	k_H (atm*L/mol)	Molaridad (mol/L)	VP Ajustada (mm de Hg)	VHR Ajustada	%VHR	Constante de Ley de Henry (atm*m ² /mol)
Número		MSDS	Averiguar	Averiguar	J*1000	(A*10)/C	D*E*760	(G/B)	(H/Max H)*100	
67-56-1	Metanol	10	200	32.04	4.55E-03	3.121	10.793	0.054	51.94%	4.55E-06
67-64-1	Acetona	6	250	58.08	3.97E-02	0.861	25.975	0.104	100.00%	3.97E-05
7732-18-5	Agua	85	10000	18	8.41E-06	47.222	0.302	0.000	0.03%	8.41E-09
	Total	100				51.2042	37.0691	0.158		

Se deben seguir los siguientes pasos para utilizar la hoja de cálculo:

- Al igual que con la Ley de Raoult, se deben completar las celdas rosadas. Las constantes de la ley de Henry pueden usualmente encontrarse en HSDB en TOXNET. Observe que estas constantes se pueden expresar en varias unidades. Las unidades típicamente en referencia se expresan en atm*m3/mol.
- Esta hoja de cálculo requiere que los valores de las constantes de la ley de Henry se expresen en unidades de atm*L/mol. La conversión de la constante en las unidades requeridas en la columna D se obtiene el valor indicado en la columna J por 1000.
- La molaridad (Columna E) se calcula de la composición en %WT. El agua pesa 1 gramo por mililitro, por lo tanto se necesita una cantidad de 1000 g para contar con 1 litro de agua. Nuevamente, se asume que es una mezcla de 100 gramos. La molaridad en la columna E, entonces se calcula multiplicando la columna A por 10 y luego dividiéndolo por el peso molecular de la columna C.
- La presión de vapor ajustada se calcula multiplicando la columna D (Constante de Ley de Henry) por la columna E (Molaridad) por 760 (Para convertir las atmósferas en mm de Hg).
- La columna del VHR, Columna H y el %VHR se calculan igual que en la hoja de cálculo de la Ley de Raoult.

Note que la acetona es el componente de control o predominante aunque su composición sea menor a la del metanol. La VHR ajustada de 0.158 corresponde a un puntaje de 2 (Buena ventilación General).

EN LA TABLA 26.8 APARECEN LOS DATOS DE LA LEY ROT DE LA MISMA FORMA QUE SE HIZO CON LA LEY DE RAOULT.

Tabla 26.8 – Ejemplo de calculo de mezclas – Regla de Diez

Componente	OEL ppm	VP Corregida mm Hg	Grado de Ventilación – Concentraciones en ppm					
			VP Saturada	Muy limitada	Pobre	Buena	Captura	Contención
Metanol	200	10.793	14201	1420.10	142.20	14.22	1.42	0.142
Acetona	250	25975	34177	3417.70	341.8	34.18	3.418	0.342
Agua	10000	0.302	397	39.7	3.97	0.397	0.040	0.004

Esta tabla indica que la ventilación general es adecuada para el control de la exposición, pero si la actual ventilación es pobre, puede haber problemas con la exposición de la acetona.

La constante de la Ley de Henry depende de la temperatura. Una discusión detallada de esta

Traducción y Adaptación

Magda L. Góngora Guaje IQ, ESO ; José Luqués Serna IQ ;
Álvaro Araque García, IQ ESHI.

*Rules and Guidelines to Facilitate Professional Judgments . Chapter 26. AIHA.
A Strategy for Assessing and Managing Occupational Exposures. Fourt Edition.
2016*

dependencia de la temperatura va más allá de los objetivos de este capítulo, sin embargo se proporciona de un método aproximado. Usualmente se reportan a 25° C. Para mezclas menores a 80° C, se puede estimar razonablemente la constante para una sustancia específica utilizando la siguiente ecuación:

$$KH(\text{Nueva temperatura}) = KH(25^\circ \text{C}) * (VP(\text{Nueva Temperatura}) / VP(25^\circ \text{C}))$$

Donde:

$KH(\text{Nueva temperatura})$ = es la constante de la ley de Henry a la nueva temperatura.

$KH(25^\circ \text{C})$ = es la constante de la Ley de Henry a 25° C.

$VP(\text{Nueva Temperatura})$ = Es la presión de vapor a la nueva temperatura

$VP(25^\circ \text{C})$ = La presión de vapor de la sustancia a 25° C.

