

UNIVERSIDAD DE ALMERÍA
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR Y FACULTAD DE CIENCIAS
EXPERIMENTALES



PROYECTO FIN DE CARRERA
INGENIERÍA QUÍMICA

PLANTA DEMOSTRACIÓN DE DEPURACIÓN DE AGUAS
RESIDUALES CON MICROALGAS

Almeria, Junio de 2014

PAULA SORIANO MOLINA



UNIVERSIDAD DE ALMERÍA

**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR Y FACULTAD DE CIENCIAS
EXPERIMENTALES**

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA

**PLANTA DEMOSTRACIÓN DE DEPURACIÓN DE AGUAS
RESIDUALES CON MICROALGAS**

AUTORA:

PAULA SORIANO MOLINA

DIRECTORES:

PEDRO ANTONIO GONZÁLEZ MORENO

ANTONIO GIMÉNEZ GIMÉNEZ

Almería, Junio de 2014

RESUMEN

El cultivo de microorganismos fotosintéticos en aguas residuales, en especial las microalgas, en simbiosis con sistemas bacterianos, se ha erigido como una alternativa viable tecnológicamente dado que presenta tres ventajas combinadas: la eliminación del exceso de nutrientes, la producción de biomasa y el consumo de CO₂.

El presente proyecto tiene como objetivo principal mejorar la calidad del agua residual utilizándola como medio de cultivo de microalgas, con el consiguiente aprovechamiento de la biomasa para el abastecimiento energético de la planta de tratamiento de aguas residuales.

En el proceso proyectado para tal fin pueden diferenciarse tres etapas principales:

- Tratamiento biológico del agua residual en un conjunto de cuatro fotobiorreactores tipo raceway. Las algas crecen profusamente en estos reactores, de forma que la fotosíntesis junto con la oxidación bacteriana de la materia orgánica biodegradable produce una reducción de la DBO₅ del 46%.
- Digestión anaerobia del lodo con el objeto de aprovechar el biogás generado para abastecimiento energético de la planta.
- Recuperación del CO₂ de los gases generados para su disolución en el medio de cultivo, favoreciendo el proceso fotosintético de las microalgas y reduciendo a su vez emisiones de efecto invernadero.

Debido a su alta tasa de crecimiento y productividad al aire libre, se ha seleccionado la especie microalgal *Muriellopsis sp.*. Considerando que la provincia seleccionada para el emplazamiento, Almería, reúne las condiciones climatológicas óptimas para el crecimiento microalgal, se estima una productividad de biomasa microalgal/bacteriana de 20 g/m²·día.

Almería, Junio de 2014.

Paula Soriano Molina.

ÍNDICE DEL PROYECTO

DOCUMENTO N° 1. MEMORIAS

MEMORIA JUSTIFICATIVA

MEMORIA DESCRIPTIVA

DOCUMENTO N° 2. ANEJOS

ANEJO N° 1. BALANCES DE MATERIA Y ENERGÍA

ANEJO N° 2. DECANTACIÓN

ANEJO N° 3. REACTOR RACEWAY

ANEJO N° 4. DIGESTIÓN ANAEROBIA

ANEJO N° 5. INTERCAMBIADORES DE CALOR

ANEJO N° 6. RECIPIENTES A PRESIÓN

ANEJO N° 7. GENERADOR

ANEJO N° 8. CAPTACIÓN DEL CO₂ DE LOS GASES DE COMBUSTIÓN

ANEJO N° 9. DISEÑO ESTÁNDAR DE UNA TURBINA

ANEJO N° 10. TUBERÍAS Y BOMBAS

ANEJO N° 11. VENTILADORES, SOPLANTES Y COMPRESORES

ANEJO N° 12. CONTROL E INSTRUMENTACIÓN

ANEJO N° 13. DISTRIBUCIÓN EN PLANTA

DOCUMENTO N°3. PLANOS

DOCUMENTO N°4. PLIEGO DE CONDICIONES

DOCUMENTO N°5. SEGURIDAD INDUSTRIAL

DOCUMENTO N°6. PRESUPUESTO

DOCUMENTO N°1
MEMORIAS

**MEMORIA
JUSTIFICATIVA**

ÍNDICE

1. ANTECEDENTES

1.1. Aguas residuales urbanas

1.1.1. Definición y procedencia

1.1.2. Características

1.1.3. Principales contaminantes y parámetros de caracterización

1.2. Microalgas

1.2.1. Introducción

1.2.2. Función fotosintética

1.2.3. Producción

1.2.3.1. Sistemas de cultivo

1.2.3.2. Factores limitantes que controlan la producción de microalgas

1.3. Aplicación e importancia de las microalgas en el tratamiento de aguas residuales

1.3.1. Introducción

1.3.2. Ventajas

1.3.3. Eficiencia

1.3.4. Microalgas comunes en lagunas de estabilización

1.3.5. Tratamiento de metales pesados con microalgas

1.3.5.1. Adaptaciones de las microalgas a los efluentes con metales pesados

1.3.5.2. Mecanismos de tolerancia de las microalgas a los efluentes con metales

1.4. Energía a partir de microalgas

1.4.1. Biodiesel

1.4.2. Conversión térmica

1.4.3. Hidrógeno

1.4.4. Conversión bioquímica

1.5. Bibliografía

2. OBJETIVO

3. LOCALIZACIÓN

4. JUSTIFICACIÓN

5. SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS

5.1. Diagrama de bloques

5.2. Especie microalgal y agua residual

5.2.1. Evaluación y selección de la cepa

5.2.2. Agua residual

5.3. Biorreactor

5.3.1. Sistemas abiertos

5.3.2. Sistemas cerrados

5.3.3. Suministro de carbono

5.4. Separación

5.5. Tratamiento de fangos

5.6. Captación de CO₂

5.7. Bibliografía

6. SELECCIÓN FINAL

6.1. Especie microalgal y agua residual

6.1.1. Especie microalgal

6.1.2. Selección y acondicionamiento del agua residual

6.2. Biorreactor

6.3. Méteodo de separación

6.4. Tratamiento de fangos

6.5. Captación de CO₂

6.6. Diagrama de bloques

1. ANTECEDENTES

1.1. Aguas residuales urbanas

1.1.1. Definición y procedencia de las aguas residuales urbanas

Según la Directiva 91/271/CEE relativa al tratamiento de las aguas residuales urbanas, se entiende por aguas residuales urbanas aquellas aguas residuales domésticas o la mezcla de las mismas con aguas residuales industriales y/o aguas de escorrentía pluvial.

Así mismo, y de acuerdo a dicha Directiva:

Las aguas residuales domésticas son aquellas aguas residuales procedentes de zonas de vivienda y de servicios y generadas principalmente por el metabolismo humano y las actividades domésticas.

Las aguas residuales industriales son todas aquellas aguas residuales vertidas desde locales utilizados para efectuar cualquier actividad comercial o industrial que no sean aguas residuales domésticas ni aguas de escorrentía pluvial.

La contribución de las actividades industriales en la composición de las aguas residuales urbanas depende principalmente del grado de industrialización de la aglomeración urbana y de las características de los vertidos realizados a la red de colectores municipales, los cuales pueden tener una composición muy variable dependiendo del tipo de industria.

Las aguas procedentes de las escorrentías pluviales tendrán mayor o menor grado de representatividad dependiendo principalmente del tipo de red de saneamiento existente, así como de la pluviometría registrada.

Las aguas domésticas incluyen las aguas de cocina, las aguas de lavadoras, las aguas de baño y las aguas negras procedentes del metabolismo humano.

Las aguas industriales proceden de actividades industriales que descargan sus vertidos a la red de alcantarillado municipal y presentan una composición muy variable dependiendo del tipo de industria.

Las aguas pluviales o de tormenta arrastran partículas y contaminantes presentes tanto en la atmósfera como en los viales. En la mayoría de las ocasiones, donde los sistemas de alcantarillado son unitarios, las aguas de lluvia son recogidas por el mismo sistema que se emplea para la recogida y conducción de las aguas residuales domésticas e industriales. En los primeros 15-30 minutos del inicio o de las precipitaciones, la contaminación aportada a la estación de tratamiento puede

ser importante. A esto, se suma el aporte intermitente de caudal, que, en determinadas ocasiones, obliga a la derivación, sin tratamiento previo, de un volumen determinado a los medios receptores.

1.1.2. Características

Las aguas residuales urbanas se caracterizan por su composición física y biológica, apareciendo una interrelación entre muchos de los parámetros que integran dicha composición. A la hora de realizar una adecuada gestión de dichas aguas, se hace imprescindible el disponer de una información lo más detallada posible sobre su naturaleza y características.

Las características más importantes de las aguas residuales urbanas son:

- **Color:** la coloración de las aguas residuales urbanas determina cualitativamente el tiempo de las mismas. Generalmente varía del beige claro al negro. Si el agua es reciente, suele presentar coloración beige clara; oscureciéndose a medida que pasa el tiempo, pasando a ser de color gris o negro, debido a la implantación de condiciones de anaerobiosis, por descomposición bacteriana de la materia orgánica.
- **Olor:** se debe principalmente a la presencia de determinadas sustancias producidas por la descomposición anaerobia de la materia orgánica. Si las aguas residuales son recientes, no presentan olores desagradables ni intensos. A medida que pasa el tiempo, aumenta el olor por desprendimiento de gases como el sulfhídrico o compuestos amoniacales por descomposición anaerobia.
- **Temperatura:** en los efluentes urbanos oscila entre 15 - 20 °C, lo que facilita el desarrollo de los microorganismos existentes.
- **Sólidos:** de forma genérica, los sólidos son todos aquellos elementos o compuestos presentes en el agua residual urbana que no son agua. Entre los efectos negativos sobre los medios hídricos caben destacar, entre otros, disminución en la fotosíntesis por el aumento de la turbidez del agua, deposiciones sobre los vegetales y branquias de los peces, pudiendo provocar asfixia por colmatación de las mismas; formación de depósitos por sedimentación en el fondo de los medios receptores, favoreciendo la aparición de condiciones anaerobias o aumentos de la salinidad e incrementos de la presión osmótica.

Las características químicas de las aguas residuales urbanas vienen definidas por sus componentes orgánicos, inorgánicos y gaseosos.

Los componentes orgánicos pueden ser de origen vegetal o animal, aunque cada vez, y con mayor frecuencia, las aguas residuales urbanas también contienen compuestos orgánicos sintéticos. Las proteínas, hidratos de carbono y lípidos, así

como sus derivados, son los compuestos orgánicos que principalmente aparecen en este tipo de aguas. Son biodegradables y su eliminación por oxidación es relativamente sencilla.

- Las proteínas suponen entre el 40 y el 60% de la materia orgánica de un agua residual, y junto con la urea, son los principales responsables de la presencia de nitrógeno en las aguas residuales. La existencia de grandes cantidades de proteínas en el agua residual puede ser origen de olores desagradables debido a los procesos de descomposición.
- Los hidratos de carbono representan entre un 25 y 50% de la materia orgánica. Desde el punto de vista del volumen y la resistencia a la descomposición, la celulosa es el hidrato de carbono cuya presencia en el agua residual es la más importante.
- En las aguas residuales urbanas, sin componente industrial, la presencia de grasas y aceites suele ser baja, no más de un 10%, lo que no evita que puedan provocar problemas tanto en la red de alcantarillado como en las plantas de tratamiento. Si no se elimina el contenido en grasa antes del vertido del agua residual, puede interferir con los organismos existentes en las aguas superficiales y crear películas y acumulaciones de materia flotante desagradables, impidiendo en determinadas ocasiones la realización de actividades como la fotosíntesis, respiración y transpiración.
- Junto con las proteínas, los hidratos de carbono, las grasas y los aceites, en el agua residual urbana aparecen pequeñas cantidades de moléculas orgánicas sintéticas, cuya estructura puede ser desde muy simple a extremadamente compleja. Entre estas moléculas orgánicas sintéticas, destacan los agentes tensoactivos.

Los agentes están formados por moléculas de gran tamaño, ligeramente solubles en agua. Son responsables de la aparición de espumas en las plantas de tratamiento y en la superficie de los cuerpos de agua receptores de los vertidos. Estas sustancias son los principales componentes de los detergentes, por lo que su presencia en las aguas residuales urbanas, se detecta por la aparición de espumas en la superficie. La formación de estas espumas producen un incremento de contaminación por materia orgánica disuelta al emulsionar y/o solubilizar las grasas y los aceites presentes en el agua. Por otro lado, en las plantas de depuración causa graves problemas al interferir en los procesos biológicos y en los sistemas de coagulación-floculación y decantación.

Dentro de los compuestos inorgánicos se incluyen a todos los sólidos de origen generalmente mineral, como las sales minerales, arcillas, lodos, arenas y gravas, y ciertos compuestos como sulfatos, carbonatos, etc., que pueden sufrir algunas transformaciones (fenómenos de óxido-reducción y otros).

La componente gaseosa de las aguas residuales urbanas contiene diversos gases en diferente concentración, entre los que destacan:

- Oxígeno disuelto: es fundamental para la respiración de los organismos aerobios presentes en el agua residual. El control de este gas a lo largo del tiempo, suministra una serie de datos fundamentales para el conocimiento del estado del agua residual. La cantidad presente en el agua depende de muchos

factores, principalmente relacionados con la temperatura y actividades químicas y biológicas, entre otros.

- **Ácido sulfhídrico:** es un gas que se forma en un medio anaerobio por la descomposición de ciertas sustancias orgánicas e inorgánicas que contienen azufre. Su presencia se manifiesta fundamentalmente por el olor repulsivo característico que produce.
- **Anhídrido carbónico:** se produce en las fermentaciones de los compuestos orgánicos de las aguas residuales.
- **Metano:** se forma en la descomposición anaerobia de la materia orgánica, apareciendo sobre todo en cierto tipo de estaciones depuradoras, donde se llevan a cabo procesos de estabilización de fangos vía anaerobia, ofreciendo algunas posibilidades de aprovechamiento como combustible.
- **Otros gases:** Se trata principalmente de gases malolientes, como ácidos grasos volátiles, indol, escatol y otros derivados del nitrógeno.

Las características biológicas de las aguas residuales urbanas vienen dadas por una gran variedad de organismos vivos de alta capacidad metabólica, y gran potencial de descomposición y degradación de la materia orgánica e inorgánica.

El componente orgánico de las aguas residuales es un medio de cultivo que permite el desarrollo de los microorganismos que cierran los ciclos biogeoquímicos de elementos como el carbono, el nitrógeno, el fósforo o el azufre.

Los organismos que principalmente se encuentran en las aguas residuales urbanas son: algas, mohos, bacterias, virus, flagelados, ciliados, rotíferos, nemátodos, anélidos, larvas, etc.

1.1.3. Principales contaminantes y parámetros de caracterización

Los principales compuestos a controlar y eliminar de las aguas residuales urbanas pueden resumirse en los siguientes:

- **Objetos gruesos:** trozos de madera, trapos, plásticos, etc., que son arrojados a la red de alcantarillado.
- **Arenas:** bajo esta denominación se engloban las arenas propiamente dichas, gravas y partículas más o menos grandes de origen mineral u orgánico.
- **Grasas y aceites:** sustancias que al no mezclarse con el agua permanecen en su superficie dando lugar a natas. Su procedencia es tanto doméstica como industrial.
- **Sustancias con requerimientos de oxígeno:** materia orgánica y compuestos inorgánicos que se oxidan fácilmente, lo que provoca un consumo del oxígeno del medio al que se vierten.
- **Nutrientes (Nitrógeno y Fósforo):** su presencia en las aguas es debida principalmente a los detergentes y a los fertilizantes. Igualmente, las excretas humanas aportan nitrógeno orgánico. El nitrógeno, fósforo y carbono son nutrientes esenciales para el crecimiento de los organismos. Cuando se vierten al medio acuático, pueden favorecer el crecimiento de una vida acuática no

deseada. Si se vierten al terreno en cantidades excesivas pueden provocar la contaminación del agua subterránea.

- Agentes patógenos: organismos presentes en mayor o menor cantidad en las aguas residuales y que pueden producir o transmitir enfermedades (virus, bacterias, protozoos, hongos, etc.).

Para caracterizar las aguas residuales se emplean un conjunto de parámetros que permiten cuantificar los contaminantes anteriormente definidos. Los parámetros de uso más habitual son los siguientes:

- Sólidos en Suspensión: sólidos que no pasan a través de una membrana filtrante de un tamaño determinado (0,45 micras). Dentro de los sólidos en suspensión se encuentran los sólidos sedimentables, que decantan por su propio peso y los no sedimentables.
- Aceites y Grasas: el contenido en aceites y grasas presentes en un agua residual se determina mediante su extracción previa con un disolvente apropiado, la posterior evaporación del disolvente y el pesaje del residuo obtenido.
- Demanda Bioquímica de Oxígeno a los 5 días (DBO_5): cantidad de oxígeno disuelto ($mg\ O_2/L$) necesario para oxidar biológicamente la materia orgánica de las aguas residuales. En el transcurso de los cinco días de duración del ensayo se consume aproximadamente el 70 % de las sustancias biodegradables.
- Demanda Química de Oxígeno (DQO): cantidad de oxígeno ($mg\ O_2/L$) necesaria para oxidar los componentes del agua recurriendo a reacciones químicas.

La relación DBO_5/DQO es un factor importante, que indica la biodegradabilidad de las aguas residuales urbanas, entendiéndose por biodegradabilidad, la característica de algunas sustancias químicas de poder ser utilizadas como sustrato por microorganismos, que las emplean para producir energía (por respiración celular), y crear otras sustancias como aminoácidos, nuevos tejidos y nuevos organismos.

Tabla 1. Biodegradabilidad del agua residual urbana según la relación DBO_5/DQO

DBO_5/DQO	Biodegradabilidad del agua residual
0,4	Alta
0,2 - 0,4	Normal
0,2	Baja

- Nitrógeno: se presenta en las aguas residuales en forma de amoníaco fundamentalmente y, en menor medida, como nitratos y nitritos. Para su determinación se recurre a métodos espectrofotométricos.

- Fósforo: en las aguas residuales aparece principalmente como fosfatos orgánicos y polifosfatos. Para su determinación se emplean métodos espectrofotométricos.
- Organismos patógenos: como organismos indicadores de contaminación fecal se utilizan normalmente los Coliformes (Totales y fecales).

A modo de ejemplo, se incluye una tabla con parámetros según Pliego de Condiciones y Anormalidad tolerable

Tabla 2. Parámetros de incumplimiento del Pliego de Condiciones y Anormalidad tolerable

	Incumplimiento Pliego	Anormalidad Tolerable
Rend. SS Dec 1 ^a , %	60	57
Rend. eliminación grasas, %	70	65
Rend. DBO ₅ Dec 1 ^a , %	33	30
Rend. DBO ₅ total, %	90	87
DBO ₅ salida para entrada < 350, mg/L	35	37
Rend. SS total	92	89
SS salida para SS entrada < 360, mg/L	30	32
Rend. eliminación N total, %	50	45

1.2. Microalgas

1.2.1. Introducción

Las microalgas son en general organismos fotoautótrofos, es decir, obtienen la energía de la luz proveniente del Sol y se desarrollan a partir de materia inorgánica. Sin embargo, algunas especies son capaces de crecer empleando materia orgánica como fuente de energía o de carbono. Según esto, la producción de microalgas se divide en:

- Fotoautótrofa: las algas obtienen la energía del Sol y el carbono de compuestos inorgánicos (sales).
- Fotoheterótrofa: obtienen la energía del Sol y emplean compuestos orgánicos como fuente de carbono.
- Mixotrófica: muchas algas son capaces de crecer bajo procesos tanto autótrofos como heterótrofos. El carbono lo obtienen por tanto de compuestos orgánicos y

de CO₂. Algunas de estas algas son la *Spirulina Platensis* o la *Chlamydomonas Reinhardtii*.

- Heterótrofa: los compuestos orgánicos proporcionan tanto la energía como la fuente de carbono. Es decir, existen en efecto algas que pueden desarrollarse bajo ausencia de luz, como por ejemplo *Chlorella Protothecoides*.

La producción fotoautótrofa de algas es actualmente la única técnica y económicamente viable a gran escala.

La composición de las microalgas (contenido en lípidos, carbohidratos y proteínas) es variable y puede ser manipulada mediante varios parámetros durante el proceso de su cultivo. Depende obviamente también de la especie considerada.

La relación C:N para las microalgas varía entre 6 y 9 dependiendo de las especies.

El tamaño de las algas eucariotas varía entre 0,5–30 µm (Markou et al., 2011), mientras que las cianobacterias pueden llegar a medir hasta 200 µm.

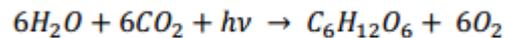
1.2.2. Función fotosintética

La fotosíntesis es un proceso llevado a cabo por organismos fotoautótrofos, que tienen la capacidad de sintetizar materia orgánica partiendo de la energía del Sol y la materia inorgánica. La importancia de este proceso no puede ser discutida, ya que la vida en la Tierra se mantiene fundamentalmente gracias a la fotosíntesis que realizan las algas en el medio acuático y las plantas en el medio terrestre, ya que éstas introducen los nutrientes minerales en la base de la cadenas tróficas de los ecosistemas, generando materia orgánica que es consumida por organismos superiores.

Las microalgas, como las cianobacterias y al igual también que las plantas verdes, emplean la energía de la luz del Sol para generar un oxidante lo suficientemente potente como para extraer del agua oxígeno, protones y electrones. Los electrones extraídos del agua reducen, en la fase luminosa de la fotosíntesis, el NADP⁺ a NADPH.

NADP⁺ es la forma oxidada de la nicotinamida adenina dinucleótido fosfato, una coenzima que interviene en numerosas vías anabólicas. NADPH es su forma reducida, que interviene en la fase oscura de la fotosíntesis (ciclo de Calvin) donde se reduce el CO₂. El NADPH actúa como transportador de energía, la cual se emplea finalmente en sintetizar macromoléculas orgánicas a partir de moléculas precursoras pequeñas.

La estequiometría del proceso fotosintético total, en el que se libera oxígeno molecular, es la siguiente:



Donde hv representa la energía lumínica en función de su frecuencia v y la constante de Planck h . El proceso fotosintético de fijación de CO_2 provoca un aumento gradual de pH en el medio debido a la acumulación de OH^- .

En la actualidad se denomina a este proceso fotosíntesis oxigénica, y se diferencia de la fotosíntesis anoxigénica o bacteriana, llevada a cabo por las bacterias purpúreas y verdes del azufre. En este proceso el dador de electrones es el sulfuro de hidrógeno y, consecuentemente, el elemento químico liberado no será oxígeno sino azufre. El azufre puede ser acumulado en el interior de la bacteria, o expulsado al agua.

Dentro de las células, la fotosíntesis tiene lugar en los cloroplastos, unos orgánulos citoplasmáticos de color verde exclusivos de las células fotosintéticas. En una cámara en su interior se encuentra el estroma, un medio interno donde tienen lugar las reacciones oscuras del ciclo de Calvin. El estroma alberga componentes necesarios para la fotosíntesis, como la principal enzima responsable de la fijación del dióxido de carbono: la RBP-carboxilasa o RuBisCO. Es una proteína formada por 16 polipéptidos que cataliza la transformación del CO_2 a una forma orgánica.

Por su parte, los pigmentos fotosintéticos se encuentran en la membrana de los tilacoides, unos sacos que son también llamados lamelas. Los pigmentos que absorben la luz solar son:

- Clorofila: La clorofila a es el pigmento involucrado directamente en la transformación de la energía lumínica en energía química. Absorbe en la región del rojo (650-700 nm) y azul (400-500 nm). Las células fotosintéticas casi siempre contienen un segundo tipo de clorofila, la clorofila b, con un espectro de absorción ligeramente diferente. También existe una clorofila c, la cual se puede hallar en algas pardas. El contenido de clorofila del alga fitoplanctónica es entre el 1 y 2% en peso seco. La relación clorofila:carbono varía por tanto bastante, dependiendo de la fase de crecimiento: desde menos de 1:100 a más de 3:100.
- Carotenoides, que absorben en la región del azul (400-500 nm) y se encuentran principalmente en las bacterias purpúreas. Se dividen en carotenos y xantofilas.



Figura 1. Estructura de la clorofila a

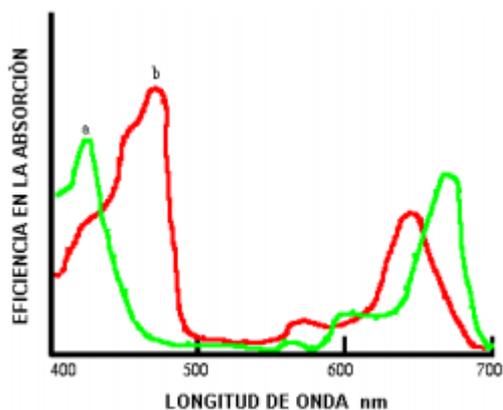


Figura 2. Espectro de absorción de la clorofila a y b

- Ficobilinas, que absorben en la región anaranjada del espectro (600-650). Se encuentran presentes sólo en las cianobacterias y las algas rojas.

1.2.3. Producción

Como se ha comentado, las microalgas se pueden cultivar de manera fotoautótrofa, heterótrofa o en condiciones de mixotrofia. Según Brennan (2010) la producción fotoautótrofa es hoy en día el único método de producción de microalgas a gran escala que resulta económicamente rentable y técnicamente viable en el caso de que no haya producción de energía.

1.2.3.1. Sistemas de cultivo

Existen tres tipos de métodos a escala comercial de cultivo masivo de microalgas, dependiendo de cómo opere el sistema:

- Cultivos discontinuos ("Batch")

En estos cultivos la población va pasando por las distintas fases de crecimiento (latencia, exponencial, estacionaria), ajustándose generalmente a una función logística (Schanz y Zahler, 1981). Esto produce cambios fisiológicos de la población a medida que transcurre el tiempo de cultivo.

Los cultivos discontinuos se utilizan generalmente en estudios fotoautotróficos, pero su población celular es muy difícil de definir. Estos tipos de cultivos tienen la ventaja de ser fáciles de manejar y son adecuados para estudiar las cinéticas de crecimiento y los parámetros que inciden en el crecimiento celular.

- Cultivo semi-continuo

En este tipo de cultivo, parte del volumen se recoge para su utilización, generalmente al final de la fase exponencial, y la cantidad que se retira se reemplaza con medio de cultivo fresco. Este método requiere menos mano de obra que los cultivos en batch. Se pueden mantener sistemas interiores para la producción de microalgas durante varias semanas utilizando métodos semicontinuos, en los que las condiciones de cultivo pueden ser cuidadosamente controladas. En sistemas de energía lumínica eficiente se puede recoger 3 veces por semana hasta el 90% del volumen de cultivo a altas concentraciones celulares (Laing, 1985).

También pueden operar semicontinuosamente cultivos de especies naturales, tanto marinas como dulceacuícolas, inducidos para la producción de blooms (Dunstan y Tenore, 1972; Dcikson, 1987).

- Cultivo continuo

Es aquel en el que se mantiene la población en fase exponencial de crecimiento ("steady-state") durante largos periodos de tiempo. Hay que añadir continuamente nutrientes en la misma medida que son retirados del medio, para mantener los parámetros de crecimiento y la población celular a nivel constante. En estos sistemas el factor que controla el crecimiento es la tasa a la que se añade el medio fresco. El cociente entre la tasa de flujo y el volumen de cultivo se denomina tasa de dilución ($D=f/V$). Esta tasa es el volumen de medio que pasa por un recipiente de cultivo en un tiempo; su recíproco ($1/D$) es el tiempo medio de residencia de una célula en el sistema.

Para obtener cultivos continuos, todos los factores de crecimiento deben mantenerse constantes. La densidad del cultivo se controla manteniéndola a concentración constante. La ventaja del cultivo continuo es que se pueden

mantener unas condiciones óptimas del “steady-state” en el cultivo, con un mayor grado de control de calidad sobre el producto algal.

1.2.3.2. Factores limitantes que controlan la producción de microalgas

Existen tres factores principales que actúan sobre la producción de la biomasa algal: el medio de cultivo, la temperatura y la luz. Las tasas de crecimiento algal son reguladas por los parámetros ambientales, presentan una respuesta directa a factores como la intensidad luminosa, la temperatura, la concentración de nutrientes, el pH, etc. Dicha respuesta es específica para el organismo que se cultive y determina la productividad del sistema. Debido a la rápida proliferación de las algas, ciertas especies tienden a dominar a través de selección natural, independientemente del alga que haya sido utilizada como inóculo.

En estanques de cultivo abiertos de agua dulce, *Chlorella*, *Scenedesmus* y *Micractinium* tienden a ser dominantes a través del tiempo, así como *Phaeodactylum* en cultivos de agua de mar.

- Medio de cultivo: debe proveer a las microalgas de las sales minerales indispensables para un crecimiento óptimo. El control frecuente de la concentración es indispensable para evitar una baja en la producción por carencia de sales. Éste es un factor que puede ser controlado y no debe representar un limitante en sistemas industriales de producción.
- Temperatura: es un factor al cual los cultivos son sensibles en permanencia, en ciertos casos puede alterar las reacciones celulares y las condiciones metabólicas del organismo. La respuesta de las microalgas a las variaciones de la temperatura son muy diversas según el tipo de célula cultivada. Por ejemplo, para las cianofitas la temperatura óptima se sitúa entre 28 y 35 °C, mientras que para las clorofita está comprendida entre 23 y 28 °C y para las bacillarofitas marinas entre 15 y 20 °C. De ahí la importancia al escoger el tipo de alga a cultivar de acuerdo a las condiciones climáticas y a la complejidad de las instalaciones que se dispongan.
- Luz: tiene un efecto inmediato sobre las células y produce grandes variaciones en el desarrollo de acuerdo a la duración de la irradiación, la intensidad luminosa, la superficie expuesta, la densidad celular, la profundidad del cultivo y los mecanismos de agitación. Como la luz penetra únicamente en la superficie del cultivo, la agitación y el control de la densidad son indispensables para evitar que la falta de luz en las células provoque una disminución importante en la producción.

Goldman (1979), en su análisis sobre las limitaciones de la eficiencia fotosintética en los cultivos masivos algales al aire libre, demostró que el proceso de conversión de energía solar en biomasa vegetal presenta grandes pérdidas. En

condiciones óptimas, para una conversión del 5% del total de la energía solar esperada, se puede obtener hasta 30 – 40 g/m²día en peso seco durante cortos periodos de tiempo. Sin embargo, la producción en periodos a largo plazo resulta considerablemente más baja. La luz funciona también como un medio selectivo para el cultivo de cierto tipo de algas, Vonshak et al. (1982), constataron que en cultivos al aire libre de *Spirulina*, la disminución de la intensidad luminosa recibida favorece el crecimiento de ésta microalga y limita la frecuente contaminación por *Chlorella*.

Myers y Burr (1940) y Ryther (1956) llegaron a la conclusion que para diferentes microalgas marinas la fuerte intensidad luminosa provoca un efecto inhibitorio ocasionando una disminución en su actividad fotosintética.

Hay otros factores que no se suelen considerar, pero que en casos concretos pueden controlar el proceso, como son: estrés mecánico e hidrodinámico, salinidad del medio, micronutrientes, catabolitos etc.

1.3. Aplicación e importancia de las microalgas en el tratamiento de aguas residuales

1.3.1. Introducción

Diversos tipos de aguas residuales constituyen un medio apropiado para el crecimiento de microalgas, las cuales crecen rápidamente en estos medios convirtiendo la energía solar en materia orgánica. Además, la actividad fotosintética, proporciona oxígeno para la oxidación microbiológica de los residuos orgánicos, y la incorporación fotosintética de CO₂ aumenta el pH del agua residual hasta un valor letal para muchas bacterias y virus patógenos.

Existe una estrecha relación entre algas y bacterias que es fundamental para el desarrollo del proceso (Figura 3). Las bacterias degradan los compuestos orgánicos produciendo anhídrido carbónico y otros productos que son utilizados por las algas, mientras éstas producen por medio de la fotosíntesis el oxígeno necesario para que las bacterias lleven a cabo la oxidación.

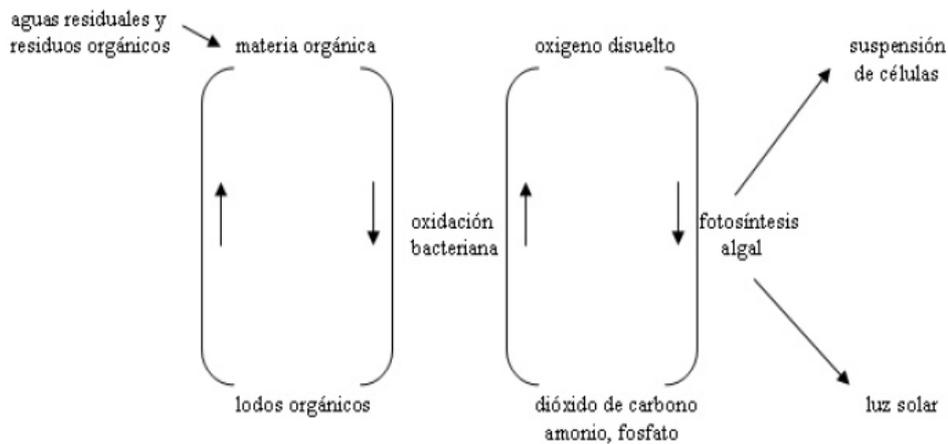


Figura 3. Ciclo de oxigenación fotosintética de las aguas residuales

El objetivo fundamental de la aplicación de microalgas en el tratamiento de aguas residuales es la utilización y transformación de los nutrientes a biomasa, con la consecuente producción de oxígeno, para mejorar la calidad del efluente así como la disponibilidad de éste para la continua oxidación bacteriana de la materia orgánica en sistemas integrales, mediante el ciclo de oxigenación fotosintética de aguas residuales.

La importancia y aplicación de las microalgas en el tratamiento de aguas residuales, tiene sus antecedentes en la época de Caldwell (1940), quien reporta los primeros estudios, sobre la posibilidad de utilizar las microalgas como “microorganismos purificadores de aguas residuales”, debido al aprovechamiento de los “nutrientes inorgánicos” contenidos en esta agua, para favorecer el crecimiento de las microalgas, funcionando éste como medio de cultivo.

Posteriormente Oswald (1957), introduce un nuevo concepto en la producción masiva de microalgas, al llevar a cabo el tratamiento de las aguas residuales, obteniendo una producción de biomasa vegetal con un alto contenido proteico, lo que finalmente se considera como una valorización de las aguas residuales mediante el cultivo de microalgas. Es en la década de los años sesenta, en Richmond (California) cuando se plantea el sistema de cultivo más grande de los Estados Unidos, llegándose a alcanzar una producción muy alta de biomasa de microalgas, siendo de 12-18 g.m².d⁻¹. Es a partir de este cultivo a gran escala que se desencadenó el desarrollo por parte de diversos países en el cultivo masivo de microalgas en sistemas cerrados y abiertos, con diferentes finalidades.

1.3.2. Ventajas

El tratamiento de las aguas residuales con microalgas presenta ventajas tan importantes como son el mejoramiento de la calidad del efluente, mediante un mecanismo de bajo costo energético, así como el aprovechamiento de nutrientes, que están siendo desechados, al ser incorporados a la biomasa, con la consecuente producción y generación de oxígeno.

Estas ventajas tienen como consecuencia, en un proceso global, la remoción de sales (amonio, nitritos, nitratos, ortofosfatos), el aumento del pH de los efluentes (proceso fotosintético), lo cual favorece la precipitación de ortofosfatos, la eliminación de nitrógeno amoniacal por efecto de intercambio gaseoso, la disminución de la demanda biológica de oxígeno, la oxigenación del agua, favoreciendo la oxidación continua de materia orgánica, la acción bactericida, reduciendo la supervivencia de organismos patógenos, la recuperación de CO₂, liberado en los procesos, mediante su empleo en el proceso fotosintético y un alto rendimiento en la bioconversión de la energía solar respecto a algunas plantas agrícolas convencionales (azúcar y sorgo).

1.3.3. Eficiencia

La eficiencia de este proceso, depende de varios factores tales como:

- Tipo de efluente a tratar: doméstico, agrícola e industrial.
- Características de operación: carga orgánica e hidráulica.
- Contaminantes (organismos depredadores), que afectan la composición de la biomasa, restringiendo las aplicaciones.
- Profundidad de los estanques y de los mecanismos de agitación.
- Diferencia de temperatura e intensidad luminosa, debido a las variaciones estacionarias, así como el fotoperiodo (luz-oscuridad) o luz continua.

Algunos aspectos a considerar en la eficiencia del proceso son: la adecuada combinación de los parámetros anteriormente mencionados, así como el mantenimiento del cultivo en óptimas condiciones, favoreciendo la elevada eficiencia de remoción del proceso, con la finalidad de alcanzar las máximas densidades algales.

1.3.4. Microalgas comunes en lagunas de estabilización

Las microalgas que se utilizan en el tratamiento de aguas residuales se caracterizan por soportar elevadas concentraciones de nutrientes contenidos en las

aguas residuales, los cuales son requeridos para el desarrollo y crecimiento poblacional, por lo que los microorganismos presentan ciertas adaptaciones para poder sobrevivir en estos medios. Presentan además una actividad metabólica elevada, una capacidad de resistir variaciones ambientales y un desarrollo de cultivo en fase exponencial, con la capacidad de tolerar las altas concentraciones de nutrientes inorgánicos. Dentro de las microalgas tenemos grupos y géneros representativos, que son utilizados en el tratamiento biológico terciario de las aguas residuales, las cuales se presentan en la Tabla 3

En la Tabla 4 se resumen algunas de las microalgas que han sido empleadas en la depuración de diversos tipos de aguas residuales.

La biomasa microalgal obtenida en estos sistemas de tratamiento, puede ser cosechada o recuperada para su aplicación en diferentes aspectos, como suplemento o complemento de la alimentación animal y producción de fertilizantes, lo cual se traduce como la valorización del tratamiento de las aguas residuales con cultivos de microalgas (Tabla 5).

Tabla 3. Géneros y grupos de microalgas

Grupo	Géneros representativos	% de aplicación en lagunas de estabilización
Diatomeas	<i>Cyclotella</i> , <i>Gomphonema</i> , <i>Nitzschia</i>	10
Flageladas	<i>Chlamydomonas</i> , <i>Euglena</i> , <i>Cryptomonas</i>	25
Algas verdes	<i>Ankistrodesmus</i> , <i>Chlorella</i> , <i>Scenedesmus</i>	50
Algas verdes/azules	<i>Anacystis</i> , <i>Anabaena</i> , <i>Oscillatoria</i>	15

Tabla 4. Microalgas empleadas en la degradación de diversos contaminantes

Microalga	Tipos de aguas residuales
<i>Prototheca zopfii</i>	Hidrocarburos derivados del petróleo
<i>Chlorella pyrenoidosa</i>	Tintes azoicos en aguas residuales
<i>Chlorella sp.</i>	Residuos de ganadería digeridos anaeróbicamente
<i>Ankistrodesmus</i> y <i>Scenedesmus</i>	Aguas residuales de industria del papel y alperujos
<i>Spirulina platensis</i>	Agua residual urbana
<i>Chlorella sokoniana</i>	Agua residual en heterotrofia sin luz
<i>Botryococcus braunii</i>	Agua residual tras tratamiento secundario
<i>Scenedesmus</i>	Altos niveles de amonio en efluente de digestión anaerobia

Tabla 5. Empleo de la biomasa producida

Géneros de microalgas	Empleo
<i>Chaetoceros, Chlamydomonas, Chlorella, Chlorococcum, Cylotella, Dunaliella, Rhodomonas</i>	Acuicultura: Moluscos, bivalvos, crustáceos, rotíferos, peces
Otros géneros	Alimentación animal: ganado porcino
Cianobacterias	Fertilizantes diversos: arrozales y cultivos diversos
Diversos géneros	Productos químicos y energía: producción de hidrógeno, metanización y ácidos grasos

1.3.5. Tratamiento de metales pesados con microalgas

En la descarga de aguas residuales domésticas e industriales, se encuentran principalmente altas concentraciones de materia orgánica, así como desechos inorgánicos, entre los que se pueden mencionar como altamente tóxicos a los metales pesados, causantes de muchas alteraciones a los seres vivos, debido a los problemas que se presentan por la acumulación en la sangre, en el cabello, en el sistema nervioso, en la piel, etc., por lo que la biorremoción de estos metales en sistemas biológicos es posible mediante la aplicación del cultivo de microalgas, ya que presentan diversas adaptaciones y ciertos mecanismos de tolerancia, los cuales son los responsables de llevar a cabo a través de la membrana, los procesos de adsorción, absorción y desorción. Los metales que más se han estudiados en este tipo de tratamiento son: Cd, Zn, Cu, Ag, Pb, Hg, Ni y Cr. Así mismo, los géneros *Chlorella* y *Scenedesmus*, mostraron la mayor capacidad de remoción de los metales señalados.

1.3.5.1. Adaptaciones de las microalgas a los efluentes con metales pesados

- Capacidad para sobrevivir y reproducirse en hábitats contaminados con metales.
- Adaptaciones genéticas, dependiendo de cada género a utilizar.
- Cambios genéticos o fisiológicos producidos por la exposición a los metales, haciendo más tolerantes algunos géneros a un metal específico.
- Tolerancia a algunos metales (propiedades intrínsecas bioquímicas y fisiológicas), como la bioacumulación en vacuolas de Cd y Zn, siendo no dañinos.
- Resistencia dada por la respuesta de las microalgas al medio ambiente externo y a la exposición de metales.

1.3.5.2. Mecanismos de tolerancia de las microalgas a los efluentes con metales

- Captación extracelular y precipitación: dada por la composición de las especies de algas, la biomasa total y parámetros fisicoquímicos.
- Impermeabilidad y exclusión: detoxificación en la cual los iones, no atraviesan la membrana celular, por lo que la célula no toma los metales al interior.
- Detoxificación interna: en la cual, los metales se depositan frecuentemente en varios organelos celulares, mitocondrias, vacuolas, núcleo, cloroplastos, cuerpos de inclusión (polifosfatos) y pared celular.

1.4. Energía a partir de microalgas

Podría decirse que una de las principales preocupaciones actuales es la búsqueda de fuentes de energía sustitutas o complementarias al petróleo, dado el pronóstico del agotamiento de las reservas del planeta y los problemas derivados de su uso: emisiones de efecto invernadero, subida de los precios, inestabilidad de los mercados por dependencia energética de países productores, etc.

La investigación actual en microalgas está mayoritariamente centrada en la obtención de cultivos con alto contenido en lípidos para la producción de biodiesel. Existen, sin embargo, además de dicha conversión química, otras posibilidades de aprovechamiento energético de las microalgas, de modo similar a como se aprovechan otros tipos de biomasa del planeta (residuo forestal, residuo orgánico urbano, etc.): mediante conversión termoquímica, química o bioquímica. Todas estas posibilidades se detallan a continuación.

1.4.1. Biodiesel

El biodiesel es un combustible líquido obtenido a partir de lípidos mediante procesos de esterificación y transesterificación. Estos lípidos provienen de grasas animales o de aceites de diversos cultivos, como los de soja (en la actualidad la materia prima más empleada), maíz, girasol, palma, colza, remolacha, jatropha, etc. El principal problema de estas materias primas vegetales es la necesidad de grandes extensiones de tierra para su cultivo y la competencia con productos de alimentación, lo que ha generado en los últimos años un amplio debate sobre su sostenibilidad económica, medioambiental y social.

Numerosas especies de microalgas pueden ser inducidas, manipulando la características físico-químicas del medio de cultivo, a producir elevadas cantidades de lípidos o ácidos grasos, que pueden ser posteriormente empleados para la producción de biodiesel. Estas manipulaciones pueden ser simples, como variación de la salinidad, temperatura, pH o disponibilidad de micronutrientes. La acumulación de lípidos se atribuye a un consumo de azúcares mayor al crecimiento

celular, que favorece la conversión a lípidos de los azúcares en exceso. Sin embargo, y por regla general, las microalgas con alto contenido lipídico no presentan altas velocidades de crecimiento. Es por ello que lo que se busca optimizar es la producción neta de lípidos por unidad de volumen de reactor o de superficie ocupada.

Las ventajas del empleo de algas para la obtención de biodiesel son principalmente las siguientes:

- No compite en el mercado de productos de alimentación.
- La producción no es estacional por dependencia con las cosechas.
- El consumo de agua es menor.
- La superficie necesaria para su cultivo es mucho menor: empleando aceite de colza se producen alrededor de 1190 L biodiesel/ha de cultivo, mientras que en el caso de las algas se pueden obtener hasta 12000 L/ha.
- Su alta velocidad de crecimiento en comparación con los cultivos tradicionales: la productividad por unidad de superficie es entre 20 y 40 veces mayor en el caso de las algas.
- Eliminación del empleo de herbicidas y pesticidas.

Los principales problemas técnicos de la obtención de biodiesel a partir de microalgas radican en la dificultad de la extracción de los lípidos de las células. Estos procedimientos son complejos y están todavía en fase de desarrollo. Los principales problemas económicos derivan por consecuente del alto precio de la tecnología necesaria, así como del hecho que compiten con precios de carburantes relativamente bajos.

1.4.2. Conversión termoquímica

La conversión termoquímica es la descomposición térmica de la materia orgánica de la biomasa mediante diferentes métodos:

- La **combustión directa** genera gases calientes quemando la biomasa en presencia de aire. Pese a la posibilidad de quemar todo tipo de biomasa, el proceso sólo es rentable para aquella con un contenido en humedad menor al 50%. La viabilidad del empleo de microalgas en combustión no ha sido estudiada como tal, sin embargo existen estudios donde la biomasa algal se combina con carbón en su combustión, disminuyendo la producción de gases de efecto invernadero.
- **Gasificación**: es la oxidación parcial de la biomasa a temperaturas entre 800 y 1000 ° C, que genera gas de síntesis (una mezcla de CO₂, H₂, CO, N₂ y CH₄). Existen estudios de gasificación de microalgas como *Spirulina* y *Chlorella*, sin embargo la bibliografía al respecto es escasa.
- La **pirólisis** transforma la biomasa, en ausencia de aire y mediante temperaturas que oscilan entre 350 - 700 °C, a aceite, carbón vegetal y gas de síntesis. La investigación actual defiende el potencial de la pirólisis como medio para

obtener carburantes líquidos sustitutos del petróleo. Existen varios tipos de pirólisis aunque los procesos presentan todavía barreras técnicas que salvar para tratar correctamente los aceites producidos (craqueo catalítico, hidrogenación, eliminación de álcalis, etc.). La investigación en pirólisis de algas presenta resultados prometedores que podrían llevar a la explotación comercial, sobre todo a partir de microalgas que crecen en heterotrofia.

- La **licuefacción termoquímica** de las microalgas representa una opción viable para su aprovechamiento energético, ya que no es necesario el secado de la biomasa. Se emplean bajas temperaturas alrededor de 300 - 350 °C y altas presiones (5-20 MPa), junto con un catalizador en presencia de hidrógeno. Los reactores son complejos y la tecnología, costosa; sin embargo, existen diferentes estudios que demuestran un balance energético positivo del proceso completo de licuefacción de por ejemplo *B. braunii* o *Dunaliella tertiolecta*.

1.4.3. Hidrógeno

Las microalgas poseen las características genéticas, metabólicas y enzimáticas para producir hidrógeno en condiciones anaerobias. Las enzimas hidrogenasas son capaces de producirlo a partir de los protones extraídos del agua, si bien son inhibidas rápidamente por dicho hidrógeno producido. La microalga *Chlamydomonas reinhardtii*, por ejemplo, es capaz de producir hidrógeno gaseoso en lugar de oxígeno molecular mediante la fotosíntesis cuando hay deficiencia de azufre. Esto indica que existen vías alternativas de transporte de electrones durante el proceso fotosintético que no implican al oxígeno o al NADP⁺. Las investigaciones al respecto son recientes y por tanto los resultados concretos son aún escasos. Se están llevando a cabo investigaciones a escala de laboratorio y desarrollando diferentes métodos para incrementar el rendimiento de la producción y optimizar el proceso. Existen principalmente dos métodos: producción simultánea de oxígeno e hidrógeno y producción en dos etapas, en la segunda de las cuales las algas se ven privadas de azufre.

1.4.4. Conversión bioquímica

La conversión bioquímica de la biomasa de microalgas incluye principalmente la digestión anaerobia y la fermentación alcohólica. En la primera, la biomasa debe presentar, para un buen desarrollo del proceso, una relación C:N apropiada, mientras que para la fermentación con vistas a obtener bioetanol es deseable que la biomasa contenga alto contenido en carbohidratos, ya que éstos son los finalmente transformados en alcohol.

