Contenido

[1. Resumen (1-2) 2](#_Toc422089884)

[2. Introducción (max-8pags) 4](#_Toc422089885)

[2.1. La gasificación de combustibles sólidos 5](#_Toc422089886)

[2.2. Fundamentos de la gasificación 6](#_Toc422089887)

[2.3. Valores medioambiental de la tecnología GICC 8](#_Toc422089888)

[2.4. Antecedentes y alternativas de limpieza 9](#_Toc422089889)

[2.5. Legislación y normativa 12](#_Toc422089890)

[3. Objetivos (1-2) 14](#_Toc422089891)

[3.1. Objetivos 14](#_Toc422089892)

[3.2. Plan de trabajo y programación de las actividades 14](#_Toc422089893)

[4. Resultados y discusión 15](#_Toc422089894)

[4.1. Filtración de cenizas volantes con filtro de fibra de vidrio 15](#_Toc422089895)

[4.2. Lavado de gases tipo Venturi 22](#_Toc422089896)

[4.3. Ciclón 24](#_Toc422089897)

[4.4. Columna de absorción 29](#_Toc422089898)

# Resumen (1-2)

*“El amor esta en el aire pero el aire está altamente contaminado”, Amit Abraham.*

La anterior cita ha sido elegida para introducir este trabajo, como reflexión para llegar a entender a que niveles afecta la contaminación atmosférica a los destinos, el planeta, los seres humanos y la relación entre estos.

Según el diccionario, la polución es sinónimo de contaminación. Por lo tanto, los contaminantes del aire son los elementos que contaminan el aire de alguna manera. Es decir, cualquier sólido, líquido o gas que está presente en el aire, en una concentración que causa algún efecto deletéreo, se considera un contaminante del aire. Sin embargo, hay varias sustancias que, en virtud de sus enormes tasas de emisión y los efectos nocivos, son consideradas como las sustancias contaminantes más significativas.

Las Normas de Calidad del Aire (National Ambient Air Quality Standards, NAAQS) han establecido criterios para seis contaminantes del aire; cinco de ellos son considerados primarios; aquellos que son emitidos directamente, y uno como secundario; el cual proviene de la reacción química de varios contaminantes primarios. Los cinco primarios son; PM2.5, PM10, SO2, NO2, CO y plomo particulado; y el secundario seria el O3. Otro contaminante importante que no forma parte de los seis anteriores seria las partículas orgánicas volátiles (VOCs).

Las fuentes de proveniencia de los contaminantes atmosféricos pueden ser naturales; incendios forestales que emiten VOCs, volcanes que arrojan dióxido de azufre, partículas de polvo provenientes de la erosión, etc., o pueden ser generadas por el hombre; industria (como es el caso del estudio de este trabajo), transporte, combustión, calefacción etc. Los efectos de los gases de la atmosfera son graves y varios; como efectos climáticos, el famoso efecto invernadero, daños a la capa de ozono, enfermedades humanas, etc.

Todos estos efectos se han visto aumentados en cantidad y gravedad, y se han ido tomando medidas para la reducción o eliminación si es posible de la contaminación atmosférica. Podemos fijar como punto de conciencia del Cambio Climático Global, Junio de 1992 en Rio de Janeiro, cuando varios líderes políticos crearon la United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), mas tarde se creó el Protocolo de Kioto en Japón, 1997 y numerosas legislaciones y estatutos a nivel local, nacional, internaciones, son desarrollados y actualizadas en todo el mundo según las necesidades del momento y el lugar. La concienciación de las empresas e individuos ha ido creciendo, tratando de minimizar el consumo de energía, reduciendo la generación de residuos o plantando árboles locales entre otras medidas.

Pero en el ínterin, ¿qué podemos hacer como ingenieros ambientales? Lo primero es mantener una gran concienciación con esta cuestión, y estar preparados para discutirla públicamente. Debemos tratar de involucrarnos en la educación a nuestros líderes políticos e industriales en este ámbito, y por supuesto, debemos seguir buscando formas de mejorar la tecnología para reducir las emisiones y/o encontrar fuentes alternativas de energía y ciertos productos.

Por lo que, en este trabajo, debido a los límites establecidos por la ley y a nuestra concienciación por el medio ambiente, se ha estudiado la forma de limpiar los contaminantes del gas de síntesis proveniente de un proceso de gasificación carbón/coque. Ya que la fuente de energía es un combustible fósil convencional, el cual colabora a la creación del efecto invernadero, haremos lo posible para reducir las emisiones de este a la atmosfera. Por lo que se estudia, analiza y discute el mejor equipo para el diseño del túnel de lavado, con el menor coste y la mayor eficacia de limpieza, teniendo en cuenta el uso final de syngas, para producir electricidad. Previamente, con el objetivo de entender mejor la elección y el dimensionamiento de los equipos, se explica el proceso de gasificación, la composición del gas de síntesis, los contaminantes a eliminar y las alternativas para la eliminación o reducción de cada uno de los contaminantes presentes en el syngas. Y por último se estudio el coste económico y la rentabilidad de dicho proyecto, así como el impacto ambiental de este.

En este documento se expone desde el punto de vista ambiental el inconveniente de los contaminantes que se liberan en la combustión del carbón de la tecnología de Gasificación de Carbón Integrada en un Ciclo Combinado (GICC), y la limpieza de este gas.

# Introducción (max-8pags)

A partir de la crisis del petróleo de 1973, se vio la necesidad de optar como fuente de energía por combustibles alternativos, y desarrollar tecnología para ellos. Las alternativas fueron el combustible nuclear, el gas natural, y fuentes no convencionales como la solar, eólica, biofuel, producción de metano para uso domestico, etc. Sin embargo, ninguna de ellas se ha demostrado viable como solución a largo plazo para absorber la creciente demanda de energía. La nuclear ofrecía posibilidades de cubrirlas, pero en la práctica, después del accidente de Chernóbil, en Abril de 1986, la mayoría de los países occidentales ralentizaron o sencillamente suspendieron sus programas nucleares. El gas natural, con reservas limitadas, puede dar lugar a otra crisis como la del petróleo. La generación a partir de la fuente solar, eólica, etc., no pueden absorber tampoco toda la demanda industrial y domestica. Estas limitaciones de las otras posibilidades hacen que se esté volviendo al carbón para la producción de energía eléctrica.

Las reservas de carbón, con su abundancia relativa en todo el mundo, comparada con las otras fuentes pueden suministrar suficiente energía durante mucho tiempo si se desarrolla la tecnología suficientemente limpia y eficiente que se necesita para obtener energía eléctrica. En España más del 30% de la energía eléctrica se produce con carbón. Para la planificación del aprovisionamiento futuro de electricidad juegan tres factores: la seguridad de abastecimiento, el problema ambiental y el precio final de la energía admisible para los consumidores.

El carbón es abundante y el abastecimiento seguro, pero la gasificación y el proceso de limpieza del gas encarecen la energía producida. Varios estudios demuestran que la tecnología de Gasificación de Carbón Integrada en un Ciclo Combinado (GICC) puede ser competitiva en precio de la electricidad producida y en respeto ambiental frente a otras alternativas disponibles.

El objeto de este trabajo es el diseño de un túnel de lavado para la eliminación de los contaminantes de un gas de síntesis, es decir, limpiar el gas para ser usado en las turbinas de gas y vapor para producir energía. Previamente, se hará una breve introducción a las diferentes tipos de tecnologías de gasificación, composición del gas de síntesis y efectos en el medioambiente, para entender mejor el proceso y elegir la mejor alternativa a la hora de la limpieza.

## La gasificación de combustibles sólidos

La gasificación es un proceso termoquímico por el que se transforman materiales que contienen carbón, coque de petróleo, biomasa o varios residuos, en un gas combustible (gas de síntesis o syngas), mediante oxidación parcial con aire, oxigeno o vapor de agua.

El syngas se puede usar para producir electricidad o productos valiosos tales como productos químicos, fertilizantes, sustituto de gas natural, hidrogeno y combustibles para el transporte.

A diferencia de los procesos de combustión de carbón, la gasificación se realiza con defecto de oxígeno. El gas producido contiene CO, H2, CH4, CO2, N2 y vapor de agua entre otros componentes que se encuentran en menor cantidad. Estos compuestos se encuentran en el gas en proporciones distintas, principalmente según: la presentación y la composición del combustible, la tecnología utilizada para gasificar, el agente gasificante y la relación agente gasificante/combustible.

Recientemente, ha cobrado un gran interés la aplicación de la gasificación a la generación de electricidad en ciclos combinados. Esto es debido a que esta tecnología posibilita el uso de carbón como combustible en las modernas centrales de ciclo combinado, de forma limpia, eficiente y económica para su utilización, además que permite producir electricidad y, al mismo tiempo, suministrar H2 y vapor de proceso a la refinería. Algunas de las principales plantas GICC existentes son:

Tabla 1. Ejemplo de Plantas GICC con carbón como combustible

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Propietario/**  **Ubicación** | **Puesta en marcha** | **Potencia neta** | **Combustible** | **Ciclo combinado** | **Gasificación** |
| ELCOGAS, Puertollano, España | 1997 | 282,7 MW | Carbón/Coque petróleo | Siemens V94,3 | Lecho arrastrado |
| Tampa Electric, Florida, USA | 1996 | 250 MW | Carbón/Coque petróleo | GE 7F | Texaco |
| Wabash River, Indiana, USA | 1995 | 262 MW | Carbón/Coque petróleo | GE 7FA | E-GAS |
| Nuon, Buggenum, Holanda | 1994 | 253MW | Carbón/residuos y biomasa | Siemens V94,2 | Shell |

## **Fundamentos** de la gasificación

En el proceso de gasificación se producen simultáneamente un gran número de reacción químicas en serie y en paralelo, distinguiéndose tres etapas:

* Pirolisis: tras el secado y calentamiento, en el que se desprenden volátiles, se produce la pirolisis o descomposición térmica del carbón. Originándose una fracción gaseosa rica en H2, y un residuo carbonoso (‘char‘).
* Combustión: los gases originados se queman consumiéndose la mayor parte del oxígeno alimentado al gasificador. Las reacciones son exotérmicas, y desprenden el calor necesario para producir las reacción de gasificación

A su vez, el residuo carbonoso reacciona parcialmente con el oxígeno no consumido hasta que se agota.

* Gasificación: una vez consumido todo el oxígeno, se producen las reacciones entre los gases de combustión (CO2 y H2O) y el char, generando CO y H2. Las reacciones de gasificación tienen lugar como consecuencia de que se alimenta únicamente entre 1/3 y 1/5 del oxígeno teórico requerido para la combustión total.

La relación en que se van a encontrar CO y H2, principales componentes del gas final, está determinada por la reacción de equilibrio agua-gas:

La composición final del gas de síntesis depende de las condiciones de presión y temperatura, que a su vez depende de los diferentes equilibrios que se establecen según el combustible y los agentes gasificantes empleados. A elevadas temperaturas, disminuyen las concentraciones de H2O y CO2, mientras que aumentan las de CO y H2. En cambio, al aumentar la presión, disminuyen las concentraciones de CO y H2, aumenta la de H2O y apenas varía la de CO2. Además, en los procesos a baja temperatura se producen cantidades apreciables de especies como metano (CH4), alquitranes, aceites y fenoles.