En casos especiales la Ley de Raoult y la Ley de Henry no aplican.

Algunos agentes o mezclas no son estables y se da una reacción química (o descomposición) que resulta en un nuevo agente no presente en el material original puro o mezcla. Existen reglas para direccionar estas situaciones pero se sugiere que el lector consulte con expertos técnicos tales como los químicos o los ingenieros para ganar entendimiento de las características de emisión y luego utilizar herramientas de modelamiento tales como aquellos que se proporcionan en IHMOD para desarrollar estimados de exposición.

Otro caso es cuando las moléculas contienen compuestos enlazados a su estructura como por ejemplo los polímeros. En este caso, la sustancia enlazada y el polímero no forman una mezcla. En muchos casos el fabricante proporciona las tasas de emisión. Nuevamente, es mejor utilizar estas tasas para estimar las exposiciones con IHMOD. Debe observarse que el porcentaje de la sustancia en el polímero no limita la cantidad de vapor en la parte superior. La concentración de vapor de la sustancia en la parte alta de los procesos con gases de escape continuarán hasta que se alcance la presión de vapor saturado. Esto puede ser de importancia crítica en caso de que haya necesidad de que un trabajador ingrese su cabeza a un tanque que contenga el polímero. Un polímero con una sustancia enlazada aún a niveles de ppm puede resultar en altas exposiciones. Otra preocupación puede ser que se presente una explosión. Si el agente posee un límite explosivo más bajo (LEL) que la concentración en el ambiente, la electricidad estática podría hacer que se dé una explosión. Típicamente las sustancias químicas tienen LELs del orden del 1% o aproximadamente de 1000 ppm.

Finalmente, hay una situación donde la mezcla no es homogénea. La composición de las fases controla la concentración de la sustancia en el aire. Esto sucede cuando los componentes tienen un bajo punto de solubilidad en el solvente tal como el caso del benceno y el agua. No es inusual que los componentes sean miscibles al comienzo y luego por condiciones del proceso o reacciones en la mezcla se formen capas.

PARTÍCULAS, AEROSOL Y FIBRAS

Las mezclas de partículas o aerosoles o fibras se relacionan con el porcentaje en peso de cada componente en la mezcla. Por ejemplo, si se mide las partículas totales para una mezcla y esta tiene un componente con el 50% de su composición, entonces el 50% del resultado de las partículas totales se le atribuye a ese componente. El componente control es el que consta del mayor valor PHR.

OTROS DETERMINANTES DE EXPOSICIÓN CANTIDAD

Parece que intuitivamente la cantidad debe considerarse como un factor en las evaluaciones, pero no siempre es el caso. Por ejemplo, si un trabajador está muestreando en un reactor de 1000 galones a través de una escotilla batch de 2 pies de diámetro o si muestrea en un reactor de 100 galones a través de una escotilla de 2 pies de diámetro, la exposición será la misma aunque el reactor más grande tenga una mayor cantidad del material presente. Otro aspecto relacionado con la cantidad es el tipo de empaque. Añadir cinco bolsas de 40 libras (200 libras) de paraformaldehído a un reactor puede resultar en mayor exposición que agregar un gran saco de 1000 libras. Con este ejemplo también hay exposición potencial al disponer de las bolsas. Otro caso es el muestreo de un proceso. El trabajador puede que solo esté tomando algunas onzas del material, pero también se necesita tomar en consideración, cuántas veces se lavó la botella de muestrear para asegurar un buen muestreo y donde el trabajador lo hizo.

PRESIÓN

La ROT y el VHR se basan en la difusión de sustancias hasta la zona respiratoria que cuenta con una presión neutral. En algunas situaciones tales como el llenado de tambores, el aire de la parte superior se fuerza a salir del tanque hacia la zona respiratoria. Este efecto de presión puede superar la capacidad de ventilación para diluir la concentración hasta niveles aceptables. El mismo tipo de situación puede ocurrir cuando se añade una sustancia volátil a un reactor que contiene sustancias a temperaturas elevadas. Al momento de añadir la sustancia a la superficie caliente de la otra que se encuentra adentro, inmediatamente tratará de alcanzar la presión de vapor a la nueva temperatura con el cual se da el efecto de presurización de salir del reactor hasta la zona respiratoria del trabajador. En estos casos se necesita posiblemente captura y contención en puntos de emisión para controlar adecuadamente las exposiciones.