La fermentación anaerobia y la digestión anaerobia son los procesos de aprovechamiento energético, junto con la licuefacción termoquímica, en los que las microalgas se pueden emplear en base húmeda, mientras que otros métodos de recuperación energética, como por ejemplo en la recién comentada producción de biodiesel, implican el secado de la biomasa.

Cabe destacar que la conversión bioquímica de las microalgas puede tener lugar tras la extracción de los lípidos para su empleo en producción de biodiesel, con lo que es posible la combinación de varios sistemas de aprovechamiento energético para mejorar el rendimiento global.

1.5. Bibliografía

- Metcalf & Eddy, Inc. 1995. Ingeniería de aguas residuales: tratamiento, vertido y reutilización. McGraw-Hill/Interamericana de España, S.A., Aravaca.
- Hernández Muñoz, Aurelio. 1995. Manual de depuración uralita: sistemas para depuración de aguas residuales en núcleos de hasta 20000 habitantes. Editorial Uralita Productos y Servicios: Paraninfo, Madrid, edición 1.
- Ramalho, R.S. 1990. Tratamiento de aguas residuales. Ed. Reverté, S.A.
- Abalde, J., Cid, A., Fidalgo, P., Torres, E., Herrero, C. Microalgas: Cultivo y Aplicaciones. Laboratorio de Microbiología. Departamento de Biología Celular y Molecular. Universidad de La Coruña.
- Kojima, H. and Lee y K. 2001. Photosynthetic microorganisms in Environmental Biotechnology. Springer-Verlag. Hong-Kong. 310 pp.
- Oswald, W. J. 1957. Light conversion efficiency in photosynthetic oxygenation. IER, series 44. Sanitary Engr. Res. Lab. Univ. Calif. Berkeley. 127pp.

2. OBJETIVO

El presente proyecto tiene como objetivo principal mejorar la calidad del agua residual utilizándola como medio de cultivo de microalgas, con el consiguiente aprovechamiento de la biomasa para el abastecimiento energético de la planta de tratamiento de aguas residuales.

Para llevar a cabo dicho objetivo, el proceso se puede dividir en las siguientes etapas:

- Tratamiento biológico del agua residual en un reactor tipo raceway. El agua residual urbana entra en contacto con una comunidad de bacterias y microalgas durante un periodo de tiempo con el objetivo de descomponer la materia orgánica presente en el agua residual, formándose a la vez un lodo que contiene biomasa microalgal/bacteriana.
- Digestión anaerobia del lodo con el objeto de aprovechar el biogás generado para abastecimiento energético de la planta.
- Recuperación del CO₂ de los gases generados para su disolución en el medio de cultivo favoreciendo el proceso fotosintético de las microalgas y reduciendo a su vez emisiones de efecto invernadero.

Los objetivos globales relacionados con la evaluación económica, seguridad e impacto ambiental, son:

- Coste mínimo del proceso.
- Operación de la planta segura y limpia.
- Mínima contaminación ambiental.

3. LOCALIZACIÓN

El hecho de tratarse de una planta de depuración con microalgas implica tener en cuenta que la zona de ubicación debe disponer de los factores adecuados para el crecimiento de las mismas (luz, temperatura, CO₂ etc.). El agua y el sol son dos factores clave, por lo tanto la planta debe estar situada en una zona donde la intensidad del sol sea óptima y que dure lo más posible en el día.

También es importante la disponibilidad de CO₂. Las plantas de cultivo y procesamiento de microalgas deben estar situadas en zonas donde haya industria que genera el CO₂ para evitar el coste adicional de este. En este aspecto no habría problema, puesto que la propia planta generará CO₂ para autoabastecimiento.

Para aprovechar el terreno la planta se ubicará en terreno árido, evitando la ocupación de una zona útil para cultivos vegetales y alejada de zonas urbanas, evitando con ello los problemas propios de una planta de depuración tales como olores, ruidos etc.

La planta se ubicará en las proximidades de la EDAR El Toyo (Almería), aprovechando el agua procedente de la etapa de pretratamiento de dicha EDAR. El agua, tras ser utilizada como fuente de nutrientes para el crecimiento de las microalgas, con posterior decantación secundaria, se dividirá en tres corrientes: una de recirculación al decantador secundario (para diluir el agua residual procedente de la etapa de pretratamiento), otra que, tras adicionar las respectivas cantidades de carbonato y bicarbonato será empleada como fase líquida en la columna de captación del CO₂ de los gases de combustión y otra que continuará su depuración en el tratamiento terciario, en el que la filtración cerrada sobre arena constituye un complemento a la depuración del agua residual.

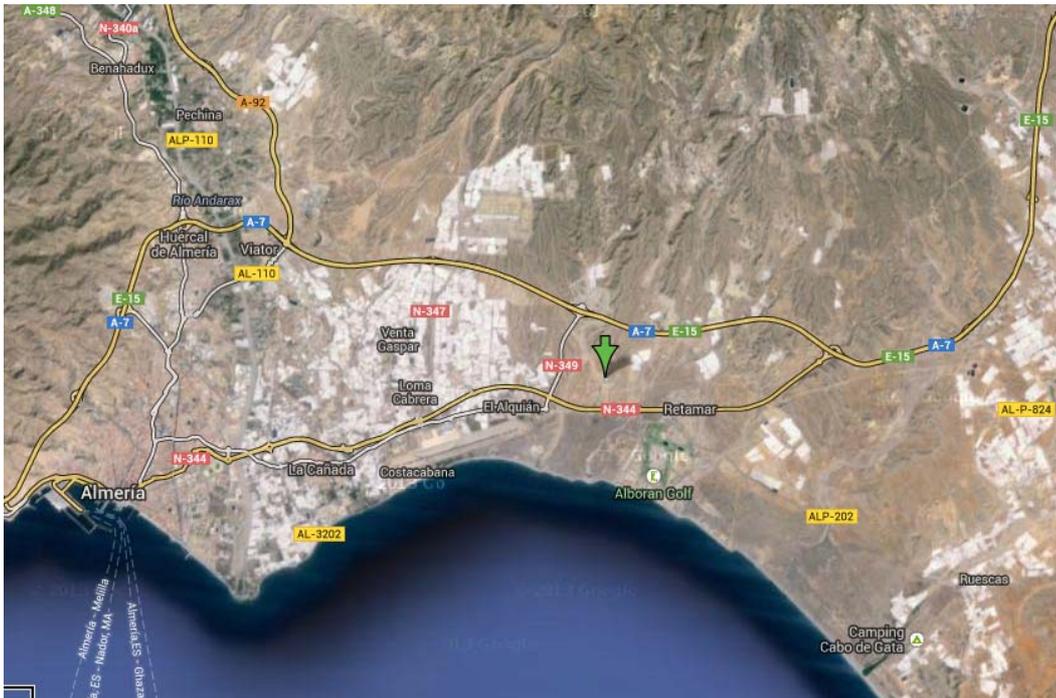


Figura 4. Zona geográfica elegida para la ubicación de la planta demostración de depuración de aguas residuales con microalgas



Figura 5. EDAR El Toyo (Almería)

4. JUSTIFICACIÓN

En muchas ocasiones los vertidos de aguas residuales urbanas superan la capacidad de dilución y autodepuración de los cauces y medios receptores, lo que conlleva a un deterioro progresivo de la calidad de los mismos, e imposibilita la reutilización posterior del agua.

Independientemente del origen y características de las aguas residuales urbanas, éstas han de ser tratadas adecuadamente antes de su vertido o reutilización, con el fin de:

- Proteger el estado ecológico de los medios receptores (embalses, ríos, barrancos, acuíferos, mar, etc.) del grueso de la contaminación orgánica procedente de las aguas residuales urbanas.
- Evitar riesgos para la salud pública de la población.
- Producir efluentes con características físicas, químicas y microbiológicas aptas para su reutilización.

Recientemente el cultivo de microorganismos fotosintéticos, en especial las microalgas, en aguas residuales se ha erigido como una alternativa viable tecnológicamente dado que presenta tres ventajas combinadas: la eliminación del exceso de nutrientes, la producción de biomasa y el consumo de CO₂.

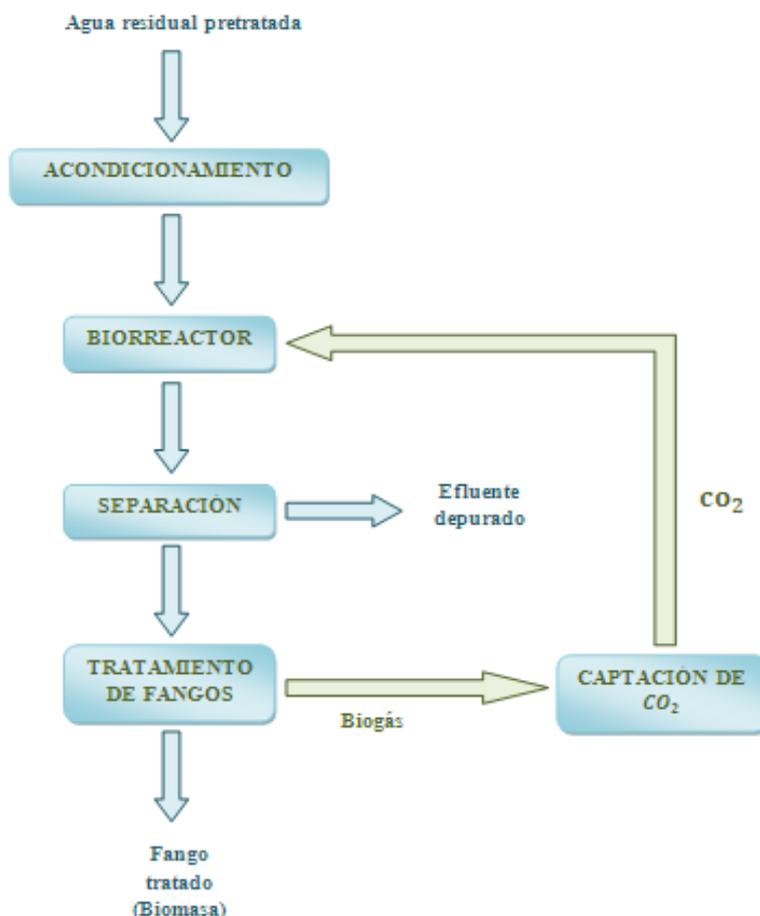
Las microalgas son organismos unicelulares fotosintéticos que captan luz solar, CO_2 y nutrientes del medio (principalmente P, y N) y desplazan microorganismos patógenos mediante competencia entre especies por los recursos. De este modo, se reduce la capacidad del efluente de provocar eutrofización en cauces naturales y además, se obtiene como producto adicional la biomasa de algas, útil para fines energéticos.

Se propone una eficiente y rentable mejora del tratamiento convencional de las aguas residuales mediante el cultivo de microalgas en un conjunto de fotobiorreactores raceway. La situación geográfica elegida es la provincia de Almería, dado que permite mantener el cultivo de microalgas a pleno rendimiento por el aporte de radiación diario y extenderlo a todo el año gracias a las horas solares anuales y temperaturas que se tienen en esta zona.

El sometimiento de la biomasa obtenida a un tratamiento de digestión anaerobia permite tratar posteriormente el biogás generado para suplir las necesidades energéticas de la planta, así como favorecer el proceso fotosintético mediante el suministro del CO_2 al medio de cultivo reduciendo a su vez emisiones de efecto invernadero.

5. SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS

5.1. Diagrama de bloques



5.2. Especie microalgal y agua residual

5.2.1. Evaluación y selección de la cepa

Se han ensayado una amplia variedad de especies y cepas de microalgas para determinar su adecuación al cultivo masivo, así como su interés ya sea como biomasa o para la obtención de algún producto.

Una vez se obtiene un género o especie de interés debe tenerse en cuenta que pueden existir distintas especies o cepas con diferencias en crecimiento, morfología y composición celular, por lo que se hacen necesarios métodos adecuados de clasificación y selección para encontrar la especie o cepa óptima (Vonshak, 1987).

Se han establecido diferentes criterios para la evaluación y selección de cepas, normalmente dirigidos a la obtención de altas tasas de producción de microalgas, aprovechando la iluminación natural (Becker, 1994). Algunos de estos criterios son:

- Respuesta a las fluctuaciones diurnas. En general, en las áreas adecuadas para el cultivo de microalgas a gran escala son frecuentes las fluctuaciones diurnas de temperatura por encima de los 20 °C, debido a su elevada intensidad de luz, lo que significa que durante las horas de la mañana, a pesar de que existe suficiente luz, la temperatura en los tanques de cultivo está por debajo de la temperatura óptima para el crecimiento. Para minimizar este efecto depresivo sobre el crecimiento, las cepas de microalgas a utilizar en estos cultivos son aquellas que presentan un amplio rango de temperatura óptima.
- Resistencia a la fotoinhibición. Aunque en general la luz es uno de los factores limitantes del cultivo microalgal, las capas más superficiales de los cultivos pueden estar expuestas a una radiación solar tan elevada que llega a producirse la fotooxidación de las células microalgales. Por ello, deben aislarse cepas con intensidades de luz de saturación elevadas y con una mínima inhibición del crecimiento a elevadas intensidad de luz.
- Cantidad de respiración en la fase oscura. Las medidas de la tasa de respiración en oscuridad han mostrado que durante la noche puede llegar a perderse más del 35% de la biomasa total producida durante el día. Las cepas con una tasa de respiración en oscuridad baja o una relación entre producción de O₂ en luz y consumo de O₂ en oscuridad alta serian buenos candidatos para el cultivo en exterior a gran escala.
- Sensibilidad a elevadas concentraciones de O₂. El oxígeno es uno de los factores más importantes de las ecuaciones de fotosíntesis; elevadas concentraciones de O₂ deprimen la tasa de incorporación fotosintética del carbono en forma de un mecanismo de retroalimentación, provocando en algunas ocasiones la pérdida total de cultivo. La agitación de los cultivos, además de asegurar la distribución homogénea de las células en el medio, permite la eliminación del cultivo del exceso de oxígeno producido en la fotosíntesis, que de lo contrario podría alcanzar niveles de saturación del 500%. En cualquier caso, deberán seleccionarse cepas que puedan tolerar concentraciones de oxígeno relativamente altas.
- Sensibilidad al estrés osmótico. Elevadas tasas de evaporación (por encima de 10 L/día.m²) en cultivos en el exterior y la adición de medio fresco pueden producir una duplicación de la concentración de sales después de largos periodos de cultivo, lo que puede provocar un fuerte estrés osmótico. Deben seleccionarse cepas que toleren aumentos de la presión osmótica sin aumentar la tasa de respiración.

5.2.2. Agua residual

- Agua residual urbana

El principal potencial de las microalgas en depuración de agua residual radica en su capacidad de asimilación, y por tanto eliminación del medio, de nutrientes, principalmente nitrógeno y fósforo.

En concreto, algunas especies de microalgas verde, como *Chlorella* y *Scenedesmus* presentan especial tolerancia a medios altos en nutrientes.

Wang y Min (2009) evaluaron el crecimiento de *Chlorella* en agua residual de cuatro puntos de su proceso de tratamiento: previa a la decantación primaria, tras la decantación primaria, tras el tratamiento de fangos activos, y el sobrenadante de la centrífuga de fangos. Su estudio proporciona datos de velocidades específicas de crecimiento (desde $0,34 \text{ d}^{-1}$ tras fangos activos hasta $0,95 \text{ d}^{-1}$ para el sobrenadante) y de eliminación de nutrientes y DQO. También llamó la atención sobre el hecho de que las microalgas eliminaron aluminio, calcio, hierro, magnesio y manganeso del sobrenadante de la centrífuga.

- Agua residual de explotaciones ganaderas y agrícolas

Estas aguas se caracterizan por presentar muy elevadas concentraciones de nutrientes, y diversos estudios han demostrado la capacidad de determinadas especies de microalgas de eliminarlos del medio. Como ejemplo citaremos

Botryococcus braunii, estudiada por An et al. (2003), *Microspora willeana*, *Ulothrix sp.* y *Rhizoclonium hierglyphicum* (Pittman 2011).

Park y Jin (2010) han estudiado el tratamiento mediante el cultivo de *Scenedesmus sp.* de efluentes provenientes de digestión anaerobia de residuos ganaderos, demostrando la capacidad de dicha microalga de eliminar altos contenidos en nutrientes ($5\text{-}6 \text{ mg de NH}_4^+/\text{L}\cdot\text{d}$) y la importancia del aporte de carbono inorgánico en forma de alcalinidad del medio, ante la ausencia de inyección de CO_2 .

- Agua residual industrial

En el caso de las aguas residuales industriales el principal interés no suele radicar en la eliminación de nutrientes sino en la eliminación de metales pesados (cadmio, cromo, zinc) o compuestos tóxicos orgánicos (hidrocarburos, biocidas, tensioactivos) que pueden ser eliminados por determinadas microalgas, como ya se ha comentado. Debido a que en este tipo de aguas los nutrientes no se encuentran en altas concentraciones, el crecimiento de las algas es más lento y por tanto la cantidad de biomasa generada es menor.

5.3. Biorreactor

5.3.1. Sistemas abiertos

En el diseño de los estanques o piscinas, los factores a tener en cuenta son (Becker, 1994):

- Profundidad. Se relaciona con la capacidad de penetración de la luz.
- Revestimiento. Representa lo más caro del sistema. Para una óptima circulación de líquido se requieren superficies lisas en el fondo y las paredes del estanque. Actualmente, los estanques algales comerciales están revestidos de hormigón o plástico, aunque se han utilizado distintos materiales con resultados diversos.
- Agitación. El método de mezcla y turbulencia es importante para conseguir altos rendimientos de biomasa algal. La mayoría de los sistemas utilizados para inducir flujo son inadecuados para conseguir el máximo potencial fotosintético de la célula, debido a que la turbulencia inducida es al azar. La agitación suele ser por dispositivos como: ruedas de paletas, hélices, inyectores de aire, etc.

Las piscinas presentan problemas de suciedad, evaporación, contaminación, etc. Una posible solución es cubrirlas por un material transparente. Tiene varias ventajas, como la reducción de las pérdidas por evaporación, la elevación de la temperatura y la disminución de la cantidad de suciedad e insectos que contaminen las microalgas. Si la evaporación es muy alta, los costes de agua y bombeo suben y aumenta la salinidad del medio, con lo que el crecimiento algal se hace más lento. Cubriendo la piscina se previene el enfriamiento del sistema, sobre todo por la noche o en invierno, ya que las cubiertas actúan como un invernadero por el día para atrapar la radiación de onda larga. Sin embargo, los materiales utilizados por las cubiertas no son del todo transparentes. Estos factores contribuyen a reducir la radiación incidente en aproximadamente un 40%. En algunas áreas subtropicales con elevada irradiación solar, esta reducción de luz puede ser una ventaja. Asimismo, se acumula polvo en la superficie externa de las cubiertas y se condensa agua en la interna, lo que contribuye a disminuir la radiación que llega al cultivo. En la estación calurosa la temperatura del cultivo puede llegar a exceder los límites tolerados y entonces deben ser enfriados con agua o hay que darles sombra.

Los estanques o piscinas son unidades abiertas de cultivo, y los tipos básicos son (Dodd, 1986; Oswald, 1988) son:

- Estanques circulares
Las piscinas circulares suelen tener un sistema de agitación mediante un brazo rotatorio. Este sistema tiene una serie de desventajas: son construcciones de hormigón caras y con una ineficiente utilización del terreno y consumen mucha energía para la agitación, aunque la turbulencia en el centro es baja. Actualmente apenas se usan.
- Sistemas tipo “raceway”
Son las más utilizadas, ya sea en unidades aisladas o con varias unidades constituyendo meandros. La agitación suele ser por palas, propulsores o bombas por aire. Son productivos y baratos.
- Piscinas inclinadas

Generalmente dispuestas constituyendo meandros, la agitación de la suspensión algal se consigue mediante flujo por gravedad y bombeo. En este último tipo se trata de crear turbulencia mientras la suspensión microalgas fluye a través de canales o superficies inclinadas por gravedad; el medio algal es bombeado a la parte superior cuando llega al punto inferior. La velocidad de flujo viene dada por la pendiente.

En un sistema de cultivo abierto es difícil mantener una sola especie de microalga, debido a la facilidad de contaminación biológica, que puede incluso suponer la infección de dicho cultivo por bacterias u otros microorganismos. El modo de conseguir mantener un monocultivo en este tipo de sistemas es mediante el control de las condiciones ambientales, de modo que éstas tomen valores extremos. Esto es posible con algunos tipos de microalgas (extremófilas), pero no con todas. Por ejemplo, *Chlorella*, *Dunaliella salina* y *Spirulina* son géneros que presentan esta opción, mediante el control de un alto nivel de nutrientes, elevada salinidad y elevada alcalinidad respectivamente.

El control de la temperatura es también complejo en un sistema de cultivo abierto, ya que si bien es verdad que la evaporación ejerce efecto de refrigeración, las oscilaciones diarias no se ven amortiguadas, y por otro lado la evaporación provoca cambios en la composición iónica del medio de cultivo.

Otros posibles problemas de este tipo de sistemas son la dificultad de mezclado eficiente, la potencial falta de CO₂ y la limitación de la luz en capas inferiores. Para maximizar la productividad de biomasa se ha de optimizar el mezclado y la profundidad del estanque.

5.3.2. Sistemas cerrados

Son sistemas sistemas económicamente más caros que los abiertos que se utilizan normalmente para el cultivo de cepas especiales para la producción de productos químicos de gran valor. Estos biorreactores pueden ser básicamente:

- Cilíndricos

Suelen ser de acero inoxidable y la mayoría de ellos con iluminación interior. Están provistos de agitación, control de temperatura, luz entrada de aire enriquecido con CO₂, etc. No requieren su instalación en una cámara de temperatura y luz controlada, ya que el control lo realiza el propio biorreactor. En algunos casos están dotados de un sistema de control automático de cultivo por ordenador. Normalmente se introduce aire burbujeándolo por la parte inferior. El diámetro suele ser menor a 200 cm para evitar que no llegue luz al interior de la columna. Algunos investigadores han desarrollado reactores anulares que eliminan la parte interior del reactor cilíndrico, de modo que el reactor viene delimitado por dos paredes concéntricas. Su altura se ve limitada a 4 metros por motivos estructurales y por evitar la sombra en una extensión donde existan instalados más de un fotobiorreactor.

- Tubulares

En los fotorreactores son tubos de diámetro igual o menor a 100 cm, dispuestos de modo horizontal, vertical, helicoidal o inclinado. La biomasa es recirculada mediante bombas o empuje por aire. La longitud puede alcanzar los cientos de metros. Asimismo, es importante el material de construcción. Los reactores tubulares son ventajosos en zonas de temperatura moderada, pero tienen problemas en climas cálidos ya que la temperatura en los tubos puede alcanzar $(10-15)^{\circ}\text{C}$ más que la ambiente, lo que hace necesarios sistemas de enfriamiento, que pueden ser ensombrecimiento de los tubos, rociados con agua o situar el reactor tubular en un lecho de agua. Los fotobiorreactores tubulares pueden presentar problemas de depleción de CO_2 y acumulación de O_2 que afectan al rendimiento y composición química de las especies en cultivo. Una de las principales ventajas de este diseño es una relación superficie/volumen de más de 100 m^{-1} . Su principal desventaja es el alto consumo energético.



Figura 6. Configuraciones de fotobiorreactores (a raceway, b placas planas, c cilíndricos, d tubulares horizontales)

5.3.3. Suministro de carbono

El suministro de CO_2 es uno de los procesos más difíciles en el cultivo de microalgas. El CO_2 se puede adicionar a los cultivos en forma de bicarbonato sódico y sales similares o en forma de pequeñas burbujas. Esas sales normalmente cuestan tres veces más que el dióxido de carbono gaseoso

La transferencia de CO_2 a través de la interfase gas-líquido es tan lenta que se deben inventar métodos especiales para alargar el tiempo y aumentar el área superficial necesarios para maximizar la transferencia. La ventaja del suministro en forma gaseosa es que el burbujeo favorece la mezcla en el reactor.

Una ventaja del suministro de CO₂ disuelto previamente en fase acuosa es que la eficiencia de transporte es del 100 %. La desventaja es que esas sales normalmente cuestan tres veces más que el dióxido de carbono gaseoso.

5.4. Métodos de separación

Existen varios métodos para concentrar las células del medio de cultivo en el que están suspendidas y la búsqueda de un método eficiente, con poco gasto de energía y económico es fundamental (Mohn, 1988; Becker, 1994).

- **Centrifugación**

Es el método más eficiente, aunque supone un gasto de energía elevado. La calidad del producto microalgal recogido por centrifugación es muy buena. El método más eficiente es la centrifugación continua.

- **Filtración**

La filtración por gravedad es el método más sencillo y económico, aunque poco eficiente. Es difícil cuando las células presentan cierto grado de plasticidad, como *Chlorella* o *Scenedesmus*. Está restringido a algas filamentosas o formadoras de colonias. Otros sistemas de filtración son filtración por arena, filtración a presión y filtración a vacío.

- **Microcoladores (“microstrainer”)**

Diseñados en un principio para eliminar el material particulado de efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales, resultan idóneos para concentrar la biomasa en el caso de algas filamentosas, pero no es eficaz con las microalgas más pequeñas (<20 micras).

- **Separador laminar**

Se basa en la sedimentación por gravedad natural; consiste en una combinación de láminas inclinadas que garantizan que el sedimento siga hacia abajo y se deposite en una especie de cárter al final del cual se puede recoger la biomasa.

- **Autoflotación**

Se basa en la liberación de pequeñas burbujas de gas desde el fondo de la unidad de cultivo que llevan a las células microalgales a la superficie donde pueden ser retiradas con un recogedor u otro sistema.

- **Sedimentación**

Algunas especies sedimentan al cesar la agitación del cultivo, y se recogen retirando el sobrenadante. Este proceso puede ayudarse utilizando floculantes químicos que pueden dar un rendimiento de hasta un 90% de recuperación de las células microalgales en un cultivo. Este método tiene la desventaja de que el producto obtenido está contaminado con el floculante. Los floculantes utilizados incluyen varios policationes, como aluminatos, hidróxido férrico y cloruro férrico. Cuando se utiliza aluminio para la floculación las microalgas contienen aproximadamente un 4% (P/V) de aluminio. La floculación con aluminatos y otros floculantes químicos entraña problemas de toxicidad y la calidad del producto microalgal resultante es pobre, siendo la principal limitación el alto contenido del producto químico utilizado en la floculación y un gusto desagradable.

5.5. Tratamiento de fangos

La tecnología de tratamiento para lodos residuales generados en las EDAR en Estados Unidos y Europa se realiza utilizando alguno de los siguientes cuatro procesos:

- Digestión anaerobia

Comprende dos fases, en la primera se forman ácidos volátiles y en la segunda las bacterias anaerobias producen gas metano a partir de dichos ácidos, todo esto en ausencia de oxígeno molecular (O_2).

- Digestión aerobia

Proceso de aireación prolongada (dotando al sistema de O_2) para provocar el desarrollo de microorganismos aerobios hasta sobrepasar el periodo de síntesis de las células y llevar a cabo su propia auto-oxidación, reduciendo así el material celular.

- Tratamiento químico

Realiza principalmente una acción bactericida, llevando al bloqueo temporal de fermentaciones ácidas. Por su reducido costo y alcalinidad, la cal es el reactivo que más se utiliza.

- Incineración

Conduce a la combustión de materias orgánicas de los lodos, y es el proceso con el que se consigue un producto residual de menor masa, las cenizas constituidas únicamente por materias minerales del lodo”.

5.6 Captación de CO₂

Existen varias opciones técnicas y económicamente viables para la captura y separación de CO₂. Otras opciones están en vías de desarrollo tecnológico y se pueden considerar como tecnologías avanzadas de posible aplicación en el futuro. A continuación se describen los diferentes sistemas de captura de CO₂ conocidos:

- Métodos criogénicos

El CO₂ puede ser condensado y separado de gases poco (o menos) condensables a bajas temperaturas y altas presiones. El proceso total consta de condensación y destilación criogénica (CDC). Los gases de combustión son secados y comprimidos a la entrada y el gas seco es refrigerado en una columna de condensación con objeto de recobrar el CO₂ condensado. El método CDC ha sido empleado para la eliminación de CO₂ en mezclas de CH₄/CO₂ y otros gases en la recuperación de hidrocarburos de fuentes naturales. La eficiencia de control de una instalación CDC es de un 70% a 85%. Este proceso requiere un consumo elevado de energía cuando la concentración de CO₂ en los gases de entrada es bajo, que es el caso que nos ocupa.

- Adsorción física en sólidos

En la adsorción, el CO₂ es retenido en el sólido debido a las interacciones con la superficie de las partículas y su porosidad. En estos procesos se trabaja en condiciones casi isotérmicas, y la operación consta de dos fases: la adsorción, que se realiza a alta presión con objeto de que la presión parcial del gas al ser capturado sea elevada, y la recuperación, que se realiza a una presión menos elevada, para liberar y recuperar el CO₂ adsorbido. Estos procesos de captura y recuperación de gas por adsorción tienen un gran interés técnico, económico y comercial. La captura y recuperación de CO₂ de los gases de combustión puede llevarse a cabo por procesos de adsorción en sólidos químicamente reactivos y no reactivos. Los adsorbentes sólidos que debieran ser considerados para la absorción del CO₂ son adsorbentes naturales como yesos y zeolitas; aceite bituminoso de desecho; adsorbentes procesados como sílice, zeolitas y tamices moleculares; y por último el carbón, el lignito y la antracita.

- Separación mediante membranas selectivas

La difusión de gases de distintos tamaños moleculares se puede llevar a cabo por mediación de membranas. Este método evita la necesidad de cambios de fase. Las membranas para la absorción de gases constan de un líquido de absorción en contacto con un lado de una membrana porosa con objeto de proveer una gran superficie de contacto y mezclar el gas con el líquido. La separación se basa en la distinta velocidad de difusión de diferentes gases. El

CO₂, siendo una molécula triatómica, puede separarse con relativa facilidad de moléculas diatómicas como O₂ y N₂.

Las membranas para la separación de gases pueden dividirse en dos tipos: membranas orgánicas y membranas inorgánicas. Membranas orgánicas apropiadas para la separación de CO₂ de N₂ incluyen materiales derivados de la celulosa, polisulfona, poliamidas y polimiimidas. Las membranas no orgánicas son químicamente estables y apropiadas para operación a presión elevada, pero son más caras que la de tipo orgánico. Ejemplos de este tipo de membranas son las membranas porosas inorgánicas, como membranas cerámicas, membranas de óxidos metálicos y membranas inorgánicas no porosas, tales como membranas metálicas. Debido a que la diferencia de tamaño y masa de N₂ y CO₂ es pequeña, las membranas no orgánicas porosas no son adecuadas para la separación de CO₂ de gases de combustión.

En la configuración con una membrana, ésta separa los gases de combustión en un permeado rico en CO₂ y una fracción pobre en CO₂. La segunda es descomprimida en una cámara de expansión y liberada, subsecuentemente, a la atmósfera. El permeado rico en CO₂ es comprimido en a una presión de 8 MPa. El permeado obtenido en un sistema consistente de una membrana solamente produce un permeado rico en CO₂ diluido con N₂. Éste no es un resultado deseable, ya que el CO₂ se condensará al ser comprimido, mientras que el N₂ permanecerá en forma gaseosa.

- Absorción

En la operación de absorción de gases, una mezcla gaseosa se pone en contacto con un líquido, a fin de disolver de manera selectiva uno o más componentes del gas y de obtener una solución de éstos en el líquido. Estas operaciones requieren la transferencia de masa de una sustancia en la corriente gaseosa al líquido. Esto se aplica cuando se quiere recuperar en un líquido componentes que acompañan el afluente gaseoso de un reactor, bien sea para conseguir su neutralización, o bien para evitar la contaminación del medio ambiente. La absorción de gases es una operación en la cual, cuando la transferencia de masa sucede en la dirección opuesta, es decir, del líquido al gas, la operación se conoce como desorción.

Muchos procesos industriales de absorción van acompañados de una reacción química. Aunque el proceso general se considera heterogéneo, la reacción es realmente homogénea, la reacción química es realmente homogénea, y ocurre en la fase líquida, que es lo más común, en la fase gas o muy raramente en ambas fases simultáneamente.

La reacción entre el soluto absorbido y un reactivo produce dos hechos favorables a la rapidez de la absorción del líquido respecto al componente gaseoso, y el aumento de la velocidad global del proceso.

Las instalaciones utilizadas son las columnas de absorción con un lecho fijo de relleno, o torre empacada.

5.7. Bibliografía

- Abalde, J., Cid, A., Fidalgo, P., Torres, E., Herrero, C. Microalgas: Cultivo y Aplicaciones. Laboratorio de Microbiología. Departamento de Biología Celular y Molecular. Universidad de La Coruña.
- Oropeza, García, N. 2006. Lodos residuales: estabilización y manejo.
- Alarcón Sánchez, J.A., Oliver, Puyol, R., Estrany, Coda F.P. 2006. Proyecto: Planta para la recuperación del dióxido de carbono de los gases de combustión.
- Gómez, C., Escudero, R., Morales, M. M., Figueroa, F. L., Fernández-Sevilla, J.M., Ación, F. G. 2013. Use of secondary-treated wastewater for the production of *Muriellopsis sp.*

6. SELECCIÓN FINAL

6.1. Especie microalgal y agua residual

6.1.1. Especie microalgal

Se ha seleccionado la microalga *Muriellopsis sp.*, aislada de las marismas del Empordá en Cataluña, debido a su alta tasa de crecimiento y productividad al aire libre.

Resultados de investigación indican que, usando como medio de cultivo agua residual procedente del tratamiento secundario de depuración, se puede alcanzar una productividad máxima de 0,5 g/L.día (superior a los 0,1 g/L.día objeto del proyecto).

6.1.2. Selección y acondicionamiento del agua residual

Se considera el uso del agua residual urbana derivada de la etapa de pretratamiento de la EDAR El Toyo, Almería.

Hay que tener en cuenta la relación N/P óptima para el crecimiento de microalgas, que es 7,3 g nitrógeno/1 g fósforo. Además, hay que considerar el contenido en nitrógeno de la biomasa, que se estima en un 10%, de modo que es posible calcular la cantidad de nitrógeno requerida en función de la productividad de biomasa que se desee alcanzar.

Por lo general, las aguas residuales urbanas contienen entre 40-60 mg/L de nitrógeno y 15-20 mg/L de fósforo. Asumiendo valores medios de concentración de ambos nutrientes, según la tabla 6 con el aporte de agua residual se tienen suficientes nutrientes esenciales para alcanzar el objetivo marcado de 300 Tm/año de biomasa.

Tabla 6. Requerimiento de nutrientes esenciales

Equivalencia	1 g biomasa	0,1 g nitrógeno
Relación N/P	7,3 g nitrógeno	1 g fósforo
Nutrientes necesarios para alcanzar la producción		
Requerimiento de Nitrógeno, mg/L		53,87
Requerimiento de fósforo, mg/L		7,38
Caudal medio, m ³ /día		1856,39
Concentración biomasa, g/L		0,54
Producción biomasa, kg/día		1000
Nitrógeno requerido, kg/día		100
Fósforo requerido, kg/día		13,70
Aporte del agua residual		
Nitrógeno, kg/día		93,56
Fósforo, kg/día		22,59

A fin de eliminar los sólidos en suspensión (en un 60%, aproximadamente) y la materia orgánica (en un 30%, aproximadamente) y proteger el proceso posterior de oxidación biológica de la intrusión de fangos inertes de densidad elevada, el agua residual se mezclará con agua procedente del tratamiento secundario de la propia planta de depuración con microalgas y se someterá a una decantación primaria para eliminar los sólidos sedimentables.

6.2 Biorreactor

En cuanto al biorreactor, por su facilidad de escalado, bajo coste así como reducido consumo energético se considera el uso de reactores abiertos tipo raceway. Para favorecer la mezcla, cada reactor estará provisto de una rueda de paletas.

Respecto al aporte de CO₂, considerando las ventajas de ambos métodos (en forma gaseosa y en forma de disolución carbonatada), la adición de CO₂ a los fotobiorreactores se va a realizar mediante inyección bajo de manda tanto en fase gaseosa como en fase acuosa.

6.3. Método de separación

Para la separación del fango, que contiene la biomasa, del agua residual tratada en el biorreactor se considera adecuado realizar un proceso de floculación-decantación, de esta manera se consigue una separación con bajo consumo

energético y la contaminación del fango con el floculante no supondría un problema en la siguiente etapa.

6.4. Tratamiento de fangos

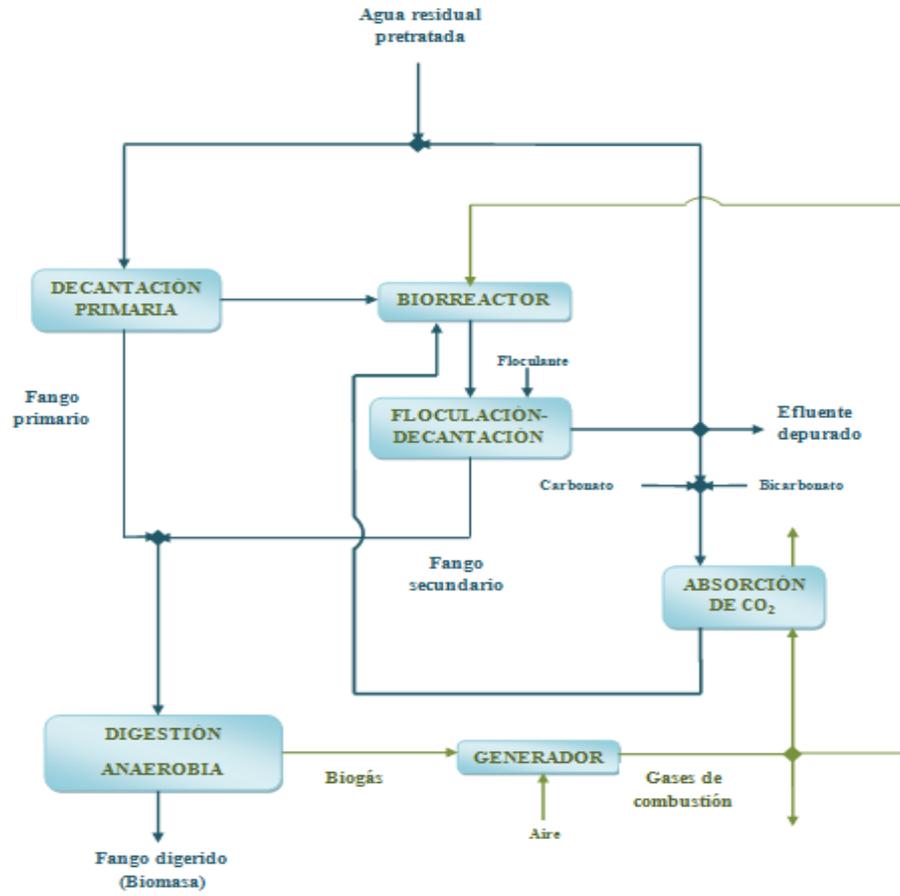
Puesto que la obtención de CO_2 , para favorecer el proceso fotosintético de los cultivos, es uno de los objetivos del presente proyecto, la alternativa seleccionada consiste en someter el fango a un proceso de digestión anaerobia, a través del cual se obtendrá biogás, compuesto principalmente por metano y CO_2 .

6.5. Captación de CO_2

El suministro de CO_2 a los reactores en forma gaseosa favorece la mezcla, pero previamente disuelto en fase acuosa la eficiencia de la transferencia de carbono al cultivo es prácticamente del 100%, por lo que se ha considerado el aporte a los reactores en forma gaseosa y en forma disolución carbonatada. Teniendo en cuenta el aporte en fase acuosa, el método de captación de CO_2 elegido es la absorción con reacción química, empleando una columna de burbujeo.

Previamente a la absorción, se ha considerado pasar la corriente de biogás por un generador. Así, por un lado se obtiene energía para autoconsumo de la planta, y por otro, la reacción de combustión convierte el metano en CO_2 , el cual es consumido por las microalgas en el proceso fotosintético, reduciéndose por lo tanto la emisión de gases de efecto invernadero.

6.6. Diagrama de bloques



**MEMORIA
DESCRIPTIVA**

ÍNDICE

- 1. LOCALIZACIÓN**
- 2. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROCESO Y EQUIPOS**
 - 2.1. Diagrama de bloques**
 - 2.2. Diagrama de flujo**
 - 2.3. Etapas del proceso**
 - 2.3.1. Decantación primaria**
 - 2.3.2. Biorreactor**
 - 2.3.3. Floculación-decantación**
 - 2.3.4. Digestión anaerobia**
 - 2.3.5. Captación de CO₂**
 - 2.4. Tuberías y bombas**
 - 2.4.1 Tuberías**
 - 2.4.1.1. Tuberías para líquidos**
 - 2.4.1.2. Tuberías para gases**
 - 2.4.2. Bombas**
 - 2.5. Generador**
 - 2.6. Compresor y soplantes**
 - 2.5.1. Compresor**
 - 2.5.2. Soplantes**
- 3. CONTROL E INSTRUMENTACIÓN**
 - 3.1. Control del pH en los fotobiorreactores**
 - 3.2. Control en los equipos**
 - 3.2.1. Cambiador de calor**
 - 3.2.2. Digestor anaerobio**
 - 3.2.3. Gasómetro**
 - 3.2.4. Generador**
 - 3.2.5. Columna de absorción**
 - 3.2.6. Tanque de disolución carbonato/bicarbonato**
 - 3.3. Instrumentación**

1. LOCALIZACIÓN

La planta demostración de depuración de aguas residuales con microalgas se ubicará en las proximidades de la Estación Depuradora de Aguas Residuales El Toyo, en el término municipal de Almería.

La parcela de la EDAR El Toyo se sitúa en la zona conocida como las Atochas, entre la Rambla de La sepultura y la Rambla del puente de La Quebrada, a unos 20 km de la ciudad. Las coordenadas geográficas son: Latitud: 36° 51' 37.76" N; Longitud: 2° 19' 47.93" O. En el sistema UTM: X: 559727 huso 30; Y: 4079672 hemisferio Norte. La elevación es 67 m con respecto al nivel del mar.

La proximidad de vías de comunicación al emplazamiento seleccionado facilitan la logística de la planta. Entre estas vías destacan la autovía A-7 que enlaza con el puerto de Almería, situado a 16 km, y la N-344, que enlaza con El Alquíán, donde se encuentra el aeropuerto de Almería.

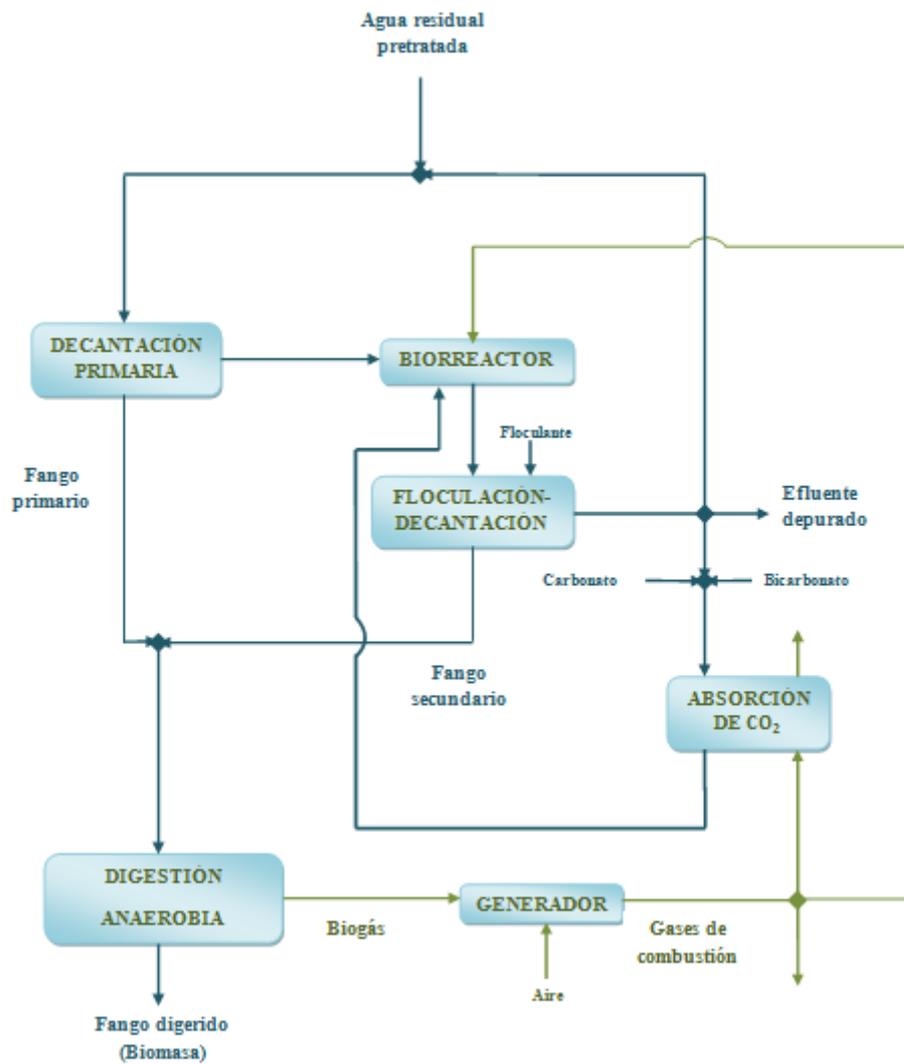
La EDAR El Toyo está prevista para una población de 52000 habitantes, que suponen un caudal medio de 542 m³/h (13.000 m³ diarios). Además, en el diseño de la planta se tuvo en cuenta el crecimiento del área urbana. De modo que se prevé una eventual ampliación de la misma que permita tratar el agua residual de una población de 75.000 habitantes, con caudal medio diario de 19.500 m³ de agua.