Existen diferentes tecnologías de gasificación, que en función del régimen de flujo, se puede hablar de tres tipos de gasificadores:

* Lecho fijo. El carbón se alimenta seco por la parte superior del reactor, y desciende lentamente reaccionando con los gases que fluyen en contracorriente a través del lecho. En su camino descendente, el carbón experimenta de forma sucesiva los procesos de secado, calentamiento, pirolisis, gasificación y combustión. Las cenizas pueden extraerse secas o fundidas.
* Lecho fluidizado. Las partículas de combustible se introducen en un flujo ascendente de gas, en el que se encuentran suspendidas mientras se produce la reacción.
* Lecho arrastrado. El carbón y los agentes gasificantes fluyen en la misma dirección, con velocidades muy superiores a las que se dan en el resto de tipos de gasificadores. La alimentación del carbón pulverizado, que puede ser seca (con nitrógeno) o húmeda (en mezcla con agua), se realiza a través de quemadores de oxidación parcial.

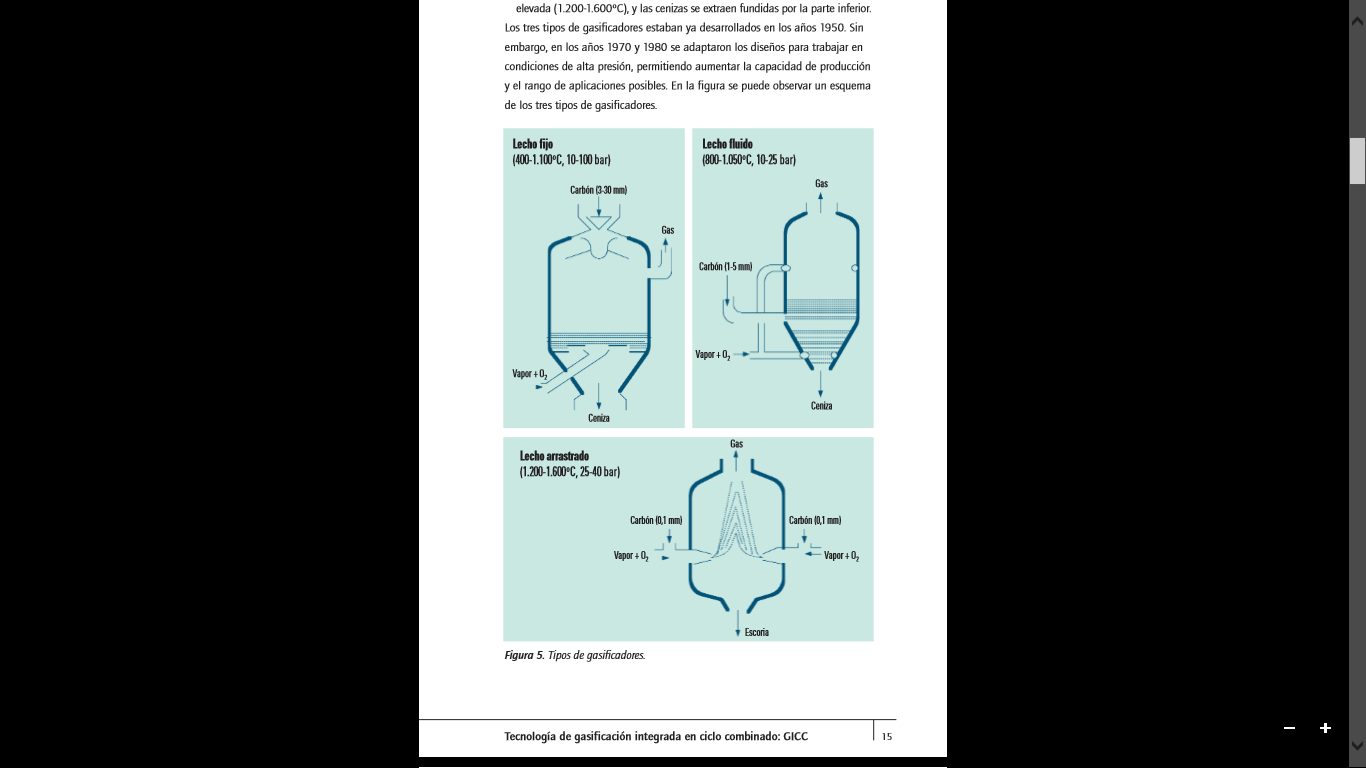


Figura 1. Tipos de gasificadores

Los combustibles a usar pueden ser desde carbón, coque o biomasa hasta varios residuos, con diferentes composiciones como ya se ha mencionado anteriormente:

Tabla 2. Composición de los distintos combustibles

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | **Lignito** | **Carbón** | **Coque de Petróleo** | **Serrín de madera** | **Paja de arroz** | **Bagazo caña de azúcar** | **Papel** | **RSU** |
| **Carbono (%peso)** | 61.00 | 36.26 | 82.21 | 46.80 | 38.20 | 48.60 | 48.00 | 39.70 |
| **Hidrogeno (%peso)** | 4.00 | 2.48 | 3.11 | 5.46 | 5.20 | 5.90 | 6.60 | 5.80 |
| **Oxigeno (%peso)** | 18.50 | 6.62 | 0.02 | 37.40 | 36.30 | 42.80 | 36.90 | 27.25 |
| **Nitrógeno (%peso)** | 1.00 | 0.81 | 1.90 | 0.25 | 0.90 | 0.16 | 0.14 | 0.80 |
| **Azufre (%peso)** | 1.80 | 0.93 | 5.50 | - | 0.20 | 0.04 | 0.06 | 0.35 |
| **Cloruros (%peso)** | - | - | - | - | 0.60 | 0.03 | - | - |
| **Cenizas (%peso)** | 13.70 | 41.10 | 0.26 | 0.09 | 18.60 | 2.44 | 8.30 | 26.10 |
| **Humedad (%peso)** | - | 11.80 | 7.00 | 10.00 | - | 0.03 | - | - |
| **PCS (MJ/kg)** | 23.35 | 13.10 | 31.99 | 16.94 | 15.09 | 18.99 | 20.78 | 23.35 |

## Valores medioambiental de la tecnología GICC

Los valores de elevada eficiencia y disponibilidad de combustibles de la tecnología GICC llevan aparejados de forma indirecta importantes beneficios medioambientales: baja emisión de CO2 y otros contaminantes por Kw/h producido, menos consumo de recursos y posibilidades de emplear energías renovables mediante co-gasificación.

En una central GICC, además de presentar un buen comportamiento en cuanto a emisión de contaminantes atmosféricos regulados (SO2, NOx, partículas), se puede hablar de un impacto contaminante global muy limitado: los residuos sólidos son subproductos comerciales, tiene un bajo consumo relativo de agua, y emite menores cantidades de CO2, mercurio y metales pesados que otros procesos básicos en carbón.

Por las condiciones reductoras en que se produce la gasificación, el azufre del carbón no se convierte en SO2, sino en H2S y COS. El nitrógeno del carbón se transforma en NH3 y HCN. Estas especies contaminantes se pueden eliminar con facilidad mediante procesos de lavado con agua y absorción con disolventes, obteniendo así un gas de síntesis limpio. En cuanto a las partículas solidas, estas se extraen del gas de síntesis mediante filtros y/o lavado con agua antes de la combustión del gas, por lo que sus emisiones son irrelevantes.

La tecnología se selecciona según los objetivos de la planta, los productos deseados, el combustible primario y el tamaño del gasificador necesario para un producto económicamente competitivo.

## Antecedentes y alternativas de limpieza

Una vez ya descritos los tipos de combustible y las diferentes tecnologías de gasificación, nos centraremos en el estudio de la mejor alternativa de equipos que formen el túnel de lavado para nuestro gas de síntesis. Se ha optado por una planta GICC similar a la de ELCOGAS (Puertollano). La tecnología es de lecho arrastrado seco y con una eficacia PCI del 45% aproximadamente.

Nuestro combustible es una mezcla 50:50 de carbón y coque, con la siguiente composición:

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | **Carbón** | **Coque** | **Mezcla** |
| **Humedad %peso** | 11,8 | 7,00 | 9,40 |
| **Cenizas % peso** | 41,10 | 0,26 | 20,68 |
| **Carbón %peso** | 36,27 | 82,21 | 59,21 |
| **Hidrogeno %peso** | 2,48 | 3,11 | 2,80 |
| **Nitrógeno % peso** | 0,81 | 1,9 | 1,36 |
| **Oxigeno %peso** | 6,62 | 0,02 | 3,32 |
| **Azufre %peso** | 0,93 | 5,5 | 3,21 |
| **PCI /MJ/kg)** | 13,10 | 31,99 | 22,55 |

Con un caudal de gas de síntesis de 180.000m3/h, y de composición:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Compuesto** | **Gas crudo** | **Gas limpio** |
| **CO (%w)** | 59,26 | 59,30 |
| **H2 (%w)** | 21,44 | 21,95 |
| **CO2 (%w)** | 2,84 | 2,41 |
| **N2 (%w)** | 13,32 | 14,76 |
| **Ar (%w)** | 0,9 | 1,18 |
| **H2S (%w)** | 1,0 | 3 (ppm) |
| **HCN (ppm)** | 23 | - |
| **Cenizas (mg/m3)** | 3 | 0 |

Como ya se ha mencionado anteriormente, los contaminantes a eliminar serán las partículas solidas y los compuestos azufrados y nitrogenados que contiene el gas de síntesis, para que este entre limpio a la turbina de gas.

Para el diseño de los equipos encargados de la disminución o eliminación de la cantidad partículas solidas, hay que tener en cuenta que el gas se encuentra a muy altas temperaturas. Según el principio en el que se basa el proceso de separación de las partículas, pueden establecerse los siguientes tipos de depuración: colectores, precipitadores electrostáticos, filtros, lavadoras y absorbedores húmedos. Para simplificar estudiaremos tres alternativas:

1. **Ciclón:** se trata de un dispositivo de separación de partículas en suspensión de una corriente gaseosa. Se basa en el fundamento de que el aire fluye siguiendo un patrón helicoidal, comenzando desde lo más alto del ciclón a lo más bajo y finalizando en un flujo central ascendente que sale por el tubo de salida. Las partículas más grandes tienen demasiada inercia para seguir la fuerte curva ascendente en la parte inferior del ciclón y chocan contra la pared. Seguidamente caen hacia la parte más baja del ciclón donde puede ser retirada. En el sistema cónico, el flujo de rotación se hace cada vez más estrecho, reduciendo cada vez más el radio del flujo y permitiendo remover partículas más pequeñas cada vez. Se trata de una tecnología barata pero su eficacia es relativamente baja con un diseño complejo. Los ciclones son considerados de bajo coste y bajo mantenimiento.
2. **Filtros:** cualquier estructura porosa compuesta por materiales fibrosos o granulares que tienden a retener las partículas mientras que el gas pasa a través. Los filtros pueden ser:
3. Filtros de fibra: se trata de un dispositivo de separación de partículas en suspensión de una corriente gaseosa. Consta de diversas mangas de tela dispuestas sobre cestas metálicas y el polvo se acumula en su parte externa. El material del tejido debe adaptarse al uso deseado y las condiciones existentes como la temperatura o la presencia de compuestos corrosivos. El tamaño de los poros limita el tamaño mínimo de las partículas retenidas. Una de las principales ventajas de estos dispositivos es su fácil diseño, ya que únicamente conociendo la velocidad y el caudal del gas que se desea tratar se puede determinar las dimensiones de la estructura. Su limpieza es sencilla y poseen elevadas eficacias de recolección pero requieren mucho mantenimiento.
4. Filtros cerámicos de alta temperatura: similar al filtro de mangas, el filtro cerámico o filtro de candela, suele utilizarse con gran frecuencia en procesos de depuración de gases, y principalmente cuando estos se encuentran a temperaturas muy elevadas o tienen carácter corrosivo. Los tubos cilíndricos se colocan en disposición vertical similar a las bolsas del filtro de mangas. Estos proporcionan un medio poroso cerámico altamente resistente, y suelen estar fabricados en cuarzo, alúmina o carburo de silicio. Tienen mayor eficacia de filtración pero los costes también son más altos. El mecanismo de separación es, al igual que en los filtros de tela, la filtración superficial, debido al carácter poroso antes mencionado, suelen alcanzar grandes niveles de eficacia. Trabajan en semicontinuo, con paradas únicamente para limpieza.
5. **Lavador (Tipo Venturi):** El mecanismo de lavado consiste en hacer pasar el gas cargado con partículas por una cámara en la cual es puesto en contacto directo con un líquido, que generalmente es agua, de tal forma que las partículas a removerse son colectadas en las gotas del líquido. Para llevar a cabo la captación de partículas, se inyecta agua en la zona donde el gas, y por lo tanto las partículas alcanzan su mayor velocidad, produciéndose así el rompimiento de la tensión superficial del agua y dando lugar a la formación de pequeñas gotas del líquido. Esto resultará en el contacto físico entre las gotas del líquido de lavado y las partículas, de manera que éstas últimas serán removidas de la descarga gaseosa.

