

## *Tema 10. Naturaleza y tratamiento de residuos.*

10.1 Naturaleza de los residuos peligrosos

10.2 La basura doméstica y los vertederos

10.3 La eliminación de residuos

### 10.1 Naturaleza de los residuos peligrosos

- **Sustancia peligrosa** → puede presentar algún daño al medio ambiente, en especial a organismos vivos.
- La mayoría de los residuos peligrosos que se manejan son sustancias químicas comerciales o son subproductos de su producción; no se consideran los materiales biológicos.
- Los materiales peligrosos incluyen aquellos que son:
  - **Tóxicos**, amenazan a la salud de un ser vivo cuando entra en su organismo
  - **Inflamables** y que queman fácil y rápidamente
  - **Corrosivos**; su carácter ácido o básico corroen fácilmente otros materiales
  - **Reactivos**, no inflamables o corrosivos, por ejemplo, aquellos materiales que presentan un peligro de explosión
  - **Radiactivos**

### Residuos inflamables

- Una sustancia **inflamable**, es la que quema con facilidad → participa en reacciones de oxidación con oxígeno atmosférico como oxidante.
- **Punto de inflamabilidad** → la menor temperatura a la que el vapor liberado por el líquido se inflama cuando está expuesto a la llama.

**Tabla 10.1:** Puntos de inflamabilidad y límites de inflamabilidad (porcentaje en volumen de aire) para algunas sustancias comunes

Sustancia	Punto de inflamabilidad / °C	Límite inferior de inflamabilidad / %	Límite superior de inflamabilidad / %
Metanol	+ 12	6,0	37
Acetona	- 20	2,6	13
Dietileter	- 43	1,9	36
Butano	- 60	1,8	8,4
Tolueno	+ 4	1,3	7,1
Cloruro de Metilo	+ 333	10,7	11,4
Amoníaco		16	25

- **Líquido inflamable** → posee una temperatura de inflamabilidad inferior a 60,5 °C.
- Algunos líquidos, también son **pirofóricos**, que significa que pueden autoinflamarse.
- Los **líquidos combustibles** se definen como aquellos que poseen puntos de inflamabilidad comprendidos entre 60,5 °C y 93,3 °C, de manera que queman menos fácilmente que los líquidos inflamables.
- El **límite inferior de inflamabilidad (LII)** es la menor proporción vapor/aire que puede mantener la ignición, mientras que el **límite superior de inflamabilidad (LSI)** corresponde a la máxima proporción que permite sustentarla.
- Existen sustancias peligrosas, que son oxidantes, que pueden substituir al O<sub>2</sub> para mantener la combustión. Algunos ejemplos de dichas sustancias son:
  - El ozono, O<sub>3</sub>; peróxido de hidrógeno, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>; y óxido nitroso, N<sub>2</sub>O
  - La forma elemental de los halógenos: F<sub>2</sub>, Cl<sub>2</sub> y Br<sub>2</sub>
  - Sustancias que contienen nitrato, como el ácido nítrico, HNO<sub>3</sub>, y el nitrato amónico, NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>
  - Las sustancias que contienen clorato: HClO<sub>4</sub>, NH<sub>4</sub>ClO<sub>4</sub>
  - El dicromato de sodio, Na<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>; y el permanganato de potasio, KMnO<sub>4</sub>, ambos en forma sólida.

- Un elemento en cada una de estas sustancias está en un estado de oxidación alto e inestable → tendencia a aumentar su número de electrones → capacidad oxidante.
- La tendencia a reaccionar varía entre los varios miembros de la serie anterior, en función de su estado físico o de su concentración si se encuentra en disolución, así como también de la naturaleza del material que oxidan.
- Algunos residuos oxidantes, pueden **disponerse** (*serie de tratamientos seguidos para eliminar o reducir el impacto negativo de los residuos*) por medio de su disolución en agua, tratando las disoluciones resultantes con agentes reductores suaves ( $\text{SO}_2$  o  $\text{Fe}^{2+}$ ).