Figura 1. Emplazamiento de la planta demostración de depuración de aguas residuales con microalgas

2. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROCESO Y EQUIPOS

2.1. Diagrama de bloques



2.2. Diagrama de flujo

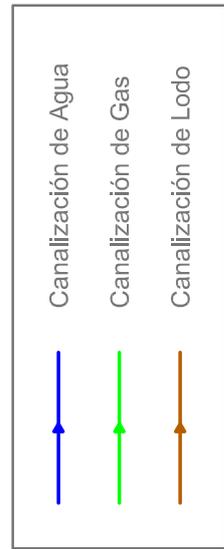
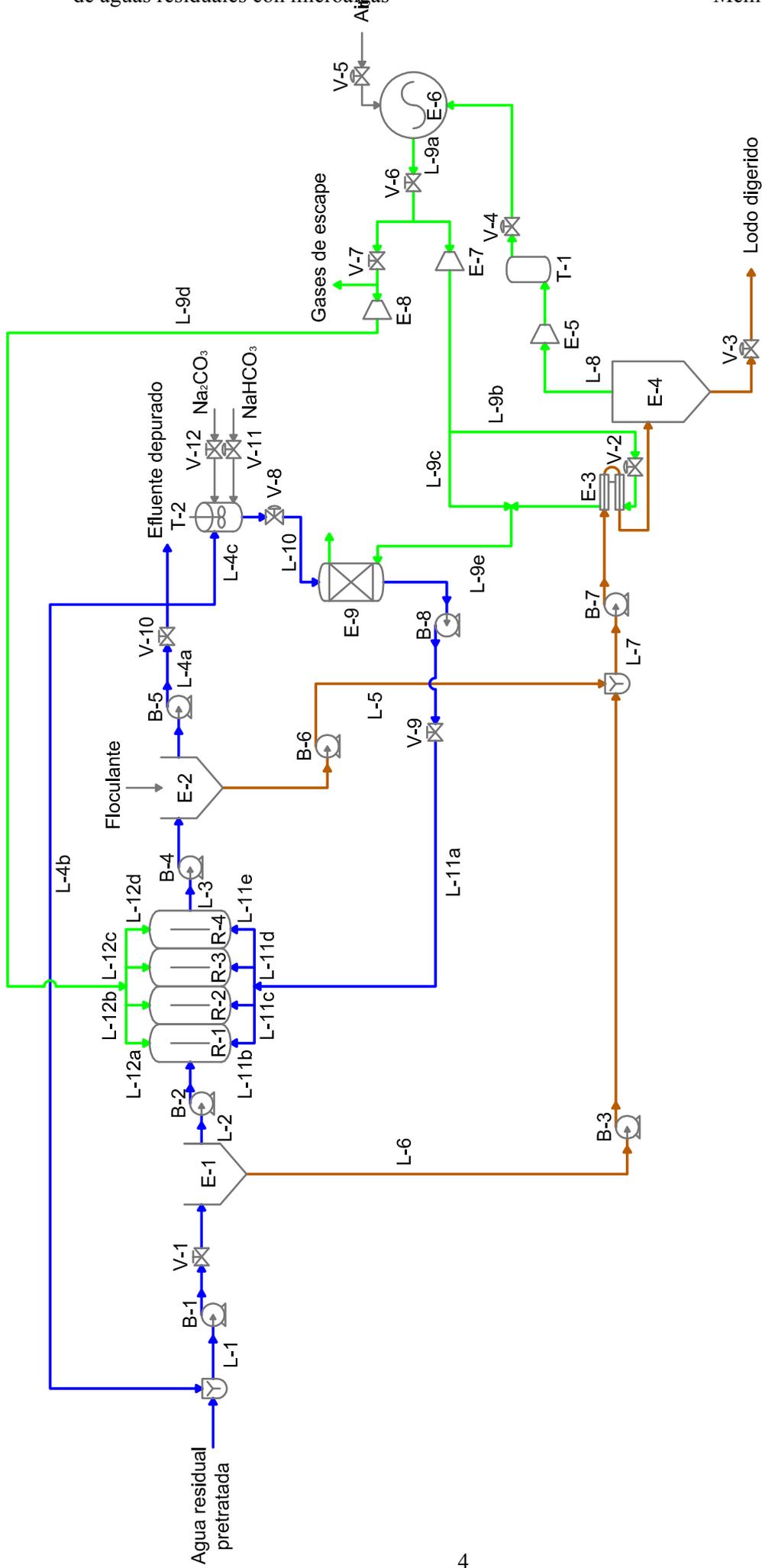


Tabla 1. Notación de equipos empleados

R-1 Reactor raceway	E-9 Columna de absorción
R-2 Reactor raceway	T-1 Gasómetro
R-3 Reactor raceway	T-2 Tanque de disolución $\text{Na}_2\text{CO}_3/\text{NaHCO}_3$
R-4 Reactor raceway	B-1 Bomba de agua a decantador primario
E-1 Decantador primario	B-2 Bomba de agua a reactores
E-2 Decantador secundario	B-3 Bomba de agua a decantador secundario
E-3 Intercambiador de tubos concéntricos	B-4 Bomba de agua salida decantador secundario
E-4 Digestor anaerobio	B-5 Bomba de lodo primario
E-5 Compresor	B-6 Bomba de lodo secundario
E-6 Generador	B-7 Bomba de lodo primario y secundario a digestor
E-7 Soplante	B-8 Bomba de disolución carbonatada a reactores
E-8 Soplante	

Tabla 2. Notación de líneas de proceso

L-1 Entrada de agua al decantador primario	L-9d Gases de escape a reactores
L-2 Entrada de agua a reactores	L-9e Gases de escape a columna de absorción (L-9b+L-9c)
L-3 Entrada de agua al decantador secundario	L-10 Entrada de disolución $\text{Na}_2\text{CO}_3/\text{NaHCO}_3$ a la columna de absorción
L-4a Salida de agua depurada	L-11a Salida de disolución carbonatada de la columna de absorción
L-4b Recirculación de agua depurada	L-11b Entrada de disolución carbonata al reactor R-1
L-4c Entrada de agua depurada al tanque de disolución $\text{Na}_2\text{CO}_3/\text{NaHCO}_3$	L-11c Entrada de disolución carbonata al reactor R-2
L-5 Salida de lodo secundario	L-11d Entrada de disolución carbonata al reactor R-3
L-6 Salida de lodo primario	L-11e Entrada de disolución carbonata al reactor R-4
L-7 Entrada de lodo al digestor	L-12a Entrada de gases de escape al reactor R-1
L-8 Salida de biogás del digestor	L-12b Entrada de gases de escape al reactor R-2
L-9a Gases de escape del generador	L-12c Entrada de gases de escape al reactor R-3
L-9b Gases de escape a intercambiador	L-12d Entrada de gases de escape al reactor R-4
L-9c Gases de escape a columna de absorción	

2.2. Etapas del proceso

2.2.1. Decantación primaria

Antes del tratamiento en el fotobiorreactor, el agua residual pretratada (1.320,46 m³/día) se mezclará con una corriente de agua depurada (544,6 m³/día) y someterá a una decantación primaria. Para ello se construirá un decantador circular de flujo vertical. El fondo tendrá una pendiente del 3%. Los sólidos depositados en el fondo junto con el líquido espesado son continuamente dirigidos hacia la salida mediante un mecanismo de arrastre consistente en dos brazos largos con rastrillos de diseño convencional, que gira a una velocidad de 0.6 m/min. El líquido clarificado se retira continuamente a través de un rebosadero que rodea al borde superior del depósito. La concentración inicial de sólidos en la suspensión es de 0,15 kg/m³, se consigue aumentar hasta una concentración en el lodo de 20 kg/m³. Se obtienen 1.856,39 m³/día de sobrenadante, con una concentración de sólidos en suspensión de 0,058 kg/m³, el cual es bombeado a los fotobiorreactores.

Tabla 3. Características del decantador primario

Caudal, m ³ /día	1.865,06
Superficie, m ²	95,03
Diámetro, m	11
Altura recta, m	3
Inclinación del fondo, %	3
Velocidad barredora de fondos, m/s	0,6
Relación diámetro chapa deflectora/diámetro decantador	0,1
Relación altura sumergida chapa deflectora/altura decantador	0,4
Volumen decantador, m ³	233,13
Tiempo de retención, h	3
Carga hidráulica, m ³ /m ² .h	0,82
Zona de entrada	
Altura zona de reparto, m	3,16
Altura sumergida en chapa deflectora, m	1,27
Diámetro chapa deflectora, m	1,1
Vertedero de salida	
Longitud, m	34,56
Carga sobre vertedero, m ³ /m.h	2,41
Poceta de fangos	
Tiempo de retención, h	2
Volumen poceta, m ³	0,72

Tabla 4. Reducción de DBO5 y sólidos totales en suspensión tras la decantación primaria

	Afluente	Efluente	% de eliminación
DBO5, mg/L	188	122	35
SST, mg/L	150	58	62

Los porcentajes de eliminación aplicados han sido obtenidos de la figura 1 del Anejo Decantación.

2.2.2. Biorreactor

Se utilizará un conjunto de cuatro reactores de 1,25 ha cada uno que trabajarán en continuo, estimándose una producción anual de 300 Tm.

Los reactores se construirán con tierra compacta, separados por bermas. Las bermas se protegerán de la erosión del viento y las olas y el crecimiento de las malas hierbas con una cubierta delgada de geotextil.

Se colocarán dos tabiques deflectores equidistantes a lo largo y a lo ancho de cada esquina del estanque. Cada reactor estará provisto de un agitador de rueda de paletas para mezclar el agua residual, con una velocidad horizontal promedia del agua de 0.2 m/s, la cual será suficiente para mantener los flóculos algales/bacterianos en suspensión. Cada agitador tendrá 7 m de largo con 0.8 m de hojas construidas con acero galvanizado y pintado. Las ruedas de paletas se accionarán mediante una caja de cambios de un motor trifásico de 6 kW.

Tabla 5. Resumen de las dimensiones del reactor y parámetros relativos a la circulación del cultivo en cada reactor.

Profundidad, m	0,3
Profundidad activa, m	0,2
Superficie activa, m ²	12.500
Volumen activo, m ³	2.500
Ancho del canal, m	17,68
Ancho del reactor, m	35,36
Longitud, m	353,55
Pendiente interna de la berma (horiz/vert)	2
Pendiente externa de la berma (horiz/vert)	2
Caudal desplazado, m ³ /s	0,707
Factor de Manning, n	0,02
Eficiencia paddle Wheel	0,5
Potencia, kW	1,39

Cada reactor incluirá un foso para la adición de CO_2 . El CO_2 se tomará de los gases de escape del generador y se transferirá al conjunto de reactores mediante una soplante a través de una tubería, siendo 32,8% la eficiencia de absorción de CO_2 . Se controlará la adición de CO_2 a cada reactor manteniendo el pH en un rango de 7,5 a 8,5. El sumidero de adición de carbono será de hormigón y atravesará el ancho del canal.

El aporte de CO_2 se va a realizar en función de la relación establecida entre kg de CO_2 por cada kg de biomasa producida. Esta relación es de 1,8 en valor estequiométrico pero se ha considerado un valor real de 2,5 para compensar posibles pérdidas.

Además, una parte del carbono procedente de los gases de escape del generador, tras pasar por una columna de absorción, se suministrará en forma de disolución carbonato/bicarbonato. La eficiencia de absorción de CO_2 en la columna es del 80%.

Tabla 6. Dimensiones del foso

Relación volumen foso/volumen reactor	1/20
Volumen, m^3	125
Anchura, m	17,7
Profundidad, m	1,5
Largo, m	4,7

Tabla 7. Caudales de gases de escape y disolución carbonatada a aportar al conjunto de reactores

Caudal de CO_2 necesario, kg/día	2.500
Caudal de CO_2 disolución carbonatada, kg/día	2.433
Caudal de gases de escape del generador, kg/día	1.415

Tabla 8. Productividad del conjunto de reactores

Capacidad de producción, Tm/año	300
Tiempo de operación, días/año	300
Productividad por unidad de superficie, $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{día}$	0,02
Productividad volumétrica, $\text{kg}/\text{m}^3 \cdot \text{día}$	0,1

Tabla 9. Características del agua

	Afluyente	Efluyente	% de eliminación
DBO5, mg/L	122	62	45,95
SST, mg/L	58	558	

2.2.3. Floculación-decantación

El cosechado del fotobiorreactor se someterá a un proceso de floculación-decantación para separar la biomasa microalgal/bacteriana del agua depurada. Se va a utilizar un floculante tipo catiónico ya que la suspensión de microalgas tiene carga negativa con lo que favorece la decantación.

Tabla 10. Parámetros de la suspensión y el agente floculante

Caudal de suspensión, m ³ /día	1.991,33
SST, mg/L	557,8
SSV, mg/L	502
Floculante	Actipol FB1
Concentración de floculante, mg/L	5
Caudal floculante, kg/día	10
Factor de concentración	37

La decantación se llevará a cabo mediante en un decantador circular de flujo vertical. Para determinar la superficie necesaria para el espesado del fango se ha empleado el método de Talmadge y Fitch. El fondo tendrá una pendiente del 3% Los sólidos depositados en el fondo junto con el líquido espesado son continuamente dirigidos hacia la salida mediante un mecanismo de arrastre consistente en dos brazos largos con rastrillos de diseño convencional, que gira a una velocidad de 0.6 m/min. El líquido clarificado se retira continuamente a través de un rebosadero que rodea al borde superior del depósito. Se obtienen 49,44 m³/día de lodo con una concentración de sólidos en suspensión de 20,64 kg/m³ y 1.941,9 m³/día de sobrenadante (agua residual depurada) con una concentración de sólidos en suspensión de 0.046 g/L.

Tabla 11. Características del decantador secundario

Caudal, m ³ /día	1.991,33
Superficie, m ²	95,03
Diámetro, m	11
Altura recta, m	3
Inclinación del fondo, %	3
Velocidad barredora de fondos, m/s	0,6
Relación diámetro chapa deflectora/diámetro decantador	0,1
Relación altura sumergida chapa deflectora/altura decantador	0,4
Volumen decantador, m ³	285,1
Tiempo de retención, h	2,5
Carga hidráulica, m ³ /m ² .h	0,859
Zona de entrada	
Altura zona de reparto, m	3,165
Altura sumergida en chapa deflectora, m	1,266
Diámetro chapa deflectora, m	1,1
Vertedero de salida	
Longitud, m	34,56
Carga sobre vertedero, m ³ /m.h	2,4
Poceta de fangos	
Tiempo de retención, h	2
Volumen poceta,	4,12

Tabla 12. Características del agua

	Afluente	Efluente	% de eliminación
DBO5, mg/L	62	38	40
SST, mg/L	558	46	92

2.3.4. Digestión anaerobia

Los lodos de la decantación primaria y secundaria (biomasa microalgal/bacteriana) se mezclarán y se someterán a un proceso de digestión anaerobia en una etapa, sin mezcla, basado en la degradación de la materia orgánica en ausencia de oxígeno, obteniéndose un biogás compuesto, principalmente, por metano y CO₂.

Puesto que las bacterias mesófilas actúan a temperaturas comprendidas entre 12 y 35 °C, y para compensar las pérdidas de calor en el digestor, el lodo se calentará antes de su entrada en el digestor. Para ello se empleará un intercambiador de calor y se aprovechará una parte de los gases de escape del generador como corriente de calefacción. Se ha elegido un intercambiador de dos tubos concéntricos porque el incremento de la temperatura del lodo es pequeño (de 19 a 32 °C) y la temperatura de los gases de escape elevada (400 °C). El lodo circulará por el tubo interno, ya que es la corriente más sucia.

Tabla 13. Características del intercambiador de doble tubo

Tubo interno	
Material	Acero inoxidable
Caudal de lodo, kg/h	2.445,63
Longitud, m	1
Diámetro interno, m	0,02
Diámetro externo, m	0,022
Velocidad transversal, m/s	2,141
Coefficiente individual de transmisión de calor, W/m ² .°C	24.310
Caída de presión, Pa	3.056
Tubo externo	
Material	Acero inoxidable
Caudal de gas, kg/h	0,25
Longitud, m	1
Diámetro interno, m	0,035
Diámetro externo, m	0,038
Velocidad transversal, m/s	0,22
Coefficiente individual de transmisión de calor, W/m ² .°C	13,64
Caída de presión, Pa	0,49
Área de intercambio, m ²	0,01
Coefficiente global de transmisión de calor, W/m ² .°C	13,57

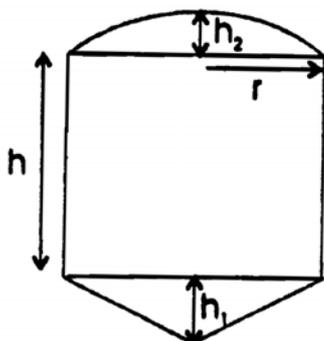


Figura 2. Esquema del digestor anaerobio.

Tabla 14. Dimensiones del digestor anaerobio

Volumen activo, m ³	613,96
Diámetro, m	10
Superficie, m ²	78,54
Altura activa, m	8
Atura inclinada parte superior, m	1
Altura inclinada parte inferior, m	1
Altura total, m	10
Volumen total, m ³	694,29

En el digestor, de hormigón armado, entrarán 58,11 m³/día de lodo con una concentración de sólidos volátiles en suspensión de 18,19 kg/m³. Siendo el tiempo de retención de sólidos de 10 días, el porcentaje de eliminación de sólidos volátiles es del 50%, obteniéndose 533,88 m³/día de biogás y 15,52 m³/día de lodo con 33,79 kg/m³ de sólidos volátiles en suspensión.

Se ha considerado la instalación de un gasómetro para almacenar biogás, por ejemplo en caso de parada de la planta. El gasómetro será un recipiente cilíndrico con cabezas semiesféricas, con un volumen capaz de almacenar la producción de biogás de 12 horas.

Tabla 15. Dimensionado del gasómetro según la norma ASME

Material	Acero al carbono SA516
Volumen, m^3	266,94
Presión interna, atm	6
Presión externa, atm	1
Eficiencia de las juntas	0,9
Altura de la carcasa cilíndrica, m	8
Diámetro interno de la carcasa, m	5,41
Espesor de la carcasa, in	0,58
Espesor de las cabezas, in	0,44

2.3.5. Captación de CO₂

Se tratarán 6.745,57 m^3 /día (3.642,6 kg/día) de gases de escape del generador en una columna de burbujeo para recuperar el 80% del CO₂ mediante la circulación de 134,92 m^3 /día de fase acuosa enriquecida en carbonato-bicarbonato, con una concentración de NaHCO₃ de 11 kg/ m^3 y una concentración de Na₂CO₃ de 22 kg/ m^3 .

Tabla 16. Dimensiones de la columna de absorción

Volumen, m^3	2,34
Relación altura/diámetro	2,5
Diámetro, m	1,06
Altura, m	2,65

Se ha diseñado un tanque de mezcla para preparar la disolución carbonatada a introducir en la columna de absorción. El caudal necesario de agua se tomará de la corriente de agua depurada a la salida del tanque de decantación-floculación. Para favorecer la mezcla se empleará un agitador de turbina abierta de seis hojas inclinadas con las aspas a 45°, impartándose una combinación de flujos axial y radial. En la siguiente tabla se muestran sus dimensiones, así como las características del sistema de agitación.

Tabla 17. Dimensiones del tanque de mezcla y características del sistema de agitación

Dimensionado del tanque de mezcla	
Caudal de agua depurada, m ³ /día	134,92
Tiempo de residencia, min	10
Volumen de mezcla, m ³	0,94
Vacío de seguridad, %	20
Volumen del tanque, m ³	1,124
Relación altura/diámetro	1,5
Diámetro, m	0,98
Altura, m	1,47
Volumen, m ³	1,18
Dimensionado de la turbina	
Densidad de la mezcla, kg/m ³	1.000
Viscosidad dinámica de la mezcla, kg/m.s	0,001
Da,m	0,33
W,m	0,04
C,m	0,33
Dd,m	0,22
J,m	0,08
L,m	0,08
Velocidad de rotación, rpm	50
Número de Reynodls	92.320
Número de potencia	1
Potencia, W	2,86

2.3. Tuberías, bombas y soplantes

2.3.1. Tuberías

2.3.1.1. Tuberías para líquidos

A continuación se describen las tuberías para líquidos necesarias en la instalación:

Tabla 18. Diseño de las tuberías para líquidos

TUBERÍAS PARA LÍQUIDOS															
Propiedades físicas	L-1	L-2	L-3	L-4a	L-4b	L-4c	L-5	L-6	L-7	L-10	L-11a	L-11b	L-11c	L-11d	L-11e
Caudal volumétrico, m ³ /s	0,0216	0,0215	0,0230	0,0224	0,0063	0,0016	0,0006	0,0001	0,0007	0,0016	0,0016	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004
densidad, kg/m ³	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1010	1010	1010	1000	1000	1000	1000	1000	1000
viscosidad, kg/m.s	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0020	0,0020	0,0020	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010
Caudal másico, kg/s	21,5863	21,4860	23,0478	22,4375	6,3032	1,5616	0,5780	0,1014	0,6793	1,5616	1,5616	0,3904	0,3904	0,3904	0,3904
Selección de la tubería															
Velocidad del líquido en la tubería, m/s	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,5	0,5	0,5	1	1	1	1	1	1
Sección de tubería, m ²	0,0216	0,0215	0,0230	0,0224	0,0063	0,0016	0,0011	0,0002	0,0013	0,0016	0,0016	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004
Diámetro de la tubería, m	0,1658	0,1654	0,1713	0,1690	0,0896	0,0446	0,0382	0,0160	0,0414	0,0446	0,0446	0,0223	0,0223	0,0223	0,0223
Longitud de la tubería, m	10	10	10	2	200	10	30	220	10	5	195	60	25	25	60
Material de la tubería	PVC	PVC	PVC	PVC	PVC	PVC	PVC	PVC	PVC	PVC	PVC	PVC	PVC	PVC	PVC
Diámetro nominal de tubería comercial, m	0,1524	0,1524	0,1524	0,1524	0,0847	0,0508	0,0381	0,0191	0,0381	0,0508	0,0508	0,0254	0,0254	0,0254	0,0254
Sección real de tubería, m ²	0,0182	0,0182	0,0182	0,0182	0,0056	0,0020	0,0011	0,0003	0,0011	0,0020	0,0020	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
Velocidad real del líquido en la tubería, m/s	1,1832	1,1777	1,2633	1,2299	1,1185	0,7704	0,5019	0,3502	0,5899	0,7704	0,7704	0,7704	0,7704	0,7704	0,7704
Pérdida de carga															
Diferencia de alturas, m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Válvulas de bola	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
Codos 90°	0	0	0	0	2	1	1	1	2	2	0	1	0	0	1
T	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0
Rugosidad	0,000002	0,000002	0,000002	0,000002	0,000002	0,000002	0,000002	0,000002	0,000002	0,000002	0,000002	0,000002	0,000002	0,000002	0,000002
Rugosidad relativa, E/D	1,3123E-05	1,3123E-05	1,3123E-05	1,3123E-05	2,3613E-05	3,9570E-05	0,0001	0,0001	0,0001	0,0004	0,0004	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
Leq	4,5720E+01	0,0000E+00	0,0000E+00	4,5720E+01	5,9290E+00	1,7780E+00	1,335	0,6685	2,6670	18,7960	18,2880	0,8890	1,5240	1,5240	0,8890
Re	1,8032E+05	1,7948E+05	1,9253E+05	1,8743E+05	9,4740E+04	3,9134E+04	9656,5267	3377,6697	11349,7747	39134,1502	39134,1502	19567,0751	19567,0751	19567,0751	19567,0751
fF, factor de rozamiento	4,0210E-03	4,0246E-03	3,9707E-03	3,9912E-03	4,5865E-03	5,5587E-03	0,0078	0,0105	0,0075	0,0056	0,0056	0,0066	0,0066	0,0066	0,0066
f, J/kg	4,1163E+00	7,3256E-01	8,3165E-01	3,7806E+00	2,7903E+01	1,5297E+00	3,2366	29,7109	1,7333	3,0905	27,7008	18,6509	8,1246	8,1246	18,6509

2.4.1.2. Tuberías para gases

A continuación se describen las tuberías para gases necesarias en la instalación:

Tabla 19. Diseño de las tuberías para gases

TUBERÍAS PARA GASES										
Propiedades físicas	L-8	L-9a	L-9b	L-9c	L-9d	L-9e	L-12a	L-12b	L-12c	L-12d
Caudal máxico, kg/s	0,0072	0,0823	0,0001	0,0421	0,0164	0,0422	0,00409425	0,0041	0,0041	0,0041
Presión, atm	1,1172	2,4652	1,3663	1,3663	1,0733	1,0733	1,0733	1,0733	1,0733	1,0733
Temperatura, K	305,0000	673,0000	373,0000	373,0000	293,0000	293,0000	293,0000	293,0000	293,0000	293,0000
Densidad, kg/m ³	1,1730	0,5400	0,5400	0,5400	0,5400	0,5400	0,5400	0,5400	0,5400	0,5400
Caudal volumétrico, m ³ /s	0,0062	0,1524	0,0001	0,0779	0,0303	0,0781	0,0076	0,0076	0,0076	0,0076
Selección de la tubería										
Velocidad del gas en a tubería, m/s	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000
Sección de la tubería, m ²	0,0002	0,0051	0,0000	0,0026	0,0010	0,0026	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003
Dámetro de la tubería, m	0,0162	0,0804	0,0023	0,0575	0,0359	0,0576	0,0179	0,0179	0,0179	0,0179
Longitud de la tubería, m	10,0000	2,0000	3,0000	2,0000	230,0000	5,0000	60,0000	25,0000	25,0000	60,0000
Material de la tubería	PVC	Acero al carbono	PVC	PVC	PVC	PVC	PVC	PVC	PVC	PVC
Diámetro nominal de la tubería, m	0,0847	0,0847	0,0033	0,0508	0,0381	0,0508	0,0847	0,0847	0,0847	0,0847
Sección real de la tubería, m ²	0,00564	0,0056	0,00001	0,0020	0,0011	0,0020	0,0056	0,0056	0,0056	0,0056
Velocidad real del gas, m/s	1,0965	27,0489	15,0156	38,4516	26,5977	38,5151	1,3455	1,3455	1,3455	1,3455

2.3.2. Bombas

Se utilizarán bombas centrífugas para la impulsión de líquido (B-1, B-2 y B-4, B-5 y B-8), debido a su gran versatilidad, bajo coste y fácil diseño, operación y mantenimiento. Las bombas para la impulsión del lodo (B-3, B-6 y B-7) serán de bombeo de lodos debido a la carga de sólidos.

Tabla 20. Diseño de las bombas

BOMBAS								
Parámetros	B-1	B-2	B-3	B-4	B-5	B-6	B-7	B-8
Caudal volumétrico, m ³ /s	0,0216	0,0215	0,0001	0,0230	0,0224	0,0006	0,0007	0,0016
Caudal máxico, kg/s	21,5863	21,4860	0,1014	23,0478	22,4375	0,5780	0,6793	1,5616
Longitud de tubería de aspiración, m	4,0000	1,0000	2,0000	1,0000	1,0000	1,0000	2,0000	1,0000
Longitud de tubería de impulsión, m	6,0000	9,0000	218,0000	9,0000	1,0000	29,0000	8,0000	194,0000
Diámetro de tubería, m	0,1524	0,1524	0,0191	0,1524	0,1524	0,0381	0,0381	0,0508
f impulsión e impulsión, J/kg	4,1163	0,7326	29,7109	0,8316	3,7806	3,2366	1,7333	27,7008
Altura tramo de aspiración, m	0,0000	0,0000	-1,0000	0,0000	0,0000	-1,0000	0,0000	-1,0000
Altura tramo de impulsión, m	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Energía potencial, J/kg	0,0000	0,0000	9,8100	0,0000	0,0000	9,8100	0,0000	9,8100
Energía cinética, J/kg	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Energía por fricción, J/kg	4,1163	0,7326	29,7109	0,8316	3,7806	3,2366	1,7333	27,7008
W trabajo a realizar, J/kg	4,1163	0,7326	39,5209	0,8316	3,7806	13,0466	1,7333	37,5108
Rendimiento de la bomba	0,8000	0,8000	0,8000	0,8000	0,8000	0,8000	0,8000	0,8000
Potencia necesaria de la bomba, W	111,0708	19,6747	5,0068	23,9596	106,0344	9,4261	1,4719	73,2205
Potencia necesaria de la bomba, CV	0,1510	0,0268	0,0068	0,0326	0,1442	0,0128	0,00200	0,0996

2.4. Generador

Para la generación eléctrica por medio del biogás obtenido en la etapa de digestión anaerobia, se empleará una planta eléctrica a biogás de 40 kW, que funciona como planta de transferencia manual, transferencia automática, sincronía y paralelismo. Viene equipada con un tablero multifuncional, así como un generador síncrono WEG y reguladores electrónicos de tensión analógicos de alta confiabilidad.

Tabla 21. Eficiencia eléctrica del generador

Caudal másico biogás consumido, kg/h	26,1
Eficiencia eléctrica, %	28,81
Caudal másico gases de escape, kg/h	296,32

2.5. Compresor y soplantes

2.5.1. Compresor

Se utilizará un compresor para comprimir el biogás que sale del digestor y almacenarlo en el gasómetro. La potencia necesaria para comprimir el gas de 1 a 6 atm es de 1,95 kW, por lo que se ha considerado la instalación de un compresor de 3 kW, disponiendo así de una capacidad mayor en caso necesario.

Tabla 22. Cálculo de la potencia del compresor

Densidad, kg/m ³	1,05
Caudal, m ³ /s	0.006
Presión de entrada, N/m ²	101.325,3
Presión de salida, N/m ²	607.951,6
Potencia, kW	1,95
Potencia del compresor, kW	3

2.5.2. Soplantes

Se utilizarán soplantes para impulsar los gases de escape del generador y poder mandarlo a la columna absorción y a los reactores.

La potencia necesaria para impulsar el gas desde el generador a los reactores es de 332,86 W, mientras que el transporte a la columna de absorción requiere 857,26 W por lo que se empleará dos soplantes de 1 kW.

Tabla 23. Cálculo de la potencia de las soplantes

Transporte del generador a la columna de absorción	
Densidad, kg/m ³	1,331
Caudal másico, kg/s	0,042
Presión de entrada, N/m ²	101.325,27
Presión de salida, N/m ²	131.325,27
Potencia, W	857,26
Potencia de la soplante, kW	1
Transporte del generador a los fotobiorreactores	
Densidad, kg/m ³	1,331
Caudal másico, kg/s	0,016
Presión de entrada, N/m ²	101.325,27
Presión de salida, N/m ²	131.325,27
Potencia, W	332,86
Potencia de la soplante, kW	1

3. CONTROL E INSTRUMENTACIÓN

3.1 Control del pH en los fotobiorreactores

El pH de un cultivo de microalgas se ve influenciado principalmente por dos fenómenos. Por un lado el aporte de CO₂ como nutriente provoca la formación de ácido carbónico y éste un descenso del pH en el cultivo. Por otro lado, las microalgas realizan la fotosíntesis en presencia de radiación solar consumiendo el CO₂ y generando O₂, lo que provoca una subida paulatina del pH. El consumo de nitratos también supone una alcalinización del pH del medio.

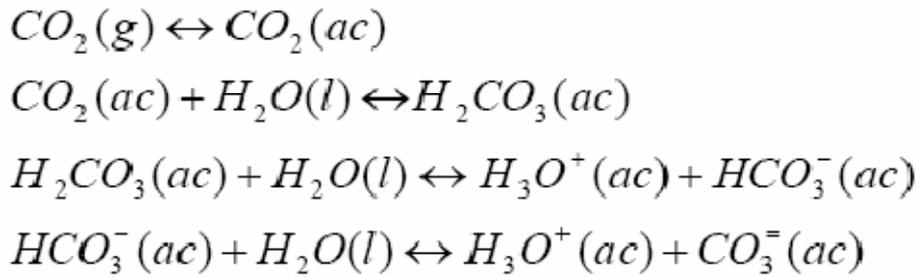


Figura 3. Disolución de CO₂ en agua (Tampón Carbonato-Bicarbonato).

Para mantener el crecimiento máximo y por lo tanto maximizar el rendimiento de los cultivos se requiere que ciertas variables del entorno sean mantenidas en los valores óptimos. Entre ellas, el pH es una de las variables críticas, la cual tiene que ser regulada adecuadamente. Esto se lleva a cabo por la interacción con el sistema amortiguador de bicarbonato a través de la inyección de una corriente de CO₂. La actividad biológica produce un descenso en el carbono inorgánico disuelto que es consumido para el crecimiento microalgal, forzando un desplazamiento en el equilibrio del tampón carbonato/bicarbonato (Figura 3) y resultando un incremento del pH. La inyección de CO₂ como acción reguladora tiene dos objetivos: en primer lugar, se produce una acidificación del medio de cultivo recuperando la capacidad del tampón y llevando el pH al punto óptimo de equilibrio para la microalga, y en segundo lugar proporciona una fuente de carbono inorgánico indispensable para el crecimiento.

El control del pH es un problema no lineal que puede ser linealizado bajo ciertas circunstancias. Para ello el modelo que se va a utilizar relaciona el pH con la inyección de CO₂ y la radiación solar a través de dos funciones de transferencia de primer orden en la variable *s* de Laplace:

$$V_{pH} = \underbrace{\frac{K_1}{(1 + \tau_1 \cdot s)}}_{FT1_1} \cdot \underbrace{\frac{K_{1_2} \cdot \omega_n^2}{(s^2 + 2 \cdot \delta \omega_n \cdot s + \omega_n^2)}}_{FT1_2} \cdot e^{-m_1 \cdot s} \cdot VCO_2 + \underbrace{\frac{K_2}{(1 + \tau_2 \cdot s)}}_{FT2} \cdot VI$$

Donde:

VpH: pH del cultivo.

VCO₂: porcentaje de apertura de la válvula de CO₂.

VI: valor de la radiación global.

La primera función de transferencia, que relaciona el pH con el CO₂ inyectado (FT1) se divide a su vez en otras dos funciones de transferencia. Por un lado FT1_1 que es de primer orden y que representa la dinámica principal del sistema, y por otro lado FT1_2 que es de segundo orden y representa la pequeña dinámica oscilatoria que se observa sobre la dinámica principal debido a la recirculación que se produce en los

fotobiorreactores. Como el sistema tiene retardo, también se debe añadir la función del retardo ($e^{-tr_1 \cdot s}$). La función de transferencia FT2 relaciona el efecto de la radiación solar en el pH y también se trata de una función de transferencia de primer orden, pero en este caso sin retardo, ya que este es despreciable.

Las funciones de transferencia de primer orden tienen como parámetros la ganancia estática (K) y la constante de tiempo (τ). La ganancia estática del sistema proporciona una medida de la amplitud de la respuesta del sistema en función de la amplitud de la entrada al mismo. Es decir, es el cociente entre el cambio experimentado por la salida una vez alcanzado el régimen permanente final y el cambio efectuado en la variable de entrada (magnitud del escalón). La constante de tiempo es el tiempo que tarda el sistema en alcanzar el 63% del valor final de la señal de salida desde que comienza a variar el sistema frente a la entrada en escalón. Es una medida de la rapidez de respuesta del sistema a una señal escalón. La función retardo tiene como parámetro tr que es el tiempo de retardo.

En las funciones de transferencia de segundo orden, los parámetros son la ganancia (K_{1_2}), la frecuencia natural no amortiguada (ω_n) y el coeficiente de amortiguamiento (δ). La frecuencia natural no amortiguada corresponde a la frecuencia con la que oscilaría el sistema si no existiera amortiguamiento, mientras que el coeficiente de amortiguamiento es un parámetro que en función de su valor se puede deducir si el sistema es inestable, críticamente amortiguado, sobreamortiguado o subamortiguado (en este caso además su valor determina la amplitud de las sobreoscilaciones).

Conocidos los efectos de la inyección de CO_2 y de la radiación solar, así como las funciones de transferencia que lo representan, se considera que la dinámica principal del sistema viene determinada por la inyección de CO_2 , mientras que la radiación solar será considerada como una perturbación del sistema.

El control anticipativo o Feedforward consiste básicamente en realimentar el efecto de la perturbación (la radiación solar) al lazo de control para que posteriormente se corrijan los efectos de ésta. El esquema de control es el mismo que el del controlador PI, sólo que se añade la función de transferencia GFF (Feedforward) que es la que introduce el efecto de la radiación en el lazo de control. El cálculo de GFF se realiza del siguiente modo:

$$G_{FF} = \frac{TF2(s)}{TF1_1(s)}$$

El control anticipativo Feedforward reduce las pérdidas de CO_2 con respecto al Todo-Nada y al PI, consiguiendo mantener el pH entorno al valor óptimo inyectando la menor cantidad de CO_2 , y por consiguiente perdiendo menos cantidad de CO_2 .

Por otro lado, reduce el número de actuaciones de la válvula de CO_2 , ya que el control del pH está mejor regulado, evitando un desgaste excesivo de la válvula, alargando la vida útil de ésta.

3.2. Control en los equipos

3.2.1. Cambiador de calor

Puesto que la temperatura de entrada del fango en el digestor debe ser 32°C, se instalará un termómetro en la corriente de fango a la salida del cambiador de calor que manda señales a un controlador PID que actúa sobre la válvula de regulación del caudal de gas a la entrada del cambiador.

3.2.2. Digestor anaerobio

Para mantener el volumen de fango en el digestor a un nivel constante se instalará un sensor de caudal a la salida de la válvula que regula el caudal de fango que sale del digestor. Dicho sensor manda señales a un controlador PID que actúa sobre el grado de apertura de la válvula.

3.2.3. Gasómetro

Para evitar en el interior del gasómetro se alcance una presión superior a 6 atmósferas, se instalará un sensor de presión en la corriente de salida del gasómetro que manda señales a un controlador PID que actúa sobre la válvula que regula el caudal de biogás que sale del mismo.

3.2.4. Generador

Se regulará el caudal de entrada de aire en función del caudal de entrada de biogás. Para ello se empleará un tipo especial de control anticipativo, el “ratio control”, es decir, se calcula la relación entre los caudales de entrada (midiéndolos, mediante sensores de caudal situados en las entradas, y dividiéndolos), es decir, la variable a controlar, la cual se envía a un controlador PID de realimentación cuyo punto de consigna es la relación entre ambos caudales. El controlador actúa sobre el grado de apertura de la válvula de entrada de aire.

3.2.5. Columna de absorción

Se regulará el caudal de entrada de disolución carbonato/bicarbonato en función del caudal de entrada de gas de escape del generador empleando el ratio control. Se miden los caudales de entrada y se calcula la relación entre ambos, la cual se envía a un controlador PID que actúa sobre el grado de apertura de la válvula de entrada de la fase líquida.

Relación caudal fase gaseosa/caudal fase líquida: 50

3.2.6. Tanque de disolución carbonato/bicarbonato

En este caso también se empleará el ratio control. Se regulará el caudal de entrada de disolución de bicarbonato en función del caudal de entrada de disolución de carbonato. Se miden los caudales de entrada y se calcula la relación entre ambos la cual se envía a un controlador PID que actúa sobre el grado de apertura de la válvula de entrada de disolución de bicarbonato.
Relación caudal carbonato/caudal bicarbonato: 2

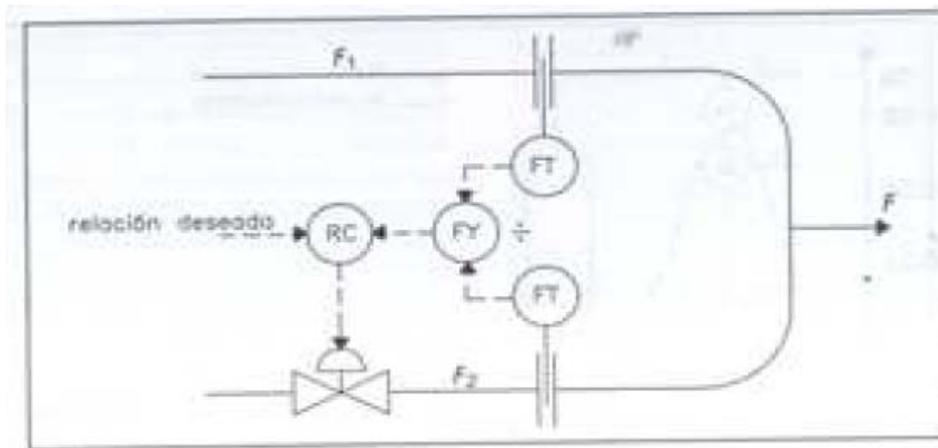


Figura 4. Control de la relación de dos caudales mediante ratio control

3.3. Instrumentación

3.3.1. Diagrama de instrumentación

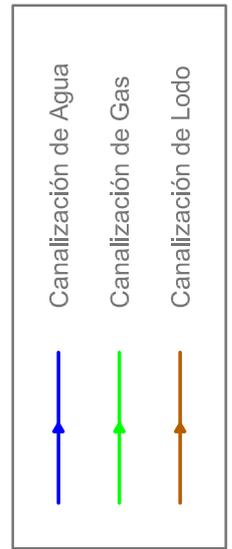
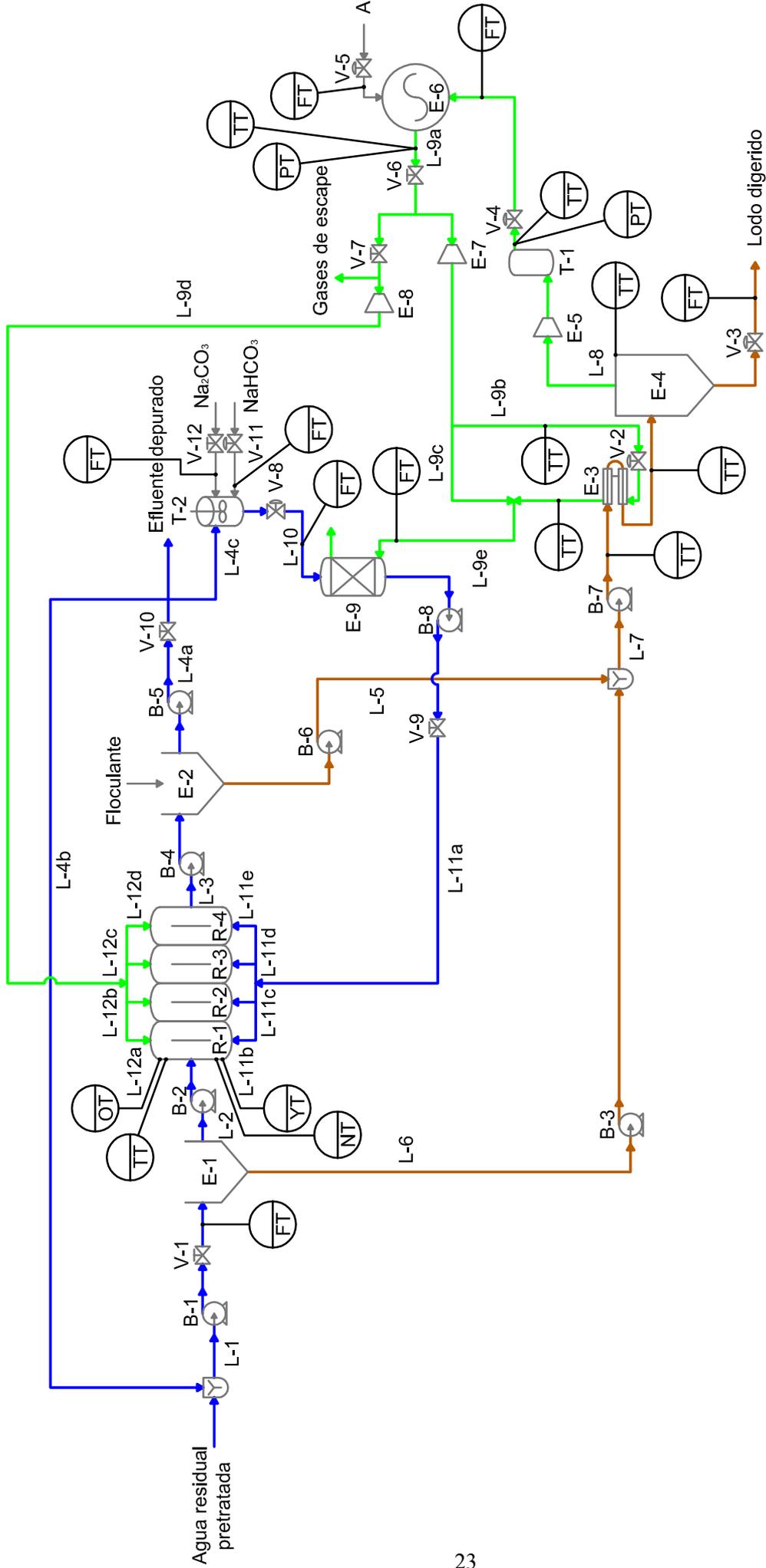


Tabla 24. Nomenclatura de sensores

KT	Sensor/transmisor de tiempo
CT	Sensor/transmisor de conductividad
LT	Sensor de nivel
PT	Sensor/transmisor de presión
TT	Sensor/transmisor de temperatura
FT	Sensor/transmisor de flujo o caudal
AT	Sensor/transmisor-analizador de CO ₂
YT	Sensor/transmisor de pH
OT	Sensor/transmisor-analizador de O ₂
NT	Sensor/transmisor de radiación solar
MT	Sensor/ transmisor de humedad

Tabla 25. Nomenclatura de válvulas

	Válvula automática de control
	Válvula manual

DOCUMENTO N° 2
ANEJOS

ANEJO N° 1
BALANCES DE
MATERIA Y ENERGÍA

ÍNDICE

- 1. BALANCES DE MATERIA**
 - 1.1. Balance de materia global**
 - 1.2. Decantador primario**
 - 1.3. Conjunto de fotobiorreactores**
 - 1.4. Decantador secundario**
 - 1.5. Digestor anaerobio**
 - 1.6. Generador**
 - 1.7. Columna de absorción**

- 2. BALANCES DE ENERGÍA**
 - 2.1. Intercambiador de calor**
 - 2.2. Generador**

1. BALANCES DE MATERIA

1.1. Balance de materia global

Teniendo en cuenta que la planta operará 300 días al año, 24 horas al día, en la tabla 1 se muestran las corrientes de entrada y salida de la planta de depuración.

Tabla 1. Balance de materia global

Entrada	
Caudal de agua residual pretratada, m ³ /día	1.320,46
Caudal de agua residual pretratada, kg/día	1.320.460
Caudal de floculante, kg/día	10
Caudal de carbonato sódico, kg/día	2.968
Caudal de bicarbonato sódico, kg/día	1.484
Caudal de aire, m ³ /día	6.851,59
Caudal de aire, kg/día	6.485,38
Salida	
Caudal de agua depurada, m ³ /día	1.262,38
Caudal de agua depurada, kg/día	1.262.379
Caudal de lodo digerido, m ³ /día	15,52
Caudal de lodo digerido, kg/día	15.675,2
Caudal de gases de escape (generador), kg/día	2.054,06
Caudal de gases de escape (absorción), kg/día	2.944,66
Caudal de gases de escape (fotobiorreactor), kg/día	1.348

Tabla 2. Características del agua

Entrada	
DBO5, mg/L	250
SST, mg/L	212,55
SSV, mg/L	170,04
Salida	
DBO5, mg/L	37,8
SST, mg/L	46,5
SSV, mg/L	41,2

1.2. Decantador primario

La mezcla de 1.320,56m³/día agua residual pretratada, procedente de la EDAR El Toyo, y 544,6 m³/día de agua depurada se someterá a una decantación primaria.

Tabla 3. Balance al decantador primario

Entrada	
Caudal de agua, m ³ /día	1.865,06
SST, mg/L	150,5
SSV, mg/L	120,4
DBO5, mg/L	187,77
Salida	
Caudal de lodo, m ³ /día	8,67
SST lodo, mg/L	20.000
SSV lodo, mg/L	16.000
Caudal de sobrenadante, m ³ /día	1.856,39
SST sobrenadante, mg/L	58
SSV sobrenadante, mg/L	46
DBO5 sobrenadante, mg/L	122

1.3. Conjunto de fotobiorreactores

El conjunto de fotobiorreactores lo forman cuatro reactores tipo raceway. Con una capacidad de producción de 300 Tm/año, se obtendrá una productividad de 60 Tm/Ha.año; siendo el tiempo de residencia 5 días y la velocidad de dilución 0,2 días⁻¹.

Tabla 4. Balance al conjunto de fotobiorreactores

Entrada	
Caudal de agua, m ³ /día	1.856,39
Caudal de agua, kg/día	1.856.390
SST, mg/L	57,8
SSV, mg/L	46,24
DBO5, mg/L	122,05
Caudal de gases de escape , kg/día	1415
Caudal de disolución carbonatada, kg/día	2433
Salida	
Caudal de agua, m ³ /día	1.991,33
Caudal de agua, kg/día	1.991.330
SST lodo, mg/L	558
SSV lodo, mg/L	502
DBO5, mg/L	62
Caudal de gases de escape, kg/día	1.348

1.4. Decantador secundario

El cosechado del fotobiorreactor se someterá a un proceso de floculación-decantación para separar la biomasa microalgal/bacteriana del agua depurada.

Tabla 5. Balance al decantador secundario

Entrada	
Caudal de agua, m ³ /día	1.991,33
SST, mg/L	557,8
SSV, mg/L	502
DBO5, mg/L	61,5
Caudal de floculante, kg/día	10
Salida	
Caudal de lodo, m ³ /día	49,44
SST lodo, mg/L	20.640
SSV lodo, mg/L	18.574
Caudal de sobrenadante, m ³ /día	1.941,9
SST sobrenadante, mg/L	46
SSV sobrenadante, mg/L	41
DBO5 sobrenadante, mg/L	38

1.5. Digestor anaerobio

Los lodos de la decantación primaria y secundaria (biomasa microalgal/bacteriana) se mezclarán y se someterán a un proceso de digestión anaerobia en una etapa.

Tabla 6. Balance al digestor anaerobio

Entrada	
Caudal de lodo, m ³ /día	58,114
SST, g/L	20,543
SSV (biomasa), g/L	18,19
Salida	
Caudal de lodo, m ³ /día	15,52
SST, g/L	50
SSV (biomasa), g/L	33,79
Caudal de biogás, m ³ /día	533,88

1.6. Generador

El biogás producido en la etapa de digestión, además de satisfacer la demanda de CO₂ en los fotobiorreactores, se aprovechará para autoabastecimiento energético de la planta.

Tabla 7. Balance al generador

Entrada	
Caudal de biogás, m ³ /día	533,91
Caudal de biogás, kg/día	626,28
Caudal de CO ₂ (36% del biogás), kg/día	225,46
Caudal de CH ₄ (62,5% del biogás), kg/día	391,42
Caudal de N ₂ (1,5%), kg/día	9,39
Caudal de aire	6.485,38
Salida	
Caudal de gases de escape (a 400 °C), m ³ /día	13.169,73
Caudal de gases de escape, kg/día	7.111,66
Caudal de CO ₂ (14,525%), kg/día	1.032,97
Caudal de N ₂ (72,184%), kg/día	5.133,48
Caudal de O ₂ (5,745%), kg/día	408,56
Caudal de H ₂ O (7,541%), kg/día	536,29

1.7. Columna de absorción

Una parte de los gases de escape se tratarán en una columna de absorción para extraer el CO₂, la disolución carbonatada de salida de la columna se introducirá en los reactores para satisfacer una parte de la demanda de CO₂.