En cuanto a la eliminación de ácidos optaremos por la operación unitaria comúnmente denominada absorción. En la absorción de gases, un vapor soluble se absorbe desde su mezcla con un gas inerte por medio de un liquido en el que el gas se desea eliminar es más o menos soluble. Normalmente, esta operación se realiza en las denominadas torres o columnas, que son recipientes cilíndricos esbeltos, en posición vertical y en cuyo interior se incluyen dispositivos como platos o lechos de relleno. Generalmente, el gas y el líquido fluyen en contracorriente por el interior de la torre, cuyos dispositivos promueven el contacto entre las fases y el desarrollo de la superficie interfacial a través de la cual se producirá la transferencia de materia.

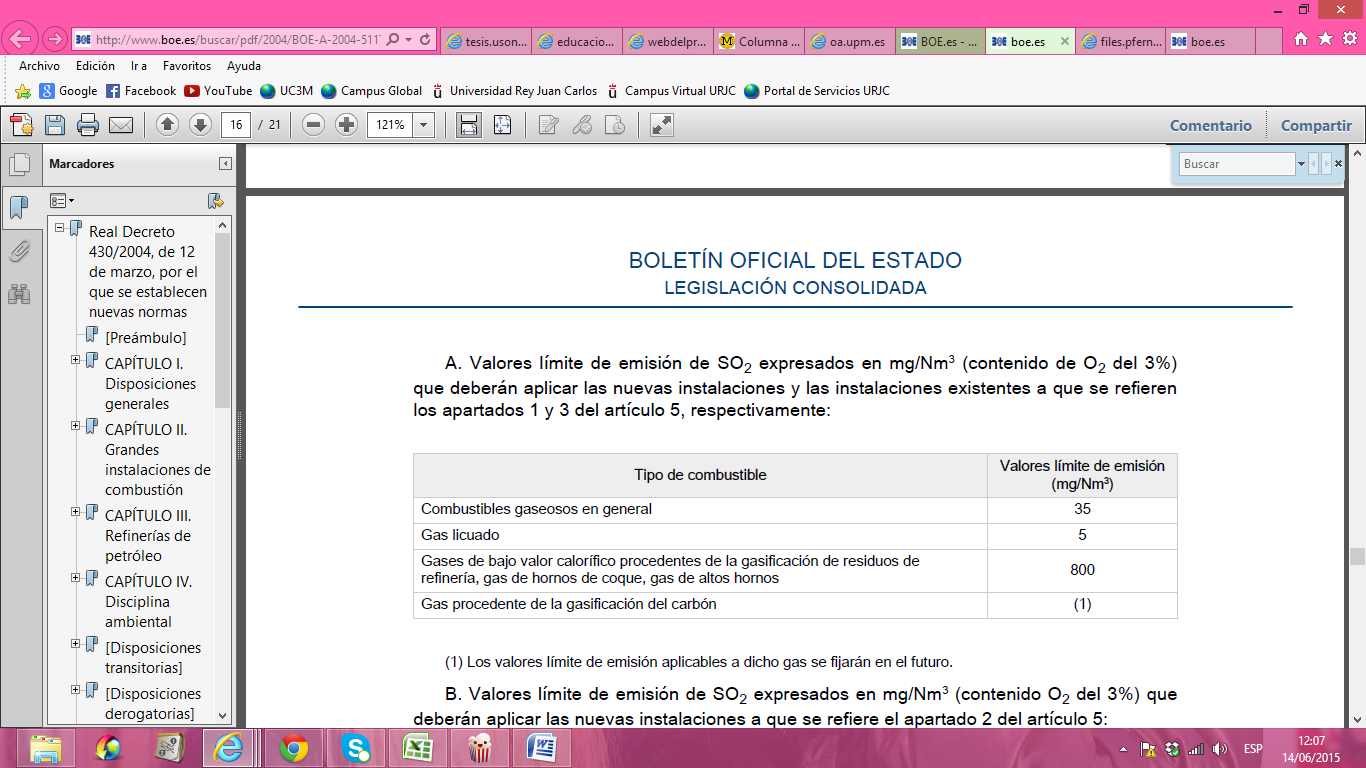
1. **Columna de platos**: se utilizan platos como dispositivo que promueve el contacto entre las dos fases. La mayoría de los platos utilizan perforaciones para la dispersión del gas en el líquido. Resultan considerablemente eficaces y su diseño está bastante normalizado.
2. **Columnas de relleno:** como dispositivo promotor del contacto entre las dos fases se utiliza una masa soportada de cuerpos sólidos inertes que recibe el nombre de torre empacada. El soporte del empaque consiste, por lo general, en una criba o tamiz corrugado con una gran fracción de área libre de forma que no se produzca inundación en el soporte. El líquido entrante se distribuye sobre la parte superior del empaque, mojándola de manera uniforme. El gas entra en el espacio de distribución situado debajo del empaque y asciende a través de los intersticios de este en contracorriente con el flujo de líquido.

## Legislación y normativa

En el ámbito de la legislación ambiental, existe una normativa europea que establece los límites máximos de emisión. Todos los países miembros deben cumplir con estas emisiones como mínimo, pudiendo establecer restricciones más severas si lo desean.

Según el **Real Decreto 430/2004,** de 12 de marzo, por el que se establecen nuevas normas sobre limitación de emisiones a la atmosfera de determinados agentes contaminantes procedentes de grandes instalaciones de combustión, y se fijan ciertas condiciones para el control de las emisiones a la atmosfera de las refinerías de petróleo.

Tabla 3. Valores límite de emisión de SO2 expresados en mg/Nm3 (contenido de O2 del 3%) que deberán aplicar las nuevas instalaciones y las instalaciones existentes a que se refieren los apartados 1 y 3 del artículo 5, respectivamente:



Esto, aplica a las emisiones a la atmosfera de toda la planta GICC, como el caso a estudiar es el túnel de lavado, no hay emisiones a la atmosfera de forma directa, por lo que no aplica.

Tan solo se tiene en cuenta la composición del gas de síntesis apto para la turbina de gas del ciclo combinado. Por lo que, para alimentar la turbina de gas del ciclo combinado, se requiere un gas de síntesis con alta presión (15-20 bar), y que se encuentre prácticamente exento de partículas y contaminantes.

# Objetivos (1-2)

## Objetivos

1. La limpieza del contaminante y la reducción de las emisiones (con números)
2. Estudio de los combustibles alternativos para la producción de energía a partir de una planta GICC
3. Estudio desde el punto de vista ambiental de los inconvenientes de las emisiones de los contaminantes a la atmosfera desde una planta GICC
4. Estudio de las distintas alternativas según contaminantes para el lavado de un gas de síntesis de una planta GICC
5. Estudio del coste económico del proyecto del túnel de lavado del gas de síntesis
6. Estudio del impacto ambiental del proyecto del túnel de lavado del gas de síntesis
7. Estudio de la rentabilidad y viabilidad del proyecto del túnel de lavado del gas de síntesis

## Plan de trabajo y programación de las actividades

1. Planteamiento y obtención de datos de partida bibliográficos
2. Diseño de las dimensiones de los equipos según el contaminante a eliminar que forman el túnel de lavado, así como la valoración económica y el estudio del impacto ambiental
3. Planteamiento de conclusiones tras el análisis de los resultados obtenidos

# Resultados y discusión

Como se ha explicado con anterioridad, este trabajo trata de diseñar los equipos que forman el túnel de lavado para la eliminación de los contaminantes del gas de síntesis, de la forma más eficiente, limpia y económica. Con este fin, se han estudiado diferentes alternativas de equipos, de las cuales se desarrollan a continuación las finalmente elegidas:

## Filtración de cenizas volantes con filtro de fibra de vidrio

El gas una vez que sale del gasificador se encuentra a muy altas temperaturas >200ºC, por lo que antes de comenzar con el lavado de este, hay que enfriarlo. Una vez que el gas de síntesis ha sido enfriado, seleccionamos la mejor alternativa de limpieza en función del diámetro de las partículas solidas de carbón y coque (Dp=2,5 µm), la eficacia deseada para llegar a la concentración objetivo (0 mg/m3) y la temperatura del gas (235ºC).

Como ya se ha analizado anteriormente, la mejor alternativo para la limpieza de las partículas será el uso de filtros. En los filtros, el gas con las partículas fluye por el filtro a través de una serie de bolsas, dejando las partículas retenidas en estas. Hay diferentes tipos de filtros, con diferentes tejidos, diferentes formas y tamaños de bolsas, diferentes disposiciones de estas y diferentes formas de hacer pasar la corriente de gas a través del filtro. Los tres tipos comunes de los compartimentos de las bolsas, clasificados por el método utilizado para la limpieza del polvo de las bolsas; son por flexión, aire inverso y pulso de aire comprimido.

El material del tejido de filtro a usar será fibra de vidrio, ya que tiene una elevada eficacia, reduce las necesidades de depuración de agua frente a los sistemas húmedos y soporta altas temperaturas de filtración, ya que soporta hasta 315ºC de forma puntual, y nuestro gas se encuentra a unos 230ºC aproximadamente. Además, la resistencia a ácidos de estos filtros es buena.

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Tejido** | **Máxima temperatura sostenida** | **Máxima temperatura puntual** | **Resistencia a ácidos** | **Resistencia a alcalisis** | **Resistencia a flexión** | **Costo relativo** |
| **Algodón** | 80 | 110 | M | B | B | 1 |
| **Lana** | 95 | 120 | MB | M | R | 2.75 |
| **Neflonylon** | 95 | 120 | R | MB | MB | 2.5 |
| **Dynel** | 70 | 115 | R a MB | MB | B | 3.2 |
| **Polipropileno** | 95 | 120 | MB | MB | MB | 1.75 |
| **Orlón** | 125 | 135 | B a MB | R | R | 2.75 |
| **Dacron** | 135 | 160 | B | B | MB | 1.8 |
| **Nomex** | 205 | 260 | R | MB | MB | 8 |
| **Teflón** | 205 | 260 | MB | MB | R | 30 |
| **Fibra de vidrio** | 290 | 315 | R a B | R | M | 5.5 |
| **Polietileno** | 95 | - | MB | MB | B | 2 |

El diseño del filtro se ha basado en la eficacia al recolectar las partículas de la corriente gaseosa y la velocidad de filtración. Teniendo en cuenta que la velocidad de filtración recomendada para filtros de fibra de vidrio está entre 0,60-0,70 m/min para calderas de carbón. Tomaremos como dato medio una velocidad de filtración de 0,65m/min, o lo que es lo mismo de 39m/h.