### Sustancias reactivas

- Las **sustancias reactivas** son aquellas que pueden sufrir reacciones violentas.
- Algunas de ellas no necesitan otros materiales con los que reaccionar, ya que ciertas partes de la sustancia contiene agentes oxidantes y otras contienen agentes reductores, que reaccionan entre sí de forma exotérmica.
- Existe un número de moléculas enlazadas covalentemente que contienen enlaces que son débiles → por tanto tienden a ser bastante reactivos.
  - 📖 Enlaces débiles **O-O** (en relación a la mitad de la fuerza del enlace  $\text{O}=\text{O}$  tomado como estándar) en peróxidos,  $\text{ROOR}$ , e hidroperóxidos,  $\text{ROOH}$
  - 📖 Enlaces débiles **N=N** (comparado con el enlace triple  $\text{N}\equiv\text{N}$  en el nitrógeno diatómico) en azo-compuestos  $\text{C-N=N-C}$ , triacenos  $\text{N-N=N}$  y en el óxido nitroso  $\text{N=N=O}$
  - 📖 Enlaces débiles **C=C** en alenos  $\text{C=C=C}$ , y en polienos
  - 📖 Enlaces débiles **C-O** en anillos óxidos forzados de tres miembros
  - 📖 Enlaces débiles **N-O** en nitro-compuestos y nitratos, nitritos y compuestos nitrosos orgánicos
  - 📖 Enlaces débiles **halógeno-halógeno**, halógeno-nitrógeno y halógeno-oxígeno, en compuestos tales como los interhalógenos, los trihaluros de nitrógeno y los óxidos halógenos

- Otros compuestos dentro de esta clase de sustancias reactivas son los que reaccionan violentamente con agua, como los metales alcalinos, o los que reaccionan con agua o con disoluciones ácidas o básicas para expeler gases venenosos como cianuro o sulfuro de hidrógeno.

### Sustancias corrosivas

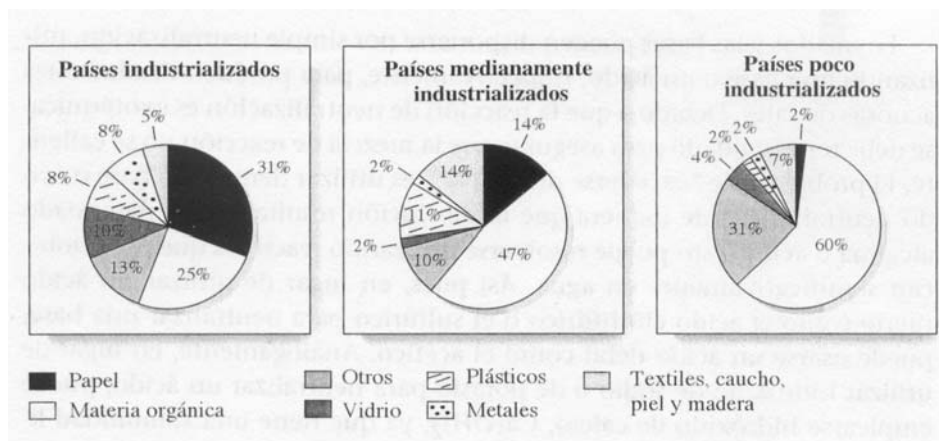
- Las **sustancias corrosivas** son aquellas que dan lugar a la deterioración de materiales con los que entran en contacto.
- Operan en virtud de que son ácidos o bases fuertes, y pueden, también, ser agentes deshidratantes y al mismo tiempo oxidantes ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ).
- Los otros ácidos fuertes clasificados como corrosivos son los ácidos clorhídrico,  $\text{HCl}$ , fluorhídrico,  $\text{HF}$ , y nítrico,  $\text{HNO}_3$ ; este último, en su forma concentrada es, también, un agente oxidante.
- Las bases fuertes y corrosivas más comunes son los hidróxidos de sodio ( $\text{NaOH}$ ) y de potasio ( $\text{KOH}$ ).
- Otras sustancias corrosivas son los interhalógenos y los óxidos halógenos → acidifican, oxidan y pueden deshidratar los tejidos vivos.
- Los ácidos y las bases pueden disponerse por simple neutralización.
- La reacción de neutralización es exotérmica → se debe tener cuidado.