Tabla 8. Balance a la columna de absorción

Entrada	
Caudal de fase gaseosa (gases de escape), kg/día	3.642,61
Caudal de CO ₂ (14,525%), kg/día	529,09
Caudal de fase acuosa (enriquecida en NaHCO ₃ /Na ₂ CO ₃), m ³ /día	134,92
Caudal de fase acuosa (enriquecida en NaHCO ₃ /Na ₂ CO ₃), kg/día	134.921
Concentración de NaHCO ₃ , kg/m ³	11
Concentración de Na ₂ CO ₃ , kg/m ³	22
Salida	
Caudal de fase gaseosa (gases de escape), kg/día	2.944,656
Caudal de CO ₂ , kg/día	105,818
Caudal de fase acuosa (disolución carbonatada), m ³ /día	135,619
Caudal de fase acuosa (disolución carbonatada), kg/día	135.618,952
Caudal de CO ₂ absorbido, kg/día	423,271

2. BALANCES DE ENERGÍA

2.1. Intercambiador de calor

El lodo debe calentarse antes de entrar en el digestor, para ello se empleará un intercambiador de dos tubos concéntricos. El lodo circulará por el tubo interno y por el externo, como fluido caliente, gases de escape del generador.

Tabla 9. Balance al intercambiador de doble tubo

Propiedades físicas del lodo	
Temperatura de entrada, °C	19
Temperatura de salida, °C	32
Densidad, kg/m ³	1.010
Viscosidad, kg/m.s	0,001
Capacidad calorífica, J/kg.°C	4.187
Caudal, m ³ /h	2,421
Caudal, kg/h	2.445,631
Conductividad térmica, W/m.°C	0,6
Propiedades físicas del gas	
Temperatura de entrada, °C	400
Temperatura de salida, °C	200
Densidad, kg/m ³	0,54
Viscosidad, kg/m.s	0,00003
Capacidad calorífica, J/kg.°C	2639
Caudal, m ³ /h	0,463
Caudal, kg/h	0,25
Conductividad térmica, W/m.°C	0,02
Calor intercambiado	
Calor cedido, W	36,61
Coefficiente global de transmisión de calor, W/m ² .°C	13,57

2.2. Generador

Tabla 10. Balance al generador

Potencia eléctrica, Kw	40
Caudal de entrada de combustible (biogás), m ³ /h	22,24
Caudal de entrada de combustible (biogás), kg/h	26,10
PCI del biogás, kJ/m ³	22.429,88
Consumo de combustible (biogás), kW	138,83
Eficiencia eléctrica, %	28,81
Caudal de gases de escape, m ³ /h	548,78
Caudal de gases de escape, kg/h	296,32
Capacidad calorífica de los gases de escape, kJ/m ³ .°C	1,42

ANEJO N° 2
DECANTACIÓN

ÍNDICE

- 1. DECANTACIÓN PRIMARIA**
 - 1.1. Introducción**
 - 1.2. Velocidad ascensional**
 - 1.3. Tiempo de retención**
 - 1.4. Dimensionamiento**
 - 1.4.1. Relaciones dimensionales**
 - 1.4.2. Dimensiones de la zona de entrada**
 - 1.4.3. Altura sumergida de la chapa deflectora**
 - 1.4.4. Longitud del vertedero de salida**
 - 1.4.5. Barrederas de fangos**
 - 1.5. Producción de fangos**
 - 1.6. Diseño del decantador primario**

- 2. DECANTACIÓN SECUNDARIA**
 - 2.1. Método de Talmadge y Fitch**
 - 2.2. Uso de floculantes**
 - 2.3. Diseño del decantador secundario**

- 3. BIBLIOGRAFÍA**

1. DECANTACIÓN PRIMARIA

1.1. Introducción

El objetivo fundamental de la decantación primaria es la eliminación de los sólidos sedimentables. La mayor parte de las sustancias en suspensión en las aguas residuales no pueden retenerse, por razón de su finura o densidad, en las rejillas, desarenadores y cámaras de grasa, ni tampoco pueden separarse mediante flotación por ser más pesadas que el agua.

La reducción de la velocidad de corriente por debajo de un determinado valor, función de la eficacia deseada en la decantación, es el fundamento de la eliminación de un 50 a 70 % de las materias en suspensión del afluente. Al depositarse estas partículas de fango, arrastran en su caída una cierta cantidad de bacterias, con lo que se alcanza también, en este tipo de tratamiento una reducción de la DBO (entre 25 y 40%) y una cierta depuración biológica.

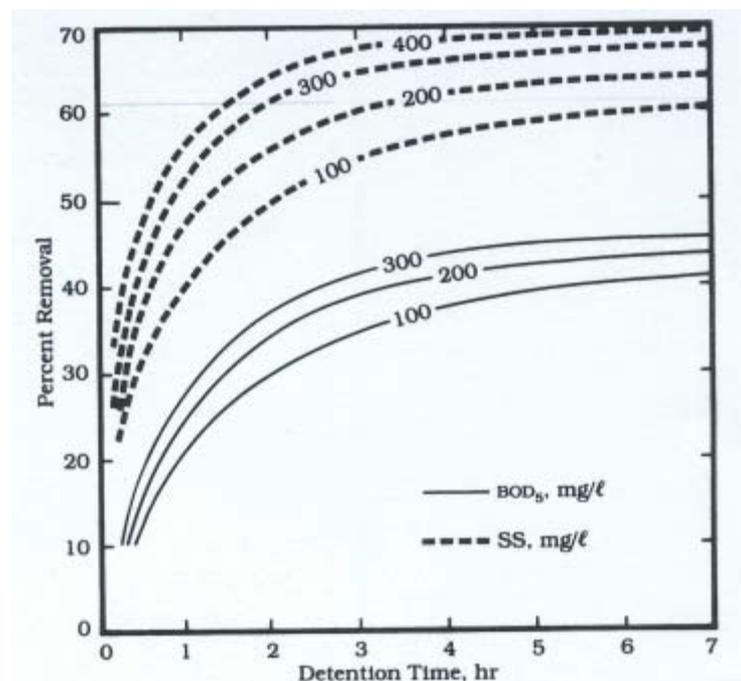


Figura 1. Porcentajes de eliminación de DBO₅ y de sólidos en suspensión frente al tiempo obtenidos en la decantación primaria de aguas residuales urbanas.

Sirven como decantadores todos los depósitos que sean atravesados con velocidad suficientemente lenta y de forma adecuada por el agua a depurar. La exigencia, sin embargo, de separar fácil y rápidamente las partículas sedimentadas de las aguas clarificadas ha conducido a ciertas formas especiales.

Los elementos fundamentales de todo decantador son:

- Entrada del afluente: Debe proyectarse en forma tal que la corriente de alimentación se difunda homogéneamente por todo el tanque desde el primer momento.
- Deflectores: Suelen colocarse a la entrada y salida de la balsa y sirviendo, el primero, para conseguir una buena repartición del caudal afluente, y el segundo para la retención de las sustancias flotantes, grasas y espumas.
- Vertedero de salida: Su nivelación es muy importante para el funcionamiento correcto de la clarificación. Por otro lado, para no provocar levantamiento de los fangos sedimentados, la relación del caudal afluente a la longitud total de vertido debe ser menor de 10-12 $m^3/m.h$.
- Características geométricas: Las relaciones entre ellas deben ser las adecuadas para la sedimentación de los tipos de partículas previstas. Su forma puede ser rectangular, cuadrada o circular.

La sedimentación puede ser:

- de flujo horizontal
- de flujo vertical

1.2. Velocidad ascensional

Se define como el cociente entre el caudal a tratar y la superficie de decantación:

$$v_{asc} = \frac{Q}{S} \quad (1)$$

S: superficie del decantador, m^2 .

Q: caudal a tratar, m^3/h .

v_{asc} : velocidad ascensional, m/h .

Los valores de la velocidad ascensional pueden obtenerse de la Tabla 1.

1.3. Tiempo de retención

Se define como el cociente entre el volumen del tanque de decantación y el caudal a tratar

$$t = \frac{V}{Q} \quad (2)$$

Q: caudal a tratar, m^3/h .

V: volumen del decantador, m³.

t: tiempo de retención, h.

1.4.DIMENSIONAMIENTO

1.4.1. Relaciones dimensionales

En decantadores circulares de flujo vertical:

Siendo:

h: altura del decantador

Φ : diámetro del decantador

Puede tomarse:

$$\Phi < 40 \text{ m}$$

$$h \leq 3 \text{ m}$$

1.4.2. Dimensiones de la zona de entrada

En decantadores circulares de flujo vertical, siendo:

Φ : diámetro del decantador.

ϕ_1 : diámetro del cilindro central de entrada.

h_1 : altura del cilindro central desde el borde superior del decantador.

h: altura del decantador.

La altura en la zona de reparto, considerando una pendiente en la base del tanque del n% y siendo h la altura del decantador, es:

$$h' = h + \frac{n}{100} \cdot r \quad (3)$$

h: altura del decantador, m.

r: radio del decantador, m.

n: pendiente, %

1.4.3. Altura sumergida de la chapa deflectora, h_1

El diámetro de la chapa deflectora, adoptando una relación de diámetros Φ_1/Φ y siendo Φ el diámetro del tanque, es:

$$\Phi_1 = \frac{\Phi_1}{\Phi} \cdot \Phi \quad (4)$$

1.4.4. Longitud del vertedero de salida

Esta longitud vendrá dada por la relación:

$$L = 2 \cdot \pi \cdot r \quad (5)$$

Se define como carga sobre vertedero al cociente entre el caudal a tratar y la longitud de vertedero:

$$V_{\text{vert}} = \frac{Q}{L} \quad (6)$$

L: longitud necesaria de vertedero, m.

Q: caudal a tratar, m³/h.

V_{vert}: carga sobre vertedero, m³/m.h.

Tabla 1. Valores de diseño en la decantación primaria

Velocidades ascensionales a caudal medio (m/h)			
	Valor mínimo	Valor típico	Valor máximo
Decantadores circulares	1.00	1.50	2.00
Decantadores rectangulares	0.80	1.30	1.80
Velocidades ascensionales a caudal máximo (m/h)			
	Valor mínimo	Valor típico	Valor máximo
Decantadores circulares	2.00	2.50	3.00
Decantadores rectangulares	1.80	2.20	2.60
Tiempo de retención (h)			
	Valor mínimo	Valor típico	Valor máximo
Tiempo de retención p/caudal medio	1.50	2.00	3.00
Tiempo de retención p/caudal máximo	1.00	1.50	2.00
Dimensiones de decantadores rectangulares			
Decantación primaria	Valor mínimo	Valor típico	Valor máximo
L	5	-	90
L/h	5	15	40
L/b	1.5	4.5	7.5
h	1.5	3	3
Dimensiones de decantadores circulares			
	Valor mínimo	Valor típico	Valor máximo
$\varnothing_1/\varnothing$	0.05	0.1	0.2
h1/h	0.25	0.40	0.65
Carga sobre vertedero (m ³ /h.m)			
	Valor mínimo	Valor típico	Valor máximo
Decantadores circulares	5	9.5	18
Decantadores rectangulares	5	10	26
Concentración de lodos primarios (%)			
	Valor mínimo	Valor típico	Valor máximo
Decantadores de succión	1	1.5	2
Decantadores de posetas	3	5	6

1.4.5. Barrederas de fangos

Siendo v_r : velocidad lineal de las barrederas de fondo en decantadores, puede tomarse:

Tabla 2. Velocidad de barrederas de fondo

	Valor mínimo	Valor típico	Valor máximo
Vr (m/min)	0,3	0,6	1,2

Las inclinaciones de los fondos para dichas rasquetas suelen ser, en decantadores circulares, del 2 al 8%, dependiendo del sistema de rasquetas empleado.

1.5.PRODUCCIÓN DE FANGOS

En un agua residual de tipo urbano, la concentración de fangos obtenidos en los decantadores primarios varía entre el 1,5 y el 2,5%. La cantidad de fangos producidos suele calcularse directamente multiplicando la concentración de sólidos en suspensión en el agua bruta por un coeficiente de reducción de sólidos en decantación primaria. Este coeficiente, K, oscila entre 40 y 60 %.

- Poceta de fangos

El volumen necesario de la o las pocetas de fangos necesarias vendrá dado por la expresión:

$$V = Q \cdot T_r \quad (7)$$

V: volumen de poceta o pocetas, m³.

Q: caudal medio de fangos producidos, m³/h.

T_r: tiempo de retención del fango en pocetas, h.

Los valores usuales del tiempo de retención en pocetas suelen tomarse de la Tabla 3.

Tabla 3. Tiempo de retención en pocetas de decantadores

Tiempo de retención en pocetas de decantadores primarios	Valor mínimo (h)	Valor típico (h)	Valor máximo (h)
Decantador circular sin rasquetas de espesador	0,5	2	5
Decantador circular con rasquetas de espesador	4	6	8
Decantador rectangular	4	10	24

1.6 Diseño del decantador primario

Cálculo del área del decantador

$$\text{Caudal diseño: } Q := 1865.06 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{day}}$$

$$\text{Velocidad barredora de fondos: } v_r := 0.6 \cdot \frac{\text{m}}{\text{min}} \quad (\text{Tabla 2})$$

Inclinación del fondo del decantador: 3% (Asumido entre 2 y 8%)

$$\text{Tiempo de retención en poceta: } T_r := 2 \cdot \text{hr} \quad (\text{Tabla 3})$$

$$\text{Velocidad ascensional (o carga hidráulica superficial): } v_{\text{asc}} := 1.5 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{hr}} (\text{Tabla 1})$$

$$\text{Tiempo de retención: } t := 3 \cdot \text{hr} \quad (\text{Tabla 1})$$

Relación entre el diámetro de la chapa deflectora y el diámetro del decantador:

$$D_{\text{div}D} := 0.1 \quad (\text{Tabla 1})$$

Relación entre la altura sumergida de la chapa deflectora y la altura del decantador:

$$h_{\text{div}h} := 0.4 \quad (\text{Tabla 1})$$

$$\text{Volumen del decantador: } V_{\text{dec}} := Q \cdot t = 233.132 \cdot \text{m}^3$$

$$\text{Altura recta del decantador: } h := 3 \cdot \text{m} \quad (\text{Asumida})$$

$$\text{Superficie del decantador: } S_{\text{dec}} := \frac{V}{h} = 77.711 \text{ m}^2$$

$$\text{Diámetro del decantador: } D := \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi}} = 9.947 \text{ m} \quad D_{\text{dec}} := 11 \cdot \text{m}$$

$$\text{Recálculo del área: } S_{\text{dec}} := \pi \cdot \frac{D^2}{4} = 95.033 \text{ m}^2$$

Cálculo de las cargas

-Velocidad ascensional (calculada):

$$\text{carga}_{\text{hidráulica}} := \frac{Q}{S} = 0.818 \cdot \frac{\text{m}}{\text{hr}} \quad (\text{El valor está dentro de la carga hidráulica admisible, inferior a } 2 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr})$$

Cálculos de la zona de entrada

$$\text{-Altura en la zona de reparto: } h' := h + 0.03 \cdot \frac{D}{2} = 3.165 \text{ m}$$

- Altura sumergida en chapa deflectora: $h_1 := h_{1divh} \cdot h' = 1.266 \text{ m}$

- Diámetro de la chapa deflectora: $D_1 := D_{1divD} \cdot D = 1.1 \text{ m}$

Cálculo vertedero de salida

- Longitud del vertedero: $L_{\text{ww}} := 2 \cdot \pi \cdot \frac{D}{\gamma} = 34.558 \text{ m}$

- Carga sobre vertedero $\text{carga_vertedero} := \frac{Q}{L} = 2.249 \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{hr}}$ (El valor está dentro de la carga sobre vertedero admisible, inferior a $18 \text{ m}^3/\text{m} \cdot \text{h}$)

Fangos producidos

$$STo := 0.1505 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Se ha fijado un rendimiento de eliminación del 62%, por lo tanto, la cantidad de fangos producida será:

$$F_{\text{ww}} := 0.62 \cdot Q \cdot STo = 174.029 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

Caudal de fango

Considerando que la concentración del fango es del 2%: $SST_{\text{fango}} := 20 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Caudal de fango primario: $Q_{\text{fango}} := \frac{F}{SST_{\text{fango}}} = 8.701 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{day}}$

Volumen poceta de fangos

Tiempo de retención en poceta: $Tr_{\text{ww}} := 2 \cdot \text{hr}$

$$V_{\text{poceta}} := \frac{Q_{\text{fango}}}{24 \cdot \frac{\text{hr}}{\text{day}}} \cdot Tr = 0.725 \cdot \text{m}^3$$

Caudal de sobrenadante

$$Q_{\text{sobrenadante}} := Q - Q_{\text{fango}} = 1.856 \times 10^3 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{day}}$$

2. DECANTACIÓN SECUNDARIA

La unidad de sedimentación secundaria es parte fundamental del proceso de fangos activados para conseguir los objetivos de calidad relativos a los sólidos en suspensión y DBO asociados a los sólidos suspendidos volátiles del efluente.

2.1. Método de Talmadge y Fitch

Talmadge y Fitch desarrollaron un método para determinar la superficie necesaria para el espesado de fangos. Se llena una columna con una suspensión de sólidos de concentración C_0 que alcanzan la altura H_0 y se mantiene en reposo. Con el paso del tiempo los sólidos sedimentan y la altura del líquido H_t , con sólidos en suspensión disminuye.

En cualquier situación de la interfase, en cualquier tiempo del experimento, puesto que la cantidad de sólidos es constante, se cumple:

$$H_0 \cdot C_0 = H_t \cdot C_t \quad (8)$$

Se pueden trazar tangentes a la curva de velocidad en todos los puntos, sin embargo hay varias consideraciones importantes para el diseño. La pendiente de la curva a tiempo cero proporciona la velocidad inicial, que es la mayor velocidad, puesto que la concentración es la inicial la menor de la zona que contiene sólidos. La pendiente a tiempo elevado (infinito) F , es la pendiente en la compresión (líneas verdes).

Si en el punto de corte de ambas líneas se traza la bisectriz al ángulo formado por las mismas se señala el punto en el que trazar la pendiente a la curva de velocidad que es la perpendicular a la bisectriz dibujada. Estas dos líneas perpendiculares entre sí, delimitan el punto crítico ($H_c * t_c$) que corresponde a la concentración crítica. Esto es la concentración que debe alcanzarse para que el fango no esté excesivamente diluido

$$H_c = \frac{C_0 \cdot H_0}{C_c} \quad (9)$$

Las condiciones que se elijan en el diseño corresponderán a una altura igual o inferior (H_U, t_U) a la marcada en el punto crítico. Si se eligiera una altura superior a la concentración sería menor y el fango estaría muy diluido, no se habría alcanzado la compresión necesaria.

En el diseño se elige una altura H , y un área de sedimentador A_E . Un caudal Q de entrada a ese recipiente tendría un tiempo de permanencia hidráulico τ_H . Ahora bien se debe mantener la relación entre la H_0/t_U , medida en el laboratorio. Para ello

$$\frac{H.A}{Q} = t \rightarrow \frac{H_0}{t_U} = \frac{Q}{A_E} \quad (10)$$

Lo que permite elegir el área del sedimentador necesaria para el espesamiento. En la práctica la relación H_0/t_U viene afectada por un factor de escala.

Además hay que estimar el área del sedimentador necesaria para que se produzca la clarificación de la corriente, es decir la separación de todo sólido no disuelto, se calcula a partir de ciertas características: el caudal sobrenadante y la velocidad de sedimentación.

La velocidad de sedimentación inicial viene dada por:

$$U_0 = [dH/dt]_{t \rightarrow 0} \quad (11)$$

Y se obtiene de la pendiente de la curva H-t experimental a tiempo cero. Pendiente que proporciona datos de la zona de sedimentación libre.

El caudal sobrenadante es proporcional al volumen de líquido existente por encima de la zona crítica de fangos.

$$Q_{\text{sobrenadante}} = Q_{\text{afluente}} \frac{H_0 - H_U}{H_0} = Q_S \quad (12)$$

En el área de clarificación se mantiene la relación

$$A_{\text{clarificación}} = \frac{Q_{\text{sobrenadante}}}{\text{velocidad inicial}} = \frac{Q_S}{U_0} = A_C \quad (13)$$

Se han definido por tanto, dos áreas para el sedimentador. Éstas áreas se multiplican por el factor de escalonamiento (1,5, área de clarificación, y 2, área de espesamiento) y se elige la mayor de ellas para el diseño, así se cubren ambas necesidades: espesamiento y clarificación.

Hay otras características que deben ser definidas: la carga de sólidos y la carga hidráulica:

$$\text{Carga de sólidos} = \frac{Q_{\text{afluente}} \cdot C_{\text{osólidos}}}{\text{Área}} \quad (14)$$

$$\text{Carga hidráulica} = \frac{Q_{\text{afluente}}}{\text{Área}} \cdot \frac{H_0 \cdot H_F}{H_0} \quad (15)$$

Conjugando estos datos se puede llegar a estimar el dimensionado de un sedimentador para un caudal de afluente y unas propiedades dadas, al menos como una información aproximada. En el uso diario el control del proceso permitirá llevarlo a cabo en las condiciones más adecuadas.

2.2. Uso de floculantes

La recolección de biomasa microalgal es un cuello de botella en el desarrollo de los sistemas de producción a gran escala de biocombustibles o los procesos de tratamiento de aguas residuales basados en microalgas. En estos procesos, es imperativo el uso de tecnologías baratas y de baja energía capaces tanto de la gestión de grandes volúmenes de cultivo como de la recuperación eficaz de biomasa. Por esta razón, el cosechado de biomasa microalgal requiere el uso de varios pasos de separación sólido-líquido para obtener un lodo concentrado de 200 a 250 g/l a partir de cultivos diluidos con concentraciones de biomasa de 0,5 a 2,5 g/l (lo que significa que se requieren factores de concentración de 100 a 500). Para lograr estos factores de concentración, se necesitan varios pasos; por lo tanto, es fundamental la selección adecuada de las unidades de operación. El método de cosecha depende de la cepa, de las condiciones de cultivo y del producto final. La recuperación de biomasa representa entre el 20 y el 30% de los costes de producción de biomasa; por lo tanto, es un factor crítico en la viabilidad de los procesos a gran escala.

Aunque la biomasa se puede cosechar con varias operaciones unitarias, la floculación combinada con flotación/sedimentación y finalmente la deshidratación mediante centrifugación o filtración parece ser la mejor opción. Los sistemas comerciales utilizan principalmente la centrifugación para la cosecha, pero es una operación cara recomendada sólo en el caso de productos de gran valor. En el caso de productos de bajo coste, se necesita una etapa de preconcentración, combinando coagulación-floculación con flotación o sedimentación, y finalmente una etapa de deshidratación mediante filtración o centrifugación. La coagulación-floculación se utiliza para aglomerar las células microalgales y aumentar el tamaño efectivo de "partícula", así se mejora la recuperación de biomasa. Las células microalgales son pequeñas, inferiores a 30 μm , y su densidad es parecida a la del agua, con una velocidad de sedimentación inferior a 10^{-6}m/s . Para una sedimentación eficiente, la velocidad de sedimentación debe ser superior a 10^{-4}m/s como ocurre en las unidades de sedimentación tradicionales; por lo tanto es necesario aumentarla mediante la agregación de células. Se han propuesto distintos métodos para agregar las células microalgales, tales como electrocoagulación, electrofloculación, separación magnética (Wang et al., 2007), ultrasonidos (Bosma et al., 2003), floculación mediante cambios de pH, o mediante adición de sales metálicas o polielectrolitos. La potencia consumida en los procesos de electrofloculación es de hasta 16 kWh/kg de bioamasa; mientras que el máximo factor de concentración obtenido mediante separación magnética o ultrasonidos es inferior a 20 (Bosma et al., 2003; Xu et al., 2011).

Los métodos de floculación mediante cambios de pH, o por adición de quitosano o sales metálicas (o polielectrolitos) son eficientes. La floculación mediante

cambios de pH puede mejorarse artificialmente, modificando el pH de los cultivos añadiendo un álcali; o naturalmente, mediante el aumento del pH producido por las células en cultivos sin control del pH o en condiciones adversas de crecimiento. Sea cual sea el método, el aumento del pH dentro de un rango de 8,5 a 10,5 permite la recuperación de microalgas como *Paeodactylum tricornutum*; *Anabaena marina* o *Dunaliella tertiolecta* con valores de recuperación de biomasa superiores al 90%. La desventaja de este método es que se obtienen factores de concentración bajos, inferiores a 10 en la mayoría de los casos; y que se debe neutralizar el sobrenadante antes de reutilizarlo para el crecimiento de las microalgas. Por otra parte, se han utilizado floculantes tradicionales, como las sales de hierro o aluminio y la citosina, en la recuperación de *Chlorella* sp y *P.tricornutum* con dosis de 200 a 270 mg/g obteniéndose factores de concentración menores de 10 (Harith et al., 2009; Sirin et al., 2011). Normalmente las células microalgales están cargadas negativamente, por lo que se recomienda el uso de cationes y polímeros catiónicos para la coagulación-floculación. También se ha demostrado que cloruro de polialuminio y el sulfato poliférrico son eficientes (Sirin et al., 2011; Jiang et al., 1993). Sin embargo, la floculación con sales metálicas podría no ser aceptable si la biomasa se utiliza en ciertas aplicaciones de acuicultura. Normalmente, las sales de aluminio son más efectivas que las sales de hierro, siendo útiles para la recuperación de *Scenedesmus* o *Chlorella* pero con eficiencias inferiores al 80% en la mayoría de los casos. Un gran inconveniente del uso de sales minerales es la necesidad de altas dosis de floculante, comprendidas 120 y 1000 mg/L; resultando el sobrenadante contaminado por el exceso de iones, lo que limita su reutilización. Para solucionar este problema, se pueden utilizar sales de polialumínicas o poliférricas, lo que disminuye las dosis necesarias de floculante a 30 mg/l, pero aún así, también se obtienen bajos factores de concentración. Además, el uso de estos compuestos puede colorear o alterar al medio hasta tal punto que no pueda reutilizarse.

Alternativamente, se puede mejorar la floculación usando polielectrolitos. Este tipo de compuestos neutraliza la carga de las células y une las partículas mediante enlace físico o químico, mejorando así la velocidad de sedimentación. Estos compuestos se usan normalmente en los sistemas de tratamiento de aguas residuales porque las dosis necesarias son menores que cuando se emplean sales metálicas u otros compuestos, siendo no tóxicos y biodegradables. La eficiencia del polielectrolito depende del tipo, su masa molecular y densidad de carga; pero también de las condiciones de operación tales como la dosis, la concentración de biomasa, la fuerza iónica y el pH del medio, así como del grado de mezcla.

Los polielectrolitos permiten una recuperación eficiente de la biomasa de los cultivos de microalgas de agua dulce. Las dosis de floculante necesarias son mucho más bajas que en el caso de otros floculantes tales como las sales de aluminio o de hierro y el quitosano. Los floculantes más eficientes son los polímeros catiónicos de densidad de carga media-alta y masa molecular media-alta. Se obtienen altos

factores de concentración que permiten una reducción de las dimensiones de los equipos necesarios para la deshidratación de la biomasa mejorando así la viabilidad del uso de las microalgas en los procesos de tratamiento de agua residuales.

En la Tabla 4 se muestran las dosis mínimas de floculante y los factores de concentración necesarios para recuperar el 90% de la biomasa microalgal de diferentes cepas usando el floculante más eficiente en cada caso.

Tabla 4. Dosis mínimas de floculante y los factores de concentración

Cepa	Polielectrolito (Floculante)	Factor de concentración	Dosis mínima (mg/l)
<i>Chlorella fusca</i>	EM1	37	8
<i>Chlorella vulgaris</i>	FB1	36	3
<i>Scenedesmus sp.</i>	EM22	38	25
<i>Scenedesmus subspicatus</i>	FB1	37	2

2.3 Diseño del decantador secundario

Método de Talmadge y Fitch

Decantación discontinua

Tabla 5. Datos de altura de la interfase y tiempo de sedimentación

H, cm	t, min
18,2	0
14,4	1
10,3	2
7	3
4,6	4
3,4	5
2	6
1	7
0,3	8

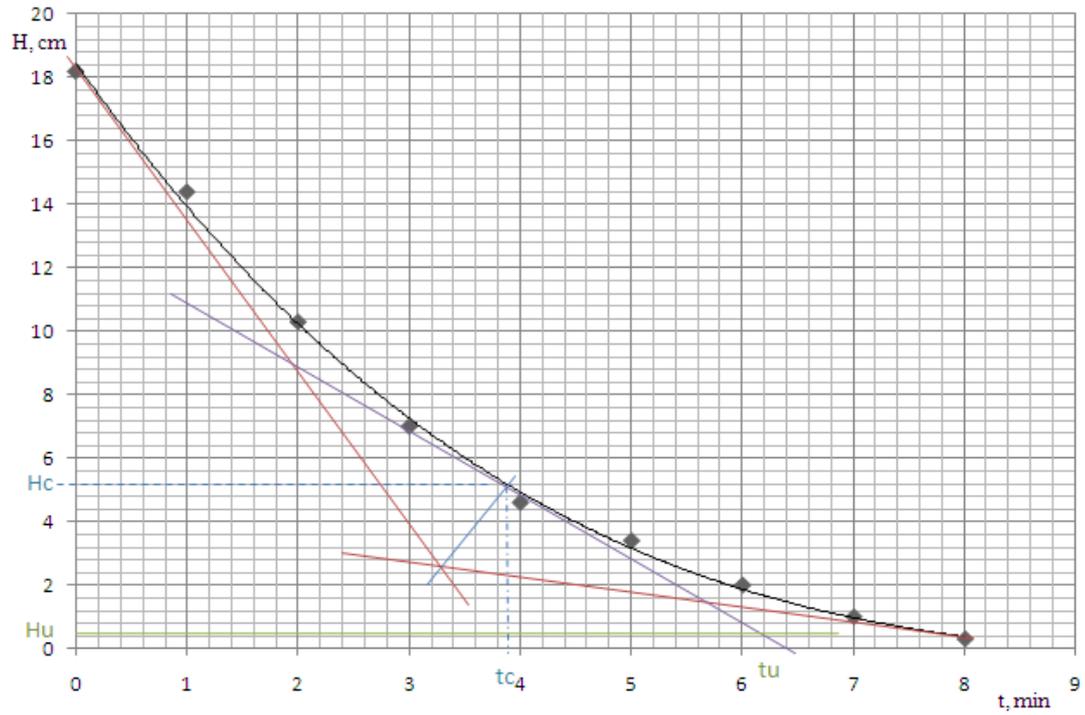


Figura 2. Análisis gráfico de la curva de sedimentación

A continuación se muestran los cálculos realizados en Mathcad

Decantación discontinua

Altura inicial de la suspensión de sólidos $t_o := 0$ min $H_o := 18.2$ cm

Altura final: $t_f := 8$ min $H_f := 0.3$ cm

Ajuste de la curva a polinomio tercer grado: $y_3(t) := -0.0139 \cdot t^3 + 0.4465 \cdot t^2 - 4.9417 \cdot t + 18.44$

Pendiente de la curva a tiempo cero: $Tang(t) := \frac{d}{dt}y_3(t)$ $Tang(t_o) = -4.9417$

Pendiente a tiempo final: $Tang(t_f) = -0.4665$

Tangente a tiempo cero: $y_1(t) := Tang(t_o) \cdot t + H_o$

Tangente a tiempo final:

$$b := H_f - Tang(t_f) \cdot t_f = 4.032$$

$$y_2(t) := Tang(t_f) \cdot t + b$$

Punto de corte entre ambas rectas:

$$Func_corte(t) := y_1(t) - y_2(t)$$

$$t := 2$$

$$tcp := \text{root}(Func_corte(t), t) \quad tcp = 3.1659$$

$$Hcp := y_2(tcp) \quad Hcp = 2.5551$$

Altura crítica:

Del gráfico de la Figura 2 -----> $t_c := 3.9$ min
 $H_c := 5.2$ cm

Diseño del decantador secundario

Caudal afluente: $Q := 1991.33 \frac{\text{m}^3}{\text{dia}}$

Concentración inicial de sólidos volátiles: $SSV_o := 0.502 \frac{\text{kg}}{\text{l}}$

Concentración inicial de sólidos totales: $SST_o := \frac{SSV_o}{0.9} = 0.5578 \frac{\text{kg}}{\text{l}}$

(Considerando que el 90% son volátiles)

Cálculo de la concentración de floculante:

(polielectrolito catiónico FB1 5 mg/L)

Concentración de polielectrolito en el depósito de preparación: $C_{poli} := 5 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Caudal de dosificación: $Q_{poli} := 2 \frac{\text{m}^3}{\text{day}}$

$$C_{poli} \cdot Q_{poli} = 10 \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

Caudal total que entra al sedimentador: $Q + Q_{poli} = 1.9933 \times 10^3 \frac{\text{m}^3}{\text{day}}$

Concentración de polielectrolito en el sedimentador:

$$\frac{C_{poli} \cdot Q_{poli}}{(Q + Q_{poli})} = 5.0167 \times 10^{-3} \quad df = 5 \text{ mg/L}$$

Factor de concentración: $f_c := 37$ (Tabla 4)

Concentración del lodo: $SSTf := SSTo \cdot f_c = 20.637 \frac{\text{g}}{\text{l}}$

Atura de diseño

$$SSTu := SSTf = 20.637 \frac{\text{g}}{\text{l}}$$

$$Hu := \frac{SSTo \cdot Ho}{SSTu} \quad \underline{Hu} := 0.4519 \text{ cm}$$

Caudal de sobrenadante: $Q_s := Q \cdot \frac{Ho - Hu}{Ho} = 1.9419 \times 10^3 \frac{\text{m}^3}{\text{day}}$

Caudal de fango: $Q_f := Q - Q_s = 49.4441 \frac{\text{m}^3}{\text{day}}$

Concentración del sobrenadante $SSTs := \frac{Q \cdot SSTo - SSTf \cdot Q_f}{Q_s} = 0.046 \frac{\text{g}}{\text{L}}$

Las condiciones de diseño corresponden a la altura igual o inferior (H_u) a la marcada en el punto crítico

$$\underline{H}(t) := -0.0139 \cdot t^3 + 0.4465 \cdot t^2 - 4.9417 \cdot t + 18.445$$

Pendiente de la curva a tiempo crítico: $\underline{t} := t_c \quad \frac{d}{dt} H(t) = -2.0933$

Recta tangente a la curva que pasa por el punto crítico: $y_4(t) := -2.0933 \cdot t + 13.3639$

Corte de la recta con la horizontal que pasa por el punto H_u : $t_u := 6.2 \text{ min}$

$$\text{Área necesaria para el espesamiento: } Ae := \frac{Q}{\frac{Ho}{100}} \cdot \frac{tu}{60 \cdot 24} = 47.1087 \text{ m}^2$$

$$Ae_{\text{diseño}} := 2 \cdot Ae = 94.2174 \text{ m}^2$$

$$\text{Pendiente de la curva a tiempo cero en valor absoluto } pendiente := 4.4917 \frac{\text{cm}}{\text{min}}$$

$$\text{Velocidad inicial: } U_o := \text{pendiente}$$

$$\text{Área de clarificación: } Ac := \frac{\frac{Q_s}{24 \cdot 60}}{\frac{U_o}{100}} = 30.0228 \text{ m}^2$$

$$Ac_{\text{diseño}} := 1.5 \cdot Ac = 45.0341 \text{ m}^2 \quad (\text{Menor que la de espesamiento, por lo tanto, se utiliza para el diseño el área de espesamiento})$$

$$\text{Diámetro del sedimentador: } D := \sqrt{\frac{Ae_{\text{diseño}} \cdot 4}{\pi}} = 10.9527 \text{ m} \quad \underline{\underline{D := 11 \text{ m}}}$$

$$\text{Recalculo el área: } \underline{\underline{A := \pi \cdot \frac{D^2}{4}}} = 95.0332 \text{ m}^2$$

• Cálculo de las cargas

-Carga de sólidos:

$$\text{carga_solidos} := \frac{\frac{Q}{24} \cdot SSTo}{A} = 0.487 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}} \quad (\text{valor válido, es inferior a } 2.5 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h})$$

-Carga hidráulica

$$\text{carga_hidraulica} := \frac{\frac{Q}{24} \cdot \frac{Ho - Hf}{Ho}}{A} = 0.858 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{h}} \quad (\text{valor válido, es inferior a } 1 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h})$$

• Cálculo del volumen del sedimentador

-Volumen

$$\text{Asumiendo un tiempo de residencia de 2.5 horas } \underline{\underline{tr := 2.5 \text{ hr}}}$$

$$V_{\text{teorico}} := tr \cdot \frac{Q}{24} = 207.4302 \text{ m}^3$$

-Altura recta sobre vertedero

$$h := \frac{V_{\text{teorico}}}{A} = 2.1827 \text{ m} \quad (\text{Inferior al recomendado } 3 - 5 \text{ m})$$

Como este valor es inferior al recomendado, se fija una altura de 3 m

$$h := 3 \text{ m} \quad \text{por lo tanto, el volumen real será} \quad V_{\text{real}} := 3 \cdot A = 285.0995 \text{ m}^3$$

- **Cálculos de la zona de entrada**

-Altura en la zona de reparto

$$h' := h + 0.03 \cdot \frac{D}{2} = 3.166 \text{ m}$$

-Altura sumergida en chapa deflectora

$$\text{Adoptando una relación de alturas} \quad h_1 \text{div} h' := 0.4$$

$$\text{la altura sumergida en la chapa es} \quad h_1 := h_1 \text{div} h' \cdot h' = 1.266 \text{ m}$$

-Diámetro de chapa deflectora

$$\text{Asumiendo la relación de diámetros} \quad D_1 \text{div} D := 0.1$$

$$\text{el diámetro de la chapa es} \quad D_1 := D_1 \text{div} D \cdot D = 1.1 \text{ m}$$

- **Cálculos vertedero de salida**

-Longitud vertedero de salida

$$L_v := 2 \cdot \pi \cdot \frac{D}{2} = 34.5575 \text{ m}$$

-Carga sobre vertedero

$$V_{\text{vert}} := \frac{Q}{L} = 2.401 \frac{\text{m}^3}{\text{m} \cdot \text{hr}} \quad (\text{aceptable, es inferior a } 5.7 \frac{\text{m}^3}{\text{m} \cdot \text{hr}})$$

- **Volumen poceta de fangos**

Tiempo de retención en poceta: $T_r := 2 \text{ hr}$

$$V_{\text{poceta}} := \frac{Q_f}{24} \cdot T_r = 4.1203 \text{ m}^3$$

3. BIBLIOGRAFÍA

- Hernández Lehmann, Aurelio.1997. Manual de diseño de estaciones depuradoras de aguas residuales. 225pp.
- Granados,M.R., Ación, F.G., Gómez, C., Fernández-Sevilla, J.M., Molina Grima, E. Evaluation of flocculants for the recovery of freshwater microalgae.
- Sainz Sastre, Juan Antonio. Tecnologías para la sostenibilidad.
- Reynolds, Tom D., Richards, Paul. Unit Operations and Processes in Enviromental Engineering. Second Edition.
- Aguilar, M.I., Aguilar J., et al. Tratamiento físico químico de aguas residuales: coagulación-floculación. Universidad de Murcia.
- Robert H. Perry, Don W. Green, James O. Maloney. Manual del Ingeniero Químico. Ed. Mc Graw-Hill.

ANEJO N°3
REACTOR RACEWAY

ÍNDICE

- 1. VENTAJAS DEL EMPLEO DE REACTORES RACEWAY**
- 2. APORTE DE CARBONO**
 - 2.1. Balances de materia**
 - 2.2. Dimensionamiento del foso para el aporte de CO₂**
 - 2.3. Difusores de CO₂**
- 3. NECESIDAD DE MEZCLA**
 - 3.1. Mezcla en el canal**
 - 3.2. Diseño del sistema de agitación**
 - 3.2.1. Rugosidad del canal**
 - 3.2.2. Velocidad del canal**
 - 3.2.3. Eficiencia fotosintética**
 - 3.2.4. Potencia necesaria para la agitación**
- 4. DIMENSIONAMIENTO Y PRODUCTIVIDAD DEL FOTOBIORREACTOR**
- 5. BIBLIOGRAFÍA**

1. VENTAJAS DEL EMPLEO DE REACTORES RACEWAY

A nivel mundial, muchos organismos públicos y privados usan sistemas de estanque-múltiple para el tratamiento de las aguas residuales. Con esos sistemas se obtienen mejoras generales en términos de eliminación de sólidos orgánicos de las aguas residuales; sin embargo, la eliminación de nutrientes, de sólidos algales y la desinfección son altamente inconsistentes y la descarga de efluentes de mala calidad, con respecto a estos parámetros, podrían impactar negativamente en las aguas receptoras. Además, los sistemas de tratamiento convencionales de aguas residuales no están diseñados para recuperar los recursos naturales de las aguas residuales, incluyendo la energía como biogás, nutrientes como biomasa algal/bacteriana usada como fertilizante, alimento o biocombustible, y agua como efluente tratado a un nivel consistentemente alto. El promedio anual de productividad algal/bacteriana en cada estanque es más pequeño, de 2.5 g/m².día .

El tratamiento en reactores raceway con cultivos algales tiene la ventaja del tratamiento convencional de fangos activos (estanques simples y económicos) pero supera muchas de sus desventajas y tiene los beneficios añadidos de eliminar los nutrientes como biomasa algal/bacteriana. El biocombustible obtenido a partir de biomasa algal/bacteriana podría ser una fuente de energía valiosa. Los reactores raceway son poco profundos (0,2-0,5 m), con canalizaciones continuas a través de las cuales el agua residual circula lentamente impulsada por una rueda de paletas. Los sistemas raceway fueron desarrollados por Oswald a finales de los años 50 para el tratamiento de aguas residuales y la recuperación de recursos. Las algas crecen profusamente en los raceway, y la fotosíntesis puede provocar una sobresaturación de oxígeno disuelto con concentraciones de hasta 20 g/m³. Esta oxigenación fotosintética promueve la oxidación bacteriana de la materia orgánica biodegradable disuelta y particulada. En estos reactores, los nutrientes se eliminan principalmente a través del crecimiento algal y la asimilación de nutrientes. La poca profundidad aumenta la velocidad a la que la luz solar inactiva los microbios fecales y promueve la foto-oxidación de contaminantes orgánicos disueltos.

Durante los últimos 50 años, se han construido HRAPs (Hight Rate Algal Ponds) en Estado Unidos y otros países como un componente de los sistemas avanzados de tratamiento de aguas residuales. El instituto Nacional de Agua y Atmósfera (NIWA) de Nueva Zelanda ha llevado a cabo la investigación a escala piloto y a gran escala de los HRAPs durante los últimos 13 años para adaptar el diseño y operación a las condiciones de ese país, y ha demostrado que los HRAPs no sólo ofrecen un tratamiento del agua residual mejor y más consistente que los estanques de oxidación, además la productividad es mucho mayor. La producción de algas en los reactores raceway está limitada en carbono debido a la baja relación carbono/nitrógeno (C/N) de las aguas residuales (3:1 para aguas residuales domésticas) comparada con la biomasa algal (6:1). Por lo tanto, las aguas residuales

domésticas contienen sólo la mitad del carbono necesario para eliminar, por medio de la asimilación por parte de la bioamasa algal, todo el nitrógeno. La limitación de carbono en los reactores viene indicada por el elevado pH del agua de los estanques durante el día, como resultado de la asimilación del carbono inorgánico causando un cambio en el equilibrio del sistema carbonato y la liberación de los iones de los iones hidroxilo eleva el pH del agua por encima de 10.

A un pH por encima de 8,5, se inhibe el crecimiento tanto de las algas como de las bacterias heterótrofas aeróbicas (las cuales degradan los compuestos orgánicos del agua residual), en parte como resultado de la alta concentración de amoníaco libre. Por lo tanto, la adición de CO₂ a los reactores podría mejorar la producción de algas y la eliminación de nutrientes nitrogenados mediante el suministro de carbono necesario para estimular el crecimiento algal y reducir el pH. Investigaciones recientes han demostrado que el rendimiento del tratamiento del agua residual y la productividad algal/bacteriana pueden mejorarse mediante la adición de CO₂ (por ejemplo, utilizando los gases de combustión procedentes de la generación de energía in-situ) al agua durante el día y mediante el uso de protocolos de operación y gestión específicos.

Dependiendo de las condiciones climáticas locales, con la adición de CO₂ se podría lograr una productividad algal/bacteriana promedia anual de 12 a 20 g/m². día (sólidos volátiles en suspensión).

La principal desventaja de estos sistemas es la superficie de terreno necesaria en comparación con los sistemas de tratamiento electromecánico. Sin embargo, el tratamiento en reactores raceway combinado con un pre-tratamiento del agua residual (para eliminar los sólidos orgánicos) de sedimentación por gravedad (por ejemplo, un sedimentador primario), seguido de un pulido adicional del efluente si es necesario, podría encajar dentro de un sistema de oxidación de dos estanques. Los sólidos sedimentados serían digeridos anaeróbicamente para recuperar la energía en forma de biogás, y la biomasa algal/bacteriana podría convertirse en biocombustible por el método más apropiado. Los sistemas raceway tienen unos costes de operación y capital menores que los sistemas mecánicos de eliminación de nutrientes y son muchos más fáciles de operar. Proporcionan los beneficios de una mayor producción algal para uso beneficioso (alimentación o biocombustible), recuperación de nutrientes para uso como fertilizante, y compensación de las emisiones de gases de efecto invernadero.

Otra ventaja de los reactores raceway frente a los estanques de oxidación es que la mezcla suave que produce promueve el crecimiento de las algas que forman colonias las cuales se pueden extraer fácilmente del fluente mediante sedimentación por gravedad en un simple estanque de sedimentación o en una cosechadora algal. La adición de CO₂ promueve la agregación/biofloculación de las colonias de algas con los flóculos bacterianos para mejorar aún más la sedimentación. La

biofloculación también puede mejorarse reciclando una fracción de las algas sedimentadas de forma similar al reciclaje del lodo en el proceso de lodos activados.

Podría ser necesario un tratamiento adicional (‘‘pulido’’) del efluente de la cosechadora de algas para cumplir con los requisitos específicos de descarga mediante el empleo de: (a) un estanque de maduración: para mayor desinfección solar-UV y pulido del agua residual, y almacenamiento antes de la descarga o posterior reutilización; (b) un filtro de roca: para la eliminación de los sólidos, a menudo seguido de un estanque de maduración; (c) desinfección UV: para la desinfección si no hay terreno suficiente para estanques de maduración; (d) un filtro de membrana: para conseguir un efluente de gran calidad, adecuado para muchas aplicaciones de reutilización.

Oswald y Golueke (1960) propusieron por primera vez la producción a gran escala de microalgas como materia prima para biocombustibles empleando este sistema. La conversión a biocombustible de la biomasa algal implicaría los siguientes procesos: (1) digestión anaerobia del cosechado de biomasa algal para obtener biogás (metano); (2) extracción y transesterificación de los triglicéridos de las algas para producir biodiesel; (3) fermentación de los carbohidratos de las algas a etanol o butanol; y (4) gasificación u otras conversiones termomecánicas de las algas, en particular la reacción en agua supercrítica para convertir la biomasa en un bio-aceite crudo.

Los fotobiorreactores, aunque se emplean para cultivar algunos productos algales de alto valor, tienen un elevado coste de capital y limitaciones de escalonamiento que actualmente les hacen poco rentables para aplicaciones de biocombustibles. Incluso los fotobiorreactores raceway, que tienen costes de capital mucho más bajos que los fotobiorreactores cerrados, son probablemente demasiado caros para utilizarlos únicamente en la producción de biocombustibles de algas. Un nicho de oportunidad para la producción económica a gran escala de biocombustibles de algas podría ser aquel donde la producción de algas es el subproducto de un HRAP de tratamiento de aguas residuales, diseñado para mejorar la eliminación de nutrientes y la desinfección.