Tabla . Velocidades de filtración recomendadas para filtros de fibra de vidrio

|  |  |
| --- | --- |
| **Polvo** | **Velocidad de filtración (m/min)** |
| Humos metalúrgicos | 0.45-0.54 |
| Hornos de cal y cemento, hornos de fundición | 0.54-0.60 |
| Calderas de carbón | 0.60-0.70 |

Teóricamente, la eficacia de un filtro varía entre 98%-99,9%. Para el filtro diseñado, el valor de la eficacia es de 99,9%. Con dicha eficacia se puede saber la cantidad de partículas que finalmente componen la corriente gaseosa que debe ser tratada. El uso final del gas limpio será para una turbina de gas de síntesis con alta presión, esta requiere que el gas se encuentre exento prácticamente de partículas y contaminantes, por eso fijamos una alta eficacia para limpiar lo máximo posible en los filtros, y lo que no se elimine será tratado en los equipos diseñados a continuación de los filtros hasta llegar al objetivo de 0mg/m3.

En un principio, la cantidad de partículas emitidas junto a la corriente gaseosa es de 3mg/m3 y tienen un diámetro la mayoría <2,5µm, por lo que las bolsas de fibra de vidrio con aire a la inversa en fuentes de combustión, son buena elección, ya que pueden recolectar partículas de 2,5µm con eficacia del 99,9%. Si fijamos esta eficacia, la cantidad de partículas emitidas es de 0,54g/h.

El diseño de los filtros de tejido, a parte del tipo de tejido también incluye el mecanismo de limpieza, numero de celdas y dimensiones de las mangas, así como la perdida de carga del impulsor y tiempo de limpieza y filtración. Los sistemas de limpieza se fundamentan en la separación y caída de la torta, y puede ser limpieza por flexión, aire inverso o pulsos de aire comprimido como ya hemos contado anteriormente.

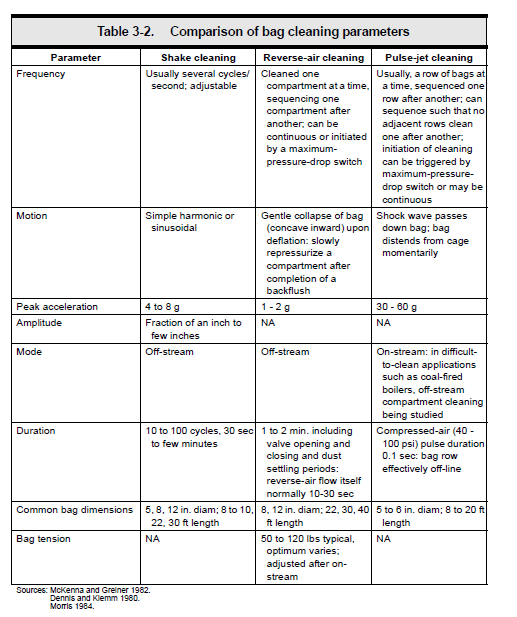
El método de limpieza escogido será por aire inverso, uno de los métodos más usados. Las mangas de un filtro de limpieza por aire inverso se diseñan con varios compartimentos. Cuando es la hora de limpiar las bolsas, un compartimentos es aislado de la corriente de gas con partículas, el aire limpio fluye a través de la bolsa aislada en la dirección contraria al gas con partículas para desalojar la capa de partículas.

Según el método de limpieza, las mangas tendrán un diámetro de 28-30cm y una altura de 6-9m. La duración o tiempo de limpieza es de 1-2min, incluyendo la apertura y cierre de la válvula y períodos de sedimentación de polvo. (Referencia *Air Pollution Egineering Manual, Wayne T.Davis*)

Por lo que los parámetros de diseño fijados son:

* Diámetro manga =30cm = 0,3m
* Altura de la manga = 9m
* Tiempo de limpieza = 2min

Tabla . Comparación de los métodos de limpieza para filtros



Como anteriormente hemos fijado la velocidad de filtración en 39m/h, calcularemos en base al caudal de gas el área total de filtración.

Que redondeando nos queda un área total:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Mecanismo de limpieza** | **Mangas de diámetro (cm)** | **Altura (m)** |
| Sacudidas mecánicas | 12,5 | 2,4-3 |
| Aire inverso | 28-30 | 6-9 |

Si se diseña el filtro con un número bajo de compartimentos, se tendrá que prever un número excesivo de mangas para así aumentar el área de filtro.

La elección de los compartimentos se puede basar en:

Tabla . Numero de compartimentos en función del área de filtración neta

|  |  |
| --- | --- |
| **Área de filtración neta (m2)** | **Numero de celdas** |
| <350 | 2 |
| 350-1100 | 3 |
| 1100-2300 | 4-5 |
| 2300-3700 | 6-7 |
| 3700-5500 | 8-10 |
| 5500-7500 | 11-13 |
| 7500-10000 | 14-16 |
| 10000-14000 | 17-20 |
| <14000 | >20 |

Según este área de filtrado, el numero de celdas de nuestro filtro estará entre 8 y 10, en nuestro caso fijamos 10 celdas. (Referencia *Air Pollution Egineering Manual, Wayne T.Davis*)

Para satisfacer la velocidad de filtrado de diseño, cuando se filtra con una celda fuera de operación, debe haber 500 m2 de la tela en cada celda, para el total de 5000 m2. Por lo que el área total de una manga será aproximadamente:

Así, el número total de mangas será:

Las 60 mangas las podemos distribuir de tal forma que queden 30 filas por 20 columnas.

El número de compartimentos elegido durante el diseño depende del flujo total a filtrar, la perdida de carga, el tiempo de filtración y el tiempo requerido para limpiar un compartimento. El intervalo de tiempo de limpieza entre dos compartimentos es conocido como tiempo de ejecución (tr), el tiempo de filtración está relacionado con el tiempo de ejecución y el tiempo de limpieza de un compartimento.

Para calcular el tiempo de ejecución, se ha fijado como tiempo de limpieza 2min y tiempo de operación 60min, N se refiere al número de compartimentos, por lo que en nuestro caso es 10.

En la práctica, la perdida de carga puede variar desde menos de 6 hasta 20 in H2O, tf puede variar desde 30 minutos hasta varias horas y tc puede variar desde 1 a 5 minutos. Normalmente a la hora de diseñar se parte de cero, sin equipos de referencia, por lo que se consideran de libre elección la perdida de carga, el tiempo de filtración y el de limpieza, y con esto la elección del número de compartimentos es según la experiencia, el sentido común o la intuición.

Así, un parámetro importante a tener en cuenta es la perdida de carga que se obtiene a partir de la ecuación de Darcy. Muchos de los parámetros a tener en cuenta en dicha ecuación han de obtenerse de forma empírica, por lo que se plantea una forma más sencilla para el cálculo de la perdida de carga.

Se considera un filtro con N numero de celdas filtrando aire con un caudal total Q. Las celdas son limpiadas en secuencia (1, 2,…, N). Se ha calculado una velocidad media de filtración teniendo en cuenta que en ningún momento la perdida de carga puede exceder un valor máximo y el flujo de aire que entra en cada celda es diferente debido a la acumulación de cenizas en ese momento en el filtro.

Con esto, y el tiempo de ejecución, se obtiene la densidad de polvo superficial:

Donde;

* W= densidad de polvo superficial (g/m2)
* L= carga de partículas (g/m3)

Un parámetro a considerar es la permeabilidad, determinada empíricamente a partir de pruebas piloto de un gas particulado similar al que se quiere estudiar. Se fijan unos valores según la bibliografía de:

* Ke=455 Pa-min/m
* Ks= 2381 Pa-min/m

Así, se obtiene el arrastre del filtro:

Según la ecuación de Crawford, no es suficiente con la velocidad de filtración media, sino que se necesita calcular la velocidad de filtración Vj en la celda j, donde más cenizas hay, en el tiempo j:

fN es el factor de corrección, que obtenemos de la siguiente tabla:

**Tabla 7. Relación de la velocidad de filtrado real con la velocidad media**

C. David Cooper and F.C. Alley, Air Pollution Control

|  |  |
| --- | --- |
| **Número total de compartimentos N** | **fN=Vj/VN-1** |
| 3 | 0,87 |
| 4 | 0,80 |
| 5 | 0,76 |
| 7 | 0,71 |
| 10 | 0,67 |
| 12 | 0,65 |
| 15 | 0,64 |
| 20 | 0,62 |

Finalmente, se obtiene el valor de la perdida de carga máxima con la ecuación:

## Lavado de gases tipo Venturi

A continuación, se realiza un lavado físico con agua del gas en un dispositivo tipo Venturi, que permite retener compuestos contaminantes (HCl, HF, NH3, HCN y parcialmente H2S y CO2), así como las partículas solidas no extraídas en caso de fallo de los filtros de tejido de vidrio.

Los lavadores Venturi pueden ser convencionales o de alta energía, este último es el más eficiente, el cual posee la capacidad de remover partículas mayores a 0.5 μm con una eficiencia de hasta 98%.

En un lavador Venturi se identifican tres zonas, que son: zona convergente, garganta y zona divergente. El gas cargado con partículas ingresa a la zona convergente, donde debido al cambio gradual en la sección transversal por donde fluye, se producirá un incremento en la velocidad del gas hasta alcanzar un valor máximo en la zona que se conoce como garganta.

La velocidad relativa entre las gotas del líquido de lavado y las partículas a removerse, es el parámetro más importante en todo lavador de gases destinado a la remoción de partículas. Esto se debe a que los mecanismos físicos por los cuales las partículas son capturadas en las gotas del líquido, dependen directamente de dicha velocidad.

A mayor velocidad relativa entre las gotas del líquido de lavado y las partículas, mayores serán las posibilidades de que se lleve a cabo la captación de partículas, pues los mecanismos de impacto inercial e intercepción son beneficiados con el aumento de dicha velocidad. Por eso, un lavador Venturi puede inclusive ser utilizado para remover partículas del tipo PM2.5.

Los principales parámetros que influyen sobre el desempeño de un lavador Venturi son:

* Distribución de tamaño de partícula y cantidad de material particulado
* Temperatura, humedad y flujo de la corriente gaseosa
* Velocidad del gas y caída de presión
* Relación líquido a gas
* Tamaño de las gotas del líquido
* Tiempo de residencia

Los valores de los parámetros de operación son:

Tabla . Parámetros operaciones para lavadores húmedos

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Scrubber type** | **Pressure Drop in. (H2O)** | **L/G Ratio (gal/1000acf)** | **Liquid Pressure (psig)** | **Cut Diameter (µm)** |
| **Spray Tower** | 0.5-3 | 0.5-20 | 10-400 | 2-8 |
| **Cyclonic** | 2-10 | 2-10 | 10-400 | 2-3 |
| **Venturi** | 10-150 | 2-20 | 0.2-20 | 0.2 |

El primer parámetro a calcular para el diseño de lavador Venturi será la penetración, Pt, que se define como la fracción de partículas de un diámetro especifico que no son capturadas y que por lo tanto logran atravesar el equipo, se relaciona con la eficiencia de remoción por medio de:

El caudal inicial de partículas que tenemos en nuestro gas, que son las partículas restantes que quedan después de la filtración en el filtro de fibra de vidrio es de 0,54g/h. Queremos limpiarlo y quedarnos con un caudal de partículas final de 0,02g/h, por lo que sacamos con esto la eficacia y la penetración.