### Sustancias tóxicas y radiactivas

- Los residuos tóxicos son aquellos que causan un deterioro en la salud humana o de otros organismos, cuando entran en el organismo vivo.
- Las especies más problemáticas son los metales pesados, los pesticidas organoclorados, los disolventes orgánicos y los PCBs.

## 10.2 La basura doméstica y los vertederos

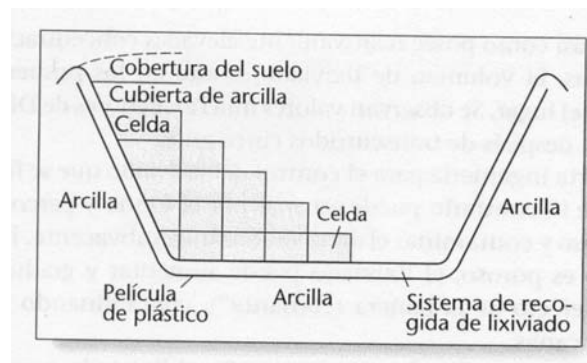
- La gran mayoría de material que se rechaza y que debe disponerse no representa ningún peligro, puesto que simplemente es "basura".
- El mayor generador de este tipo de **residuo sólido** - *residuo que es recogido y transportado por medios distintos al agua* - son los escombros de la construcción y de la demolición.
- El segundo gran volumen de residuo corresponde al generado por los sectores comerciales e industriales, seguido por el residuo doméstico generado en los domicilios.
- Un ciudadano de USA genera alrededor de 2 kilogramos de residuo doméstico/comercial por día, el doble de la media europea → no se consideran las cantidades mucho más grandes producidas por la minería y las industrias del petróleo y por la agricultura, o las cenizas procedentes de centrales eléctricas o las aguas residuales.



**Figura 10.1:** Composición media típica de residuos sólidos en países de diferente desarrollo.

- La fracción de residuo que corresponde a materia vegetal disminuye a medida que aumenta el grado de desarrollo. Lo contrario es cierto para el papel.
- Los plásticos, el vidrio y los metales dan cuenta, cada uno de ellos, de una décima parte del volumen del residuo sólido en países desarrollados, mientras que la materia orgánica (residuos de alimentos), dan cuenta de alrededor del doble de este valor.
- El método principal utilizado para deshacerse del **residuo sólido urbano, RSU**, es colocarlo en un vertedero, que, una vez llenado, habitualmente se cubre con suelo y/o arcilla.

- El vertido domina los métodos de disposición, ya que sus costes directos son sustancialmente menores que los correspondientes a la disposición por cualquier otro método.
- En el pasado, los vertederos eran simplemente "agujeros en el terreno" → se producía lixiviación que contaminaba a los acuíferos.
- Los vertederos municipales modernos están mucho mejor diseñados y construidos, a menudo para acoger residuos no peligrosos, y los lugares en que se emplazan están seleccionados para minimizar el impacto en el medio ambiente.



*Figura 10.2: Componentes de un vertedero moderno.*

- El **lixiviado** de vertederos contiene ácidos orgánicos volátiles, como el ácido acético, y varios ácidos grasos, bacterias, metales pesados, y sales de iones inorgánicos comunes como el ión  $\text{Ca}^{2+}$ .
- Los **microcontaminantes** presentes en los lixiviados de los RSU incluyen COVs típicos, como el tolueno y el diclorometano.
- El dióxido de carbono liberado de la descomposición de la materia orgánica puede acidificar el lixiviado, facilitando de este modo su capacidad de disolver más metales de los RSU.
- En general, el lixiviado de un vertedero posee una elevada demanda de oxígeno, así como posee relativamente elevadas concentraciones de metales pesados.
- El volumen de lixiviado es alto en los primeros años, una vez cubierto el lugar.
- Se observan valores mucho menores de DBO y menores volúmenes, después de transcurridos cinco años.