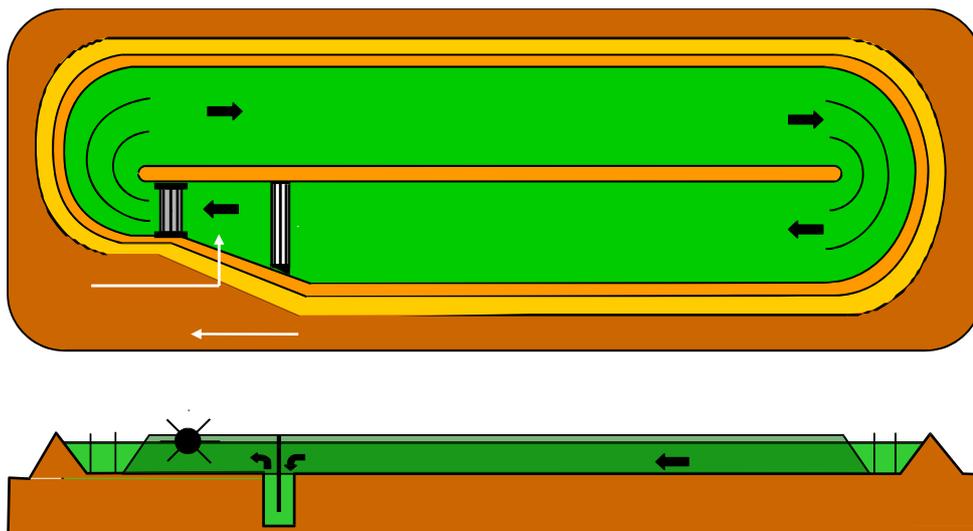


Figura 1. Diagrama esquemático de un fotobiorreactor raceway con adición de CO_2 (planta y alzado, sin escala)

2. APORTE DE CARBONO

El suministro de CO_2 es uno de los procesos más difíciles en el cultivo de microalgas. El CO_2 se puede adicionar a los cultivos en forma de bicarbonato sódico y sales similares o en forma de pequeñas burbujas. Esas sales normalmente cuestan tres veces más que el dióxido de carbono gaseoso

La transferencia de CO_2 a través de la interfase gas-líquido es tan lenta que se deben inventar métodos especiales para alargar el tiempo y aumentar el área superficial necesarios para maximizar la transferencia. La ventaja del suministro en forma gaseosa es que el burbujeo favorece la mezcla en el reactor.

Una ventaja del suministro de CO_2 disuelto previamente en fase acuosa es que la eficiencia de transporte es del 100 %. La desventaja es que esas sales normalmente cuestan tres veces más que el dióxido de carbono gaseoso.

Considerando las ventajas de ambos métodos, el aporte de CO_2 al reactor se va a realizar mediante inyección bajo de manda tanto en fase gaseosa como en fase acuosa.

El aporte de CO_2 se va a realizar en función de la relación establecida entre kg de CO_2 por cada kg de biomasa producida. Esta relación es de 1,8 en valor estequiométrico pero se considera un valor real de 2,5 para compensar posibles pérdidas.

2.1 Balances de materia

Datos de partida:

$$\text{Tiempo de operación de la planta: } t_{\text{operación}} := 300 \frac{\text{días}}{\text{año}}$$

$$\text{Relación CO}_2/\text{biomasa: } r := 2.5$$

$$\text{Capacidad de producción del conjunto de reactores: } \text{Capacidad_produccion} := 3 \cdot 10^5 \frac{\text{kg}}{\text{año}}$$

$$\text{Masa molar del CO}_2: M_{\text{CO}_2} := 44 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

$$\text{Profundidad activa del reactor: } p_{\text{activa}} := 0.2 \cdot \text{m}$$

$$\text{Volumen activo de cada reactor: } V_{\text{activo_reactor}} := 2.5 \cdot 10^3 \cdot \text{m}^3$$

- Caudal de CO₂ necesario:

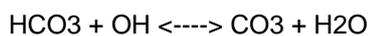
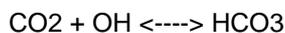
$$m_{\text{CO}_2} := \frac{\text{Capacidad_produccion} \cdot r}{t_{\text{operación}}} = 2.5 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{día}}$$

$$Q_{\text{CO}_2} := \frac{m_{\text{CO}_2}}{M_{\text{CO}_2}} \cdot 22.4 = 1.273 \times 10^3 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

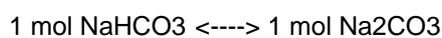
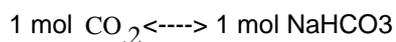
- Caudal de carbono para autoabastecimiento de la planta:

$$\text{Caudal de CO}_2 \text{ recuperado en la columna de absorción: } m_{\text{CO}_2 \text{ auto}} := \frac{888.869}{2.1} = 423.271 \frac{\text{kg}}{\text{día}}$$

El CO₂ reacciona con la fase acuosa teniendo lugar las siguientes reacciones:



Estequiométricamente:



La fase acuosa utilizada para capturar el CO_2 de los gases de escape del generador contiene sales carbonato-bicarbonato, que hay que sumar al caudal de CO_2 absorbido:

$$\text{Caudal de fase acuosa enriquecida en Na}_2\text{CO}_3/\text{NaHCO}_3: Q_{\text{fase_acuosa}} := \frac{283.334}{2.1} = 134.921 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

$$\text{Concentración de NaHCO}_3 \text{ en la fase acuosa: } C_{\text{NaHCO}_3} := 11 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Concentración de Na}_2\text{CO}_3 \text{ en la fase acuosa: } C_{\text{Na}_2\text{CO}_3} := 22 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Caudal de NaHCO_3 :

$$m_{\text{NaHCO}_3} := C_{\text{NaHCO}_3} \cdot Q_{\text{fase_acuosa}} = 1.484 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{día}}$$

Estequiométricamente:

$$M_{\text{NaHCO}_3} := 84.007$$

$$\frac{m_{\text{NaHCO}_3}}{M_{\text{NaHCO}_3}} \cdot M_{\text{CO}_2} = 777.337 \frac{\text{kg}}{\text{día}} \text{ CO}_2$$

Caudal de Na_2CO_3 :

$$m_{\text{Na}_2\text{CO}_3} := C_{\text{Na}_2\text{CO}_3} \cdot Q_{\text{fase_acuosa}} = 2.968 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{día}}$$

Estequiométricamente:

$$P_{m_{\text{Na}_2\text{CO}_3}} := 105.9885$$

$$\frac{m_{\text{Na}_2\text{CO}_3}}{P_{m_{\text{Na}_2\text{CO}_3}}} \cdot M_{\text{CO}_2} = 1.232 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{día}} \text{ CO}_2$$

Caudal total de CO_2 :

$$m_{\text{total}} := m_{\text{CO}_2_auto} + 1.232 \times 10^3 + 777.337 = 2.433 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{día}}$$

- Caudal sobrante de CO_2 de autoabastecimiento:

$$m_{\text{CO}_2\text{ sobran}} := 1032.96 - m_{\text{CO}_2\text{ auto}} = 609.689 \frac{\text{kg}}{\text{día}}$$

- Caudal de CO_2 a aportar:

Considerando que la eficiencia de fijación del CO_2 , en fase gaseosa, por parte de las microalgas del 32.8%:

$$m_{\text{CO}_2\text{ gas}} := \frac{m_{\text{CO}_2} - m_{\text{total}}}{0.328} = 205.46 \frac{\text{kg}}{\text{día}}$$

- Caudal de gases de escape del generador a aportar:

Teniendo en cuenta que el porcentaje de CO_2 es 14,525%:

$$m_{\text{gases escape}} := \frac{m_{\text{CO}_2\text{ gas}}}{0.14525} = 1.415 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{día}}$$

2.2. Dimensionamiento del foso para el aporte de CO₂

Se va a considerar la construcción de un foso de forma rectangular que permitirá aumentar la transferencia de materia del gas-líquido, de modo que la inyección de CO₂ al cultivo mejore el control del pH y aumente la eficiencia del reactor. Para el diseño del foso se considera como fenómeno determinante la capacidad de transferencia de materia, de modo que sea lo suficientemente grande y eficaz para desorber oxígeno como para absorber eficientemente CO₂, especialmente en el caso de emplear gases de combustión para los que la fuerza impulsora es menor.

Si existe una diferencia de concentraciones en el líquido y en la interfase, ocurre una transferencia de materia, la cual es representada empíricamente por:

$$N = k_1 \cdot (C_i - C_l) \quad (1)$$

Como es muy difícil conocer C_i en la interfase se recurre al uso de los coeficientes globales de transferencia de materia, quedando la ecuación:

$$N = k_1 \cdot (C_g^* - C_l) \quad (2)$$

Donde:

C_g^* : concentración de gas en la solución en equilibrio con la fase gaseosa.

C_l : concentración del gas en la fase líquida.

Es difícil conocer con certeza el área a través de la cual se produce la transferencia, se puede medir el flujo que se transfiere de una fase a otra pero no la densidad de flujo. Por esto se define el coeficiente volumétrico de transferencia de materia:

a: área interfacial por unidad de volumen = $\frac{A}{V}$

Quedando esta ecuación:

$$Q_{\text{gas}} = K_1 a \cdot (C_g^* - C_l) \cdot V \quad (3)$$

Q_{gas} : caudal de gas al foso, moles/s.

$K_1 a$: coeficiente volumétrico global de transferencia de materia, obtenido experimentalmente, s^{-1} .

Aplicando la Ley de Henry se puede obtener la concentración de CO₂ en equilibrio con la fase líquida, por medio de la ecuación:

$$C_g^* = H \cdot P^{\wedge} \quad (4)$$

que queda transformada en:

$$C_g^* = H \cdot P_T \cdot \frac{n_1}{n_T} \quad (5)$$

H: Constante de Henry para el CO₂, mol/m³.atm

P_T: Presión atmosférica, atm.

$\frac{n_1}{n_T}$: fracción molar de CO₂ en el gas.

Por tanto, refiriendo todo esto al CO₂ que se inyecta en el foso, se obtiene el volumen necesario para llevar a cabo la transferencia de materia de CO₂ en el foso del reactor. Hay que considerar que en el líquido inicialmente no hay CO₂, por lo que se simplifican los cálculos. Por tanto el volumen del foso se calcula a partir de las ecuaciones anteriores, obteniendo la profundidad de éste del modo siguiente:

$$V_f = A_f \cdot h_f = a_f \cdot b_f \cdot h_f \quad (6)$$

$$h_f = \frac{V_f}{(a_f \cdot b_f)} \quad (7)$$

Dónde:

V_f: Volumen del foso, donde se lleva a cabo la transferencia de CO₂, m³.

a_f: ancho del foso, m.

b_f: largo del foso, m.

h_f: profundidad del foso, m.

Para asegurar que se lleva a cabo la transferencia de materia en el foso, y en base a los distintos estudios realizados en reactores raceway con dispositivos parecidos, se toma como criterio 1,50 m de profundidad de foso.

Relación teórica $\frac{V_f}{V_{\text{reactor}}} = \frac{1}{20}$

Volumen del foso: $\frac{1}{20} \cdot V_{\text{activo_reactor}} = 125 \text{ m}^3$

Anchura del foso:

D: 17,68 m

a_f = D

Profundidad del foso: h_f = 1,5 m

$$\text{Largo del foso: } b_f = \frac{V_f}{a_f \cdot h_f} = 4,7 \text{ m}$$

2.2. Difusores de CO₂

Para la difusión CO₂ existen varios sistemas de difusores, entre ellos: tubo perforado de PVC, membrana microperforada de polipropileno y tubo poroso de PVC. Se han realizado distintos ensayos utilizando el método dinámico para determinar el coeficiente de transferencia de materia. Los resultados obtenidos determinan que el que mayor Kla puede dar es el correspondiente a la membrana de propileno, con un valor de $0,01 \text{ s}^{-1}$. Esto es normal ya que el tamaño de burbuja en la membrana microperforada es mucho menor que el orden de 1mm. La reducción del tamaño de la burbuja no sólo aumenta el coeficiente de transferencia, sino que también el área interfacial de intercambio. Por otro lado, cuanto menor es el diámetro de burbuja mayor es la pérdida de carga generada por el burbujeador y menor el caudal de gas introducido. El número de difusores necesarios vendrá impuesto por la cantidad de gas necesario para satisfacer la producción marcada y el caudal impuesto a través del difusor.

3. NECESIDAD DE MEZCLA

Toda la superficie externa de los cultivos de microalgas se debe mezclar continuamente para evitar que las células sedimenten y se peguen al fondo y evitar la estratificación térmica del agua. En las experiencias de Oswald en Richmon, en California y otros lugares, en los estanques sin mezcla con una superficie de unos 30 cm se encontraron diferencias de temperatura de unos 8 °C desde la parte superior a la parte inferior en los días cálidos. Estas diferencias de temperatura tan drásticas se originan cuando unos pocos centímetros superiores de un cultivo denso de algas absorbe y convierte la mayor parte de la luz solar en calor. Esto ocurre generalmente con una eficiencia diez veces mayor que la conversión de luz a energía química en las células. El agua caliente de la superficie tiende a permanecer en la superficie porque está más iluminada que el agua en el estrato más bajo. Las algas en ésta capa agotan rápidamente los iones bicarbonato disponibles y el valor del pH se eleva hasta niveles tan altos como 11. En estas condiciones el CaCO₃ y nutrientes esenciales como Fe y P tienden a precipitar y sedimentar, a menudo llevando las algas superficiales con ellos hasta el fondo. Debido a la claridad de la capa superficial, una segunda capa se expone a los rayos de sol y el proceso se repite de manera que todo el estanque poco profundo sin mezclar podría precipitar.

Una vez que las algas han llegado al fondo del estanque tienden a formar grandes aglomeraciones unidas por polímeros extracelulares y bacterias, hongos y algas verde-azuladas filamentosas. Si la luz alcanza estos niveles, tienden a desprenderse de la parte inferior y ascender a la superficie del estanque en forma de esferas de tamaño variable impulsadas por las burbujas adheridas de oxígeno liberado fotosintéticamente. Estas esferas flotantes a su vez son arrastradas a los bordes del estanque por el viento. Tales esferas, densamente hileradas en los bordes del estanque en seguida se vuelven anóxicas y olorosas. Después sirven como criaderos de insectos voladores y en última instancia pueden albergar grandes concentraciones de *Clostridium Botulinum*, con la consiguiente probabilidad de envenenamiento y muerte de aves de caza.

3.1. Mezcla en el canal

El flujo de mezcla continua en los estanques canalizados evita completamente la cadena de sucesos objetables descrita anteriormente. En la Figura 2 se muestra un canal de distribución simplificado, a través del cual el agua es forzada a moverse esencialmente como una corriente superficial confinado por las paredes exteriores y de los divisores de canal.

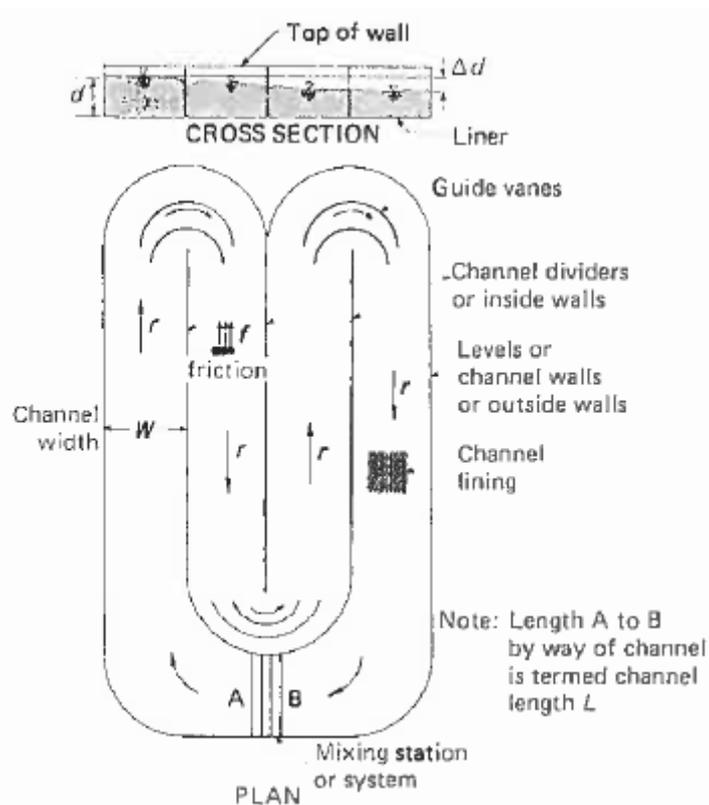


Figura 2. Diagrama simplificado de un fotobiorreactor raceway, mostrando la nomenclatura de las partes más destacables.

El movimiento lo imparte un sistema de mezclado. La mezcla de flujo es fácilmente inducida en los estanques canalizados con bombas de hélice o de tornillo, con bombas de elevación de aire y con agitadores ruedas de paletas. Las ruedas de paletas adecuadamente diseñadas son los mezcladores de estanque más eficientes y duraderos porque implican principalmente partes en movimiento a baja velocidad y pueden estar hechos de materiales resistentes a la corrosión. Las bombas de elevación de aire, aunque eficaces, implican el uso de sopladores de aire comprimido que suelen durar pocos años y son menos eficientes que las ruedas de paletas mostradas en la Figura 3 Estas ruedas se diseñaron como bombas de paletas y por consiguiente descargan todo el agua que entra en ellas y son por lo tanto altamente eficientes. Las bombas de hélice y de tornillo no se consideran las más eficientes en los sistemas de crecimiento de algas aunque hay varios sistemas operando satisfactoriamente en California.



Figura 3.Fotografía un agitador rueda de paletas

3.2. Diseño del sistema de agitación

Con referencia a la Figura 3, considerando el flujo de agua y la profundidad p en un canal de anchura finita D y longitud inespecífica L . La fricción tiende a dificultar el flujo y el área del canal sobre la cual se produce la fricción se denomina radio hidráulico R_h . Para una unidad de longitud de canal, R_h es igual al área de flujo dividida entre el perímetro en contacto con el agua:

$$Rh = \frac{A}{P} \quad (8)$$

Dónde:

$$A = p \cdot D \quad (9)$$

$$P = D + 2 \cdot p \quad (10)$$

Por lo tanto:

$$Rh = \frac{D \cdot p}{D + 2 \cdot p} \quad (11)$$

La pérdida de energía hidráulica por fricción viene determinada por una función compleja que depende de la velocidad al cuadrado, del radio hidráulico y de la fricción propiamente dicha

$$\frac{\partial d}{\partial L} = f(v^2, Rh, f)$$

La ecuación de Manning es usada como una solución empírica de ésta función compleja, ya que se trata de canales abiertos:

$$v = \frac{1}{n} \cdot Rh^{\frac{2}{3}} \cdot s^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

Dónde:

v: velocidad media del canal, m/s.

n: factor de fricción de Manning. Depende del material de construcción del canal, s/m^{1/3}.

s: pérdida de carga por fricción en el canal por unidad de longitud (pendiente de la línea de agua), es decir $\frac{\Delta d}{L}$, adimensional.

Rh: radio hidráulico.

Antes de evaluar $\frac{\partial d}{\partial L}$, es conveniente y satisfactorio asumir un valor finito para el cambio en la profundidad (diferencia de altura creada en las proximidades del agitador), Δd , y determinar la longitud finita L que corresponde al cambio asumido en la profundidad para un factor de fricción, un radio hidráulico y una velocidad

determinados. Para ello elevamos al cuadrado ambos lados de la ecuación anterior y despejamos s :

$$s = \frac{v^2 \cdot n^2}{Rh^3} \quad (13)$$

Y, puesto que $s = \frac{\Delta d}{L}$ y $Rh = \frac{D \cdot w}{w + 2 \cdot D}$:

$$\Delta d = \frac{L \cdot v^2 \cdot n^2}{\left(\frac{D \cdot w}{w + 2 \cdot D}\right)^3} \quad (14)$$

y

$$L = \frac{\Delta d \cdot \left(\frac{D \cdot w}{w + 2 \cdot D}\right)^3}{v^2 \cdot n^2} \quad (15)$$

Δd se puede estimar como $\frac{p}{2}$

3.2.1. Rugosidad del canal

El valor de n , factor de fracción de Manning, varía en función de un factor conocido como rugosidad relativa, la cual se define como la relación entre la altura media de las discontinuidades del fondo y la profundidad del agua en el canal. En consecuencia:

$$n \propto \frac{\varepsilon}{p}$$

Dónde:

ε : Altura de las discontinuidades

p : Profundidad del canal

Por ejemplo, una discontinuidad de 1 mm de altura en un canal de 10 cm de profundidad tendría una rugosidad relativa de $0.1/10 = 0.01$. Los valores de n determinados experimentalmente en fotobiorreactores raceway varían de 0.008 a 0.03, la primera para canales con revestimiento de plástico y la última para canales

de tierra relativamente rugosa. Comparando la solución de: $1/n^2$ para $n= 0.01$ (10000) y $n=0.03$ (1111), es evidente que, al igual que otros factores, n tiene un profundo efecto sobre la longitud del canal permitida para un valor de Δd dado. Los valores medios de n estimados por Oswald usando distintos materiales para los revestimientos de canal se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Valores medidos de n , estimados en canales abiertos

Material for channel liner	Manning's n
Smooth plastic on smooth concrete	0.008
Plastic with 'skrim' on smooth earth	0.010
Smooth plastic on granular earth	0.012
Smooth portland cement concrete	0.013
Smooth asphalt concrete	0.015
Coarse troweled concrete, rolled asphalt	0.016
Gunnite or sprayed membranes	0.020
Compacted smooth earth	0.020
Rolled coarse gravel, coarse asphalt	0.025
Rough earth	0.030

3.2.2. Velocidad del canal

Las experiencias de Oswald con cultivos algales a gran escala indican que velocidades de fluido tan bajas como 5 cm/s prevendrían la la estratificación térmica y mantendrían las algas o los flóculos algales-bacterianos en suspensión turbulenta. En canales anchos y poco profundos, es difícil mantener una velocidad uniforme a través de los canales y, en consecuencia, se necesitan velocidades lineales mínimas de 15 cm/s en todas las zonas. Puesto que la potencia necesaria para mezclar los cultivos aumenta al cubo de la velocidad, merece la pena minimizar la velocidad cuando la energía es un factor de coste importante. Velocidades superiores a 30 cm/s darían lugar a grandes valores de Δd en los canales largos y podrían requerir altas paredes de canal y mayores paredes divisoras que se suman al coste del estanque. Así pues, si se emplean velocidades de mezcla superiores a 15 cm/s en estanques de 15 cm de profundidad, se requerirían canales del orden de sólo 500 m de rueda de paletas a rueda de paletas. Velocidades de mezcla mayores requieren también una construcción del estanque más cara para prevenir la erosión. En consecuencia, aunque algunos experimentos han indicado que velocidades por encima de 60 cm/s mejoran la productividad algal, es difícil imaginar que el incremento del cosechado, que depende linealmente de la velocidad pueda contrarrestar el incremento del coste de los estanques y la energía, que aumenta exponencialmente con la velocidad.

3.2.3. Eficiencia fotosintética

Los cultivos de microalgas a gran escala dependen de la luz solar como fuente primaria de energía, y las células algales en crecimiento absorben fuertemente la luz solar. Las células cercanas a la superficie reciben más que suficiente luz para saturar la fotosíntesis. Las células cercanas al fondo del estanque reciben muy poca luz y, aunque puedan usarla con la máxima eficiencia, no daría lugar a una síntesis suficiente para compensar sus necesidades respiratorias. Las células situadas en la zona intermedia usan la luz con eficiencia variable.

V. Bush ha deducido una expresión teórica con la cual estimar la máxima eficiencia fotosintética que puede alcanzar un cultivo, f_w . Según Bush:

$$f_w = \frac{S_s}{S_0} \cdot (\ln \frac{S_s}{S_0} + 1) \quad (16)$$

Dónde:

S_s : Densidad de flujo de fotones a la cual la fotosíntesis se satura

S_0 : Densidad de flujo de fotones a cualquier instante.

La eficiencia deducida por Bush no puede no se puede alcanzar en los cultivos reales porque también están limitados por la eficiencia cuántica a diversas longitudes de onda, siendo la máxima 35% para la luz roja ($\lambda = 700$ nm) hasta 20% para la luz azul ($\lambda = 400$ nm). Una limitación más en la eficiencia es que se debe satisfacer la respiración nocturna en los cultivos antes de obtener el rendimiento neto. La respiración algal en sí varía mucho con la temperatura y la actividad fotosintética. Según Oswald, la máxima eficiencia de utilización de la energía solar en cultivos en continua mezcla al aire libre se aproxima al 5% del total de energía solar.

3.2.4. Potencia necesaria para la agitación

Para lograr la mezcla en el reactor raceway y que todas las células estén expuestas a la luz, se acopla un agitador rueda de paletas con un motor capaz de mover el agua. Para ello es necesario calcular la energía que debe suministrar el motor.

La potencia necesaria se puede determinar en base a Δd y la cantidad de agua en movimiento según la relación:

$$P = \frac{Q \cdot \rho \cdot \Delta d}{102 \cdot e} \quad (17)$$

Dónde:

P: Potencia del motor, kW..

Q: Caudal de agua en movimiento, kg/m³.

p: Peso específico del agua, kg/m³.

Δd: Diferencia de altura creada en la inmediación de las paletas, m.

e: eficiencia de las paletas.

Para un canal de anchura D y profundidad p , la cantidad de flujo viene dada por:

$$Q = D \cdot p \cdot V \quad (18)$$

4. DIMENSIONAMIENTO Y PRODUCTIVIDAD DEL FOTOBIORREACTOR

El dimensionamiento del reactor raceway del presente Proyecto se ha basado en los resultados obtenidos en la planta demostración situada en la EDAR de Christchurch, en el sur de la isla de Nueva Zelanda, en la cual se experimentó un sistema fotobiorreactores raceway de 5 ha.



Figura 4. Fotografía de uno de los cuatro reactores raceway de la planta de tratamiento de aguas residuales de Christchurch

Los cuatro fotobiorreactores de 1,25 ha se construyeron a partir de los restos de una laguna de oxidación ya existente tras haber sido drenada, secada y desazolvada.

La construcción de los terraplenes de los raceway se demostró rentable utilizando bermas de tierra compactada cubiertas de geotextil, y los estanques se llenaron y operaron exitosamente sin la necesidad de un caro revestimiento de plástico. El trabajo de tierra para la construcción del estanque costó 3,7 dólares de Nueva Zelanda por metro cuadrado, mientras que los costes totales de construcción, incluyendo el agitador de rueda de paletas y el controlador de adición de CO₂, fueron 5,9 dólares de Nueva Zelanda por metro cuadrado y 8.96 dólares por metro cuadrado respectivamente. Los costos esenciales se muestran en la Tabla 2. Otros costos incluyendo los de las tuberías, válvulas, bombas, medidores de caudal y control y monitorización del estanque en tiempo real no se incluyen aquí porque son específicos del lugar y duraron los 15 primeros meses de operación (Figuras 5 y 6 y Tabla 3). Por la mañana (de 9 a 10) las temperaturas del reactor eran de 1 a 2 °C más frías que la temperatura del agua afluyente (15,4 °C), mientras los niveles de oxígeno disuelto del reactor estaban prácticamente saturadas (86% al 96% de saturación), y los niveles de pH eran elevados (9,1-9,3) (Figura 5 y Tabla 3). Las concentraciones de DBO₅ del agua residual se redujeron un 47-52 % en los cuatro reactores. La eliminación de la DBO₅ filtrada era alta logrando entre los cuatro estanques de un 82% a un 91% de eliminación. La eliminación del nitrógeno amoniacal por los cuatro fue de un 64 a un 67% mientras que la eliminación de la DRP (fósforo reactivo disuelto) fue únicamente del 14 al 24% (Figura 6 Tabla 3). El tratamiento proporcionó una eficiente desinfección, aproximadamente un 2log de eliminación de E. Coli. (Tabla 3).

Tabla 2. Costos de construcción del conjunto de reactores de la planta de tratamiento de aguas residuales de Christchurch

	Cost NZ \$	Cumulative cost NZ \$	Cumulative cost NZ \$ ha ⁻¹	Cumulative cost NZ \$ m ⁻²
Pond				
Earthwork	\$108,000.00			
Embankment protection	\$51,000.00			
End baffles	\$26,000.00	\$185,000.00	\$37,000.00	\$3.70
Mixing				
Paddlewheels (inc VSD)	\$87,000.00			
Paddlewheel stations	\$23,000.00	\$295,000.00	\$59,000.00	\$5.90
CO₂ addition				
CO ₂ sumps with baffles	\$90,000.00			
CO ₂ spargers	\$22,000.00	\$407,000.00	\$81,400.00	\$8.14
pH control and valves	\$41,000.00	\$448,000.00	\$89,600.00	\$8.96

Tabla 3. Media \pm desviación estándar y porcentajes de reducción de los parámetros de calidad del agua residual en los cuatro reactores raceway de la planta de Christchurch medidos durante los 15 meses de operación (diciembre 2009 a febrero 2011)

Water quality variable	Influent	HRAP 1 effluent		HRAP 2 effluent		HRAP 3 effluent		HRAP 4 effluent	
	Median	Median	% Rem.						
Temp. (°C)	15.4±3.2	13.2±4.2		13.1±4.2		13.5±4.3		14.3±4.4	
DO (% sat.)	20.2±23.5	86.2±42.0		98.2±44.0		90.8±42.3		93.4±45.2	
pH	7.6±0.45	9.1±0.99		9.3±0.8		9.2±0.7		9.1±0.64	
Cond. (mS cm ⁻¹)	920.0±824.0	734.0±182.5	20.2	744.0±151.1	19.1	744.0±168.7	19.1	765.0±174.3	16.8
Alk. (g CaCO ₃ m ⁻³)	195.0±41.2	134.0±32.6	31.3	127.3±33.3	34.7	134.0±26.6	31.3	144.0±30.4	26.2
BOD ₅ (g m ⁻³)	115.5±71.5	61.5±26.2	46.8	56.0±22.5	51.5	57.5±22.7	50.2	56.0±35.0	51.5
fBOD ₅ (g m ⁻³)	63.0±36.7	5.4±9.0	91.4	10.0±7.2	84.3	5.0±6.9	92.1	11.5±7.8	81.8
Turbidity (NTU)	113.0±108.6	344.5±155.1		328.5±155.7		335.0±156.2		345.5±130.7	
TSS (g m ⁻³)	57.7±66.1	200.0±89.4		179.5±89.8		213.4±110.8		225.5±100.5	
VSS (g m ⁻³)	47.4±47.9	163.6±74.2		143.6±74.0		163.6±81.8		164.0±82.7	
Chlorophyll <i>a</i> (mg m ⁻³)	79.1±313.8	2875.8±1894.4		3043.3±2094.9		3122.4±1934.1		2996.8±1702.0	
NH ₄ -N (g m ⁻³)	24.2±9.5	8.6±6.3	64.2	7.9±6.5	67.4	8.6±5.6	5.6	8.6±5.66	64.6
DRP (g m ⁻³)	1.92±1.85	1.53±1.23	20.2	1.45±1.29	24.4	1.50±1.23	21.9	1.65±1.54	14.0
<i>E. coli</i> (MPN (100 mL) ⁻¹)	1.6×10 ⁶ ±1.8×10 ⁶	1.2×10 ⁴ ±4.2×10 ⁴	99.3	4.5×10 ³ ±9.8×10 ³	99.7	3.2×10 ⁴ ±6.1×10 ⁴	98.0	2.0×10 ⁴ ±1.8×10 ⁴	98.8

Las poblaciones de colonias de especies algales mejoraron naturalmente el seguimiento del llenado inicial del HRAP con agua desde el estanque 1 de la planta de tratamiento de aguas residuales. La composición de especies era parecida en los cuatro HRAPs en los cuales predominaban *Micractinium sp.* And *Desmodesmus sp.* Las concentraciones de biomasa algal/bacteriana (medidas como Sólidos en suspensión volátiles) tuvieron valores parecidos en los cuatro HRAPs (entre 143 y 163 g/m³). Con los cambios de estación la productividad de la biomasa algal/bacteriana osciló entre 4.4 y 11.5 g/m².día..

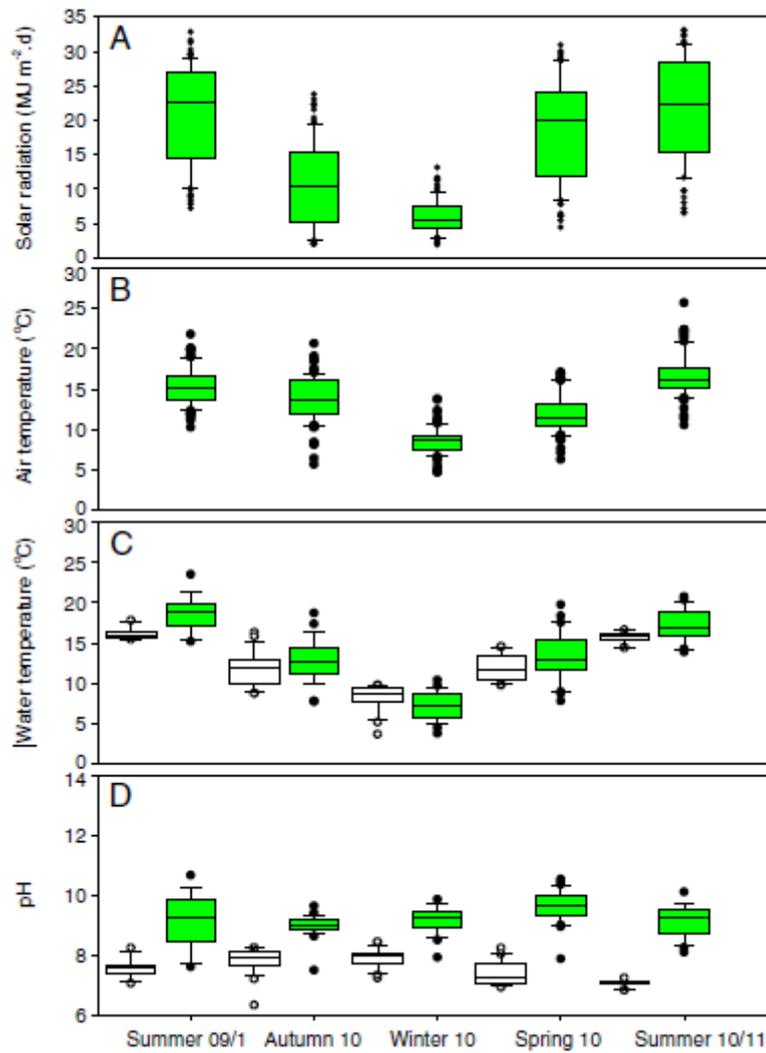


Figura 5. Condiciones ambientales (radiación solar, $\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$, la temperatura del aire, $^{\circ}\text{C}$) y afluente residual y condiciones físicas del agua en los reactores (temperatura, $^{\circ}\text{C}$ y pH) medidos durante los 15 meses de operación (diciembre 2009 a febrero 2011) (límite de caja inferior, percentil 25; línea interior, la mediana; límite superior, percentil 75; bigote inferior, percentil 10; superior, percentil 90; puntos, datos periféricas)

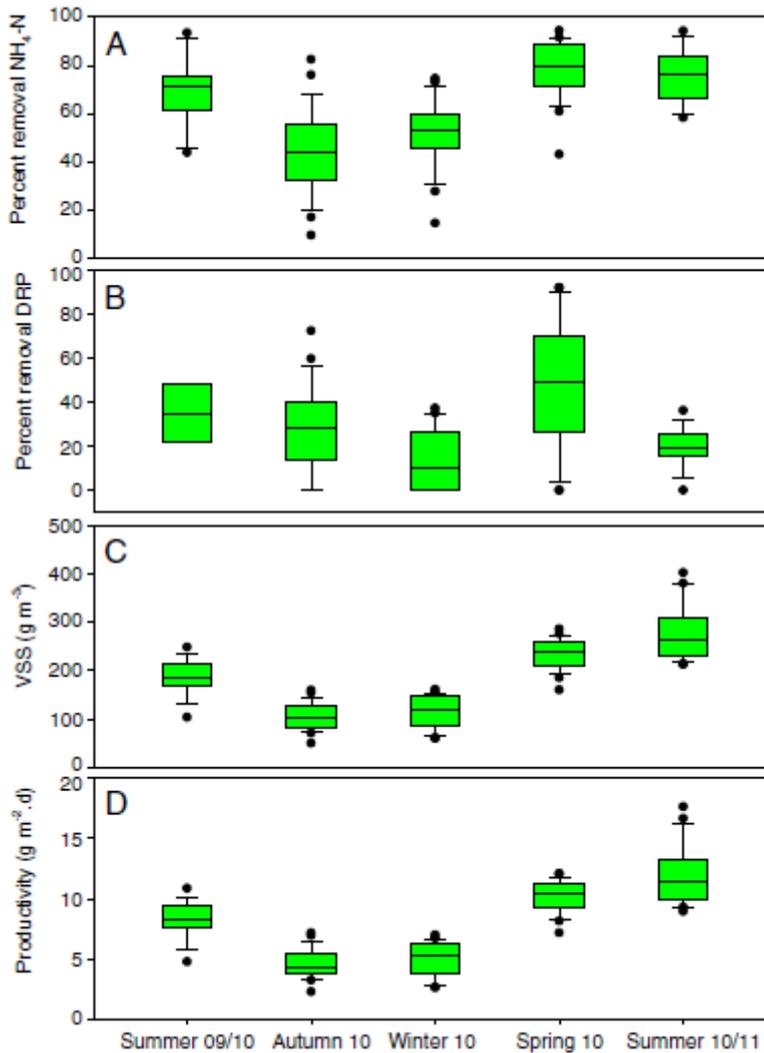


Figura 6. Porcentaje de eliminación de nitrógeno amoniacal y fósforo reactivo disuelto, concentración de sólidos volátiles en suspensión (g/m^3) y productividad algal/bacteriana ($\text{g/m}^2 \cdot \text{d}$) de los cuatro reactores durante los 15 meses de operación (diciembre 2009 a febrero 2011)(límite de caja inferior, percentil 25; línea interior, la mediana; límite superior, percentil 75; bigote superior, percentil 10, superior, percentil 90; puntos, datos periféricos)

Se construirán cuatro reactores de 1,25 ha de tierra compacta, separados por bermas con pendientes externas e internas de una proporción 2:1 horizontal/vertical. Las bermas se protegerán de la erosión del viento y las olas y el crecimiento de las malas hierbas con una cubierta delgada (aproximadamente de 5 mm) de geotextil no tejido asegurada por enterramiento en una zanja en la parte inferior al pie de cada berma. Se colocarán dos tabiques deflectores (1 mm de membrana de HDPE soportada por postes de 1/4) equidistantes a lo largo y a lo ancho de cada esquina del estanque. Cada reactor estará provisto de un único agitador de rueda de paletas para mezclar el agua residual, con una velocidad horizontal promedio del agua de 0.2 m/s, la cual será suficiente para mantener los flóculos algales/bacterianos en suspensión. Cada agitador tendrá 7 m de largo con 0.8 m de hojas construidas con

acero galvanizado y pintado. Los cojinetes axel se apoyarán sobre plintos de hormigón en cualquier extremo de una estación de hormigón revestido de rueda de paletas con una depresión curva poco profunda debajo de las ruedas de paletas que efectivamente se convierte en una bomba de desplazamiento positivo. Las ruedas de paletas se accionarán mediante una caja de cambios de un motor trifásico de 6 kW.

Cada reactor incluirá un foso para la adición de CO₂. El CO₂ se tomará de los gases de escape del generador y se transferirá al conjunto de reactores mediante una soplante a través de una tubería. Se controlará la adición de CO₂ a cada reactor manteniendo el pH en un rango de 7,5 a 8,5. El sumidero de adición de carbono será de hormigón y atravesará el ancho del canal.

Además, una parte del carbono procedente de los gases de escape del generador, tras pasar por una columna de absorción, se suministrará en forma de disolución carbonato/bicarbonato.

En las Tablas 4 y 5 se muestra un resumen de las dimensiones y parámetros relativos a la circulación del cultivo en cada reactor, así como la productividad del conjunto de reactores.

Tabla 4. Resumen de las dimensiones del reactor y parámetros relativos a la circulación del cultivo en cada reactor.

Profundidad, m	0,3
Profundidad activa, m	0,2
Superficie activa, m ²	12.500
Volumen activo, m ³	2.500
Ancho del canal, m	17,68
Ancho del reactor, m	35,36
Longitud, m	353,55
Pendiente interna de la berna (horiz/vert)	2
Pendiente externa de la berma (horiz/vert)	2
Caudal desplazado, m ³ /s	0,707
Factor de Manning, n	0,02
Eciciencia paddle Wheel	0,5
Potencia, Kw	1,39

Tabla 5. Productividad del conjunto de reactores

Capacidad de producción (kg/año)	300.000
Tiempo de operación (días/año)	300
Productividad por unidad de superficie (kg/m ² .día)	0,02
Productividad volumétrica (kg/m ³ .día)	0,1

5. BIBLIOGRAFÍA

- Oswald W.J. Microalgal Biotechnology. Cap.14 Large-scale algal culture systems (engineering aspects), pag. 357-394.
- Microalgal Biotechnology: Potential and Production. Ed. by Posten, Clemens, Walter, Christian. Cap. 9 Principles of photobioreactor design. Acién Fernández, F. G., Fernández Sevilla, J. M., Molina Grima, E.
- Craggs Rupert, Sutherland Donna, Campbell Helena. New Zealand, 2012. Hectare-scale demonstration of high rate algal ponds for enhanced wastewater treatment and biofuel production.

ANEJO N° 4
DIGESTIÓN
ANAEROBIA

ÍNDICE

- 1. INTRODUCCIÓN**
- 2. LAS MICROALGAS COMO MATERIA PRIMA PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS**
- 3. VENTAJAS Y DESVENTAJAS**
- 4. ETAPAS**
- 5. PARÁMETROS DE DISEÑO**
 - 5.1. Bases por habitante**
 - 5.2. Carga de sólidos**
 - 5.3. Tiempo de retención hidráulica**
 - 5.4. Tiempo de retención de sólidos**
 - 5.5. Temperatura**
 - 5.6. pH**
 - 5.7. Eliminación de sólidos volátiles**
 - 5.8. Producción de biogás**
- 6. TIPOS DE PROCESOS**
 - 6.1. Procesos sin enriquecimiento de biomasa**
 - 6.2. Procesos con enriquecimiento de biomasa**
- 7. DIMENSIONAMIENTO**
 - 7.1. Tanque**
 - 7.2. Cubierta**
 - 7.3. Sistema de agitación**
- 8. CALEFACCIÓN DEL DIGESTOR**
- 9. APROVECHAMIENTO DEL BIOGÁS**
- 10. DISEÑO DEL DIGESTOR ANAEROBIO**
- 11. BIBLIOGRAFÍA**

1. INTRODUCCIÓN

La energía generada a partir de combustibles fósiles representa aproximadamente el 60% del total de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero antropogénicos. Además, se están estudiando posibles alternativas para la generación de energía. Una opción consiste en el uso de biomasa como materia prima para producir biogás mediante digestión anaerobia. El biogás se puede producir a partir de una amplia gama de residuos sólidos o líquidos, así como de cosechados de biomasa. Las microalgas, por ejemplo, son biomasa adecuada debido a su contenido relativamente alto de lípidos, almidón y proteínas y la ausencia de lignina.

La biomasa microalgal tiene varias ventajas sobre los cultivos energéticos convencionales. Las microalgas son capaces de duplicar su biomasa en menos de 24 horas y no necesitan terreno de cultivo fértil, por lo que no compiten con los cultivos tradicionales. Además, las algas no necesitan necesariamente agua dulce, también pueden ser cultivadas en agua salada o residual. No necesitan herbicidas o pesticidas y, aunque las microalgas crecen en medios acuáticos, utilizan menos agua que los cultivos terrestres. Además, las microalgas tienen en común con los cultivos terrestres la cualidad de que su conversión en biogás se pueden realizar sin la producción neta de gases de efecto invernadero. El CO₂ liberado durante la combustión del biogás es tomado de la atmósfera a través a través de la fotosíntesis. Por otro lado, la mayor desventaja de la biomasa es el elevado gasto de infraestructura y la considerable demanda de energía para el cosechado y extracción de agua de los cultivos algales relativamente diluidos.

1. LAS MICROALGAS COMO MATERIA PRIMA PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

La composición química bruta de las microalgas es altamente dependiente de factores ambientales tales como la intensidad de la luz temperatura y disponibilidad de nutrientes. Generalmente, las microalgas contienen proporciones variables de proteínas, lípidos, carbohidratos, ácidos nucleicos, pigmentos y vitaminas. Las proteínas y lípidos se encuentran en cantidades más altas, es decir, las proteínas representan el 10-60% de la materia seca y los lípidos desde el 2% hasta el 90% de la materia seca. Los carbohidratos en las microalgas en forma de almidón, glucosa, azúcares y otros polisacáridos están presentes en concentraciones que van desde el 5% al 50% de materia seca. Además, las microalgas contienen sustancias valiosas tales como pigmentos, largas cadenas de ácidos grasos poliinsaturados, como eicosapentaenoico (EPA) y decosaheptaenoico (DHA) y vitaminas como A, B1, B2, B6, B12, C, E, nicotina, biotina, ácido fólico y ácido pantoténico.

Los lípidos son un sustrato atractivo para la digestión anaerobia debido a la alta producción teórica de metano, expresada normalmente como litros de metano por gramo de sólidos volátiles. En la práctica la producción de metano se encuentra en el rango de 0.85 L de metano / g de sólidos volátiles (unos 0.5 L de biogás/g de sólidos volátiles) sometidos a digestión. Desafortunadamente, para este grado de digestibilidad se requieren tiempos de retención de 20 a 30 días, lo que representa costes significativos en el caso de aplicaciones a gran escala. Varios investigadores han señalado que el principal problema de la digestión de la biomasa microalgal sin un pretratamiento es la resistencia de la pared celular, aunque la propia célula ya no esté viva. En consecuencia, parece que a los microorganismos en los reactores de biometanización convencionales no les da tiempo a hidrolizar los lípidos y la pared celular.

El aspecto positivo de la digestión es que el gas tiene un alto contenido energético, es decir, aproximadamente un 60 % de metano. Además, normalmente el biogás no contiene azufre, el cual causa la corrosión de los generadores.

Hasta ahora se ha trabajado muy poco sobre la digestión anaerobia de microalgas de agua dulce y casi nada de microalgas marinas. Mediante ensayos a pequeña escala de laboratorio se tienen datos de tasas de carga de unos 2 g de sólidos volátiles/L.día y eficiencias en el rango de 20 a 80%. A partir de esto, se puede observar que existe la necesidad de mejorar las eficiencias de conversión. Hasta ahora la investigación se ha centrado en unas pocas especies de microalgas. Teniendo en cuenta el número total de especies de microalgas, se justifica la búsqueda de especies altamente digestibles.

2. VENTAJAS Y DESVENTAJAS

La digestión anaerobia ofrece muchas ventajas sobre otros métodos de estabilización de lodos, entre las que se incluyen:

- El gas metano producido es una fuente de energía renovable. En la mayoría de los casos la energía producida excede la energía necesaria para mantener la temperatura para la digestión del lodo. El exceso de metano se puede utilizar para la calefacción de edificios, funcionamiento de los motores de sopladores de aireación, o generación de electricidad.
- La reducción de la masa total de lodos a través de la conversión de materia orgánica principalmente a metano, dióxido de carbono, y agua. Se elimina entre el 30 y el 65% de los sólidos del lodo crudo.
- Los sólidos digeridos generalmente no emiten olores desagradables.
- Los biosólidos digeridos contienen nutrientes tales como nitrógeno y fósforo, y materia orgánica que puede mejorar la fertilidad y textura de los suelos.

- Se puede alcanzar una alta tasa de distribución de patógenos, especialmente con el proceso de digestión termofílica.

Las principales desventajas de la digestión anaerobia de lodos es la siguiente:

- El coste capital es alto porque se necesitan grandes tanques de digestión cerrada con sistemas para la alimentación, calefacción y mezcla del lodo.
- Se necesitan reactores grandes que proporcionen tiempos de retención hidráulica por encima de 10 días para lograr una estabilización efectiva del fango. Este proceso lento de digestión también limita la velocidad con la cual el sistema puede ajustarse a cambios en las cargas de residuos, temperatura, y otras condiciones ambientales.
- Los microorganismos involucrados en la digestión anaerobia son sensibles a pequeños cambios ambientales, por lo que se requiere el control del proceso y el seguimiento de los resultados.
- El proceso produce una corriente secundaria de mala calidad. El sobrenadante suele tener una alta demanda de oxígeno y altas concentraciones de sólidos en suspensión, nitrógeno y fósforo. Esto podría hacer necesario el uso de tratamientos adicionales para eliminar el nitrógeno y el fósforo de las aguas residuales.