Fijamos la sección del Venturi en 6ft2 = 0,557m2, contando con que tenemos un caudal de 180.000m3/h, calculamos la velocidad del gas en la garganta:

Los lavadores Venturi son dispositivos que proveen por si mismos las formación de gotas de liquido, pues la energía requerida para la atomización del liquido de lavado la proveerá la corriente gaseosa acelerada en la garganta del dispositivo. Esta atomización neumática de doble fluido (gas y agua), puede presentarse en dos formas: atomización tipo gota y atomización tipo nube. En este trabajo se considera la atomización tipo gota, aunque se producirá un amplio rango de tamaño de las gotas, es posible predecir un diámetro promedio utilizando la ecuación de Nukiyama-Tanasawa. A este, se lo conoce como diámetro de Sauter, que en el caso del aire o agua se calcula por medio de

Se ha supuesto que:

* Relación L/G=15gl/1000ft3
* Velocidad gas= 89,76m/s=291,99ft/s
* El rango de diámetro de gota = 75-150µm
* Densidad gas=0,80kg/m3 = 0,0499lb/ft3

También es importante conocer la caída de presión a través del dispositivo, pues de ello dependerá la demanda de energía requerida para mover el gas a través del dispositivo. Se calcula mediante:

Así, finalmente obtenemos un gas de síntesis exento prácticamente de partículas y de HCl, HF, NH3, HCN.

## Ciclón

Es común que en un lavador de partículas, tipo Venturi, las gotas del líquido de lavado sean arrastradas junto con la corriente gaseosa que se quiere limpiar. Esto producirá una disminución en la eficiencia de remoción calculada, pues las gotas que viajen junto con el gas estarán cargadas con el material particulado que se quería remover.

Para solucionar este problema usualmente se debe diseñar, junto con el lavador Venturi, una cámara de separación del líquido de lavado; para ello se puede utilizar la misma configuración e inclusive las mismas ecuaciones que en un ciclón.

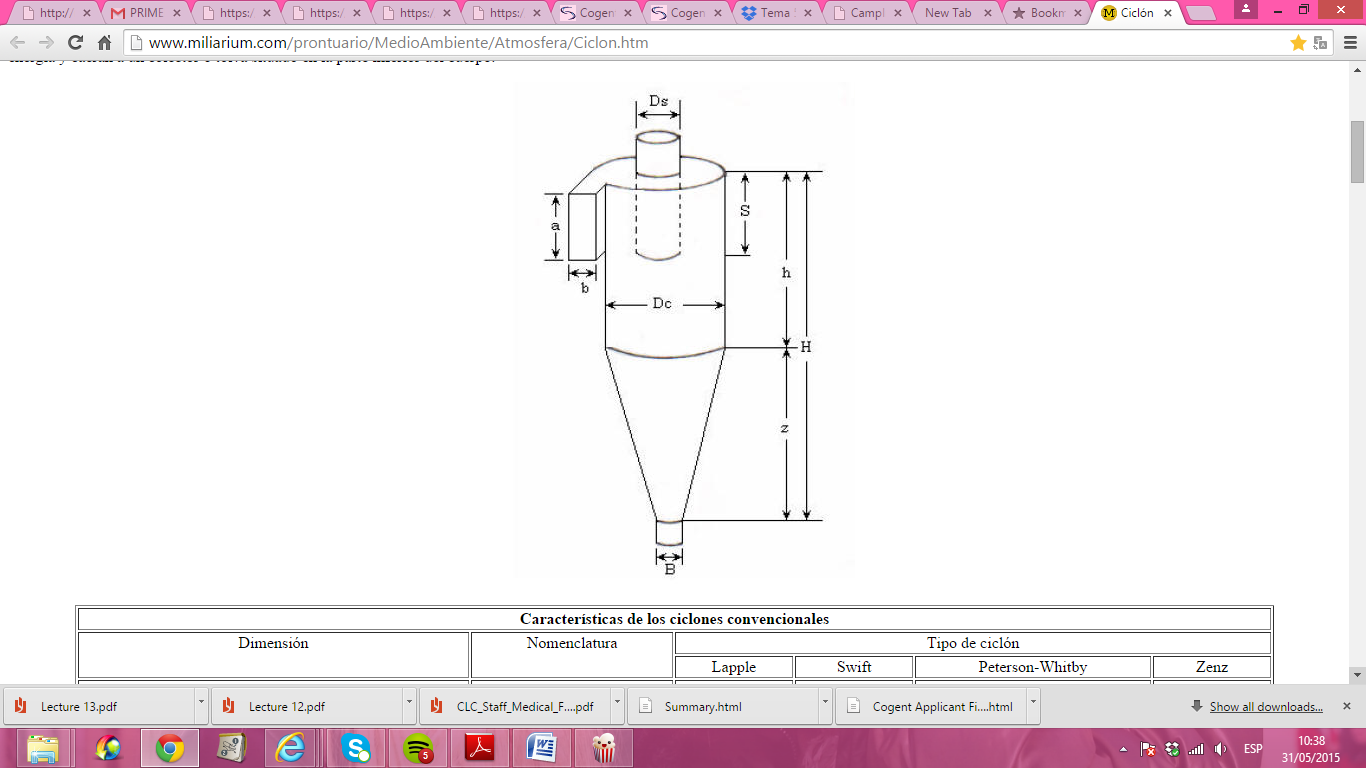


Figura . Esquema y dimensiones de un ciclón

Los ciclones se diseñan generalmente con similitud geométrica, tal que las proporciones de las dimensiones permanecen constantes a diferentes diámetros, y estas dimensiones se pueden expresar en términos del diámetro del cuerpo.

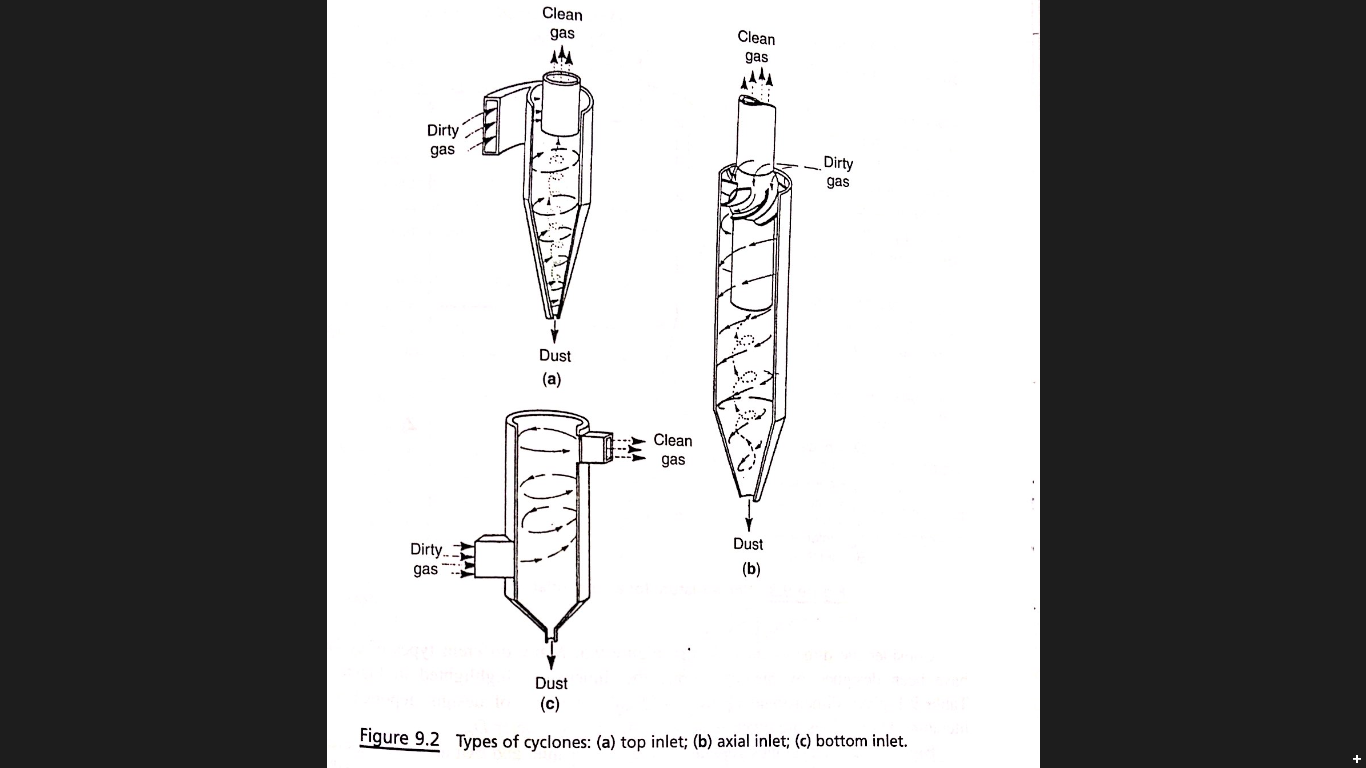
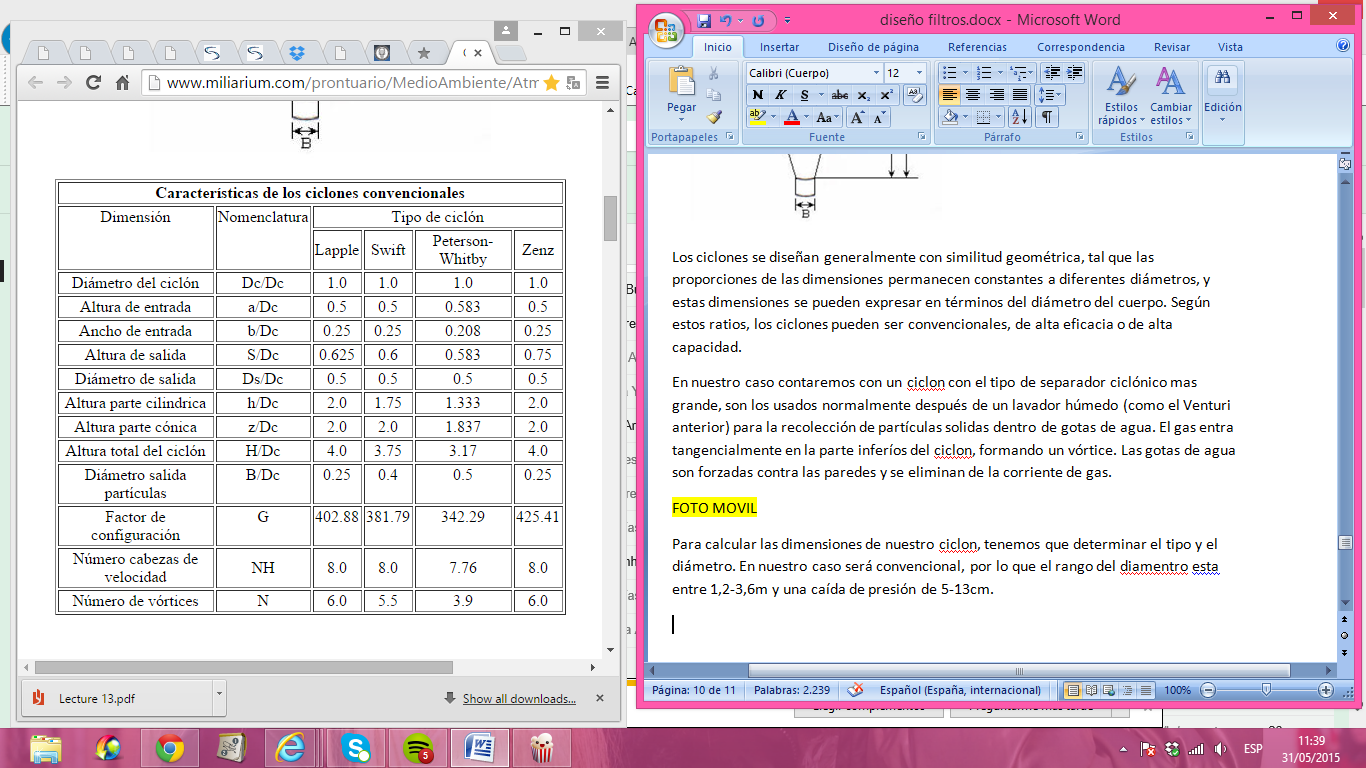


Figura . Tipos de ciclones: a) entrada por la parte de arriba; b)entrada axial; c)entrada por el inferior

Para calcular las dimensiones de nuestro ciclón, tenemos que determinar el tipo y el diámetro. En nuestro caso será convencional, por lo que el rango del diámetro está entre 1,2-3,6m y una caída de presión de 5-13cm.