- Se requiere una cierta ingeniería para el control del lixiviado que se forma en el vertedero, de lo contrario puede escapar por el fondo y percolar a través del suelo poroso y contaminar el agua subterránea subyacente.
- Los componentes típicos utilizados para controlar el lixiviado consisten en:
  - Eliminación del lixiviado y sistema de recogida, seguido de tratamiento del líquido;
  - Colocación de un revestimiento alrededor de las paredes y en el fondo del vertedero, sintético o natural, impermeable al agua. La arcilla bentonítica es un excelente sellador y retiene eficientemente los metales pesados, se coloca entre dos capas de plástico.
- El tratamiento de lixiviado para disminuir de forma rápida el DBO, se consigue por degradación aeróbica, incluyendo procesos avanzados de oxidación que utilizan ozono.
- Algunas veces, el lixiviado recogido es simplemente devuelto al vertedero → en la segunda percolación buena parte de su contenido orgánico se degrada biológicamente.
- En un vertedero sanitario, los RSU son compactados en capas y cubiertos con 20 cm de suelo al finalizar las operaciones diarias
  - El vertedero consiste de muchas *celdas* adyacentes, correspondiendo cada una de ellas a un día de residuos.
  - Al finalizar el llenado total, el vertedero es cubierto por, aproximadamente, un metro de suelo o mejor de arcilla, que es un material bastante impermeable a la lluvia que precipita sobre su superficie.
  - Con el fin de suministrar una protección adicional, se coloca una *geomembrana* de plástico en la parte superior de la capa de arcilla.
- Inicialmente, la descomposición anaeróbica produce ácidos carboxílicos volátiles y ésteres, los cuales se disuelven en el agua que está presente.
- El olor nauseabundo que emana de los vertederos, probablemente, es debido a estos ésteres y a tioésteres.
- En la siguiente etapa de la descomposición, se emite gas metano en cantidades significativas a medida que los ácidos se van descomponiendo en CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>.

- A menudo, el gas se deja escapar a la atmósfera haciéndolo pasar por pozos o por juntas de grava dispuestas en el vertedero, y en algunos municipios, el gas metano se quema a medida que se escapa por las aberturas.