3. ETAPAS

La digestión anaerobia implica varias etapas sucesivas de reacciones químicas y bioquímicas en las que intervienen enzimas y cultivos mixtos de microorganismos. El proceso comprende tres fases generales de degradación: hidrólisis, acidogénesis, y metanogénesis. La Figura 1 es una representación simplificada de las reacciones que tienen lugar durante la digestión anaerobia.

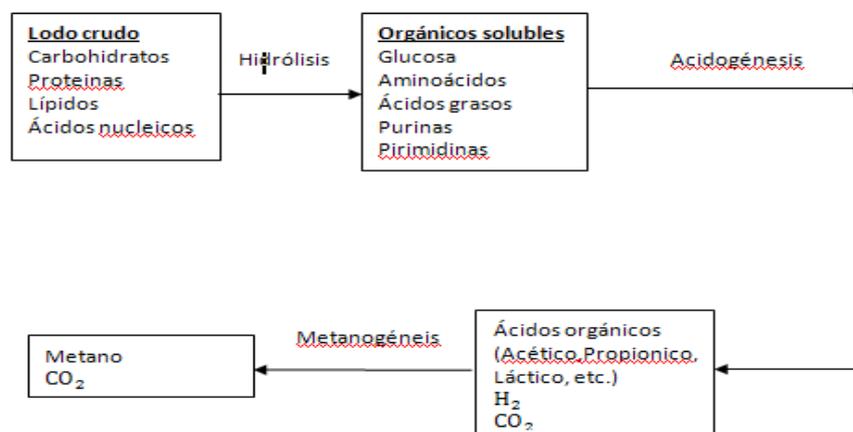


Figura 1. Esquema de reacción de la digestión anaerobia

- Hidrólisis: se produce por enzimas extracelulares que transforman compuestos de elevado peso molecular (carbohidratos, proteínas, aminoácidos...) en compuestos que pueden servir como fuente de energía y de carbono celular, siendo el producto final del proceso ácidos orgánicos volátiles.
- Acidogénesis: es la conversión bacteriana de los compuestos producidos en la primera etapa en compuestos intermedios identificables de menor peso molecular.
- Metanogénesis: es la conversión bacteriana de los productos intermedios en productos finales más simples. Por un lado se produce una gasificación produciéndose fundamentalmente dióxido de carbono y metano y por otro lado se produce una mineralización por la cual la materia orgánica soluble es también descompuesta obteniéndose un producto final inerte.

4. PARÁMETROS DE DISEÑO

5.1. Bases por habitante

Tradicionalmente se han utilizado criterios de carga empíricos para determinar el volumen de los digestores anaerobios. El más viejo y simple de los criterios es el porcentaje de volumen por habitante, es decir, basado en la población servida por la planta de tratamiento. Los factores de carga por habitante deben usarse sólo para una estimación inicial de las dimensiones porque se supone implícitamente un valor para parámetros tan importantes como la carga residual por habitante y la digestibilidad del lodo. Estos parámetros varían ampliamente de una comunidad a otra y no pueden predecirse con precisión. Los valores mostrados en la Tabla 1 se deben aumentar si el afluente de la planta contiene considerables cargas de residuos industriales.

Tabla 1. Valores medios de diseño para digestores anaerobios mesófilos

Parámetro	Unidades	Valor
Volumen	m ³ /habitante	
Lodo primario		0.03-0.06
Lodo primario + lodo de filtros percoladores		0.07-0.09
Lodo primario +lodo activo		0.07-0.11
Tasa de carga de sólidos	Kg VSS/ m ³ . día	1.6-3.2
Tiempo de retención de sólidos	días	15-20
Concentración del lodo	%	
Lodo primario + lodo biológico		4-7
Lodo digerido		4-7

5.2. Carga de sólidos

La carga de sólidos es la cantidad de materia volátil alimentada al digestor por unidad de volumen y tiempo. En la tabla se muestra un intervalo típico de tasas de carga. Los criterios de diseño de carga generalmente se basan en condiciones de carga sostenida: por lo general, el mes de mayor producción de sólidos. Se debe considerar que las cargas de sólidos excesivamente bajas se traducen en grandes volúmenes de digestor, los cuales podrían ser más caros de operar porque podrían no producir suficiente gas para proporcionar la energía necesaria para calentar el contenido del digestor a la temperatura deseada.

5.3. Tiempo de retención hidráulica

Se define como el tiempo medio de estancia del caudal de fango, en el tanque de estabilización:

$$t_R = \frac{\text{Volumen de estabilización}}{\text{Caudal diario de fango que entra en la cuba}} \quad (1)$$

En cuanto a la influencia del tiempo de retención en el rendimiento de la estabilización, puede afirmarse que a igualdad de los demás factores, la reducción de las materias volátiles, es decir, el rendimiento, es más elevado, cuanto mayor sea el tiempo de retención.

El proceso de cálculo seguido habitualmente, consiste en una vez fijado el rendimiento que se desea obtener, ese selecciona el tiempo de retención necesario, el cual nos servirá para fijar el volumen del tanque, una vez conocido el caudal de fangos a estabilizar.

5.4. Tiempo de retención de sólidos

La digestión de los sólidos volátiles es dependiente del tiempo. La consideración más importante en el diseño de un digestor es que a las bacterias les dé tiempo a reproducirse. Para conseguir un tiempo suficiente, el parámetro clave en la determinación del volumen del digestor es el tiempo de retención de sólidos, que es la media del tiempo durante el cual la masa microbiana es retenida en el digestor. Operacionalmente, puede definirse como la masa total de sólidos en el digestor dividida por la masa de sólidos retirada diariamente. En los digestores anaerobios sin recirculación o extracción del sobrenadante (por ejemplo, la digestión de una fase y alta tasa), el tiempo de retención de sólidos es equivalente al tiempo de retención hidráulica).

Para el diseño de digestores de alta tasa se recomiendan tiempos de retención de sólidos de 15 a 20 días. Este tiempo se determina con la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{\theta_{\min}} = \frac{Y \cdot K \cdot S_{\text{in}}}{K_S + S_{\text{in}}} - K_e \quad (2)$$

$$\theta_{\text{diseño}} = 2.5 \cdot \theta_{\min} \quad (3)$$

θ_{\min} : Tiempo mínimo de retención, días.

Y: Coeficiente cinético de rendimiento máximo.

K: Tasa máxima específica de consumo de sustrato.

T: Temperatura.

K_S : Constante de saturación media.

S_{in} : Concentración de sustrato biodegradable.

K_e : Coeficiente de degradación endógena.

$\theta_{\text{diseño}}$: Tiempo de retención de diseño.

La Tabla 2 muestra los valores recomendados para estos parámetros cinéticos. También pueden calcularse mediante las siguientes ecuaciones:

$$K = 6.67 \cdot (1.035^{T-35}) \quad (4)$$

$$K_S = 1.8 \cdot (1.112^{T-35}) \quad (5)$$

$$K_e = 0.03 \cdot (1.035^{T-35}) \quad (6)$$

Tabla 2. Valores recomendados para un fango mixto urbano

PARAMETRO	UNIDAD	VALORES
Y	(mg SSV/mg DBO ₅)	0,04-0,08
Kd	días ⁻¹	0,02-0,05
K	g/g día	6-10
Ks	mg ^l	150-600

4.5. Temperatura

Los organismos mesófilos actúan a temperaturas comprendidas entre los 12°C y 35°C, optimizándose el proceso entre los 29 y 33 °C. Los termófilos trabajan entre los 37°C y los 85°C, con un óptimo en las proximidades de los 55°C.

Como la velocidad de reacción de las reacciones bioquímicas aumenta con la temperatura, la digestión termófila se lleva a cabo a una velocidad muy superior a la de la digestión mesófila.

Las ventajas de la digestión termófila son básicamente:

- Menor volumen necesario
- Mejora de las características de deshidratación del fango
- Aumento de la destrucción de bacterias

Los inconvenientes que presenta son:

- Mayores necesidades energéticas para el calentamiento
- Peor calidad del sobrenadante obtenido
- Menor estabilidad del proceso

Por estas razones, el empleo en la práctica de la digestión termófila está muy limitado.

4.6. pH

El pH depende de las reacciones ácido-base. Dentro del proceso de digestión no curren multitud de estas reacciones. Por lo tanto, el pH es un índice global de lo que ocurre en el digestor a dicho nivel.

No debe olvidarse que las bacterias, actuando en el proceso pueden ser inhibidas por ciertos valores del pH. Así, las bacterias formadoras de metano tienen un pH óptimo comprendido entre 6.8 y 7.4, admitiendo valores funcionales entre 6.8

y 7.8.; también se ha dicho que por debajo de 6.2 su desarrollo es totalmente inhibido.

Las bacterias formadoras de ácidos tienen por el contrario, un campo más amplio para su desarrollo. Su actividad produce un descenso en el valor del pH al producir ácidos.

En consecuencia, para que se desarrolle bien el proceso de digestión es necesario mantener un equilibrio entre las actividades de las dos poblaciones bacterianas (producción y consumo de ácidos).

4.7. Eliminación de sólidos volátiles

Normalmente se asume que la eliminación de sólidos tiene lugar únicamente en la fracción de sólidos volátiles. Por lo tanto, la medida más común del grado de estabilización es el porcentaje de sólidos volátiles eliminados. El porcentaje de sólidos volátiles eliminados en los digestores anaerobios de alta tasa está comprendido entre 50 y 65%. La reducción alcanzada en una aplicación particular depende de las características del lodo y de los parámetros de operación. Para un sistema de digestión de alta carga se aplica la siguiente ecuación empírica:

$$v_d = 13.7 * \ln \theta_{\text{diseño}} + 18.9 \quad (7)$$

v_d : Porcentaje de eliminación de sólidos volátiles, %.

$\theta_{\text{diseño}}$: Tiempo de retención de sólidos de diseño, días.

4.8. Producción de biogás

La generación de biogás en el digestor es el resultado directo de la eliminación de sólidos volátiles. En el caso de lodos de aguas residuales, la producción de gas varía de 0.8 a 1.1 m³/kg SSV. Un proceso de digestión anaerobia produce un gas que contiene aproximadamente entre el 65 y el 75% de metano, entre el 30 y el 35% de dióxido de carbono y niveles muy bajos de nitrógeno, hidrógeno y sulfuro de hidrógeno.

5. TIPOS DE PROCESOS

6.1. Procesos sin enriquecimiento de biomasa

Pueden dividirse a su vez en tres grandes grupos

- Digestión en etapa única con mezcla completa

El fango se mezcla íntimamente mediante recirculación de gas, mezcladores mecánicos, bombeo o mezcladores con tubos de aspiración y se calienta para conseguir optimizar la velocidad de digestión.

Este tipo de tratamiento es el más extendido en España y básicamente se caracteriza por los siguientes parámetros:

- Proceso en etapa única
- Temperatura en el rango mesófilo (aproximadamente 35°C)
- Mezcla completa de todo el fango varias veces al día
- Alimentación con fango crudo espesado
- Sin retirada de sobrenadantes

Las formas más sencillas de este tipo de procesos son aquellas en las que no existe mezcla completa del fango dentro del sistema, produciéndose por tan tanto una estratificación, formándose una capa de sobrenadante por encima del fango digerido.

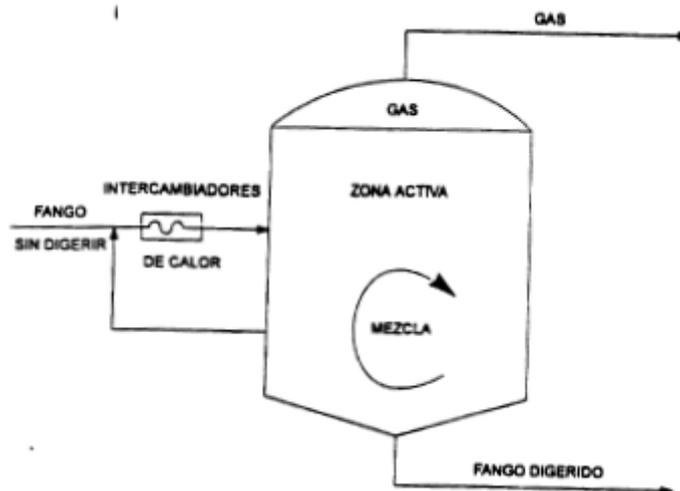


Figura 2. Digestor en etapa única con mezcla completa

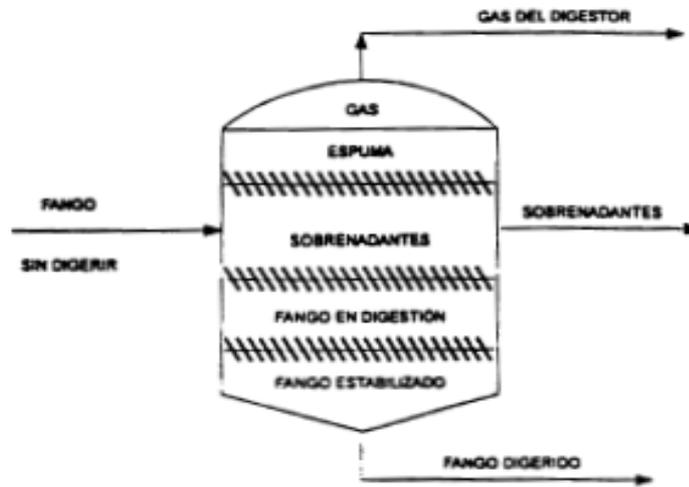


Figura 3. Digestor en etapa única sin mezcla

- Digestión en doble etapa

En este proceso el primer tanque se utiliza para la digestión y se equipa con los dispositivos necesarios para el mezclado. El segundo tanque se utiliza para el almacenamiento y concentración del fango digerido y para la concentración de un sobrenadante relativamente clarificado.

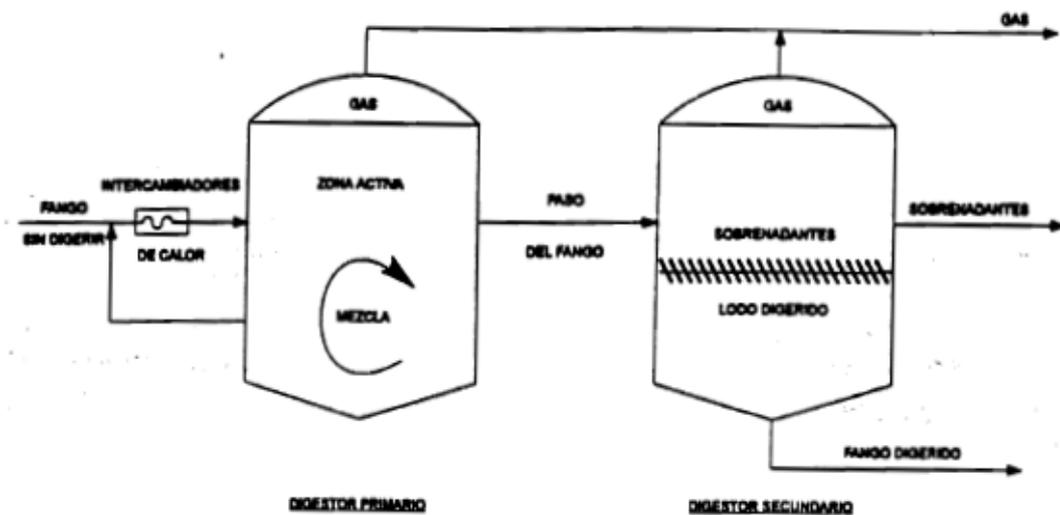


Figura 4. Digestión en doble etapa

- Digestión en dos fases

En este proceso mediante el establecimiento de unas condiciones específicas se consigue separar en dos reactores los dos tipos de microorganismos actuantes. En el primer reactor tienen lugar los procesos de hidrólisis y acidificación y en el segundo reactor tienen lugar los procesos de metanogénesis.

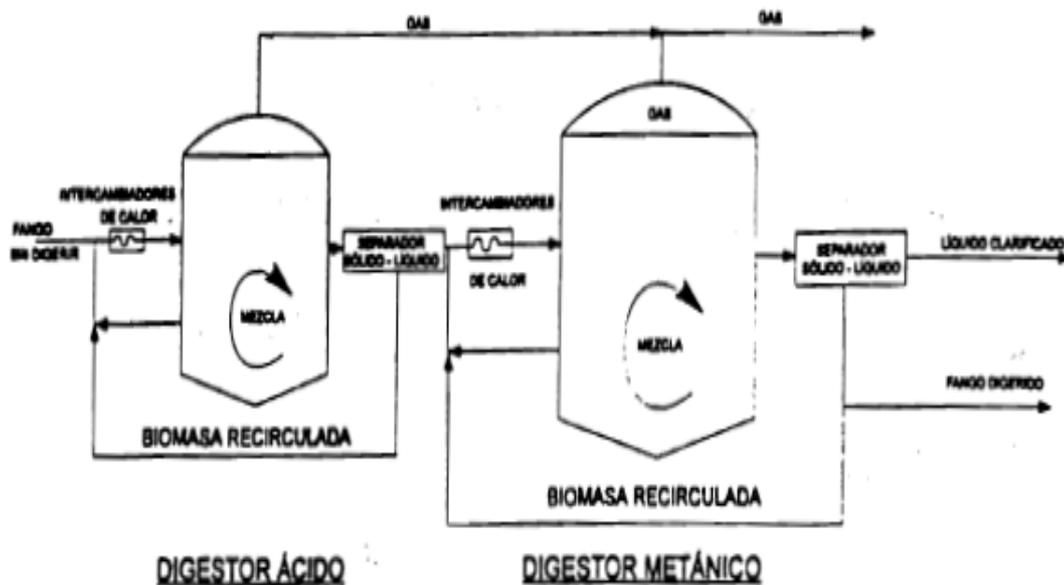


Figura 5. Digestión en dos fases

6.2. Procesos con enriquecimiento de biomasa

El objetivo de las últimas tecnologías desarrolladas en el campo de la digestión anaerobia es conseguir incrementar los rendimientos de reducción de la materia orgánica consiguiendo una mayor estabilidad y menores costes que en los procesos convencionales. Este aumento del rendimiento se pretende conseguir a través del enriquecimiento con biomasa activa de los digestores.

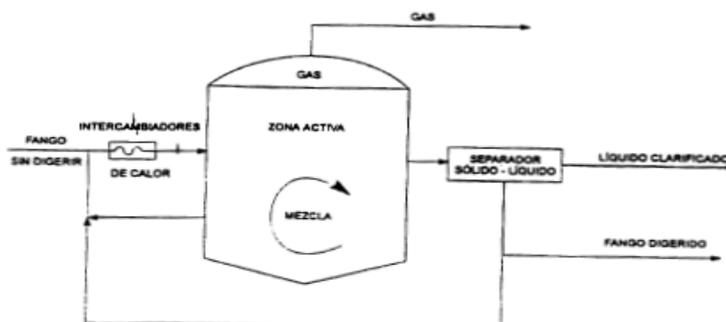


Figura 6. Digestor con enriquecimiento de biomasa

7. DIMENSIONAMIENTO

Los equipos de calefacción y mezcla varían según el fabricante. Los sistemas de dos fases y alta tasa se han utilizado desde 1950. Sin embargo, los digestores modernos se diseñan como sistemas de una única fase y alta tasa alimentados con altas concentraciones de sólidos (de 5 a 7%) sin extracción del sobrenadante.

7.1. Tanque

Los digestores anaerobios pueden ser rectangulares, cilíndricos o en forma de huevo. Los tanques rectangulares ya no se utilizan debido a dificultad para lograr una mezcla uniforme. En la Figura 7 se muestran esquemas simplificados del diseño cilíndrico y en forma de huevo.

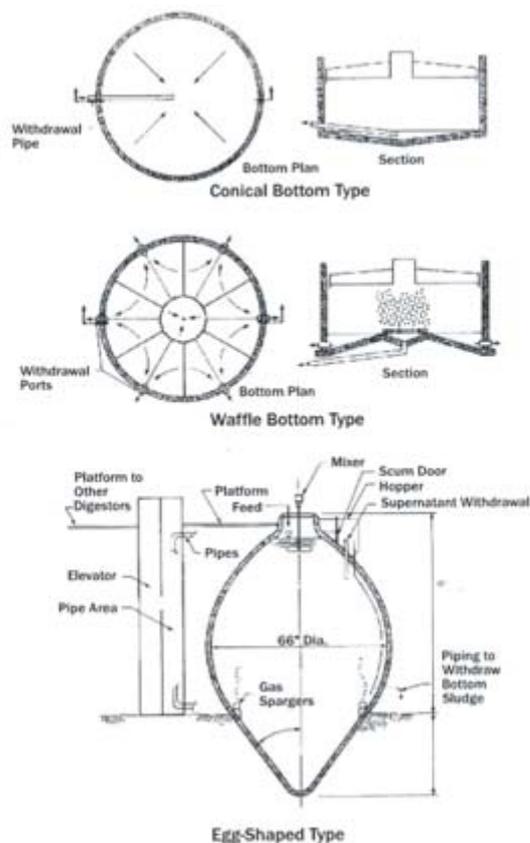


Figura 7. Diseño de un tanque de digestión anaerobia

El diseño más común en Estados Unidos consiste en un cilindro vertical bajo de 6 a 38 m de diámetro y una profundidad de 6 a 14 m. Los tanques suelen ser de hormigón, aunque también es frecuente el acero en los tamaños más pequeños. El fondo suele ser cónico con pendientes entre 1:3 y 1:6. El lodo digerido se extrae por el fondo del tanque.

7.2. Cubierta

Los digestores cilíndricos se cubren para contener los olores, mantener la temperatura de operación, mantener la condición anaerobia y recoger el gas. Las cubiertas se pueden clasificar según sean fijas o flotantes. La Figura 8 muestra varios tipos de cubiertas fijas y flotantes. Las cubiertas cerradas ya sea en forma de cúpula o plana se fabrican con hormigón armado, acero, o fibra de vidrio reforzada con poliéster. Los techos de hormigón son susceptibles de agrietarse y por lo tanto algunas veces se alinean con cloruro de polivinilo (PVC) o placa de acero para contener el gas. Generalmente, los digestores de cubierta fija operan con el fin de mantener un nivel de agua constante en el tanque compensando la extracción del lodo digerido con la adición de lodo crudo. Esto elimina la posibilidad de que entre aire en el tanque y se produzca una mezcla explosiva de gas y oxígeno.

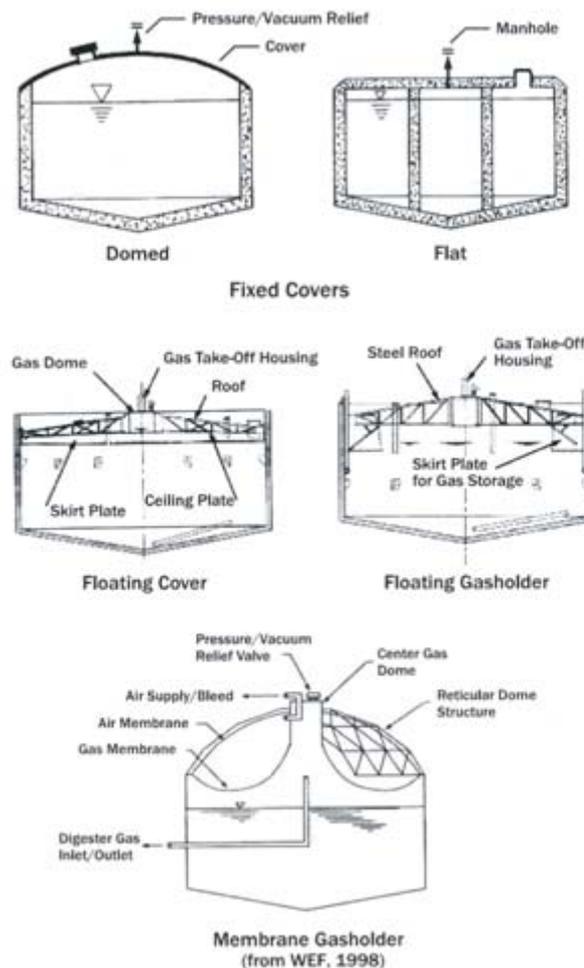


Figura 8. Cubiertas de un digestor anaerobio

8. Calefacción del digestor

Las necesidades de calor de un digestor vienen dadas por la cantidad de calor necesario para:

1. Aumentar la temperatura del fango alimentado hasta alcanzar la temperatura mantenida en el interior del digestor
2. Compensar las pérdidas de calor que se producen a través de las paredes, fondo y cubierta del digestor
3. Compensar las pérdidas que se puedan producir en las conducciones que comunican la fuente de calor con el tanque de digestión

El fango se calienta por bombeo de fango y sobrenadante del digestor a través de intercambiadores de calor situados en el exterior del tanque y recirculación del mismo, o por circulación a través de intercambiadores de calor situados en el interior del tanque.

En los casos en los que se instalan intercambiadores de calor exteriores, el fango se bombea a alta velocidad a través de unos tubos alrededor de los cuales circula agua a gran velocidad. La circulación promueve grandes turbulencias a ambos lados de la superficie de transferencia de calor, lo cual permite mayores coeficientes de transferencia de calor y mayor intercambio. Otra ventaja del uso de intercambiadores de calor exteriores es que permite el calentamiento, la mezcla íntima y la siembra con fango digerido del fango crudo frío antes de su entrada al digestor. Para mantener la eficiencia en la transferencia de calor, los intercambiadores de calor se deben limpiar periódicamente.

El calentamiento de los tanques de digestión también se ha llevado a cabo mediante sistemas de calefacción internos. Algunas de las configuraciones empleadas incluyen tuberías montadas en la parte inferior de las paredes del digestor y tubos de mezclado equipados con camisas por donde se hace circular agua caliente. Debido a los problemas de funcionamiento inherentes a este tipo de sistemas, su uso no está muy extendido. Los problemas observados en el uso de este tipo de sistemas incluyen la formación de tortas del fango sobre la superficie de transferencia de calor, y la imposibilidad de inspeccionar y reparar los equipos sin vaciar los tanques.

En el cálculo de la energía necesaria para el calentamiento del fango entrante hasta alcanzar la temperatura interior del digestor, se supone que el calor específico de la mayor parte de los fangos es el mismo que el del agua. Se ha comprobado que, a efectos de cálculo, esta hipótesis es aceptable. Las pérdidas de calor a través de las paredes, fondo y cubierta del digestor, se calculan utilizando la siguiente expresión:

$$q = K \cdot S \cdot \Delta T \quad (8)$$

q: pérdida de calor, Kcal

K: coeficiente global de transmisión de calor, Kcal/h.m².°C

S: área de la sección transversal a través de la cual se produce la pérdida de calor, m²

ΔT: diferencia de temperatura entre el interior y el exterior, °C

El coeficiente de transmisión de calor viene determinado por la siguiente expresión:

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{e_1}{\lambda_1} + \dots + \frac{e_n}{\lambda_n} + \frac{1}{\alpha_2} \quad (9)$$

α₁: kilocalorías transmitidas de un fluido de temperatura T₁ a la superficie S₁ en una hora para un grado centígrado de diferencia de temperatura y para un metro cuadrado de superficie

α₂: kilocalorías transmitidas de la superficie S₂ al fluido de temperatura T₂ en una hora para un grado centígrado de diferencia de temperatura y para un metro cuadrado de superficie

e₁: espesor de la pared en m

λ₁: kilocalorías que pasan en una hora a través de un metro cuadrado de superficie del material cuando su espesor es de un metro y la diferencia de temperatura entre sus caras es de un grado centígrado

Para el diseño de un digestor pueden adoptarse valores de las Tablas 4 y 5

Tabla 4. Valores del coeficiente α

Superficie en contacto	Coficiente α (kcal/h m ² °C)
Pared – fango	300
Pared – Aire	20
Pared - Suelo	50

Tabla 5. Valores del coeficiente λ

Material de construcción	Coficiente λ (kcal/h m ² °C)
Hormigón armado	1,4
Hormigón en masa	1,1
Espuma de poliuretano	0,02
Aire	0,02
Fábrica de ladrillo	0,35
Mortero de cemento	0,60

9. APROVECHAMIENTO DEL BIOGÁS

Un digestor anaerobio bien operado produce más gas del requerido para suministrar calor al digestor. En las plantas de tratamiento más pequeñas, el exceso de gas producido se quema en un quemador de gas para evitar olores. En las instalaciones de tratamiento grandes, las alternativas de aprovechamiento del biogás comúnmente aceptadas son:

- a) Combustión directa para la producción del calor.
- b) Motores de combustión interna, con aprovechamiento de la potencia mecánica o eléctrica y con o sin recuperación de calor (cogeneración).
- c) Turbinas de gas o vapor, con aprovechamiento de la potencia eléctrica y con o sin recuperación de calor.
- d) Vehículos, con recuperación de la energía mecánica.
- e) Enganche a la red de gas natural.
- f) Producción de sustancias químicas.

El gas del digestor, que contiene entre un 65 y un 75% de metano, tiene un poder calorífico inferior de aproximadamente 22.400 kJ/m^3 . El poder calorífico inferior es el poder calorífico del gas cuando el vapor de agua formado durante la combustión no se condensa.

10. DISEÑO DEL DIGESTOR ANAEROBIO

Datos de partida:

$$\text{Sólidos totales en lodo primario: } SST1 := 20 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Sólidos totales en lodo secundario: } SST2 := 20.6378 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Sólidos volátiles en el fango primario (80%): } SSV1 := 0.8 \cdot SST1 = 16 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Sólidos volátiles en el fango secundario (90%): } SSV2 := 0.9 \cdot SST2 = 18.574 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Caudal de lodo primario: } Q1 := 8.67 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{day}}$$

$$\text{Caudal de lodo secundario: } Q2 := 49.4441 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{day}}$$

$$\text{Caudal masico de lodo: } Q_0 S S T_0 = SST1 \cdot Q1 + SST2 \cdot Q2 = 1.194 \times 10^3 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

$$\text{Caudal lodo a digerir: } Q_0 := Q1 + Q2 = 58.114 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{day}}$$

$$\text{Concentración de sólidos totales en el fango a digerir: } S S T_0 := \frac{S S T1 \cdot Q1 + S S T2 \cdot Q2}{Q_0} = 20.543 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Concentración de sólidos volátiles en el fango a digerir: } S S V_0 := \frac{S S V1 \cdot Q1 + S S V2 \cdot Q2}{Q_0} = 18.19 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Sólidos volátiles que entran diariamente: } S S V_0 \cdot Q_0 = 1.057 \times 10^3 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

- **Tiempo de retención de los sólidos**

Temperatura: $T := 32$

Concentración de sólidos volátiles que entran: $S S V_0 := 18.19 \frac{\text{g}}{\text{L}}$

El sustrato a digerir es la biomasa

Coeficiente de rendimiento $Y := 0.05 \frac{M_{\text{bacterias anaerobias}}}{M_{\text{SSV}}}$

Concentración de sustrato biodegradable: $S_{in} := S S V_0 = 18.19 \frac{\text{g}}{\text{L}}$

Coeficiente de descomposición endógena, $k_e := 0.03 \cdot 1.035^{T-35}$

Concentración de sustrato, K_s : $K_s := 1.8 \cdot 1.112^{T-35}$

Tasa máxima de utilización del sustrato por unidad de masa de microorganismos:

$$K := 6.67 \cdot 1.035^{T-35}$$

Tiempo mínimo de retención los sólidos:

$$t_{\min} := \frac{1}{\left(\frac{Y \cdot K \cdot S_{in}}{K_s + S_{SV0}} - K_e \right)} \quad t_{\min} = 3.944 \text{ días}$$

Tiempo de retención $t_{\text{diseño}} := 2.5 \cdot t_{\min}$ $t_{\text{diseño}} = 9.86$ días

$$t_{\text{diseño}} := 10 \text{ días}$$

En los digestores anaerobios sin recirculación o extracción del sobrenadante, el tiempo hidráulico coincide con el de retención de sólidos

- **Volumen del digestor**

$$V := Q_0 \cdot t_{\text{diseño}} \cdot \text{day} = 581.141 \cdot \text{m}^3$$

- **Porcentaje de eliminación de sólidos volátiles**

$$v_d := 13.7 \cdot \ln(t_{\text{diseño}}) + 18.9 \quad v_d = 50.445 \quad \%$$

- **Dimensiones del digestor:**

$$\text{Volumen activo del digestor: } V = 581.141 \cdot \text{m}^3$$

La mayoría de los digestores son cilíndricos, con fondos en forma de cono invertido.
El diámetro es de 6-35 m.

Asumiendo 10 m de diámetro del tanque: $D := 10 \cdot \text{m}$

$$\text{Superficie del tanque: } A := \frac{D^2}{4} = 78.54 \text{ m}^2$$

$$\text{Altura activa: } h := \frac{V}{A} = 7.399 \text{ m} \quad (\text{Entre 6 y 14m})$$

$$h := 8 \cdot \text{m}$$

Altura inclinada parte superior: $h_2 := 1 \cdot \text{m}$

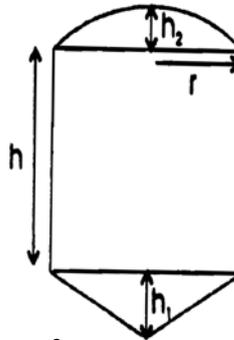
Altura inclinada parte inferior: $h_1 := 1 \cdot \text{m}$

Altura total: $h_t := h + h_2 + h_1 = 10 \text{ m}$

$$h_t := 10 \cdot \text{m}$$

Volumen parte inferior

$$V_1 := \frac{D^2}{4 \cdot 3} \cdot h_2 = 26.18 \cdot \text{m}^3$$



Volumen cilindro: $V_{\text{cil}} := \frac{D^2}{4} \cdot h = 628.319 \cdot \text{m}^3$

Volumen parte superior: $V_2 := \frac{h_1}{6} \cdot \left[3 \cdot \left(\frac{D}{2} \right)^2 + h_1^2 \right] = 39.794 \cdot \text{m}^3$

Volumen total digestor: $V := V_1 + V_{\text{cil}} + V_2 = 694.292 \cdot \text{m}^3$

Comprobación de la carga de sólidos volátiles: $TS := \frac{SSV_o \cdot Q_o}{V} = 1.524 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3 \cdot \text{day}}$

- **Sólidos volátiles eliminados**

$$SSV_{\text{eliminados}} := Q_o \cdot SSV_o \cdot \frac{v_d}{100} = 533.872 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

- **Sólidos totales eliminados (entre 35 y 38%)**

Asumiendo una reducción del 35%, $SST_{\text{eliminados}} := 0.35 \cdot SST_o \cdot Q_o = 417.836 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$

- **lodo digerido**

Sólidos volátiles en el fango digerido: $SSV_o \cdot Q_o - SSV_{\text{eliminados}} = 524.444 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$

Sólidos totales que quedan en el fango digerido: $SST_o \cdot Q_o - SST_{\text{eliminados}} = 775.981 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$

Concentración del fango (teóricamente un 5%): $SST_{\text{lodo}} := 50 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Caudal de fango digerido: $Q_l := \frac{SST_o \cdot Q_o - SST_{\text{eliminados}}}{SST_{\text{lodo}}} = 15.52 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{day}}$

Concentración de SSV en el fango: $SSV_{\text{lodo}} := \frac{SSV_o \cdot Q_o - SSV_{\text{eliminados}}}{Q_l} = 33.792 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

- **Biogás producido**

Asumiendo que se produce 1 N m³ de gas por Kg de sólidos volátiles:

$$P_{\text{gas}} := \text{SSVeliminados} \cdot 1 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} = 22.245 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{hr}}$$

- **Metano producido**

62.5% del biogás producido, $Q_{\text{metano}} := P_{\text{gas}} \cdot 0.625 = 333.67 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{day}}$

11. BIBLIOGRAFÍA

- Izrail S. Turovsiy and P. K. Mathai, Wastewater Sludge Processing.
- Hernández Lehmann, Aurelio.1997.Manual de diseño de estaciones depuradoras de aguas residuales. 225pp.
- Carlos Zamalloa, Elien Vulsckiteke, Johan Albrecht, Willy Verstraete. The techno-economic potential orf renewable energy through the anaerobic digestión of microalgae.
- J.P.S. Sukias and R. J. Craggs. Digestion of wastewater pond microalgae and potential inhibition by alum and amoniacal-N.

ANEJO N° 5
INTERCAMBIADORES
DE CALOR

ÍNDICE

- 1. INTRODUCCIÓN**
 - 1.1 Clasificación basándose en su función**
 - 1.2 Clasificación basándose en su forma de construcción**

- 2. CÁLCULO TERMODINÁMICO DE INTERCAMBIADORES DE HAZ TUBULAR**
 - 2.1. Procedimiento de diseño básico**

- 3. FACTORES DE ENSUCIAMIENTO**

- 4. CONSIDERACIONES GENERALES DE DISEÑO**
 - 4.1. Velocidades de los fluidos**
 - 4.2. Temperaturas de las corrientes**
 - 4.3. Caída de presión**
 - 4.4. Propiedades físicas de los fluidos**

- 5. COEFICIENTES DE TRANSMISIÓN DE CALOR Y CAÍDA DE PRESIÓN**
 - 5.1. Transmisión de calor**
 - 5.1.1. Flujo turbulento**
 - 5.1.2. Régimen laminar**
 - 5.1.3. Región de transición**
 - 5.1.4. Factor de transmisión de calor**
 - 5.1.5. Factor de corrección de la viscosidad**
 - 5.2. Caída de presión en los tubos**

- 6. DISEÑO DEL INTERCAMBIADOR DE DOS TUBOS CONCÉNTRICOS**

- 7. BIBLIOGRAFÍA**

1. INTRODUCCIÓN

Los cambiadores de calor son los equipos en los que se transfiere calor de un fluido a otro sin contacto directo entre ellos.

El intercambio de calor se realiza por conducción y convección.

En los últimos años predominan los métodos de diseño de intercambiadores de calor de compañías u organizaciones privadas, como la HTRI (Heat Transfer Research Inc.) de los Estados Unidos, y la HTFS (Heat Transfer and Fluid Flow Service) del Reino Unido. Sus métodos son propiedad de estas compañías y no son públicos. Están disponibles para los ingenieros de diseño de muchas compañías importantes que pertenecen a estas organizaciones.

La clasificación de estos equipos se realiza basándose en su función y su forma de construcción.

1.1. Clasificación basándose en su función

- Refrigerantes: su función es enfriar un fluido; se realiza normalmente mediante agua o aire, que se calientan hasta una temperatura máxima fijada.
- Condensadores: equipos en los que el fluido caliente entra total o parcialmente en fase vapor y sale en fase líquida.
- Hervidores: son equipos en los que el fluido frío es calentado con el fin de producir un cambio de fase, pasando de líquido a vapor. El calentamiento suele hacerse con vapor de agua.
- Intercambiadores en general: son equipos en los que se intercambia calor entre dos fluidos sin que ninguno de ellos cambie de fase.

1.2. Clasificación basándose en su forma de construcción

- Intercambiadores de doble tubo: constituidos por dos tubos coaxiales de forma que por dentro del tubo interno circula un fluido y por fuera de éste el otro fluido. En el caso de que se sustituya el tubo interior por más de uno se obtiene el tipo llamado “multitubos”. Se utilizan para intercambiadores de calor pequeños.
- Intercambiadores de serpentín: tubo sumergido en el líquido contenido en un tanque o recipiente. Su misión es mantener el líquido contenido en el tanque a una determinada temperatura, pudiendo actuar como calefactor o refrigerador. Fluidos de calentamiento o refrigeración usuales son: vapor de agua, agua o aceite caliente y agua de refrigeración.
- Refrigerantes por aire: intercambiador cuyo fluido refrigerante es el aire.

- Intercambiadores de calor de placas: están constituidos por un paquete de placas que dejan separaciones entre ellas, trabajando de forma que un fluido circula entre las separaciones pares y el otro por las impares.
- Intercambiador de haz tubular o de carcasa y tubo: es el más empleado en la industria.
- Intercambiadores de placas con aletas (plate-fin)
- Intercambiadores de contacto directo: para enfriar y calentar
- Recipientes agitados
- Calentadores de fuego directo: intercambiadores calentados por gases de combustión.

2. CÁLCULO TERMODINÁMICO DE INTERCAMBIADORES DE DOBLE TUBO

La ecuación fundamental de transmisión de calor a través de una superficie es:

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T_m \quad (1)$$

donde

Q : calor transferido por unidad de tiempo, W

U : coeficiente global de transmisión de calor, $W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$

A : área de intercambio de calor, m^2

ΔT_m : diferencia media de temperaturas entre los dos fluidos, $^\circ C$

El objetivo principal en el diseño del intercambiador es calcular el área de intercambio de calor necesaria para calentar o enfriar un fluido del que conocemos su temperatura inicial y la que se desea alcanzar, así como la cantidad de ese fluido.

2.1. Procedimiento de diseño básico

El coeficiente global de transmisión de calor es la inversa de la resistencia global a la transmisión de calor, que es la suma de todas las resistencias individuales.

Para el intercambio de calor a través de un tubo la relación entre U y los coeficientes individuales (o las inversas de las resistencias individuales) es:

$$\frac{1}{U_0} = \frac{1}{h_0} + \frac{1}{h_{0d}} + \frac{d_0 \cdot \ln \frac{d_o}{d_i}}{2 \cdot k_w} + \frac{d_0}{d_i \cdot h_{id}} + \frac{d_0}{d_i \cdot h_i} \quad (2)$$

U_0 coeficiente global basado en el área externa del tubo, $W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$

h_0 coeficiente individual del fluido externo al tubo, $W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$

h_i coeficiente individual del fluido interno, $W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$

h_{0d} coeficiente externo de ensuciamiento, $W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$

h_{id} coeficiente interno de ensuciamiento, $W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$

d_i diámetro interno del tubo, m.

d_0 diámetro externo del tubo, m.

k_w conductividad térmica del material de la pared del tubo, $W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$

Los valores medios de k_w de los metales más usados para tubos son:

Tabla 1. Valores de conductividad térmica para los metales más comunes

Metal	$k_w, BTU \cdot pie^{-1} h^{-1} \cdot ^\circ F^{-1}$	$k_w, W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$
Acero al carbono	26	45
Acero inoxidable	10	17.3
Aluminio	110	191
Cobre	220	381
Cu-Ni 70-30%	17	29
Latón	60	104
Monel	14,6	25
Níquel	34	59

En la tabla 2 se dan otros valores, en función de la temperatura.

Tabla 2. Conductividad de metales

Metal	Temperature (°C)	k_w (W/m°C)
Aluminium	0	202
	100	206
Brass (70 Cu, 30 Zn)	0	97
	100	104
	400	116
Copper	0	388
	100	378
Nickel	0	62
	212	59
Cupro-nickel (10 per cent Ni)	0-100	45
Monel	0-100	30
Stainless steel (18/8)	0-100	16
Steel	0	45
	100	45
	600	36
Titanium	0-100	16

Los coeficientes individuales dependen de:

- la naturaleza del proceso de intercambio de calor (conducción, convección, condensación, ebullición o radiación),
- propiedades físicas de los fluidos,
- velocidades de flujo y
- de la disposición física (geometría) de la pared de intercambio de calor.

Como la disposición física del intercambiador no se puede determinar hasta que sea conocida el área, el procedimiento de diseño es necesariamente iterativo. Es decir, se suponen unos valores iniciales y se van realizando cálculos sucesivos hasta conseguir que los valores supuestos y los calculados sean iguales.

Las etapas de un procedimiento de diseño típico son:

1. Fijar las especificaciones: caudales y temperaturas de entrada y salida de ambos fluidos, calcular la velocidad de transmisión de calor (balances de calor entre los fluidos), caídas de presión permisibles y factores de ensuciamiento.
2. Determinar todas las propiedades físicas de los fluidos necesarias: densidades, viscosidades, conductividades térmicas.
3. Decidir el tipo de intercambiador a utilizar (carcasa y tubos, placas, etc.).
4. Suponer un valor inicial del coeficiente global de transmisión de calor, U.

Tabla 3. Coeficientes globales de transferencia

<i>Fluido caliente</i>	<i>Fluido frío</i>	<i>«U» en BTU/h × pie² × °F</i>
Agua	Agua	200-450
Metanol	Agua	200-400
Amoníaco	Agua	200-400
Soluciones acuosas	Agua	200-450
Hidrocarburos ligeros	Agua	70-160
Hidrocarburos medios	Agua	50-130
Hidrocarburos pesados... ..	Agua	20-60
Disolventes orgánicos	Agua	50-150
Gases	Agua	5-50
Agua	Salmuera	100-200
Hidrocarburos ligeros	Salmuera	50-100
Soluciones acuosas	Soluciones acuosas	200-450
Hidrocarburos ligeros	Hidrocarburos ligeros	50-90
Hidrocarburos ligeros	Hidrocarburos medios	40-80
Hidrocarburos medios	Hidrocarburos medios	25-65
Hidrocarburos pesados... ..	Hidrocarburos pesados... ..	15-50
Hidrocarburos pesados... ..	Hidrocarburos ligeros	30-60
Vapor de agua	Agua	250-750
Vapor de agua	Hidrocarburos ligeros	90-180
Vapor de agua	Hidrocarburos medios	60-160
Vapor de agua	Hidrocarburos pesados	25-80
Vapor de agua	Gases	7-50
Fluido térmico	Hidrocarburos pesados	10-70

5. Calcular la diferencia media de temperaturas
6. Calcular el área mediante la ecuación fundamental de la transmisión de calor
7. Decidir la disposición del intercambiador de calor; relacionada con la etapa 3
8. Calcular los coeficientes individuales.
9. Calcular el coeficiente global y comparar con el valor supuesto. Si el valor calculado
10. difiere mucho del estimado, sustituir el estimado por el calculado y volver a la etapa 6. Calcular las caídas de presión en el cambiador; si son demasiado altas (superiores a las máximas admisibles) volver a las etapas de cálculo 7 ó 4 ó 3, en ese orden de preferencia.
11. Optimizar el diseño: repetir las etapas 4 a 10, tanto como sea necesario, para determinar el cambiador más barato que satisface el objetivo. Usualmente será el que tenga una menor área.

$$\frac{Q}{\Delta T_m} = U \cdot A \tag{3}$$

$Q/\Delta T_m$ depende de las especificaciones iniciales. El objetivo sería, por tanto, calcular un $U \cdot A$ que satisfaga estas especificaciones, pero a menor A , y por tanto mayor U , más económico será generalmente el cambiador.

Tabla 4. Coeficientes globales para distintas combinaciones de fluidos y diseño de cambiador

Shell and tube exchangers		
Hot fluid	Cold fluid	U ($W/m^2\text{°C}$)
<i>Heat exchangers</i>		
Water	Water	800–1500
Organic solvents	Organic solvents	100–300
Light oils	Light oils	100–400
Heavy oils	Heavy oils	50–300
Gases	Gases	10–50
<i>Coolers</i>		
Organic solvents	Water	250–750
Light oils	Water	350–900
Heavy oils	Water	60–300
Gases	Water	20–300
Organic solvents	Brine	150–500
Water	Brine	600–1200
Gases	Brine	15–250
<i>Heaters</i>		
Steam	Water	1500–4000
Steam	Organic solvents	500–1000
Steam	Light oils	300–900
Steam	Heavy oils	60–450
Steam	Gases	30–300
Dowtherm	Heavy oils	50–300
Dowtherm	Gases	20–200
Flue gases	Steam	30–100
Flue	Hydrocarbon vapours	30–100
<i>Condensers</i>		
Aqueous vapours	Water	1000–1500
Organic vapours	Water	700–1000
Organics (some non-condensables)	Water	500–700
Vacuum condensers	Water	200–500
<i>Vaporisers</i>		
Steam	Aqueous solutions	1000–1500
Steam	Light organics	900–1200
Steam	Heavy organics	600–900
Air-cooled exchangers		
Process fluid		
Water		300–450
Light organics		300–700
Heavy organics		50–150
Gases, 5–10 bar		50–100
10–30 bar		100–300
Condensing hydrocarbons		300–600
Immersed coils		
Coil	Pool	
<i>Natural circulation</i>		
Steam	Dilute aqueous solutions	500–1000
Steam	Light oils	200–300
Steam	Heavy oils	70–150
Water	Aqueous solutions	200–500
Water	Light oils	100–150

Según se ha visto, la etapa 4 del diseño implica suponer un valor inicial del coeficiente global de transmisión de calor. En las Tablas 2 y 3 se dan valores típicos de coeficientes globales para varios tipos de cambiadores.