Tabla . Características de los ciclones convencionales

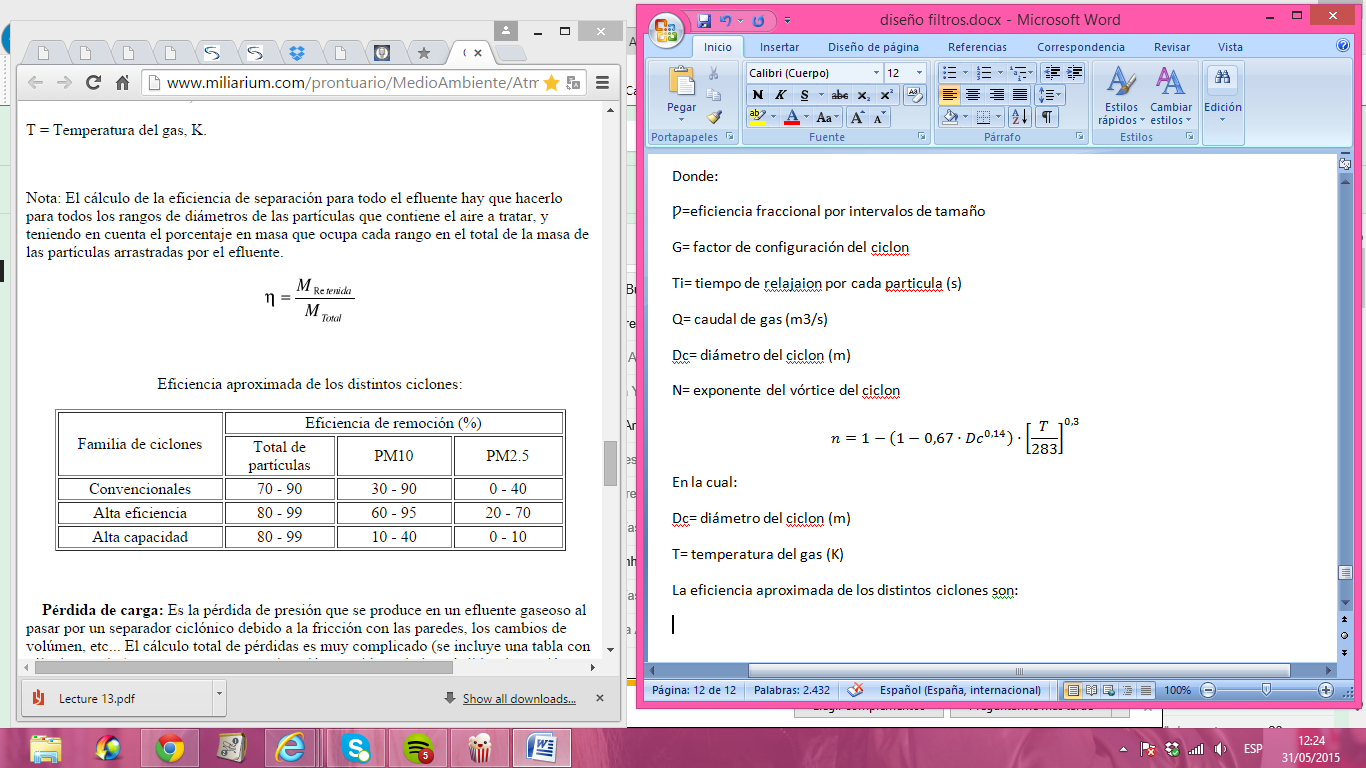


El diámetro fijado para el diseño del ciclón es de 3m, por lo que las dimensiones son:

|  |  |
| --- | --- |
| Diámetro del ciclón | 3m |
| Altura de entrada | 1,5m |
| Ancho de entrada | 0,75m |
| Altura de salida | 1,875m |
| Diámetro de salida | 1,5m |
| Altura parte cilíndrica | 6m |
| Altura parte cónica | 6m |
| Altura total del ciclón | 12m |
| Diámetro salida de partículas | 0,75m |
| Factor de configuración | 402,88 |
| Numero cabezas de velocidad | 8 |
| Numero de vórtex | 6 |

La eficiencia aproximada de los distintos ciclones es:

Tabla . Eficacia de remoción por tipo de ciclón

Teóricamente, Dp, es el tamaño de la partícula más pequeña que puede ser recolectada, esto significa que todas las partículas de diámetro Dp o mayores pueden ser recolectadas con una eficacia del 100%

El diámetro mínimo de partícula que puede ser recolectada con un 100% de eficacia está directamente relacionado con la viscosidad y con la anchura del conducto de entrada, y es inversamente proporcional con el número de giros, la velocidad de entrada el gas y la diferencia de densidad entre el gas y la partícula. En la práctica, la eficiencia de recolección de partículas depende de estos parámetros, pero esto predice que tosas las partículas mayores del Dp son recolectadas, cosa incierta.

A continuación se usa la relación semi-empírica desarrollado por Lapple (1951) para calcular un "50% diámetro de corte", dpc, que es el diámetro de partículas recogidas con 50% de eficiencia del ciclón.

La partícula a remover en este caso son las gotas de agua que han sido arrastradas desde el Venturi, que contienen en su interior las pequeñas partículas de carbón y coque.

Por lo tanto, la eficacia de recolección se calcula:

Otro parámetro a considerar en el diseño de los ciclones es la perdida de carga. Existen muchos modelos para dicho diseño, en este caso se ha usado la aproximación de Shepherd y Lapple:

Donde:

* Hv= perdida de carga
* K= constante que depende de la configuración del ciclón y de las condiciones de operación

Teóricamente, K puede variar considerablemente, pero lo normal es que varié entre 12 y 18 (Caplan 1962). Licht (1984) recomienda fijar el valor de K en 16, por lo que:

Convirtiéndolo en pérdida de carga:

<http://www.miliarium.com/prontuario/MedioAmbiente/Atmosfera/Ciclon.htm>

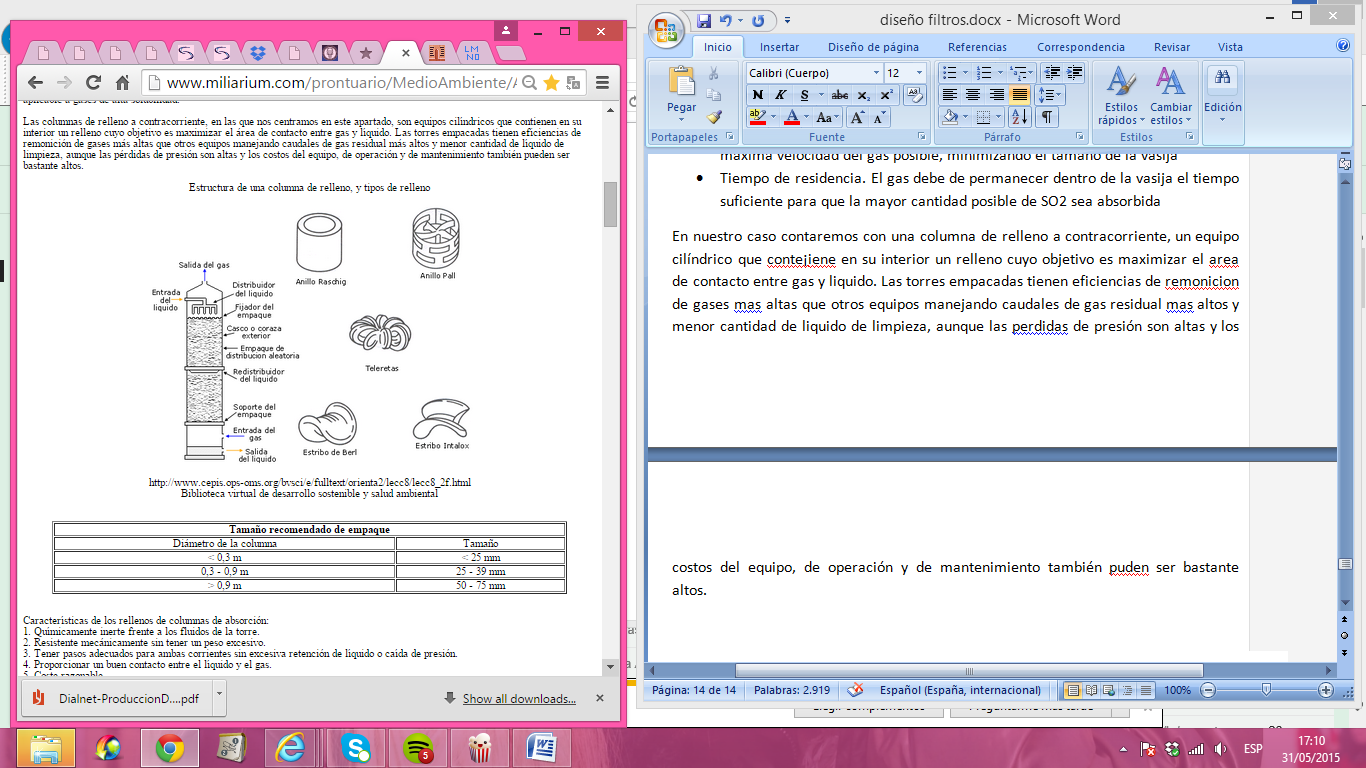
## Columna de absorción

El método de eliminación del azufre y compuestos ácidos de las corrientes gaseosas es la absorción, aunque ese método es aplicable a otros contaminantes. Este procedimiento consta de la transferencia de un contaminante de la corriente gaseosa con elevada concentración de contaminante a un líquido, con baja presión de vapor y menor concentración del compuesto, en el que tenga alta solubilidad. La fuerza impulsora que provoca la separación será entonces la diferencia de concentraciones.