### 10.3 La eliminación de residuos

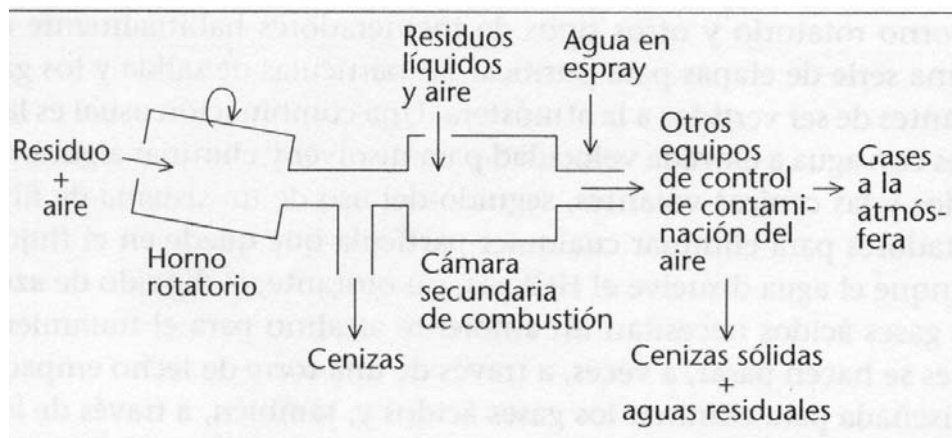
#### La incineración

- Además del vertido controlado, la manera más común de disponer los residuos, en particular los orgánicos y los biológicos, es por incineración → reducir significativamente el *volumen* de material
- En el caso de sustancias tóxicas o peligrosas, un objetivo todavía más importante es eliminar la amenaza tóxica del material.
- La incineración de residuos hospitalarios, se hace por medio de su esterilización.
- La práctica de la incineración está prohibida en algunas áreas.
- Papel, plásticos y madera, suministran el "combustible" para la llama.
- La mayoría de los incineradores de RSU domésticos comunes son unidades que queman en masa en una sola etapa.
- Los incineradores más modernos son de tipo modular, en la que la combustión se realiza en dos etapas.
  - Los residuos se colocan en una cámara primaria y se queman a una temperatura de alrededor 760 °C.
  - Los gases y las partículas que resultan se queman a  $T > 870$  °C en una cámara secundaria de combustión.
  - La cantidad de gases residuales se reduce mucho en las unidades de dos etapas comparado con los incineradores de una etapa.
  - Utilización del calor generado → agua caliente ó electricidad
- Los "productos" procedentes de incineradores municipales incluyen un residuo de sólidos que alcanza alrededor de una tercera parte del peso inicial de la basura.



- Las **cenizas fijas** es el material no combustible que se recoge en la parte inferior del incinerador.
- Las **cenizas volantes** es el material sólido finamente dividido que, habitualmente, es retenido por medio de filtros en la chimenea para impedir que sea liberado a la atmósfera.
- Buena parte de las cenizas corresponde a constituyentes inorgánicos del residuo, los cuales están formando sólidos en preferencia a gases.
- Algunas cenizas volantes son suficientemente tóxicas como para que deban ser tratadas posteriormente para descontaminarlas, inmovilizarlas o disponerlas.
- La preocupación ambiental más importante acerca de la incineración → la contaminación del aire que genera.
- Alrededor de la mitad de los costes de capital de las nuevas incineradoras, se invierten en los equipos de control de la contaminación del aire.
- Los controles incluyen:
  - *Filtro precipitador* → retiene partículas del flujo de gas con  $\phi > 0,5$  mm.
  - *Lavador de gases* → flujo de líquido o de sólido finamente dividido que se hace pasar a través del gas de salida; elimina HCl y el SO<sub>2</sub>.
- Los incineradores que tratan residuos peligrosos son más sofisticados → destrucción completa los materiales iniciales y estricto control de las emisiones.
- En las instalaciones modernas, se emplean llamas muy calientes, se asegura que haya oxígeno suficiente en la zona de combustión y se retienen los residuos un tiempo suficientemente largo en la zona de combustión, de manera que su **destrucción y eliminación efectiva (DEE)**, sea virtualmente máxima - más del **99,9999**.
- La presencia del CO a niveles superiores a 100 ppm en las emisiones gaseosas, se utiliza como indicador de combustión insuficiente.
- Las dos formas más comunes de incineradores de residuos tóxicos, son el horno rotatorio y el de inyección de líquido.
- El incinerador de **horno rotatorio**, puede aceptar residuos de todo tipo, incluyendo sólidos inertes como suelos y fangos.

- Los residuos se colocan en cilindros largos (>20 m), inclinados ligeramente, dispuestos a la entrada y que giran lentamente.
- El material no quemado esté continuamente expuesto a las condiciones oxidantes y a unas temperaturas de 650-1100 °C.
- En un periodo de alrededor de 1 hora, el residuo se desplaza por el cilindro y es quemado en gran parte.
- Los gases calientes de salida del reactor son enviados a una cámara secundaria de combustión (950 - 1200 °C) que no gira.



**Figura 10.3:** Diagrama esquemático de los componentes de un incinerador con horno rotatorio y con equipo de control de contaminación de aire.