También la Figura 1 se puede utilizar para estimar el coeficiente global para intercambiadores de carcasa y tubos. Estos coeficientes tienen en cuenta el ensuciamiento.

Los valores dados en estas tablas y figuras se pueden utilizar para los cálculos previos de diseño y para un dimensionado previo.

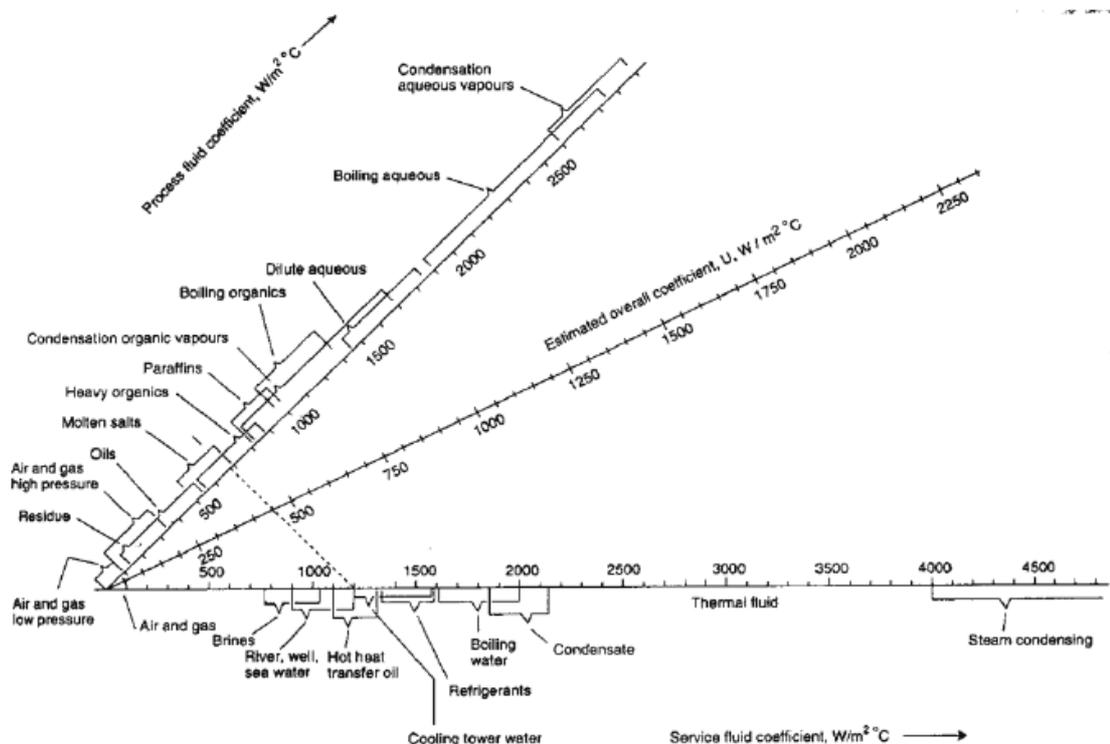


Figura 1. Coeficientes globales a partir de los individuales

3. FACTORES DE ENSUCIAMIENTO

La mayoría de los fluidos de proceso y de servicio ensucian las superficies de intercambio de calor, depositándose materiales que normalmente tienen una conductividad pequeña y reducen el coeficiente cambiador para prevenir la reducción en el rendimiento que tendrá lugar durante la operación.

Este efecto se introduce en el diseño incluyendo los coeficientes interno y externo de ensuciamiento en la ecuación para el cálculo de U. Estos factores se tratan usualmente como resistencia a la transmisión de calor, más que como coeficientes. Son difíciles de predecir, por lo que se hace a partir de la experiencia.

La estimación de estos factores introduce cierta incertidumbre en el diseño de cambiadores de calor: el valor supuesto para el factor de ensuciamiento puede disminuir la exactitud de los valores predichos para otros coeficientes.

En la Tabla 5 se dan valores de coeficientes (h_{oi} o h_{id}) y resistencias (inversas de estos coeficientes) y en la Tabla se dan valores de resistencia para algunos procesos comunes.

La selección del coeficiente de ensuciamiento para el diseño tiene, con frecuencia, repercusiones tipo económicas. El diseño óptimo se obtendrá a partir de un balance entre el costo de un cambiador más grande y los costos de operación necesarios para limpiar toda el área de intercambio. Con sistemas que ensucien mucho las áreas de intercambio debe considerarse la posibilidad de tener cambiadores duplicados.

La transmisión de calor a través de las películas que se forman por ensuciamiento es por conducción.

Tabla 5. Valores típicos de los coeficientes de ensuciamiento

Fluid	Coefficient ($W/m^2\text{°C}$)	Factor (resistance) ($m^2\text{°C}/W$)
River water	3000–12,000	0.0003–0.0001
Sea water	1000–3000	0.001–0.0003
Cooling water (towers)	3000–6000	0.0003–0.00017
Towns water (soft)	3000–5000	0.0003–0.0002
Towns water (hard)	1000–2000	0.001–0.0005
Steam condensate	1500–5000	0.00067–0.0002
Steam (oil free)	4000–10,000	0.0025–0.0001
Steam (oil traces)	2000–5000	0.0005–0.0002
Refrigerated brine	3000–5000	0.0003–0.0002
Air and industrial gases	5000–10,000	0.0002–0.0001
Flue gases	2000–5000	0.0005–0.0002
Organic vapours	5000	0.0002
Organic liquids	5000	0.0002
Light hydrocarbons	5000	0.0002
Heavy hydrocarbons	2000	0.0005
Boiling organics	2500	0.0004
Condensing organics	5000	0.0002
Heat transfer fluids	5000	0.0002
Aqueous salt solutions	3000–5000	0.0003–0.0002

Tabla 6. Factores de resistencia ($\text{h.pie}^2 \cdot ^\circ\text{F} \cdot \text{BTU}^{-1}$)

Agua	TEMPERATURA DEL AGUA 125 °F O MENOR		TEMPERATURA DEL AGUA SUPERIOR A 125° F	
	Velocidad inf. o igual a 3 pie/seg	Velocidad superior a 3 pie/seg	Velocidad inf. o igual a 3 pie/seg	Velocidad superior a 3 pie/seg
A. Factores para el agua.				
Agua de mar	0,0005	0,0005	0,001	0,001
Agua industrial de va- lor medio	0,003	0,003	0,005	0,004
Agua tratada para cal- deras	0,001	0,0005	0,001	0,001
Salmuera	0,002	0,001	0,003	0,002
B. Factores para otros productos.				
Petróleo (valores medios)				0,003-0,006
Hidrocarburos ligeros (metano, etano, propano, butano)				0,001
Nafta ligera				0,001
Gasolina				0,001
Nafta pesada				0,001
Keroseno				0,001
Gasoil ligero				0,002
Gasoil pesado				0,003
Fuel-oil				0,005
Asfalto				0,010
Aire atmosférico				0,0005-0,001
Sosa cáustica				0,0005-0,001
Vapor saturado				0,0005-0,0015
Aceite para maquinaria				0,001
Aceite vegetal				0,003

4. CONSIDERACIONES GENERALES DE DISEÑO

4.1. Velocidades de los fluidos

Velocidades altas darán altos coeficientes de transmisión de calor pero también caídas de presión elevadas.

La velocidad debe ser lo suficientemente alta para impedir que sedimente cualquier tipo de sólido, pero no tan alta como para que se cause erosión. También con velocidades altas se reducirá el ensuciamiento.

4.2. Temperaturas de las corrientes

Cuanto menor sea la diferencia entre la temperatura de salida de una corriente y la temperatura de entrada de la otra (proximidad de temperaturas, T_1-t_2 y T_2-t_1), más grande será el área de intercambio de calor necesaria para un objetivo dado (menor será ΔT_{ml}).

Pero estas diferencias no pueden hacerse tan grandes como se quiera y su valor óptimo se determina haciendo un análisis económico de diseños alternativos.

Como guía general las diferencias de temperaturas mayores deberían ser, de al menos, 20°C y las menores de 5 a 7°C para enfriadores utilizando agua de refrigeración, y de 3 a 5°C utilizando salmueras refrigeradas.

El aumento máximo de temperatura para agua de enfriamiento está limitado a unos 30°C.

Las temperaturas medias de refrigeración deben mantenerse muy por encima del punto de congelación de las sustancias de proceso.

Cuando el intercambio de calor es entre fluidos de proceso para recuperación de calor, la proximidad de temperaturas óptima normalmente no será inferior a 20°C.

4.3. Caída de presión

En muchas aplicaciones la caída de presión necesaria para llevar a los fluidos a través del intercambiador puede ajustarse mediante las condiciones del proceso y puede variar desde unos milibares en servicios de vacío a varios bares en sistemas a presión.

Otras veces el diseñador es libre de elegir la caída de presión y en este caso puede hacerse un análisis económico para determinar el diseño de cambiador que da los menores costos de operación, teniendo en cuenta tanto los costos de capital como de bombeo. Sin embargo, un análisis económico profundo sólo está justificado para cambiadores muy grandes y caros.

A continuación se sugieren caídas de presión que pueden usarse como guía general y normalmente darán diseños cercanos al óptimo.

Líquidos:

Viscosidad < 1 mN s·m⁻² (viscosidad del agua) 35 kN·m⁻² (0,35 bar)
1 a 10 mN s·m⁻² 50-70 k N·m⁻²

Gases y vapores:

Alto vacío 0,4 – 0,8 k N·m⁻²
Vacío medio 0,1 × presión absoluta
1 a 2 bar 0,5 × presión medida en el sistema
por encima de 10 bar 0,1 × presión medida en el sistema

Cuando se emplea una caída de presión alta se debe tener cuidado para asegurar que la alta velocidad del fluido resultante no causa erosión o vibraciones de los tubos.

4.4. Propiedades físicas de los fluidos

Las propiedades físicas de los fluidos requeridas para el diseño de cambiadores son: densidad, viscosidad, conductividad térmica y las correlaciones temperatura-entalpía, calores específicos y latentes.

Las conductividades térmicas de los materiales que se usan normalmente para fabricar tubos se dan en la Tabla 1.

En las correlaciones utilizadas para predecir los coeficientes de transmisión de calor, las propiedades físicas se evalúan normalmente a la temperatura media de la corriente. Esto es satisfactorio cuando el cambio de temperatura es relativamente pequeño, pero puede cometerse un error considerable cuando el cambio de temperatura es grande.

En estas circunstancias, un procedimiento simple y seguro es evaluar los coeficientes de intercambio de calor a las temperaturas de entrada y salida de las corrientes y utilizar el valor más bajo de los dos.

5. COEFICIENTES DE TRANSMISIÓN DE CALOR Y CAÍDA DE PRESIÓN

5.1. Transmisión de calor

5.1.1. Flujo turbulento ($Re > 10000$)

Los datos de transmisión de calor para flujo turbulento en conducciones de sección uniforme se correlacionan mediante la ecuación

$$Nu = C. Re^a. Pr^b. \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^c \quad (4)$$

$$Nu = C. Re^{0.8}. Pr^{0.33}. \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0.14} \quad (5)$$

donde

$C = 0,021$ (para gases), $0,023$ para líquidos no viscosos, $0,027$ para líquidos viscosos.

Nu es el número de Nusselt, $Nu = \frac{h_i \cdot d_e}{k_f}$

Re es el número de Reynolds, $Re = \frac{\rho \cdot u_t \cdot d_e}{\mu}$

Pr es el número de Prandtl, $Pr = \frac{C_p \cdot \mu}{k_f}$

h_i es el coeficiente de transmisión de calor interno, $W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$

d_e es el diámetro equivalente (o diámetro medio hidráulico), m

$$d_e = \frac{4 \cdot \text{área de la sección para el flujo}}{\text{perímetro mojado}} = d_i \text{ para tubos}$$

u_t es la velocidad del fluido, $m.s^{-1}$

k_f conductividad térmica del fluido, $W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$

μ viscosidad del fluido en la pared

C_p calor específico del fluido, $J.kg^{-1}.^{\circ}C^{-1}$

Los valores de los exponentes pueden variar dependiendo de los fluidos del proceso, pero no es posible encontrar valores para las constantes y exponentes que abarquen todas las posibilidades de fluidos de proceso, desde gases a líquidos viscosos. De todas formas los valores que se obtienen con la ecuación 5 son suficientemente exactos para diseño.

Cuando se quiere una exactitud mayor pueden emplearse los datos y correlaciones de la ESDU (Engineering Sciences Data Unit). Basada en este trabajo Butterworth (1977) da la ecuación siguiente:

$$St = E. Re^{-0.205}. Pr^{-0.505} \quad (6)$$

dónde St es el número de Stanton $\frac{Nu}{Re.Pr} = \frac{h_i}{\rho.u_t.C_p}$ y $E = 0.0225. e^{(-0.02258.(\ln Pr)^2)}$

Esta ecuación es aplicable para $Re > 10000$.

5.1.2. Régimen laminar ($Re \leq 2000$)

Si los efectos de la convección natural son pequeños (lo que normalmente se admite cuando existe convección forzada), puede utilizarse la ecuación siguiente para estimar h_i :

$$Nu = 1,86. (Re. Pr)^{0,33} \left(\frac{d_e}{L}\right)^{0,33} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0,14} \quad (7)$$

L es la longitud del tubo en metros. Si el Nu que se obtiene mediante esta ecuación es menor que 3,5 debería tomarse como 3,5.

En flujo laminar la longitud del tubo puede tener un efecto muy marcado sobre la velocidad de transmisión de calor para relaciones longitud/diámetro menores de 500.

5.1.3. Región de transición ($2000 < Re \leq 10000$)

En la región de flujo entre laminar y flujo turbulento completamente desarrollado los coeficientes de transmisión de calor no pueden predecirse con

certeza, ya que el flujo en esta región es inestable. Por lo tanto la región de transición debería evitarse en el diseño de cambiadores. Si esto no es posible el coeficiente debería evaluarse usando las ecuaciones 4 y 6, tomándose el valor más pequeño de h_i (mayor resistencia).

5.1.4. Factor de transmisión de calor, j_h

Con frecuencia es conveniente correlacionar los datos de transmisión de calor en términos de un factor de transmisión de calor, que se define como:

$$j_h = St. Pr^{0,67} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{-0.14} \quad (8)$$

El uso de j_h facilita que se puedan representar en un mismo diagrama los datos para flujo laminar y turbulento (Figura 2).

Los valores de j_h obtenidos de la Figura 2 se pueden usar con la ecuación 8 para estimar los coeficientes de transmisión de calor para tubos de cambiadores de calor y tuberías comerciales. La ecuación 8 puede reordenarse en la forma

$$\frac{h_i \cdot d_i}{k_f} = j_h \cdot Re \cdot Pr^{0,33} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0.14} \quad (9)$$

Debe tenerse en cuenta que Kern (1950) y otros investigadores definen el factor de transmisión de calor como:

$$j_H = Nu \cdot Pr^{1/3} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{-0.14} \quad (10)$$

La relación entre ambos factores j_h y j_H es $j_H = j_h \cdot Re$

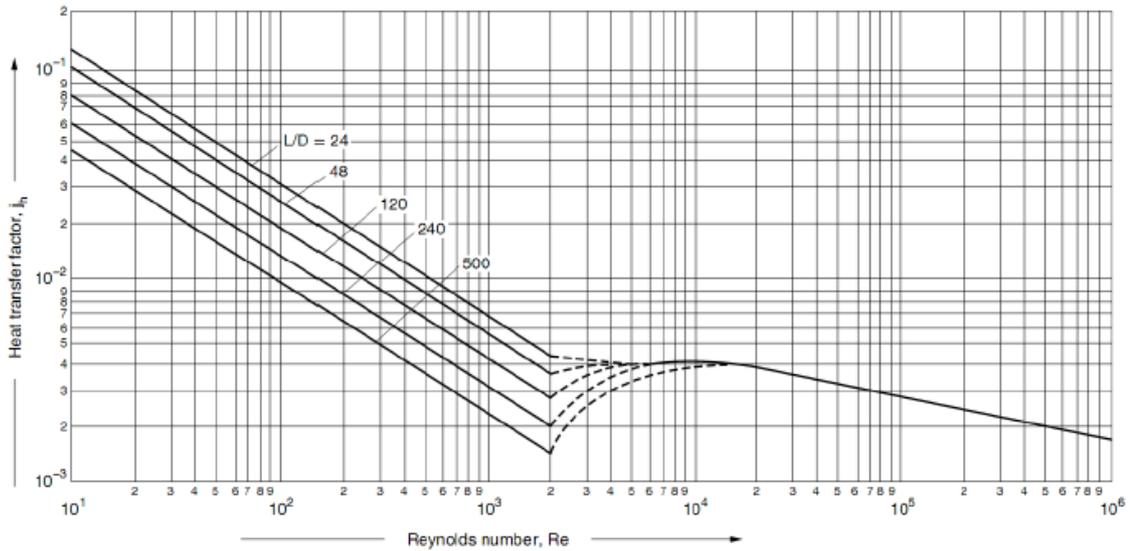


Figura 2. Factor de transmisión de calor

5.1.5. Factor de corrección de la viscosidad, $\left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{-0.14}$

El factor de corrección de la viscosidad normalmente sólo será significativo para líquidos viscosos.

Para aplicar la corrección se necesita una estimación de la temperatura de la pared. Esto puede hacerse calculando primero los coeficientes sin la corrección y utilizando la siguiente relación para estimar la temperatura de la pared:

velocidad de transmisión de calor entre la pared interna del tubo al fluido interno = velocidad de transmisión de calor desde el fluido externo al interno

$$h_i \cdot (t_w - t) = U \cdot (T - t) \quad (11)$$

t es la temperatura másica del lado del tubo (media)

t_w es la temperatura estimada para la pared

T es la temperatura másica del lado externo al tubo (media)

Usualmente es suficiente una estimación aproximada de la temperatura de la pared, pero pueden hacerse cálculos iterativos para hacer una mejor estimación si la corrección es grande.

5.2. Caída de presión en los tubos

Las causas principales para las pérdidas de presión en los tubos son: pérdidas por fricción, pérdidas debidas a contracciones y expansiones bruscas y pérdidas en los retornos de flujo entre paso y paso.

La pérdida por fricción en los tubos se puede calcular utilizando las ecuaciones para la caída de presión en tuberías. La ecuación básica para flujo isoterma en tuberías es:

$$\Delta P = 8 \cdot j_f \cdot \left(\frac{L}{d_i}\right) \cdot \frac{\rho \cdot u_t^2}{2} \quad (12)$$

j_f es el factor de fricción adimensional

L es la longitud efectiva de los tubos.

El flujo en un cambiador de calor es claramente no isoterma y esto se tiene en cuenta introduciendo un factor de corrección empírico para tener en cuenta el cambio en las propiedades físicas con la temperatura. Normalmente sólo se considera el cambio en la viscosidad:

$$\Delta P = 8 \cdot j_f \cdot \left(\frac{L}{d_i}\right) \cdot \frac{\rho \cdot u_t^2}{2} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{-0.14} \quad (13)$$

$m = 0,25$ para flujo laminar, $Re < 2100$

$m = 1,14$ para flujo turbulento, $Re > 2100$

Los valores de j_f para tubos de cambiadores de calor se pueden obtener de la Figura

ΔP_t es la caída de presión total del lado de los tubos, $N \cdot m^{-2}$

N_p es el número de pasos por el llado de los tubos

u_t velocidad por el lado de los tubos, $m \cdot s^{-1}$

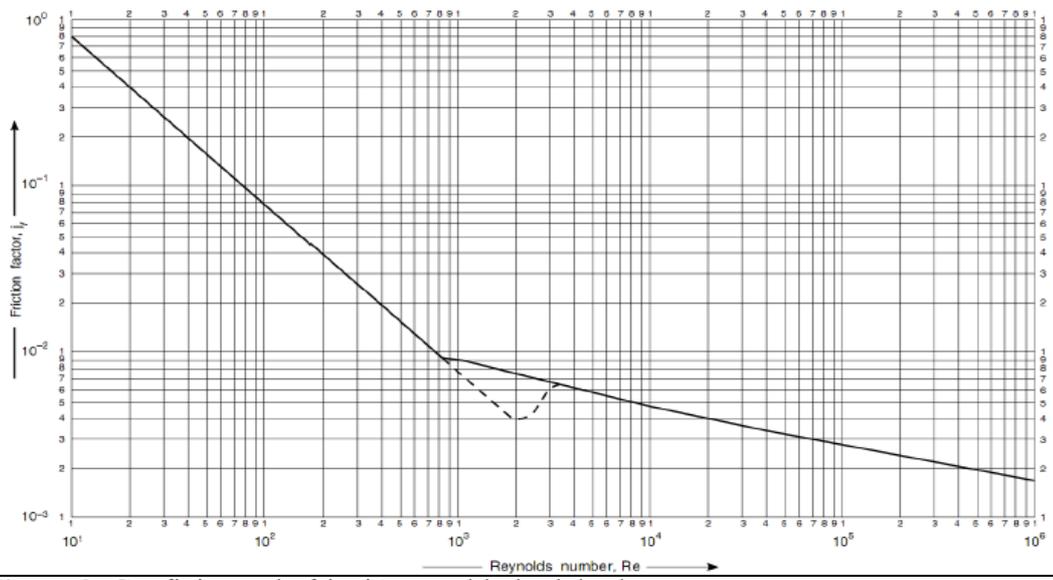


Figura3. Coeficiente de fricción en el lado del tubo

6.DISEÑO DEL INTERCAMBIADOR DE DOS TUBOS CONCÉNTRICOS

Datos de partida:

-Corriente de proceso:

Temperatura de entrada: $t_1 := (19 + 273) = 292 \text{ K}$

Temperatura de salida: $t_2 := (32 + 273) = 305 \text{ K}$

caudal másico: $\dot{m}_m := 2445.63 \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$

Densidad: $d_m := 1010 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Conductividad térmica: $K_{fm} := 0.6 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$

Capacidad calorífica: $C_{pm} := 4.187 \cdot 10^3 \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$

Viscosidad: $\nu_m := 1 \cdot 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$

Caudal volumétrico: $Q_m := \frac{\dot{m}_m}{d_m} = 2.421 \frac{\text{Nm}^3}{\text{hr}}$

- Corriente de gases de escape para calentar:

Temperatura de entrada: $T_1 := (400 + 273) = 673 \text{ K}$

Densidad: $d_g := 0.54 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Conductividad térmica: $K_{fg} := 0.02 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{C}}$

Capacidad calorífica: $C_{pg} := 1.425 \cdot 10^3 \frac{\text{J}}{\text{Nm}^3\cdot\text{K}}$

$$\dot{C}_{pg} := \frac{C_{pg}}{d_g} = 2.639 \times 10^3 \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$$

Viscosidad: $\nu_g := 3 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$

Temperatura de salida: $T_2 := 473 \text{ K}$

• Fuerza impulsora:

$$\text{incTml} := \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln\left(\frac{T_1 - t_2}{T_2 - t_1}\right)} = 263.53 \text{ K}$$

- **Flujo de calor intercambiado:**

$$Q := \frac{\text{mm}}{\text{dm}} \cdot C_{pm} \cdot (t_2 - t_1) = 1.318 \times 10^5 \frac{\text{J}}{\text{hr}}$$

$$\dot{Q} := \frac{Q}{3600} = 36.611 \frac{\text{J}}{\text{s}}$$

- **Caudal másico de gases de escape que entran al intercambiador:**

$$\dot{m}_g := \frac{Q \cdot 3600}{C_{pg} \cdot (T_1 - T_2)} = 0.25 \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$$

- **Caudal volumétrico de gases de escape que entran al intercambiador:**

$$Q_g := \frac{\dot{m}_g}{\rho_g} = 0.462 \frac{\text{m}^3}{\text{hr}}$$

- **Coefficiente de transmisión de calor supuesto:** $U := 13.5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$

- **Área de intercambio:** $A_{\text{intercambio}} := \frac{Q}{U \cdot \ln T_{ml}} = 0.01 \text{m}^2$

- **Conductividad térmica del material:**

De la Tabla 1, Material de los tubos: Acero inoxidable ---> $k_w := 17.3 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$

- **Diseño del tubo interno:**

Diámetro interno: $d_{ii} := 0.02 \text{ m}$

Espesor del tubo: $s_i := 0.002 \text{ m}$

Diámetro externo: $d_{i0} := d_{ii} + s_i = 0.022 \text{ m}$

Longitud: $L_w := 1 \text{ m}$

$$\text{Área transversal: } A_i := \frac{3.14159 \cdot d_{ii}^2}{4} = 3.142 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$\text{Velocidad transversal: } u_i := \frac{\dot{Q}_m}{A_i} = 2.141 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\text{Número de Reynolds: } Re_i := \frac{u_i \cdot d_m \cdot d_{ii}}{\nu_m} = 4.325 \times 10^4 \text{ (Régimen turbulento)}$$

$$\text{Número de Prandtl: } Pr_i := \frac{C_{pm} \cdot \nu_m}{K_{fm}} = 6.978$$

Viscosidad en la pared: $v_{wm} := v_m = 1 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$

De la Tabla 5, Coeficiente interno de ensuciamiento: $h_{id} := 4500 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$ (valor medio del agua)

Número de Nusselt: $N_{ui} := 0.023 \cdot Re_i^{0.8} \cdot Pr_i^{0.33} \cdot \left(\frac{v_m}{v_{wm}}\right)^{0.14} = 223.327$

Coeficiente jH: $j_{Hi} := N_{ui} \cdot Pr_i^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{v_m}{v_{wm}}\right)^{-0.14} = 426.768$

Coeficiente jh: $j_{hi} := \frac{j_{Hi}}{Re_i} = 9.868 \times 10^{-3}$

Coeficiente de transmisión de calor: $h_i := j_{hi} \cdot Re_i \cdot Pr_i^{0.33} \cdot \left(\frac{v_m}{v_{wm}}\right)^{0.14} \cdot \frac{K_{fm}}{d_{ii}} = 2.431 \times 10^4 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$

• **Diseño de la tubería externa:**

Diámetro interno: $d_{ei} := 0.035 \text{ m}$

Espesor: $s_0 := 0.003 \text{ m}$

Diámetro externo: $d_{ee} := d_{ei} + s_0 = 0.038 \text{ m}$

Diámetro equivalente: $d_{eq} := d_{ei} - d_{i0} = 0.013 \text{ m}$

Longitud: $L := 1 \text{ m}$

Área transversal: $A_e := \frac{3.14159 \cdot d_{ei}^2}{4} - \frac{d_{i0}^2}{4} = 5.82 \times 10^{-4} \text{ m}^2$

Velocidad transversal: $u_e := \frac{Q_g}{A_e} = 0.221 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

Número de Reynolds: $Re_e := \frac{u_e \cdot d_g \cdot d_{ei}}{v_g} = 139.06$ Régimen laminar

Número de Pradtl: $Pr_e := \frac{C_{pg} \cdot v_g}{K_{fg}} = 3.958$

Viscosidad en la pared: $v_{wg} := v_g = 3 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$

De la Tabla 5, Coeficiente de ensuciamiento: $h_{0d} := 3500 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$ (valor medio de los gases de combustión)

Número de Nusselt: $N_{ue} := 1.86 \cdot (Re_e \cdot Pr_e)^{0.33} \cdot \left(\frac{d_{eq}}{L}\right)^{0.33} \cdot \left(\frac{v_g}{v_{wg}}\right)^{0.14} = 3.561$

$$\text{Coeficiente } jH: \quad j_{He} := \text{Nue} \cdot \text{Pre}^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{vg}{vwg} \right)^{-0.14} = 5.633$$

$$\text{Coeficiente } jh: \quad j_{he} := \frac{j_{He}}{\text{Ree}} = 0.041$$

$$\text{Coeficiente de transmisión de calor:} \quad h_e := j_{he} \cdot \text{Ree} \cdot \text{Pre}^{0.33} \cdot \left(\frac{vg}{vwg} \right)^{-0.14} \cdot \frac{Kfg}{deq} = 13.645 \frac{W}{m^2 K}$$

• **Coeficiente global de transmisión de calor:**

$$U_c := \frac{1}{\frac{1}{h_e} + \frac{1}{h_{0d}} + \frac{di0 \cdot \ln\left(\frac{di0}{dii}\right)}{2 \cdot kw} + \frac{di0}{dii + hid} + \frac{di0}{dii \cdot hi}} = 13.572 \frac{W}{m^2 K}$$

$$0 \% < \frac{U_c - U}{U} \cdot 100 = 0.533 \% < 30 \%$$

• **Caída de presión en el tubo interno:**

$$\text{Número de Reynolds:} \quad \text{Re}_i = 4.325 \times 10^4$$

$$\text{De la Figura 3,} \quad j_{fi} := 3.3 \cdot 10^{-3}$$

$$\overline{m} := 0.14 \quad (\text{Flujo turbulento})$$

$$P_i := 8 \cdot j_{fi} \cdot \left(\frac{L}{dii} \right) \cdot \left(\frac{vm}{vwm} \right)^{-\overline{m}} \cdot \frac{dm \cdot ui^2}{2} = 3.056 \times 10^3 \text{ Pa}$$

• **Caída de presión en el tubo externo:**

$$\text{Número de Reynolds:} \quad \text{Re}_e = 139.06$$

$$\text{De la Figura 3:} \quad j_{fe} := 6 \cdot 10^{-2}$$

$$\overline{m} := 0.25 \quad (\text{Flujo laminar})$$

$$\overline{P}_i := 8 \cdot j_{fe} \cdot \left(\frac{L}{deq} \right) \cdot \left(\frac{vg}{vwg} \right)^{-\overline{m}} \cdot \frac{dg \cdot ue^2}{2} = 0.486 \text{ Pa}$$

6. BIBLIOGRAFÍA

- Diseño de equipos e instalaciones. Asignatura de 5º curso de Ingeniería Química (Plan 1999). Universidad de Almería.

ANEJO N° 6
RECIPIENTES A
PRESIÓN

ÍNDICE

- 1. INTRODUCCIÓN**
- 2. PARTE DESCRIPTIVA**
- 3. DISPOSITIVOS DE SUJECIÓN O APOYO**
- 4. CONEXIONES**
- 5. ACCESORIOS EXTERNOS**
- 6. CÓDIGO ASME**
- 7. DISEÑO DEL GASÓMETRO DE ALMACENAMIENTO DE BIOGÁS**
- 8. BIBLIOGRAFÍA**

1. INTRODUCCIÓN

Con la denominación de recipientes a presión se encuadra a los aparatos constituidos por una envolvente, normalmente metálica, capaz de contener un fluido, líquido o gaseoso, cuyas condiciones de temperatura y presión son distintas a las del medio ambiente.

En toda planta industrial existen recipientes a presión que desarrollan diversas funciones, tales como:

- Reactores: en ellos se producen transformaciones químicas, en condiciones de temperatura y presión normalmente severas.
- Torres: en ellas se producen transformaciones físicas, tales como separación de componentes ligeros y pesados, absorción, arrastre con vapor...
- Recipientes: en ellos pueden producirse transformaciones físicas (separación de líquido-vapor, separación de dos líquidos no miscibles con diferentes densidades) o simplemente realizan la misión de acumulación de fluido.

La forma más común de los recipientes a presión es la cilíndrica, por su más fácil construcción y requerir menores espesores que otras formas geométricas para resistir una misma presión, salvo la forma esférica, cuyo uso se reduce a grandes esferas de almacenamiento, dada su mayor complejidad en la construcción.

1. PARTE DESCRIPTIVA

Todo recipiente a presión está formado por la envolvente, dispositivos de sujeción o apoyo del propio equipo, conexiones por las que entran y salen los fluidos, elementos en el interior y accesorios en el exterior del recipiente. A continuación se procede a describir brevemente cada una de estas partes, mostrando la diversidad de posibilidades en cada una de ellas:

- **Envolvente**

Es una envoltura metálica que forma propiamente el recipiente. Como ya se ha indicado, los aparatos cilíndricos son los más utilizados, y en ellos la envolvente está formada, básicamente, por dos elementos: la parte cilíndrica o cubierta (carcasa) y los fondos o cabezales. Si la cubierta está constituida por varios cilindros de diversos diámetros, la unión entre ellos se realiza generalmente por figuras troncocónicas que realizan la transición.

- Cubierta

La cubierta está formada por una serie de virolas soldadas unas con otras, entendiéndose por virola un trozo de tubería o una chapa que convenientemente curvada y soldada forma un cilindro sin soldaduras circunferenciales.

La unión de varias virolas forma la cubierta, de forma que la suma de las alturas de los cilindros obtenidos por las virolas sea la requerida por la cubierta.

Las soldaduras de una virola son axiales o longitudinales, ya que están realizadas siguiendo la generatriz del cilindro, al contrario, las soldaduras que unen virolas, o los cabezales con la cubierta, son circunferenciales o transversales, por estar realizadas siguiendo una circunferencia situada, obviamente, en un plano perpendicular al eje del cilindro.

Cuando el diámetro de cubierta es menor de 24 pulgadas (60.9 cm) se utiliza, normalmente, tubería, y en diámetros superiores se realiza a partir de chapa.

Cuando los espesores requeridos para la cubierta son muy grandes se procede a realizarla con material forjado, o con varias cubiertas de menor espesor embebidas en caliente. Actualmente las maquinarias de curvar pueden realizar el curvado de chapas de hasta 15 cm de espesor, aunque este valor es función del diámetro del cilindro.

- Cabezales

Los cabezales o fondos son las tapas que cierran la carcasa. Normalmente son bombeados, existiendo una gran diversidad de tipos entre ellos, y como excepción existen los fondos cónicos y planos, de muy reducida utilización.

Todos estos fondos se realizan a partir de chapa, a la que mediante estampación se le da la forma deseada, salvo el caso de fondos cónicos y planos.

En todos los fondos se realiza la transición de una figura bombeada a una cilíndrica, que es la cubierta; esta línea de transición, denominada justamente línea de tangencia, está sometida a grandes tensiones axiales que se traducen en fuertes tensiones locales, y éste es el punto más débil del recipiente; por esta razón no es aconsejable realizar la soldadura de unión fondo-cubierta a lo largo de esta línea. Para evitar esta coincidencia, los fondos bombeados se construyen con una parte cilíndrica, denominada pestaña o faldilla.

Los tipos más usuales son:

- Semiesféricos.
- Elípticos.

- Policéntricos.
- Cónicos.
- Planos.

De los diferentes cabezales más usados, se ha escogido el semiesférico porque entre los cinco tipos es el que mejor se ajusta. Y sus características son las siguientes;

Son los formados por media esfera soldada a la cubierta. Su radio medio es igual al radio medio de la cubierta. El espesor requerido para resistir la presión es inferior al requerido en la cubierta cilíndrica, y como dato aproximado se puede adoptar que el espesor del cabezal es la mitad del espesor de la cubierta. La construcción de este tipo de fondos es más costosa que el resto de los fondos bombeados, por lo que se restringe a casos específicos de grandes espesores o materiales especiales, aunque resultan los más económicos para altas presiones, pudiendo construirse de hasta 12 ft (3.6m).

Es posible construir cabezales de tipo semiesférico mayores de 12 ft mediante soldadura de elementos de cabezales elípticos, pero esta opción incrementa el coste.

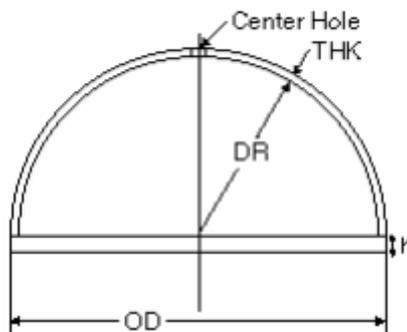


Figura 1. Cabezal semiesférico

Tabla 1. Espesor mínimo permitido en la carcasa y cabezales ferrosos.

Diámetro, in	Espesor cabezas, in	Espesor carcasa, in
> 42	0,3125	1,25
42-60	0,375	0,3125
60-78	0,4375	0,375
>78	0,5	0,4375

3. DISPOSITIVOS DE SUJECIÓN O APOYO

Todo recipiente debe ser soportado, es decir, su carga debe ser transmitida al suelo o a alguna estructura que las transmita al suelo; esta misión la cumplen los dispositivos de sujeción o apoyo. Las cargas a las que está sometido el recipiente y que transmitirá al suelo a través de su apoyo son:

- Peso propio.
- Peso del líquido en operación normal, o agua en la prueba hidráulica.
- Peso de todos los accesorios internos y externos.
- Cargas debidas al viento.
- Cargas debidas al terremoto.

Los dispositivos de apoyo, así como los pernos de anclaje que los fijan al suelo o estructura portante, deberán estar dimensionados para que resistan cada una de las condiciones de carga posible del recipiente.

Los recipientes a presión se subdividen en dos clases, dependiendo de la posición en que se encuentran instalados:

- Recipientes Verticales.
- Recipientes Horizontales.

Los dispositivos de apoyo para recipientes verticales son los siguientes:

- Patas.
- Faldón cilíndrico o cónico.
- Ménsulas.

Cada uno de estos dispositivos tiene las siguientes características:

- Patas: Con este tipo de dispositivo de sujeción el recipiente se apoya en 3 o 4 patas soldadas a la cubierta. Estas patas son perfiles en L-U-I soldados por encima de la línea de soldadura, bien directamente a la cubierta o bien a una placa de refuerzo soldada sobre el recipiente; la primera solución se utiliza para cubiertas en acero al carbono y de pequeño peso, mientras que la segunda se utiliza para cubiertas en acero aleado o recipientes de gran peso; en esta segunda solución el material de la placa es igual al de la cubierta y las patas son de acero al carbono. Cada pata está fijada al suelo por un perno de anclaje que resiste las cargas de tracción.

La sujeción por medio de patas se utiliza en recipientes de altura no superior a 5 m y diámetros no superiores a 2.4 m, siempre que los esfuerzos a transmitir no sean excesivos, o dicho de otro modo, siempre que el peso no sea muy grande, en cuyo caso se utilizará como apoyo el faldón cilíndrico.

- Faldón cilíndrico o cónico: En los recipientes que no pueden ser soportados por patas, bien sea por su tamaño o por tener que transmitir esfuerzos grandes, se utilizan los faldones cilíndricos, consistentes en un cilindro soldado al fondo. Con este tipo de apoyo la carga se reparte uniformemente a lo largo del perímetro de la circunferencia de soldadura, evitando concentraciones de esfuerzos en la envolvente y disminuyendo la presión transmitida al suelo.

Los pernos de anclaje se sitúan a lo largo del perímetro de la circunferencia de apoyo y a una distancia entre 400 y 600 mm, según el tamaño y el número requerido. En todo caso, el número de pernos deberá ser múltiplo de 4 (4, 8, 12, 20, 24).

Si la presión transmitida sobre el suelo es muy grande o el número requerido de pernos no cabe en la circunferencia del faldón, se realiza un faldón cónico que aumenta el tamaño de esta. El semiángulo del cono no debe ser mayor a 6° .

Para evitar momentos debidos al peso del recipiente se debe realizar el faldón de forma que su diámetro medio coincida con el diámetro medio de la cubierta.

Este tipo de apoyo es el más utilizado para torres, reactores y recipientes de tamaño medio y grande.

Al diseñar los faldones se debe tener en cuenta que ha de incluirse un acceso a su interior (dimensiones mínimas de 600 mm de diámetro) y unas ventilaciones para evitar la acumulación de gases en su parte interna.

- Ménsulas: Es el tipo de apoyo utilizado en recipientes verticales que deben soportarse en estructuras portantes, cuando las dimensiones y cargas no son muy grandes. El número de ménsulas utilizadas son 2, 4, 8 y raramente mayor, pero si así fuera necesario, su número deberá ser múltiplo de 4. Al igual que las patas, pueden ser soldadas directamente a la cubierta o a una placa de refuerzo soldada al recipiente. Las razones que conducen a la adopción de uno u otro sistema son las mismas a las expuestas en el caso de apoyos del tipo de patas.

4. CONEXIONES

Todo recipiente debe tener como mínimo una conexión de entrada del fluido y otra de salida, aunque siempre tienen muchas más. Seguidamente se indican los servicios más comunes que precisan conexiones en el recipiente:

- De entrada y salida de fluidos.
- Para instrumentos, como manómetros, termómetros, indicadores o reguladores de nivel.
- Para válvula de seguridad
- Para servicios tales como drenaje, venteo, de limpieza, paso de hombre, paso de mano,
- etc.

Salvo en casos excepcionales, las conexiones se realizan embridadas, ya que permiten su montaje y desmontaje sin tener que realizar ningún corte ni soldadura. Solamente en casos de fluidos extremadamente tóxicos, o altamente explosivos en contacto con el aire, se realizan las conexiones soldadas.

Las diversas partes que conforman la conexión embridada son las siguientes:

- Tubuladura.
- Placas de refuerzo.
- Brida.
- Pernos y turcas.
- Juntas o guarniciones.
- Tapas o bridas ciegas para las conexiones de servicios.

5. ACCESORIOS EXTERNOS

En la parte exterior de la envolvente van soldados numerosos accesorios, de los cuales a continuación se indican los más comunes:

- Soportes de instalación del aislamiento: Cuando la temperatura del fluido interior es superior a 60° C, o bien inferior a 0° C, se debe instalar un aislante para impedir la pérdida de calor o evitar el calentamiento del interior, así como por protección personal. Para poder aplicar el aislamiento se sueldan unos anillos que servirán de soporte de las mantas de aislamiento.

- Anclajes para aplicación de protección contra incendios: Si un equipo está instalado en una zona donde existe peligro de incendio, se aplica a su parte inferior (soporte normalmente) un cemento que los protege del fuego. Para aplicar este cemento se sueldan unos anclajes que sirven de soporte del cemento antifuego.
- Soportes de escalera y plataformas: Cuando se prevé instalar escaleras y plataformas, se sueldan unas pequeñas placas en la envolvente (clips), a las que se atornillan estas escaleras y plataformas para su sujeción.
- Soportes para tuberías: De igual forma que para las escaleras se instalan unos clips para la soportación de las tuberías que bajan a lo largo del recipiente.
- Pescantes: Si el recipiente contiene elementos pesados en su interior, como platos, rellenos, etc., es necesario instalar un pescante en la parte superior del equipo para facilitar la instalación la retirada de dichos elementos.

6. CÓDIGO ASME

El código define la presión interna de trabajo máxima permisible como la más baja de varias presiones que producirán el esfuerzo máximo permisible sobre cada una de las partes del recipiente, utilizando su espesor nominal menos el margen de corrosión. En términos estrictos, esto requiere el cálculo de la presión máxima permisible de trabajo en cada parte del recipiente y la utilización de la más baja de ellas.

La presión de diseño de un recipiente es la presión utilizada en su diseño, con el fin de determinar el espesor mínimo permisible o las características físicas de sus diversas partes. Debido al escalonamiento de los espesores de placas existentes comercialmente, un recipiente puede tener un espesor de pared un poco mayor que el necesario para soportar la presión de diseño. Por consiguiente, la presión de trabajo máxima permisible puede superar la de diseño. Sin embargo, en la práctica, para ahorrarse esfuerzos, la presión de diseño se considera por lo común como la presión máxima permisible de trabajo.

Tabla 2. Eficiencias máximas de juntas permisibles para juntas soldadas con gas y con arco. (Del código Tabla UW-12)

Fig. 6-138	Descripción de la junta	Grado de examen		
		Radio- grafía completa	Examen por puntos	No examinad por puntos
<i>a,b</i>	Juntas por ensamble con soldadura doble o con medios que permitan obtener la misma calidad de metal soldado a ambos lados de la junta	1.00	0.85	0.70
<i>b</i>	Junta por ensamble de soldadura simple, con banda de respaldo en su lugar	0.90	0.80	0.65
<i>c</i>	Junta por ensamble de soldadura simple, sin banda de respaldo. Sólo se permite para algunas juntas perimetrales.			0.60

La eficiencia de soldadura es la relación entre el esfuerzo permisible en la soldadura y el esfuerzo permisible para la placa adyacente. Depende no solo del tipo de soldadura, sino también del grado de examen radiográfico. En la tabla anterior se muestran las eficiencias máximas permisibles de juntas para juntas soldadas con gas y con arco.

En una costura completamente radiografiada, se inspecciona la longitud total. Si recibe una radiografía de puntos, se somete a la inspección de una longitud de 6 pulgadas cada 50 pies. Las imperfecciones que se encuentran fuera de la cantidad permisible se deben raspar y reparar mediante soldadura. La sensibilidad del procedimiento radiográfico se verifica mediante un penetrómetro.

En el caso de recipientes cilíndricos sometidos a presión interna, la norma ASME aconseja un espesor de: $t = \frac{P.R}{S.E-0.6.P}$, siempre que $t/R < 0,5$ o $P < 0,385.S.E$.

Tabla 3. Fórmulas de diseño de recipientes sometidos presión interna, según norma ASME

Descripción	Fórmulas		Observaciones
Concha cilíndrica	$t = \frac{PR}{SE - 0.8P}$	$P = \frac{SEt}{R + 0.8t}$	El esfuerzo perimetral (juntas longitudinales) cuando t no sobrepasa $0.5R$ o P no es mayor que $0.385SE$
Concha esférica	$t = \frac{PR}{2SE - 0.2P}$	$P = \frac{2SEt}{R + 0.2t}$	Cuando t no sobrepasa $0.356R$ o P no es mayor que $0.665SE$
Cabeza hemisférica	$t = \frac{PL}{2SE - 0.2P}$	$P = \frac{2SEt}{L + 0.2t}$	Cuando t no sobrepasan $0.356L$ o P es mayor que $0.665SE$. L = radio interno.
Cabeza elipsoidal (semielipsoidal)	$t = \frac{PD}{2SE - 0.2P}$	$P = \frac{2SEt}{D + 0.2t}$	Para cabezas semielipsoidales en las que $h = D/4$
	$t = \frac{PDK}{2SE - 0.2P}$	$P = \frac{SEt}{DK + 0.2t}$	Para valores de D/h de 2 a 6. $K = \frac{1}{4} \times [2 + (D/2h)^2]$
Cabeza torisférica (de plato esférico)	$t = \frac{0.885PL}{SE - 0.1P}$	$P = \frac{SEt}{0.885L + 0.1t}$	Para cabezas A.S.M.E. estándar en las que el radio mínimo de la articulación = 6% del radio interno de corona, pero no es menor que $3t$. L no debe ser de más que $D + 2t$.
	$t = \frac{PLM}{2SE - 0.2P}$	$P = \frac{2SEt}{LM + 0.2t}$	Para valores de L/r de 1 a 16 $\frac{1}{2}$, $M = \frac{1}{2}(1 + \sqrt{L/r})$. r debe ser al menos de $3t$ y $0.06 \times (D + 2t)$. L no debe sobrepasar $D + 2t$.
Cabeza cónica sin articulación de transición 	$t = \frac{PD}{2 \cos \alpha (SE - 0.6P)}$	$P = \frac{2SEt \cos \alpha}{D + 1.2t \cos \alpha}$	Se puede necesitar un anillo de refuerzo. Véanse los párrafos del Código UA5 (b) y (c). Aplicable para $\alpha \leq 30^\circ$.