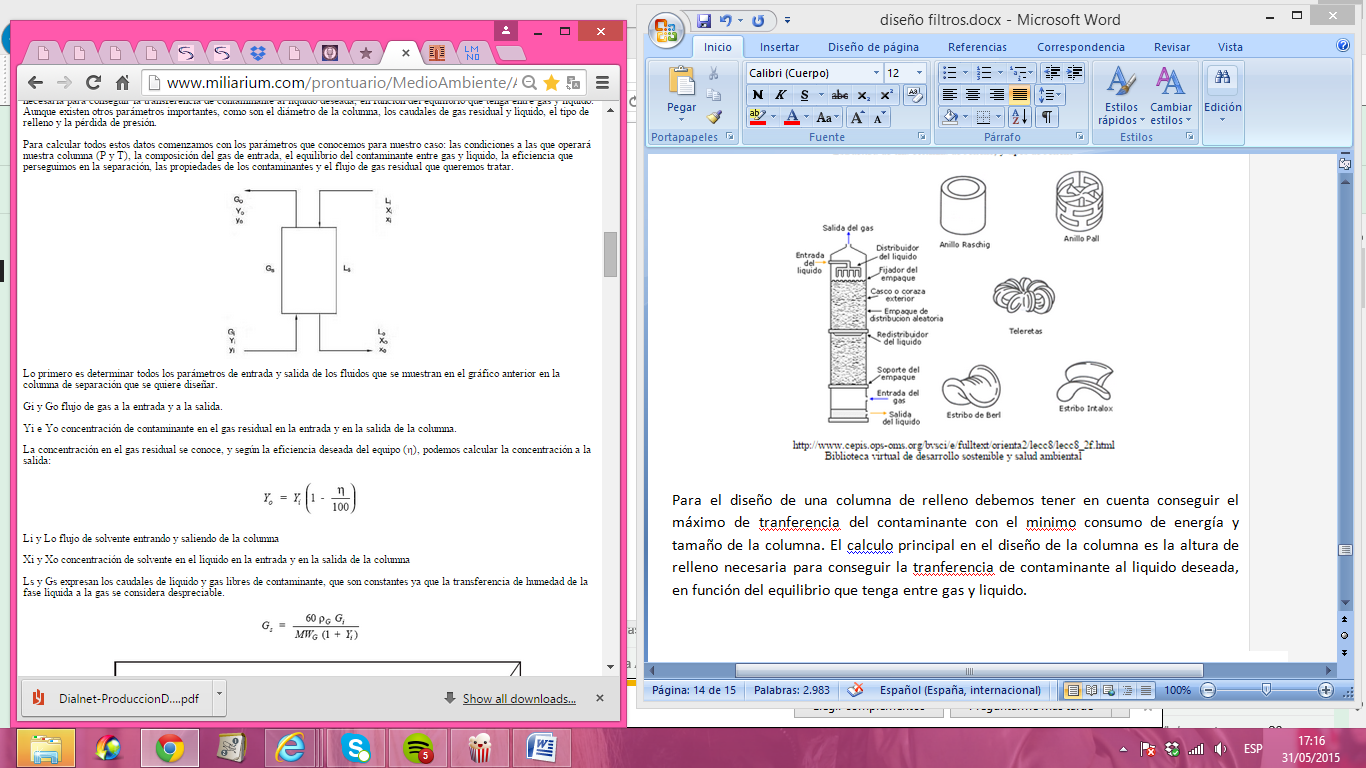
Para conseguir la máxima eficiencia se debe buscar la máxima superficie de contacto entre el gas residual y el liquido eliminador, además los materiales de construcción de estos equipos deben ser resistentes a la corrosión debido al carácter acido de los contaminantes. Los equipos empleados para la absorción de partículas pueden ser cajas de aspersión, columnas de platos, separadores Venturi o columnas de relleno a contracorriente. Los parámetros más importantes en el diseño de estos equipos son:

* La razón liquido/gas. Cuanto mejor sea este número menor cantidad de liquido lavador necesitamos y por tanto menor gasto y menos dimensionado de las instalaciones
* pH. Dependiendo del sistemas empleado, el pH se debe de mantener dentro de unos limites
* Velocidad del gas. Para minimizar los costes los lavadores se diseñan a la máxima velocidad del gas posible, minimizando el tamaño de la vasija
* Tiempo de residencia. El gas debe de permanecer dentro de la vasija el tiempo suficiente para que la mayor cantidad posible de SO2 sea absorbida

En nuestro caso contaremos con una columna de relleno a contracorriente, un equipo cilíndrico que contiene en su interior un relleno cuyo objetivo es maximizar el área de contacto entre gas y liquido. Las torres empacadas tienen eficiencias de remonicion de gases más altas que otros equipos manejando caudales de gas residual más altos y menor cantidad de líquido de limpieza, aunque las pérdidas de presión son altas y los costos del equipo, de operación y de mantenimiento también pueden ser bastante altos.



Para el diseño de una columna de relleno debemos tener en cuenta conseguir el máximo de transferencia del contaminante con el mínimo consumo de energía y tamaño de la columna. El cálculo principal en el diseño de la columna es la altura de relleno necesaria para conseguir la transferencia de contaminante al líquido deseado, en función del equilibrio que tenga entre gas y liquido.



La concentración en el gas residual se conoce, y según la eficiencia deseada del equipo (η), podemos calcular la concentración a la salida:

Nuestra concentración a la entrada de H2S es de 10000ppm en el gas, queremos eliminar la cantidad necesaria de H2S para llevar el gas a una turbina. Debido a nuestra concienciación con el medio ambiente nos proponemos rebajar nuestra concentración de contaminante hasta 3ppm, siguiente el ejemplo de la GICC Elcogas en Puertollano.

Por lo que la eficacia de nuestra columna de absorción será:

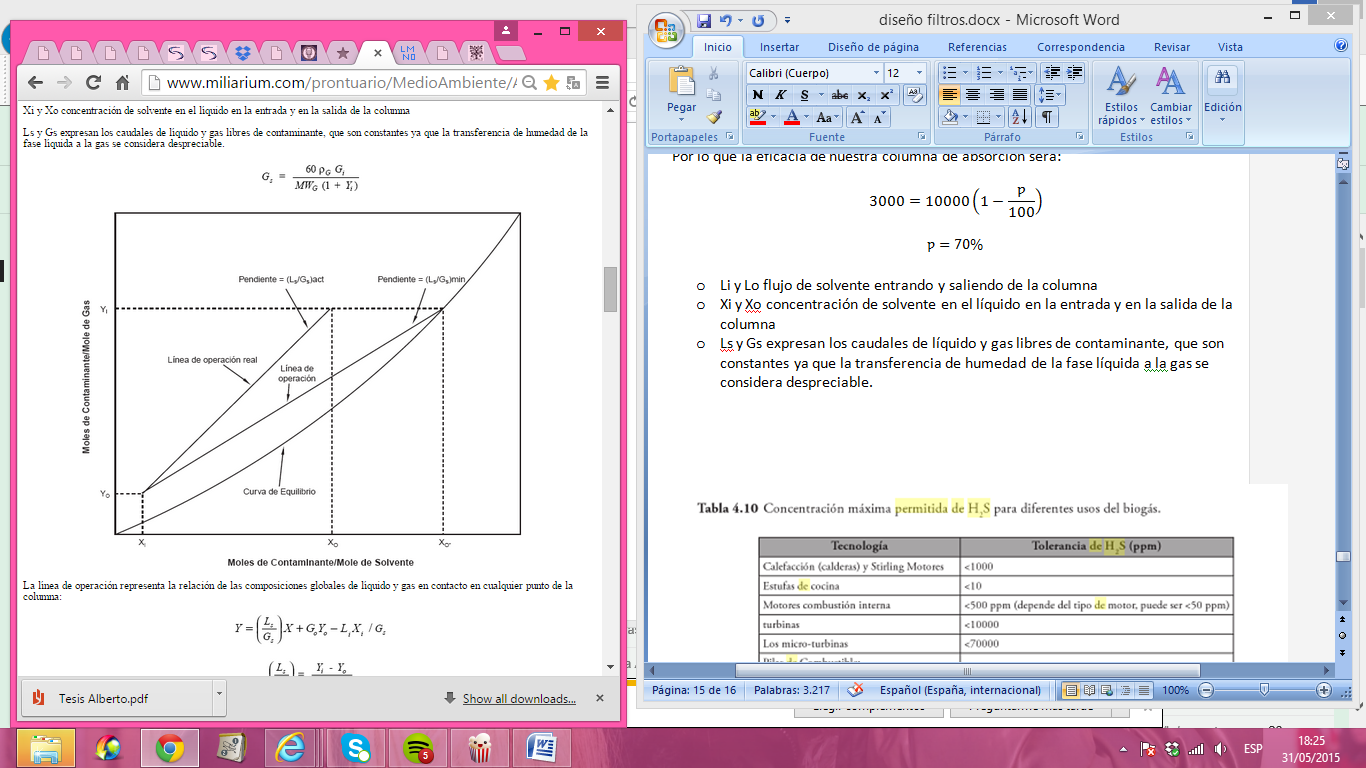
Para cumplir con dicho objetivo en la planta, la columna de relleno trabajara a 1 atm y a 25ºC. El efluente líquido se determina que será agua debido a su bajo coste. Se planteo en un principio utilizar como efluente aminas (MDEA), pero se desprecio por aumentar los costes, añadir un reactor de hidrolisis en el cual se llevara a cabo la reacción, y la complejidad del diseño.

El objetivo final del diseño es conocer la altura y el volumen de nuestra columna. Para ello, empezamos por fijar un diámetro, obtenido asemejándolo a un diámetro típico para columnas similares a la nuestra. Así el diámetro escogido fue D=1m.

Aplicamos el mismo criterio a la hora de imponer la relación entre cauda de gas y de liquido real y mínima. Es este caso, la constante suele oscilar entre 1,3 y 1,5. Tomamos un valor medio de 1,41 para reducir costes. Así pues:

Finalmente, toamos una vez más un valor aproximado para la pendiente de la recta de equilibrio de nuestra columna, según el elemento a tratar y nuestras condiciones de trabajo, así como la constante de Henry. La recta tiene la siguiente forma: y=0,12022·x

Nuestro objetivo ahora es hallar las razones molares que describen la transferencia de materia entre las fases que operan en la columna.