- En algunas instalaciones, los residuos líquidos pueden entrar directamente a esta cámara como combustible.
- Los gases que salen de la cámara secundaria son enfriados rápidamente a unos 230 °C, por medio de un rociado con agua en evaporación.
- El horno rotatorio y otros tipos de incineradores habitualmente emplean una serie de etapas para purificar las partículas de salida y los gases ácidos antes de ser vertidos a la atmósfera.
- Una combinación usual es lavar los gases con agua a elevada velocidad para disolver y eliminar algunos gases ácidos y las cenizas volantes, seguido del uso de un sistema de filtros precipitadores para eliminar cualquier partícula que quede en el flujo de gas.

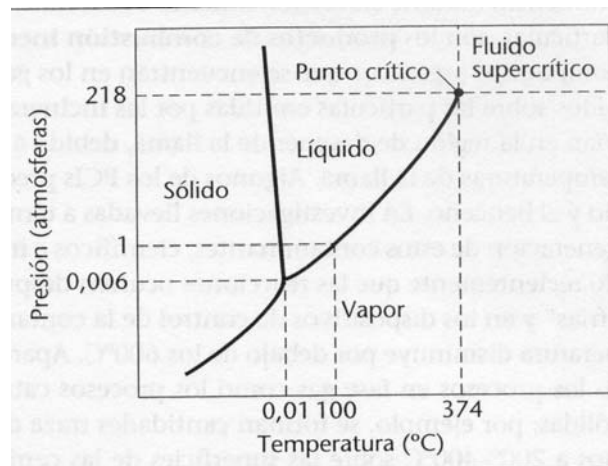
- No obstante, el dióxido de azufre y otros gases ácidos necesitan un ambiente alcalino para el tratamiento.
- Los **hornos de cementeras**, son un tipo especial de grandes hornos rotatorios que se utilizan para preparar cemento.
  - En estas unidades, se generan temperaturas muy altas (>1700 °C).
  - Además, los residuos en los hornos de cementeras son quemados con el combustible bien emplazado sobre la llama.
  - El tiempo de residencia del material en el horno es también mayor.
  - Los residuos líquidos peligrosos, a veces, son utilizados como parte del combustible (hasta un 40%) en estos hornos.
- En el **incinerador por inyección de líquido** - cilindro horizontal o vertical - los residuos líquidos son bombeados y dispersados en forma de una fina niebla.
  - Cuanto más finas son las gotas, más completa es la combustión.
  - Ocurre a unos 1600 °C y con un tiempo de residencia de 1-2 s.
  - Se utiliza un combustible, o algún residuo fácilmente combustible, para producir las temperaturas altas de combustión.
  - Sólo se utiliza una única cámara de combustión, aunque en algunas versiones modernas, se introduce una entrada secundaria de aire.
  - Los gases de salida, antes de verterse hacia la atmósfera pueden hacerse pasar a través de un lavado seco para eliminar los gases ácidos, y luego por un filtro precipitador para eliminar las partículas.
- En la incineración de residuos peligrosos preocupan los **productos de combustión incompleta**, (PCIs) → compuestos orgánicos que se encuentran en los gases y que quedan adsorbidos sobre las partículas emitidas por las incineradoras.
- Los PCIs se forman en la región de después de la llama (zonas "frías") y en los dispositivos de control de la contaminación → T < 600 °C.
- Algunos de los PCIs predominantes son el metano y el benceno.

- Aparentemente, ocurren tanto los procesos en fase gas como los procesos catalizados sobre partículas sólidas.
- Se forman cantidades traza de varias dioxinas y furanos a 200 - 400°C sobre las superficies de las cenizas volantes y el hollín, donde los procesos parecen estar catalizados por iones de metales de transición.
- Existe preocupación acerca del aumento de las emisiones que podrían ocurrir cuando la incineradora se clausura y durante los accidentes o fallos en el suministro de energía → se obtienen temperaturas menores durante un espacio de tiempo → se formarían presumiblemente mayores cantidades de dioxinas y furanos.
- También preocupan las emisiones fugitivas → escapes en válvulas, roturas pequeñas o vertidos imprevistos.
- Se ha encontrado que el polvo emitido de los hornos incineradores de cementera, contiene metales tóxicos y algunos PCIs.
- El residuo sólido que queda de la incineración de los residuos peligrosos contiene cantidades traza de materiales tóxicos.
- Estudios realizados en los Estados Unidos en los años 90, indicaron que se emiten muchas más dioxinas y furanos de la incineración de residuos sanitarios y municipales que de los residuos peligrosos.
- Se ha encontrado que el riesgo para la salud de la emisión de iones metálicos tóxicos de la incineración de residuos peligrosos, excede al correspondiente a compuestos orgánicos tóxicos.
- Se ha estimulado el desarrollo de otras tecnologías de disposición de residuos peligrosos:
  - La **combustión con sal fundida**, los residuos son calentados a 900 °C y destruidos por mezcla con carbonato de sodio fundido.
  - En los incineradores de lecho fluidizado, se suspende un material sólido (calcita, arena o alúmina) en aire y los residuos son quemados en el fluido a unos 900 °C.
  - Los **incineradores de plasma** pueden alcanzar temperaturas de unos 10.000°C, haciendo pasar una corriente eléctrica intensa a través de un gas inerte como el argón → En este

**plasma térmico** o **caliente**, todas las partículas viajan a velocidades altas y son térmicamente calientes.

### Uso de fluidos supercríticos

- Alternativa moderna a la incineración.
- A presiones y temperaturas en o más allá del **punto crítico**, ya no existen las fases líquida y gas separadas; en lugar de ello solo se encuentra el *estado supercrítico*, con propiedades que están entre las de un gas y las de un líquido.
- Para el agua, la presión crítica es de 218 atm y la temperatura crítica es 374 °C,



**Figura 10.4:** Diagrama de fases del agua

- Dependiendo, exactamente, de cuanta más presión se aplica, las propiedades físicas del fluido supercrítico varían entre las del gas (relativamente presiones bajas) y las de un líquido (presiones altas).
- La variación de las propiedades con  $P$  o  $T$ , es particularmente pronunciada cerca del punto crítico.
- Así pues, la densidad del agua supercrítica puede variar en un rango considerable, dependiendo de cuanta más presión se aplique.
- Otras sustancias que forman fácilmente fluidos supercríticos son  $\text{CO}_2$ , el Xe y el Ar.

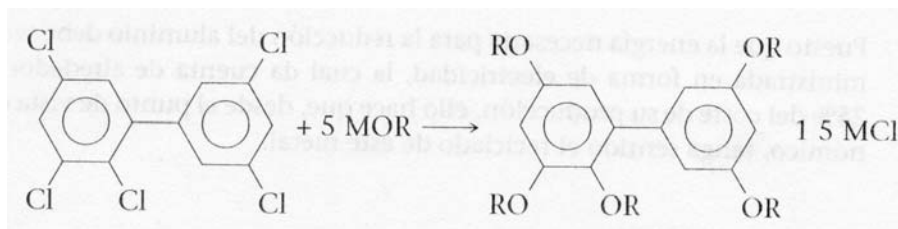
- Una tecnología innovadora de rápido desarrollo para la destrucción de residuos orgánicos y materiales peligrosos como los fenoles, es la **Oxidación con Agua Supercrítica (OASC)**.
- Los residuos orgánicos a destruir son disueltos en disolución acuosa o se suspenden en agua.
- Se somete al líquido a  $P > 218 \text{ atm}$  y  $T = 400^\circ\text{-}600^\circ\text{C}$  → el agua se comporta como un fluido supercrítico.
- En el agua supercrítica la mayoría de las sustancias orgánicas se hacen *más* solubles, mientras que muchas iónicas se tornan *menos* solubles.
- Análogamente, y también debido a las elevadas presiones aplicadas, el  $\text{O}_2$  es mucho más soluble en agua supercrítica que en agua líquida.
- A las temperaturas elevadas asociadas con el agua supercrítica, los materiales orgánicos disueltos son fácilmente oxidados por las grandes cantidades de  $\text{O}_2$  que son bombeadas dentro y disueltas en el fluido.
- Debe añadirse  $\text{H}_2\text{O}_2$  para generar radicales hidroxilo, los cuales inician una oxidación aún más rápida.
- Los materiales se difunden más rápidamente en el estado supercrítico que en los líquidos → la reacción se completa en pocos segundos o minutos.
- Un problema práctico con el método OASC, es que las sales inorgánicas insolubles que se forman en las reacciones pueden corroer el equipo de alta presión y acortar su tiempo de vida.
- Las ventajas de esta tecnología incluyen la rapidez de las reacciones de destrucción y la ausencia de  $\text{NO}_x$  como subproductos, los cuales son característicos de las combustiones en fase gas.
- Las elevadas presiones y las temperaturas requeridas son accesibles con el equipamiento adecuado.
- La formación, en el proceso OASC, de algunos productos de oxidación intermedios - sobretodo ácidos orgánicos y alcoholes, y quizás también algunas dioxinas y furanos- da lugar a una cierta inquietud acerca de la toxicidad del efluente que se obtiene del proceso.