Así pues, comenzamos por calcular el caudal másico de gas que la atraviesa, para sacar el caudal molar, aplicamos la ecuación de los gases ideales:

El caudal de H2S que entra en la columna es de 1800 m3/h; para calcular el caudal molar:

Para obtener Y1, dividimos el caudal de entrada total del gas, entre el caudal de entrada de H2S:

Suponemos que el cauda de gas total permanece constante, ya que la parte que vamos a eliminar de H2S es muy pequeña con respecto al caudal total, por lo que para calcular Y2, solo necesitamos saber el caudal de salida de H2S en la fase de gas (lo que se elimina en la corriente liquida). Realizamos los mismos cálculos para Y2:

Para el cálculo de X1, es necesario saber que la relación (L’/V’) siempre es mínima en el equilibrio a partir de esto, aproximaremos X1 a Xe1 en este punto y despejaremos de esta ultima de la recta de equilibrio, representándola frente a nuestra Y1. De esta forma obtenemos Xe1 (donde Xe1≈X1). Con esta razón molar, obtenemos la relación (L’/V’)min mediante la expresión:

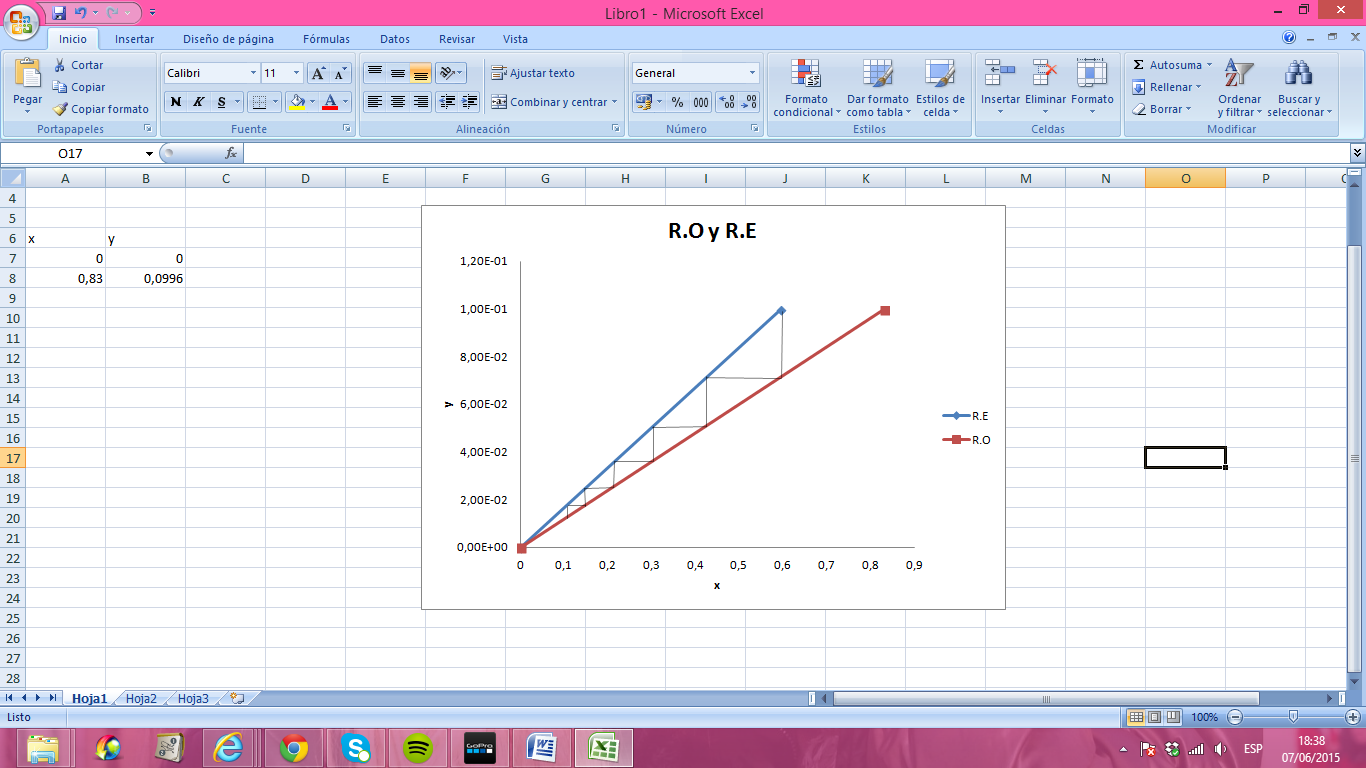
Sabiendo además que X2 es siempre cero, ya que no entra nada de azufre con la corriente de agua. Una vez conocemos (L’/V’)min, calculamos (L’/V’)real a partir de la relación (1,41) que hemos establecido anteriormente. Ahora que conocemos (L’/V’) real y todas las razones molares salvo X1, calculamos esta ultima:

Por lo que operando:

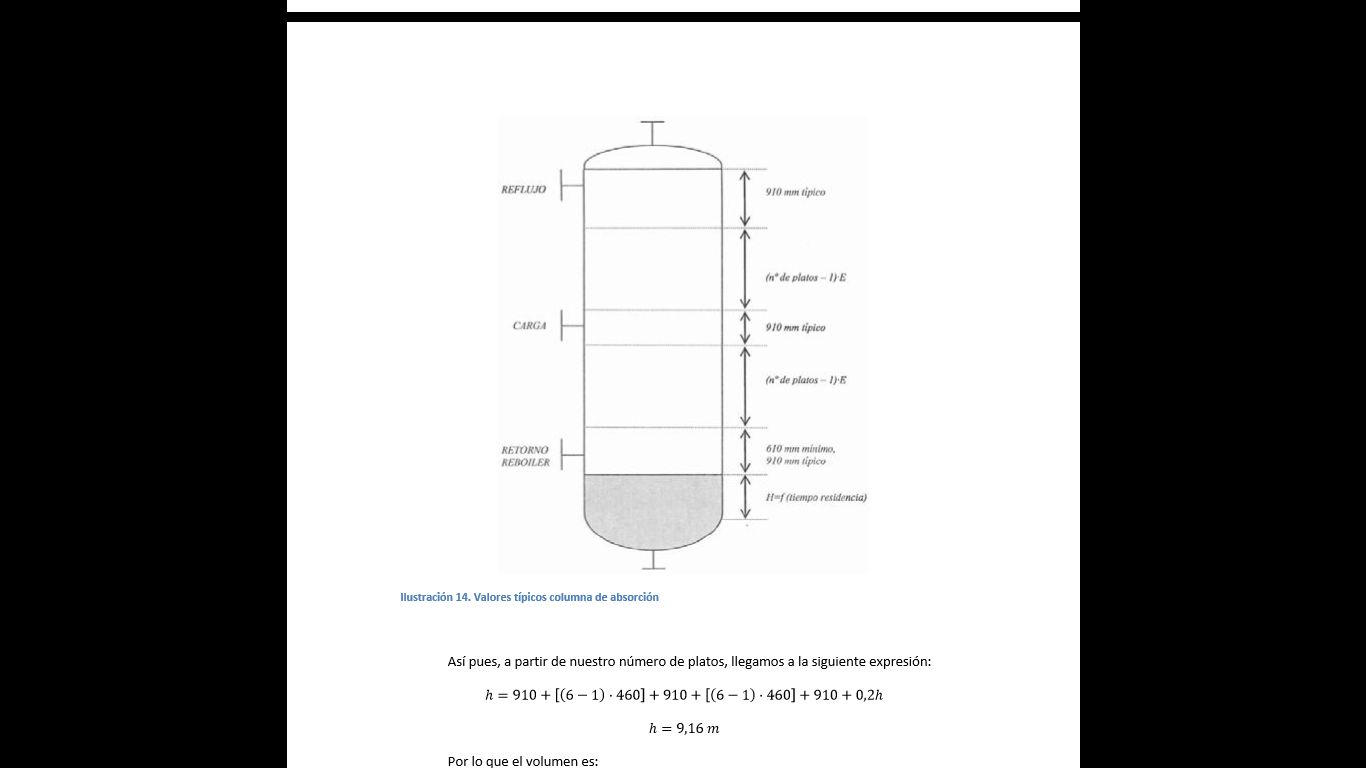
Ahora podemos calcular el caudal de líquido que necesitamos aportar a la columna para la conversión deseada:

Pasamos la solución a m3/h:

Ya hemos obtenido todas las razones molares (Y1, Y2, X1, X2) por lo que podemos representar la recta de operación de la columna, y calcula de forma grafica el número de unidades de transferencia. La representación es la siguiente:



El número de unidades de transferencia para nuestra columna es por tanto 5. Ahora solo queda conocer la altura de la columna y por tanto su volumen, para finaliza el diseño.

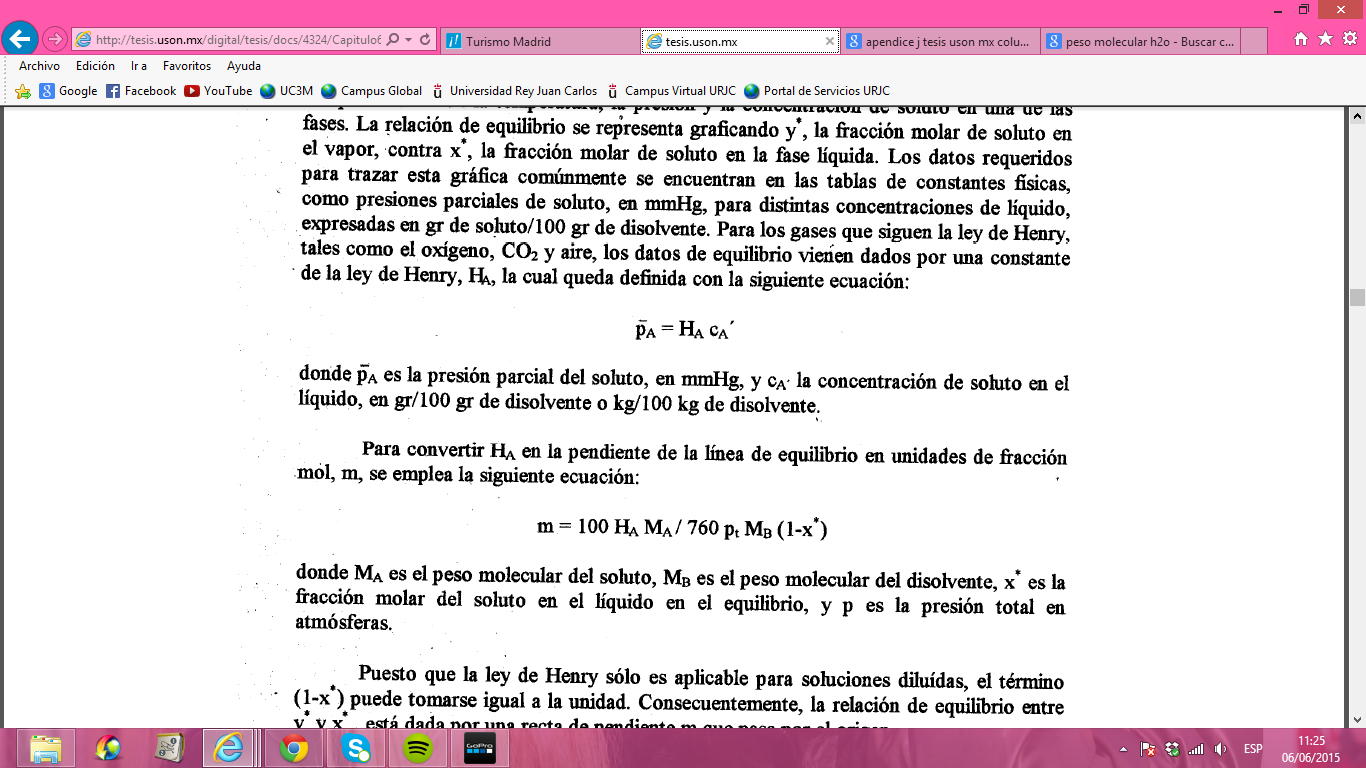


Así pues, a partir de nuestro número de platos, llegamos a la siguiente expresión:

Por lo que el volumen es:

**Había pensado determinar la perdida de carga y las propiedades del empaquetado de la columna, pero tengo unas dudas para la próxima tutoría.**

Fuentes:

* Theoretical Study of Cyclone Design. (May 2004)  
  Lingjuan Wang,  
  B. Eng., Anhui Institute of Finance and Trade, China;  
  M.S., Texas A&M University
* Diseño óptimo de ciclones. Carlos Alberto Echeverri Londoño. Medellín, 2006
* 
* <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/4324/Capitulo6.pdf>

# 