- Al utilizar un catalizador, el porcentaje de conversión a productos totalmente oxidados aumenta y la cantidad de intermedios que persiste disminuye.
- En el proceso de **Oxidación con Aire Húmedo** se utilizan presiones y temperaturas (120 - 320 °C) inferiores a las necesarias para el proceso OASC.
  - La cantidad de oxígeno que se disuelve a estas elevadas presiones favorece la reacción de oxidación.
  - El proceso es mucho más lento que en agua supercrítica, y requiere alrededor de una hora para alcanzar la conclusión.
  - El método es más barato de utilizar que la tecnología OASC.
- El dióxido de carbono supercrítico ha sido utilizado para extraer contaminantes orgánicos, como por ejemplo el aditivo de la gasolina MTBE del agua contaminada.
- Análogamente, los fluidos supercríticos podrían utilizarse para extraer contaminantes como los PCBs y el DDT de los suelos y sedimentos.

### *Procesos no-oxidativos*

- Se ha diseñado el llamado **Proceso de Reducción Química** que actúa en circuito cerrado, el cual no libera emisiones descontroladas y que utiliza una atmósfera reductora en lugar de una oxidante, para destruir los residuos peligrosos.
- Una ventaja de la ausencia de oxígeno, es que no se da la oportunidad para iniciar la formación de dioxinas y furanos.
- La atmósfera reductora se logra utilizando H<sub>2</sub> a unos 850 °C.
- El carbono de los residuos se convierte a metano, y el oxígeno, nitrógeno, azufre y cloro se convierten en sus respectivos hidruros.
- El proceso se intensifica por la presencia de agua, la cual bajo estas condiciones de reacción puede actuar como agente reductor y formar hidrógeno adicional por medio de la reacción de cambio del agua con metano.
- El gas de salida se enfría y se lava para eliminar las partículas.

- Los hidrocarburos de los procesos son quemados a la salida para suministrar gas al sistema → no hay emisiones directas a la atmósfera.
- Los métodos de **Deshalogenación Química** se han desarrollado en varias partes del mundo para el tratamiento de residuos orgánicos que contienen cloro, especialmente los PCBs.
- Sustituir los átomos de Cl unidos covalentemente en las moléculas, por átomos de H u otros no halógenos, destoxificándolas → pueden ser incinerados o depositados en vertederos.



- El proceso se lleva a cabo a  $T > 120\text{ }^{\circ}\text{C}$  en presencia de KOH.
- Una alternativa es la reacción de los PCBs con dispersiones de Na metálico, para dar cloruro de sodio y un polímero que contiene muchas unidades bifenilo unidas.