Nomenclatura:

- t = espesor de concha o cabeza, en pulg
- P = presión, en lb/pulg²
- S = esfuerzo permisible en lb / pulg²
- E = eficiencia conjunta, adimensional
- R = radio interno, en pulg
- D = diámetro interno de faldón de cabeza o longitud interna del eje mayor de una cabeza elipsoidal, en pulg
- h = profundidad interna de una cabeza elipsoidal, en pulg
- r = radio interno de charnela o articulación de una cabeza torisférica, en pulg
- L = radio interno de cabeza hemisférica o radio de corona interna de una cabeza torisférica, en pulg

7. DISEÑO DEL GASÓMETRO PARA EL ALMACENAMIENTO DE BIOGÁS

Datos de partida:

$$\text{Producción horaria de biogas: } P_{\text{biogas}} := 22.245 \frac{\text{Nm}^3}{\text{hr}}$$

El gasómetro será un recipiente cilíndrico con cabezas semiesféricas de acero al carbono SA-516

Se adopta un volumen de gasómetro tal que pueda almacenar la producción de 12 horas

$$V_{\text{gasometro}} := 12 \cdot P_{\text{biogas}} = 266.94 \text{ m}^3$$

- **Dimensiones y espesor** (Dimensionamiento según norma ASME)

$$P_{\text{int}} := \text{atm} \quad P_{\text{ext}} := 1 \text{ atm} \quad T := 193.237 \text{ C}$$

$$\text{Material: acero SA-516} \rightarrow S := 15000 \text{ psi}$$

$$\text{Eficiencia de las juntas } E := 0.9 \text{ (Radiografía completa. Tabla 2)}$$

$$\text{Altura de la carcasa cilíndrica (asumida): } h_t := 8 \text{ m}$$

Diámetro interno:

$$D_i := 2$$

Dado

$$F(D_i) := V_{\text{gasometro}} - 2 \cdot \frac{2}{3} \cdot \left(\frac{D_i}{2}\right)^3 - \left(\frac{D_i}{2}\right)^2 \cdot h_t$$

$$D_i := \text{root}(F(D_i), D_i)$$

$$D_i = 5.411 \text{ m} \quad D_i := \frac{D_i}{0.025399944} = 213.0 \text{ in}$$

$$P_{\text{neto}} := P_{\text{int}} - P_{\text{ext}} = 5 \text{ atm} \quad P_{\text{neto}} := P_{\text{neto}} \cdot 14.6931 = 73.465 \text{ psi}$$

- **Espesor de la carcasa**

En los recipientes cilíndricos, los esfuerzos longitudinales son menores que los tangenciales, aplicando la norma ASME:

$$t_{\text{carcasa}} := \frac{P_{\text{neto}} \cdot \frac{D_i}{2}}{S \cdot E - 0.6 \cdot P_{\text{neto}}} = 0.582 \text{ in}$$

Comprobación de que se cumplen las condiciones:

$$0.385 \cdot S \cdot E = 5.197 \times 10^3 > P_{\text{neto}} \text{ (se cumple)}$$

$$\frac{t_{\text{carcasa}}}{\frac{D_i}{2}} = 5.46 \times 10^{-3} < 0.5 \text{ (se cumple)}$$

El espesor de la plancha no puede ser inferior a 0.438 in (Tabla 1), se cumple, por tanto:

$$\text{espesor_carcasa} := 0.582 \text{ in}$$

- **Espesor de las cabezas**

$$t_{\text{cabezas}} := \frac{P_{\text{meta}} \cdot \frac{D_i}{2}}{2 \cdot S \cdot E - 0.2 \cdot P_{\text{meta}}} = 0.29 \text{ in}$$

Comprobación de que se cumplen las condiciones:

$$0.385 \cdot S \cdot 0.8 = 4.62 \times 10^3 > P_{\text{meta}} \quad (\text{se cumple})$$

$$\frac{t_{\text{cabezas}}}{\frac{D_i}{2}} = 2.722 \times 10^{-3} < 0.5 \quad (\text{se cumple})$$

El espesor de la plancha no puede ser inferior a 0,438 in, por lo tanto, el espesor será :

$$\text{espesor_cabezas} := 0.438 \text{ in}$$

8. BIBLIOGRAFÍA

- Diseño de equipos e instalaciones: Diseño de recipientes a presión. Asignatura de 5º curso de Ingeniería Química (plan 1999). Universidad de Almería.

ANEJO N° 7
GENERADOR

ÍNDICE

- 1. INTRODUCCIÓN**
- 2. UNIDADES GENERADORAS UTILIZADAS EN LA GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD POR MEDIO DE BIOGÁS**
- 3. LIMPIEZA DEL BIOGÁS**
- 4. CARACTERÍSTICAS DE LA PLANTA ELÉCTRICA A BIOGÁS**
- 5. EFICIENCIA ELÉCTRICA Y COMPOSICIÓN DE LOS GASES DEL GENERADOR**
- 6. BIBLIOGRAFÍA**

1. INTRODUCCIÓN

La generación de electricidad en corriente alterna se basa en la Ley de Faraday-Lenz. Cuando existe movimiento relativo entre un conductor eléctrico y un campo magnético (imán) se produce una fuerza electromotriz (fem) que hace circular corriente eléctrica por el conductor. A continuación se muestran algunos ejemplos de generadores de electricidad:

- **Centrales Térmicas:** En las centrales térmicas, el agente externo es el vapor de agua a presión generado al quemar carbón, fuel, gas, derivados del petróleo u otro combustible orgánico. La energía liberada durante la combustión hace que el agua se caliente y el vapor a presión generado moverá la turbina que a su vez hace girar al alternador, produciendo así la electricidad.
- **Centrales Nucleares:** En las centrales nucleares, el combustible es el uranio. El calor generado en la vasija del reactor-fisión produce vapor de agua a presión en un circuito exterior al reactor. El fundamento es el mismo que en la central térmica.
- **Centrales Eólicas:** En los molinos de viento o aerogeneradores, es el viento (partículas de aire a gran velocidad y alta energía cinética) el agente externo que mueve el alternador.
- **Centrales Solares:** En la central solar es la energía del sol la que hace hervir el agua y generar vapor a presión.
- **Centrales Hidroeléctricas:** En la central hidroeléctrica es la energía potencial y la energía cinética del agua que mueve la turbina, la cual está conectada al alternador.
- **Centrales Mareomotrices:** En la central mareomotriz, el agente externo es la velocidad del agua del mar. Las subidas y bajadas de las mareas, originan unas corrientes con gran energía cinética capaces de mover los alternadores.
- **Centrales Biomásicas:** En las centrales de biomasa, es el vapor de agua producido al quemar la materia orgánica residual derivada de cultivos agrícolas principalmente, o por la combustión en motores, donde el biogás procedente de la fermentación de la biomasa es consumida por el motor de combustión interna que mueve el generador.

2. UNIDADES GENERADORAS UTILIZADAS EN LA GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD POR MEDIO DE BIOGÁS

Para las aplicaciones de generación eléctrica por medio de biogás, se alimenta el motor de combustión interna, el cual está conectado a un generador, con biogás. Estos motores pueden consumir GLP, gasolina o diesel.

• Motores a gas

Los motores a gas mecánicamente son idénticos a los motores de combustión a gasolina, la diferencia radica en la admisión del combustible. En los motores a gas, esta admisión se realiza por medio de una válvula que regula la presión con la que se inyecta el gas licuado directamente en el carburador.

Las modificaciones que se deben realizar a este motor para utilizarlo en la generación de electricidad a partir del consumo de biogás, es modificar levemente la presión de inyección del gas para que se ajuste a las condiciones del biogás. El porcentaje de sustitución de biogás por gas GLP es del 100%. Así se puede realizar una conexión de la tubería de biogás al sistema de modo que el equipo pueda operar con ambos combustibles.

Por el tipo de sistema de alimentación, estas adaptaciones no permiten una regulación automática de la mezcla y la carga, por lo que el ajuste del motor se debe de realizar de forma manual desde la válvula de control del biogás, colocada en la línea de admisión.

Se recomienda que las cargas aplicadas sean constantes, para evitar los problemas de regulación del motor y por tanto una ineficiente calidad de la energía suministrado por el generador.

Para el caso de cargas variables, el flujo de gas hacia el motor se debe regular por medio de un sistema de control especialmente diseñado, que garantice el flujo del gas al motor para responder a las diferentes demandas de potencia generados por las cargas aplicadas.

• Motores a Gasolina

El motor a gasolina puede ser operado con biogás realizándole una simple adaptación, que consiste en colocar entre el filtro del aire y el carburador una "T" por donde se suministra el gas al sistema.

Se deben tener ciertas consideraciones para que un motor a gasolina, alimentado con biogás opere satisfactoriamente:

- Evitar el paso de gasolina cuando el motor va a operar o está operando con biogás, esto con el fin de evitar un gasto innecesario de combustible. Para lograrlo se debe de colocar una válvula para controlar el paso de la gasolina al carburador.
- Garantizar un suministro de biogás a presión constante.

- El filtro del aire debe de mantenerse limpio para mantener una constante relación entre la mezcla de biogás y aire que nos garantice una operación estable del motor.
- Colocar una válvula para controlar la admisión del gas al motor.

Al ser alimentado con biogás, directamente al múltiple de admisión el motor no permite una regulación automática de la mezcla y la carga, por lo que el ajuste del motor se debe de realizar de forma manual desde la válvula de control del biogás, colocada en la línea de admisión.

Se recomienda que las cargas aplicadas sean constantes, para evitar los problemas de regulación del motor y por tanto una ineficiente calidad de la energía suministrada por el generador.

Para el caso de cargas variables, el flujo de gas hacia el motor se debe regular con un sistema de control especialmente diseñado, que garantice que el flujo del gas que se inyecte en el motor pueda responder a las diferentes demandas de potencia debido a las variaciones de carga eléctrica, provocada por el constante entrar y salir de cargas.

- **Motores a diesel**

Los motores a diesel, se pueden operar con una sustitución del diesel por biogás hasta un 70%, y un consumo de diesel del 30% restante por lo que el motor no sufre ninguna alteración al consumir los dos tipos de combustible al mismo tiempo.

Para realizar estas adaptaciones se debe de colocar una “T” entre el filtro y el sistema de admisión del aire, donde se conecta la tubería del biogás. Se debe de instalar una válvula en esta tubería para regular el suministro del biogás y ajustarlo al porcentaje requerido de operación. Como se muestra en la Figura 1.



Figura 1. Adaptación de un motor diesel para el consumo de biogás

En la Figura 1 se muestra la adaptación que se le realizó al motor de diesel, donde se le colocó una “T” entre la admisión del aire del motor que es la parte inferior de la tubería plástica y el filtro del depurador en la parte superior, además se aprecia la válvula reguladora la cual es de bronce y la válvula de cierre del biogás, que se encuentra en la parte superior derecha de color rojo.

En estos motores la mezcla de diesel y biogás se realiza directamente en la cámara de combustión del motor. Cuando el motor recibe el biogás por la entrada de aire, este se acelera, por lo que el gobernador de la bomba de inyección reduce la cantidad de diesel suministrado a la cámara de combustión, logrando una estabilidad en la aceleración y potencia del motor. Estos motores soportan las variaciones de carga sin tener que operar la válvula de regulación del biogás, permitiendo operar en un rango más amplio de carga.

Para los arranques del motor se debe alimentar únicamente con diesel, una vez arrancado el motor se realiza la transferencia de biogás gradualmente, hasta alcanzar el 70%. No es recomendable la sustitución mayor a un 70% de biogás por diesel porque puede dañar el motor.

3. LIMPIEZA DEL BIOGÁS

Cuando el gas producido se utiliza sólo como combustible para motores, se recomienda muchas veces no limpiarlo, dado que la presencia de estos compuestos (agua y ácido sulfhídrico) no afectan el rendimiento ni los componentes del motor. Además, las emisiones de ácidos, asociadas a la composición del combustible gaseoso, son insignificantes en comparación a las emisiones obtenidas con un motor dedicado a Diesel (Fundacion Pesenca, 1992).

4. CARACTERÍSTICAS DE LA PLANTA ELÉCTRICA A BIOGÁS

La planta eléctrica Econogás a biogás de 40 kW, funciona como planta de transferencia manual, transferencia automática, sincronía y paralelismo.

Viene equipada con un tablero multifuncional; así como un generador síncrono WEG y reguladores electrónicos de tensión analógicos de alta confiabilidad.

Tabla 1. Especificaciones de la planta eléctrica

Potencia Nominal	60 Kwe
Potencia Continua en Biogás *	40 Kwe en Biogás *

Tabla 2. Dimensiones de la planta eléctrica

Largo	pulg	86.625
Alto	pulg	52.500
Ancho	pulg	61.250

Tabla 3. Especificaciones del motor

Potencia Motor Nominal @ 1800 r.p.m	67 B.H.P
Potencia Motor Continua @ 1800 r.p.m	54 B.H.P
Modelo	TWG60
Tipo de Motor	6.372
R.P.M.	1800 RMP
Combustible	Biogás
Tipo de encendido	Electrónico
Tipo de Aspiración	Natural
Número de Cilindros	6
Diámetro	(3.975 pulg) 100.96mm
Carrera	5 Pulg (127 mm)
Cilindrada	6.1 L
Sistema de enfriamiento	50% Agua y 50% anticongelante
Especificaciones del Aceite del Motor	SAE 20W-50 Norma MIL- 2104D CD Serie 3
Relación de Compresión	12.5:1
Consumo Combustible a plena carga (100%)	33m ³ /hr
Cantidad de Liquido Refrigerante	28 L
Gobernación	Electrónica
Filtro de Aire	Tipo seco
Diámetro interior de la salida de escape	3 pulg.
Cantidad de Aceite Incluyendo Filtros	14.1 L
Batería recomendada	12 V LTH 827C

Tabla 4. Especificaciones del generador

Potencia del Generador	76 Kwe / 95 Kva
Modelo	GTA201AIHE (20025117)
Servicio Stand by.	76 Kwe / 95 Kva
Continuo	64 Kwe / 80 Kva
Tensión	220 V a 440 V
Factor de Potencia	0.8
Frecuencia	60 Hz
Brida	SAE 3
Disco	SAE 11.5
No. de Terminales del Generador	12
Tipo de Aislamiento del Generador	Baja tensión / Clase H
Tipo de Excitación	Generador sin escobillas con bobina auxiliar
Tipo de Refrigeración del Generador	Abierto Autoventilado (Estandar)
Regulador de Tensión Integrado	Electrónico
Amperaje	220V-120 amperes 440V- 60 amperes
Tipo de Carcasa del Generador	IEC20-200 Corta
Fases	3
Hilos	4
Ciclo de Operación	Continuo % Intermitente
Régimen de Sobrecarga	10% hasta 2 horas /24 horas
Tipo de Generador	Síncrono Seriado

5. EFICIENCIA ELÉCTRICA Y COMPOSICIÓN DE LOS GASES DEL GENERADOR

Datos de partida:

Potencia eléctrica: $P_{elec} := 40 \text{ kW}$

Producción diaria de biogás: $Q_{biogás} := 22.245 \frac{\text{Nm}^3}{\text{hr}}$

Potencia calorífica inferior del biogás: $PCI := 5.366 \cdot 10^3 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^3}$

$R := 0.082 \frac{\text{atm} \cdot \text{L}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$

$M_{\text{CH}_4} := 16 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$ $M_{\text{CO}_2} := 44 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$ $M_{\text{H}_2\text{O}} := 18 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$ $M_{\text{N}_2} := 28 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$ $M_{\text{O}_2} := 32 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$

- **Eficiencia eléctrica:**

Consumo combustible: $C_c := Q_{biogás} \cdot PCI \cdot \frac{4.187}{3600} = 138.83 \text{ kW}$

$E_{electrica} := \frac{P_{elec}}{C_c} \cdot 100 = 28.812 \%$

- **Densidad del biogás:**

Composición del biogás: 62.5% CH_4 36% CO_2 1.5 % N_2

Ecuación de estado de los gases ideales:

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

$$P \cdot V = (m/M) \cdot R \cdot T$$

$$d = m/V = (P \cdot M)/(R \cdot T)$$

donde:

d: densidad

m: masa

V: Volumen

n: Número de moles

R: Constante de los gases ideales

M: Masa molecular

Teniendo en cuenta condiciones normales: $P := 1 \text{ atm}$ $T := 273 \text{ K}$

$$d_{\text{CH}_4}_{273} := \frac{M_{\text{CH}_4}}{R \cdot T} = 0.715 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$d_{\text{CO}_2}_{273} := \frac{M_{\text{CO}_2}}{(0.082 \cdot 273)} = 1.966 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$dN2_{273} := \frac{M_{N2}}{(0.082 \cdot 273)} = 1.251 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$dbiogás := dCH4_{273} \cdot 0.625 + dCO2_{273} \cdot 0.36 + dN2_{273} \cdot 0.015 = 1.17 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

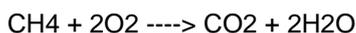
• **Consumo de combustible:**

$$m_{biogás} := Q_{biogás} \cdot dbiogás = 26.095 \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$$

• **Composición volumétrica de los gases de escape**

De la composición del biogás, $0.625 \frac{\text{Nm}^3 \text{CH}_4}{\text{Nm}^3 \text{biogás}}$ $0.36 \frac{\text{Nm}^3 \text{CO}_2}{\text{Nm}^3 \text{biogás}}$ $0.015 \frac{\text{Nm}^3 \text{N}_2}{\text{Nm}^3 \text{biogás}}$

Reacción de combustión que se produce en el motor:



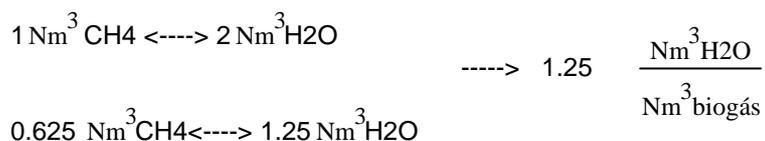
Estequiométricamente:



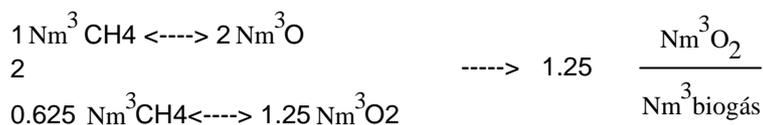
El CO2 no reacciona, el CO2 total que sale de los gases de escape es :

$$CO2_{total} := 0.625 + 0.36 = 0.985 \frac{\text{Nm}^3 \text{ CO}_2}{\text{Nm}^3 \text{ biogás}}$$

Vapòr de agua que se produce:



Oxígeno mínimo consumido:



El N2 no reacciona, por lo que sale en su totalidad de los gases de escape.

Pasándolo todo a kg/hr:

$$0.985 \cdot \frac{1}{22.4} \cdot M_{CO2} \cdot Q_{biogás} = 43.04 \frac{\text{kgCO}_2}{\text{hr}} \quad (\text{CO}_2 \text{ en los gases de escape})$$

$$1.25 \cdot \frac{1}{22.4} \cdot M_{\text{H}_2\text{O}} \cdot Q_{\text{biogás}} = 22.344 \frac{\text{kgH}_2\text{O}}{\text{hr}} \quad (\text{H}_2\text{O en los gases de escape})$$

$$0.015 \cdot \frac{1}{22.4} \cdot M_{\text{N}_2} \cdot Q_{\text{biogás}} = 0.417 \frac{\text{kgN}_2}{\text{hr}} \quad (\text{N}_2 \text{ del biogás en los gases de escape})$$

$$1.25 \cdot \frac{1}{22.4} \cdot M_{\text{O}_2} \cdot Q_{\text{biogás}} = 39.72 \frac{\text{kgO}_2}{\text{hr}} \quad (\text{O}_2 \text{ consumido})$$

Suposición: Se consume un 70% de oxígeno (30% en exceso), por tanto, el caudal de O₂ de admisión al motor será:

$$O_{2 \text{ admisión}} := \frac{39.723}{0.7} = 56.747 \frac{\text{kgO}_2}{\text{hr}}$$

Del aire de admisión el 21 % es Oxígeno, por tanto, el caudal másico de aire de admisión es:

$$m_{\text{aire_admisión}} := \frac{100}{21} \cdot O_{2 \text{ admisión}} = 270.224 \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$$

$$\text{Oxígeno que no se consume: } O_{2 \text{ escape}} := 0.3 \cdot O_{2 \text{ admisión}} = 17.024 \frac{\text{kgO}_2}{\text{hr}}$$

$$\text{N}_2 \text{ en el aire: } N_{2 \text{ aire}} := 0.79 \cdot m_{\text{aire_admisión}} = 213.477 \frac{\text{kgN}_2}{\text{hr}}$$

El N₂ del biogás no reacciona, por tanto, el N₂ total en los gases de escape es:

$$N_{2 \text{ total}} := 0.417 + N_{2 \text{ aire}} = 213.894 \frac{\text{kgN}_2}{\text{hr}}$$

- **Caudal másico de gases de escape**

$$m_{\text{gases}} := m_{\text{biogás}} + m_{\text{aire_admisión}} = 296.319 \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$$

- **Composición másica de los gases de escape**

$$\text{O}_2: \frac{17.024}{m_{\text{gases}}} \cdot 100 = 5.745 \quad \%$$

$$\text{N}_2: \frac{213.894}{m_{\text{gases}}} \cdot 100 = 72.184 \quad \%$$

$$\text{CO}_2: \frac{43.04}{m_{\text{gases}}} \cdot 100 = 14.525 \quad \%$$

$$\text{H}_2\text{O}: \frac{22.344}{m_{\text{gases}}} \cdot 100 = 7.541 \quad \%$$

- **Densidad de los gases de escape**

Los gases salen del generador a 400 °C

$$dCO2_{400} := dCO2_{273} \cdot \frac{273}{673} = 0.797 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$dN2_{400} := dN2_{273} \cdot \frac{273}{673} = 0.507 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$dO2_{273} := \frac{M_{O2}}{0.082 \cdot 273} = 1.429 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$dH2O_{273} := \frac{M_{H2O}}{0.082 \cdot 273} = 0.804 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$dO2_{400} := dO2_{273} \cdot \frac{273}{673} = 0.58 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$dH2O_{400} := dH2O_{273} \cdot \frac{273}{673} = 0.326 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$d_{\text{gases}} := dCO2_{400} \cdot \frac{14.525}{100} + dH2O_{400} \cdot \frac{7.541}{100} + dO2_{400} \cdot \frac{5.745}{100} + dN2_{400} \cdot \frac{72.184}{100} = 0.54 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

- **Caudal volumétrico de gases de escape**

$$Q_{\text{gases}} := \frac{m_{\text{gases}}}{d_{\text{gases}}} = 548.778 \frac{\text{m}^3}{\text{hr}}$$

- **Capacidad calorífica de los gases de escape**

$$Cp_{CO2_{400}} := 0.4716 \frac{\text{kcal}}{\text{Nm}^3\text{°C}}$$

$$Cp_{O2_{400}} := 0.3288 \frac{\text{kcal}}{\text{Nm}^3\text{°C}}$$

$$Cp_{N2_{400}} := 0.3111 \frac{\text{kcal}}{\text{Nm}^3\text{°C}}$$

$$Cp_{H2O_{400}} := 0.384 \frac{\text{kcal}}{\text{Nm}^3\text{°C}}$$

Fuente: Chemical Engineering Handbook (R. H. Perry and C. H. Chilton)

$$Cp_{\text{gases}_{400}} := 0.4716 \cdot \frac{14.525}{100} + 0.3288 \cdot \frac{5.745}{100} + 0.3111 \cdot \frac{72.184}{100} + 0.3841 \cdot \frac{7.541}{100} = 0.341 \frac{\text{kcal}}{\text{Nm}^3\text{°C}}$$

$$Cp_{\text{gases}_{400}} := 0.341 \cdot 4.18 = 1.425 \frac{\text{kJ}}{\text{Nm}^3\text{°C}}$$

6. BIBLIOGRAFÍA

- Perry & Chilton. The Chemicals Engineers Handbook.
- Ramírez Rodríguez, Luis Diego. Generación eléctrica por medio de biogás.
- González Marín, Pilar. Diseño de una planta de cogeneración para una E.D.A.R.
- <http://www.mopesa.com.mx/Motores.html>.

ANEJO N° 8
CAPTACIÓN DEL CO₂
DE LOS GASES DE
COMBUSTIÓN

ÍNDICE

- 1. INTRODUCCIÓN**
- 2. SISTEMAS DE CAPTURA DE CO₂**
- 3. SISTEMA DE CAPTURA DE CO₂ MEDIANTE ABSORCIÓN QUÍMICA**
 - 3.1. Ensayos en discontinuo**
 - 3.2. Cinética de las reacciones**
 - 3.3. Ensayos en continuo**
 - 3.4. Ventajas del empleo de disoluciones carbonatadas**
- 4. ELECCIÓN DE LA COLUMNA DE ABSORCIÓN**
- 5. DISEÑO DE LA COLUMNA DE ABSORCIÓN**
- 6. BIBLIOGRAFÍA**

1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, la producción de biocombustibles a partir de microorganismos fotosintéticos, tales como las microalgas, despierta gran interés. La producción de microalgas puede ser económica y ambientalmente sostenible y la producción de hidrocarburos a partir de biomasa de microalgas ofrece ventajas significativas sobre el uso de los cultivos tradicionales, como la canola y el frijol de soya. Para producir grandes cantidades de biomasa de microalgas, es necesario suministrar grandes cantidades de nutrientes, especialmente nitrógeno, fósforo, y sobre todo de carbono. El carbono constituye la mitad del peso de la biomasa y se suministran normalmente como dióxido de carbono debido a su alta solubilidad y bajo precio. Por otra parte, la necesidad de disponer de grandes cantidades de CO₂ impone el uso de gases de combustión como fuente de carbono. Los procesos de combustión son la principal fuente de CO₂, incluyendo la energía procedente de la quema de combustibles fósiles, fabricación de productos químicos y petroquímicos, la producción de cemento, y plantas de purificación de gas natural.

El dióxido de carbono se puede suministrar a los cultivos de microalgas mediante separación previa de los gases de combustión o mediante la inyección directa los gases de combustión en la cultivo. Hay varias técnicas disponibles para separar el CO₂ de los gases de combustión como la absorción química, la destilación criogénica, la separación con membranas, la adsorción usando de tamices moleculares. La absorción química de CO₂ del gas de combustión con soluciones de amina es la técnica más ampliamente utilizada. Sin embargo, las aminas son tóxicas y corrosivas y requieren un proceso de calentamiento para la regeneración que implica un alto consumo de energía, alrededor de 4 MJ/kgCO₂. Otros procesos basados en carbonato de potasio tienen menor calor de regeneración que las aminas, pero su velocidad de reacción es más lenta.

Por otro lado, la inyección directa de los gases de combustión en cultivos de microalgas requiere el diseño y funcionamiento adecuado de las unidades de carbonatación en el interior del fotobiorreactor. Por lo general, fotobiorreactores están diseñados satisfacer las condiciones necesarias de las células, tales como la luz, la temperatura, el pH y la mezcla pero el problema del suministro de CO₂ no se tienen en cuenta ya que se utiliza CO₂ puro, por lo que la eficiencia del uso del CO₂ es baja. Para el suministro de CO₂ en los cultivos de microalgas hay dos estrategias que se utilizan normalmente: burbujeo continuo e inyección bajo demanda. Por burbujeo continuo de los gases de combustión el medio se vuelve ácido y las eficiencias máximas registradas del uso de CO₂ es de 8,1 % y 4,2 %. Por inyección bajo demanda, los gases de combustión se inyectan para controlar el pH del cultivo en el óptimo para el microorganismo y el uso máximo de CO₂, alcanzándose eficiencias de 32,8%. En ambos casos, la eficiencia del uso de CO₂ es baja y se debe ser mejor mediante el diseño adecuado de unidades de carbonatación, para los que

se necesita el conocimiento de los fenómenos de transferencia de materia y de intercambio de gases en los cultivos.

Si el CO₂ se separa de los gases de combustión antes de ser inyectado en el fotobiorreactor, el coste energético es demasiado alto. Por otro lado, si los gases de combustión se inyectan directamente, las condiciones fisiológicas y la baja transferencia de materia en los fotobiorreactores hace que la mayor parte del CO₂ se libere a la atmósfera. Para resolver este problema, es necesario desarrollar un proceso que permita la captura de CO₂ de manera eficiente de los gases de combustión y transferirlo a cultivos de microalgas. En este sentido, se ha desarrollado y patentado un nuevo proceso para la captura de CO₂ de los gases de combustión adecuado para ser acoplado a los procesos con microalgas. El proceso consiste en la captura de CO₂ de los gases de combustión con agua enriquecida en un tampón carbonato-bicarbonato.

La fase líquida resultante se puede depurar a continuación en un fotobiorreactor biológico con microalgas. La fase absorbente regenerada puede ser utilizada de nuevo en la unidad de absorción.

2. SISTEMAS DE CAPTURA DE CO₂

Para la captura de CO₂, y otros gases como NO₂ o SO_x, se han desarrollado numerosos sistemas que se pueden clasificar en sistemas de adsorción física, separación con membranas, destilación criogénica y los de adsorción química.

- Adsorción física: Los procesos de adsorción física emplean materiales capaces de adsorber el CO₂, que luego se "desorbe" mediante cambios de T ó P (Pressure and Temperature Swing Adsorption, PTSA). Entre los materiales adsorbentes se encuentran: carbón activo, materiales mesoporosos, zeolitas, alúminas e hidrotalcitas. Los inconvenientes son que necesita un aumento de temperatura en la fase de desorción (50-100°C), La baja capacidad de adsorción por unidad de volumen de lecho, y que posteriormente o bien se desecha el material o se desorbe, con lo que el CO₂ se reincorpora a la atmósfera.
- Separación con membranas: La selectividad de las membranas a los diferentes gases está relacionada con el material de las que están fabricadas (polímeros, metales, materiales cerámicos). La separación se mejora con corrientes a altas presiones. La ventaja de utilizar membranas radica en la mejora del área de transferencia de materia y eliminar los problemas asociados con el contacto gas-líquido. En esta aplicación la membrana no realiza la operación de separación sino que se hace con etanolaminas. Para evitar la destrucción o deterioro de la membrana ésta debe construirse en politetrafluoroetileno (PTFE). El uso de esta tecnología reduce el costo de instalación y operación del proceso en un 30-40%,

independientemente de las mejoras que puedan introducirse en el empleo de las etanolaminas. Presentan como inconveniente que todavía no se han utilizado a la escala y condiciones, en términos de disponibilidad y coste, que se necesita para los sistemas de captura de CO₂ (y la fase de recuperación de CO₂).

- **Destilación criogénica:** La destilación criogénica transcurre mediante una serie de etapas de compresión, enfriamiento y expansión, tras las cuales los componentes del gas se pueden separar en una columna de destilación. Esta tecnología se utiliza sobre todo para separar las impurezas de una corriente de CO₂ de alta pureza. El inconveniente es que todavía no se ha utilizado a la escala de condiciones, en términos de disponibilidad y coste, que se necesita para los sistemas de captura de CO₂ en grandes focos emisores.
- **Absorción química:** La mayoría de los procesos de absorción química están basados en carbonato de potasio o en alcanolaminas. La monoetanolamina (MEA) y la dietanolamina (DEA) son álcalis más fuertes que el carbonato de potasio, por lo que reduce en mayor grado el contenido de los gases ácidos. La capacidad de absorción es también mayor para las alcanolaminas. Se suelen utilizar aditivos para incrementar la capacidad de absorción de las soluciones de K₂CO₃, y presentan la desventaja de una menor eficacia de depuración de los gases.

En la Tabla 1 se expone un resumen de los distintos procesos de absorción química:

Tabla 1. Resumen de los distintos procesos de absorción química

PROCESOS		ABSORBENTE (en solución acuosa)
CON AMINAS	Adip (Shell Dev. Co.)	Diisopropanolamina
	Amine Guard (Union Carbide)	MEA+inhibidores de corriente
	DEA	Dietanolamina
	Econamine (Fluor Corp.)	Dietanolamina
CON CARBONATOS	Benfield (Union Carbabide)	K ₂ CO ₃ + aditivos
	Catacarb (Eickmeyer & Ass.)	K ₂ CO ₃ + aditivos
	Gianmarco-Vetrocoke (Gianmarco.)	K ₂ CO ₃ + aditivos

3. ENSAYOS DE ABSORCIÓN QUÍMICA

3.1. Ensayos en discontinuo

Se han realizado experimentos utilizando agua pura, disoluciones de NaOH (como referencia), y disoluciones de DEA (como una de las fases líquidas más utilizadas a escala industrial). Los resultados obtenidos demuestran que, debido a que la solubilidad del CO₂ en agua pura es baja, es necesario operar en condiciones de absorción con reacción química para mejorar la eficiencia de la absorción de CO₂. Cuando se utiliza agua como fase líquida, la eficiencia de eliminación de CO₂ es menor que 10% y el carbono inorgánico total (TIC) absorbido por la fase líquida está por debajo de 0,05 g / L. A pesar de la baja absorción de CO₂ el pH de la fase líquida desciende a valores de 6,4, Figura 1.A. Esto es debido a la baja alcalinidad del agua pura, que se agota inmediatamente. Por lo tanto, el líquido se satura con CO₂, en equilibrio con el gas de entrada, y el pH se vuelve ácido. Cuando se utilizan disoluciones de NaOH, las eficiencias de eliminación de CO₂ son cercanas al 100%. El TIC absorbido por la fase líquida aumenta linealmente con el tiempo. En cuanto al pH, es alto al principio, pero disminuye con el tiempo hasta que los valores mínimos de 8,1 debido a la formación de tampón de carbonato / bicarbonato, Figura 1.A. Mediante adición de hidróxido de sodio, la alcalinidad aumenta y por lo tanto aumenta la capacidad de absorción de CO₂. Cuanto más alta es la concentración de NaOH, mayor es la capacidad de absorción de CO₂, pero la cinética permanece inalterada. Por lo tanto, la pendiente de TIC en función del tiempo es la misma, independientemente de la concentración de NaOH. Este comportamiento demuestra que cuando se utilizan disoluciones de NaOH, la absorción se realiza en régimen de reacción instantánea, por lo que está limitada por la velocidad de transferencia de CO₂ del gas al líquido.

Los experimentos con disoluciones de DEA se llevaron a cabo para tener como base de comparación uno de los reactivos más extendidos en la industria. Los resultados mostraron un comportamiento análogo a la que se observa cuando se usan disoluciones de NaOH. Esto indica que se producen fenómenos similares. La eliminación de CO₂ de la fase gaseosa alcanza valores cercanos al 100% para concentraciones de DEA más de 0,5 moles/L, pero disminuye cuando la concentración de la DEA en la fase líquida se agota, Figura 1.B. El TIC absorbido por la fase líquida aumenta linealmente con el tiempo. Sin embargo, la pendiente es la misma a concentraciones de más 0,5 mol /L de DEA y más alta que usando disoluciones de NaOH, Figura 1.B. Con respecto al pH, el valor inicial de 10 sólo disminuye ligeramente cuando el CO₂ es absorbido, Figura 1.B.

Aunque la absorción de CO₂ utilizando disoluciones de DEA es más alta que con el uso de disoluciones de NaOH, es del mismo orden de magnitud y el comportamiento es similar en ambos casos. Sin embargo, ninguna de estas fases

líquidas se puede utilizar para absorber CO₂ de los gases diluidos porque no se puede biológicamente. La fase líquida que puede utilizarse potencialmente debe absorber CO₂ a alta velocidad sin modificar sus propiedades. Además, no puede ser tóxica y tiene que regenerarse naturalmente a través la fotosíntesis de los microorganismos. Para una alta velocidad de absorción de CO₂, es necesario trabajar en las mejores condiciones químicas, como cuando se utilizan disoluciones de NaOH y de DEA . Por otro lado, el pH de la fase líquida debe mantenerse lo más constante posible y cerca del requerida para el crecimiento óptimo de la microorganismos . Por lo tanto, se concluye que el uso de disoluciones de carbonato/ bicarbonato es la mejor opción.

Cuando se utilizaron disoluciones de bicarbonato de sodio a pH 10, la eliminación de CO₂ de la fase de gas alcanzaron valor máximos de 71% , Figura 2.A que son más bajos que los medidos usando NaOH o disoluciones de DEA. El TIC absorbido aumenta linealmente con el tiempo. La pendiente es la misma sea cual sea la concentración de bicarbonato, Figura 2.A, pero es inferior a los medidos con disoluciones de NaOH o DEA. En cuanto al pH, sólo disminuye de 10,0 a 9,0 a la concentración mínima ensayada de bicarbonato 0,3 mol/L, Figura 2.A. Esto es debido a que el tampón carbonato/bicarbonato estabiliza el pH y permite el aumento de la cantidad de carbono inorgánico absorbido sin grandes variaciones de pH. Cuando se utilizan disoluciones de carbonato de sodio, el comportamiento es similar, pero la eficiencia de eliminación de CO₂ de la fase gaseosa y el TIC absorbido son más altos. Por lo tanto, la eliminación de CO₂ alcanza valores hasta un 78% y la pendiente de la variación del TIC con el tiempo es más alto que la obtenido con soluciones de bicarbonato, Figura 2.B. la razón es que el mayor pH de soluciones de carbonato mejora la cinética de la reacción del CO₂ y por tanto la velocidad de absorción de CO₂. El pH osciló desde 11,6 hasta 9,2 durante los ensayos.

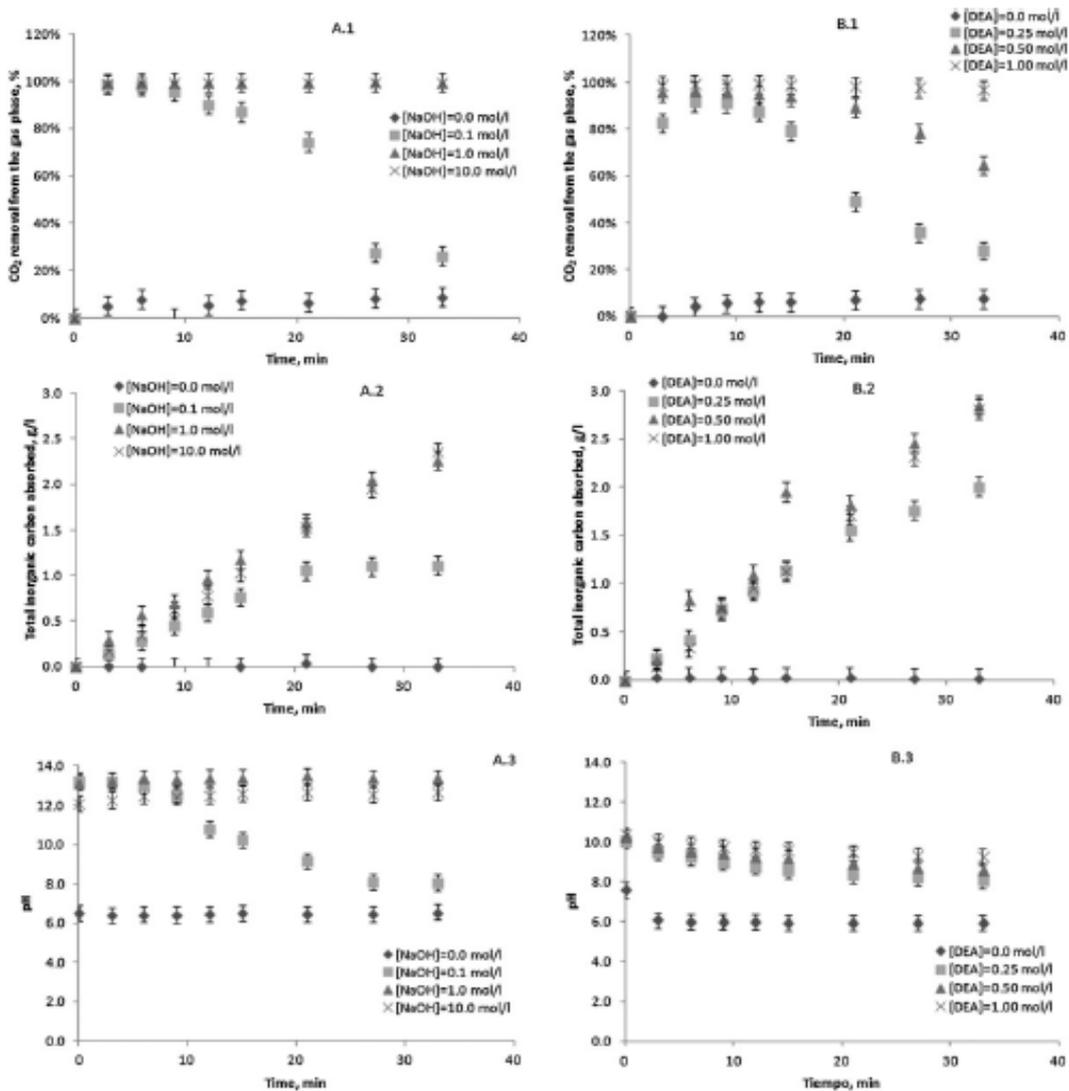


Figura 1. Influencia del tiempo y la composición de la fase líquida, empleando disoluciones de NaOH (A) y DEA (B), mediante ensayos de absorción en discontinuo, en la eficiencia de eliminación de CO₂ de la fase gaseosa (1), la concentración de carbono orgánico total absorbido por la fase líquida (2) y el pH (3).

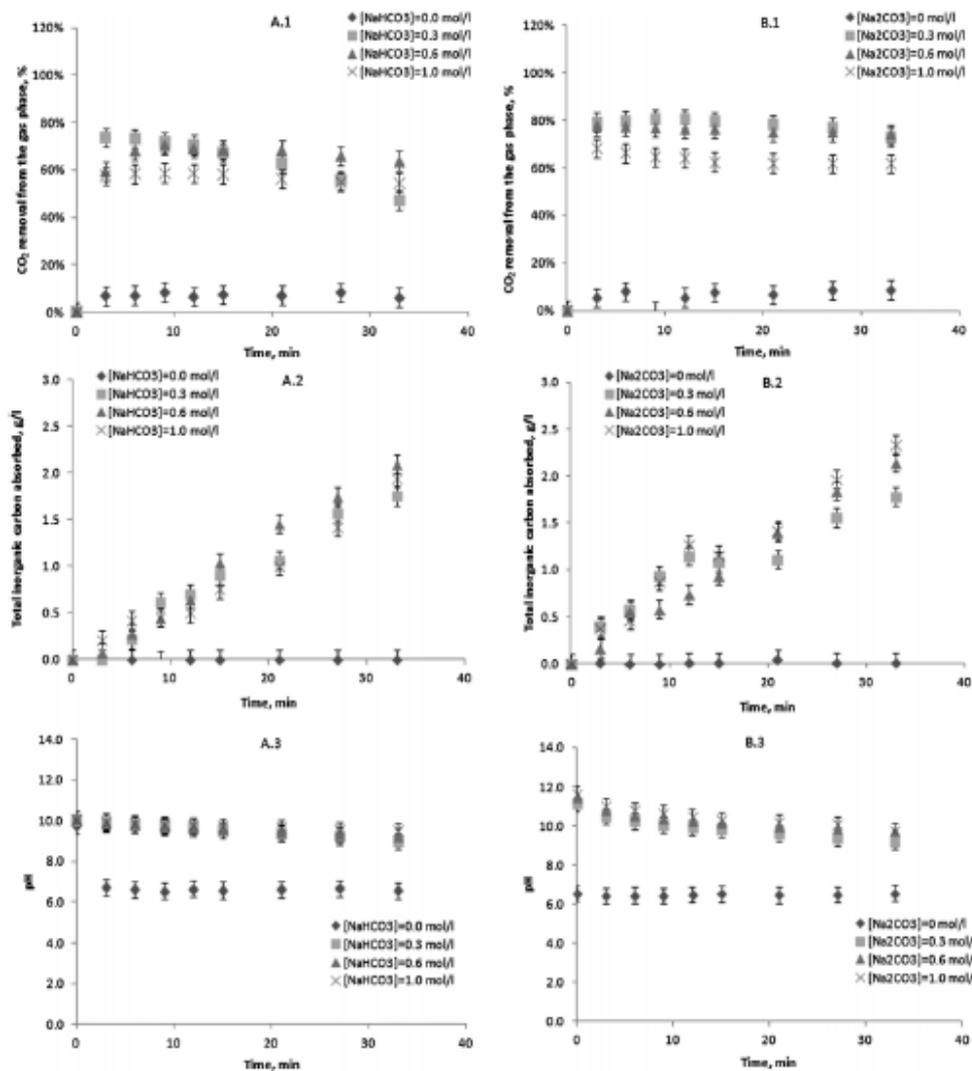
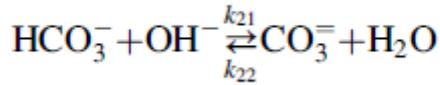
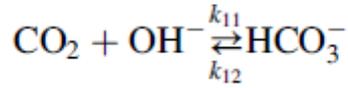


Figura 2. Influencia del tiempo y la composición de la fase líquida, NaHCO₃ (A) y Na₂CO₃ (B), mediante ensayos de absorción en discontinuo, en la eficiencia de eliminación de CO₂ de la fase gaseosa (1), la concentración de carbono orgánico total absorbido por la fase líquida (2) y el pH (3).

3.2. Cinética de las reacciones

Los datos obtenidos de los experimentos discontinuos señalan la importancia de la cinética de la reacción implicada en la absorción de CO₂ en la fase líquida. Para estudiar el proceso, se desarrolló un modelo de absorción de CO₂. La aplicación de este modelo a los resultados obtenidos en los experimentos de modo discontinuo permite determinar los mejores parámetros cinéticos de ajuste para cada experimento. Cuando se utilizan disoluciones de NaOH, Na₂CO₃ o NaHCO₃, tienen lugar las siguientes reacciones en la fase líquida:



La velocidad de cada reacción es función de la concentración de cada una de las especies carbonatadas y de la concentración de hidroxilo, por lo que es función del pH. Con respecto a la primera reacción, el parámetro cinético para la reacción directa (k_{11}) es alto y aumenta con el valor de pH. Mientras que el parámetro cinético para la reacción inversa (k_{12}) es bajo y muestra poca variación con el pH (Figura 4). En cuanto a la segunda reacción, el parámetro cinético de la reacción directa (k_{21}) es sólo un orden de magnitud más alto que el correspondiente a la reacción inversa (k_{22}). Como ocurre para la primera reacción, cuanto más alto es el pH, mayor es el valor de k_{21} . Por otro parte, el valor de k_{22} no está tan influido por las variaciones de pH. Estos resultados sugieren que cuando se utilizan soluciones carbonatadas ambas reacciones se llevan a cabo y la velocidad de cada una depende de los parámetros cinéticos y de la concentración de cada compuesto.

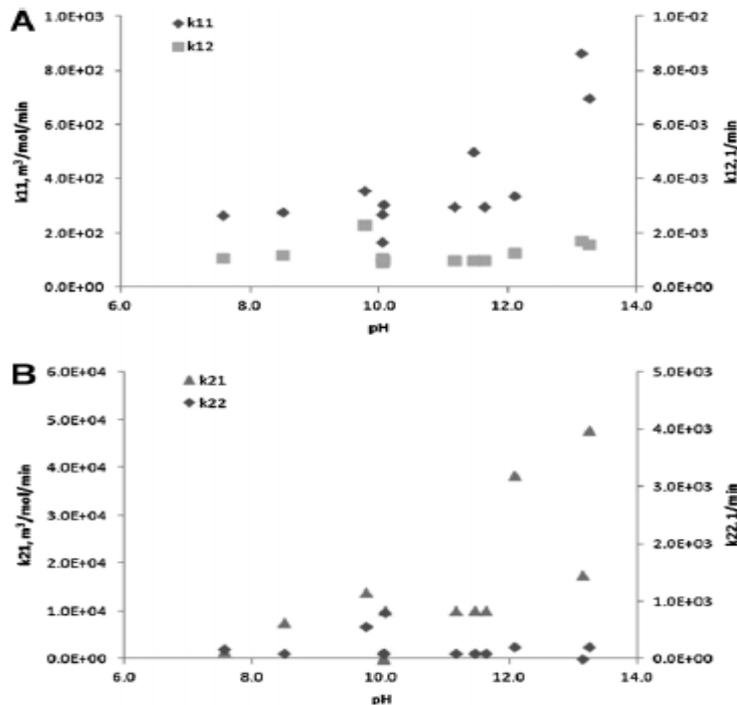


Figura 3. Variación de los parámetros cinéticos obtenida a partir de ensayos de absorción en discontinuo empleando NaOH, NaHCO₃ y Na₂CO₃

3.3. Ensayos en continuo

A partir de los datos mostrados anteriormente, se puede concluir que ambas disoluciones de bicarbonato y carbonato se pueden utilizar para una absorción eficiente del CO₂ de gases diluidos. Para demostrar esto, se han realizado ensayos en continuo, modificando el caudal de fase líquida y por lo tanto el tiempo de residencia del líquido. Se empleó agua pura y disoluciones acuosas de sodio, carbonato y DEA con una concentración de 0,25 mol/L. El objetivo era mantener una alta depuración de CO₂ y reducir al mínimo el caudal de líquido para aumentar la eficiencia de utilización de la fase líquida. Los resultados muestran que el agua pura es un absorbente de CO₂ pobre en comparación con disoluciones de carbonato o DEA, estos últimos muestran datos similares, Figura 4. El rendimiento de la absorción es un función del caudal de fase líquida y por lo tanto de la residencia tiempo y la composición de dicha fase. Los datos muestran que se puede lograr una eficiencia de eliminación de CO₂ de hasta el 70 % usando soluciones de carbonato de sodio con tiempos de residencia de 15 min, Figura 4.A, pero en estas condiciones el TIC absorbido por la fase líquida es de sólo 0,77 gC / L, Figura. 4.B. El pH de la fase líquida sólo desciende de 10.0 a 9,77, Figura 4.C.

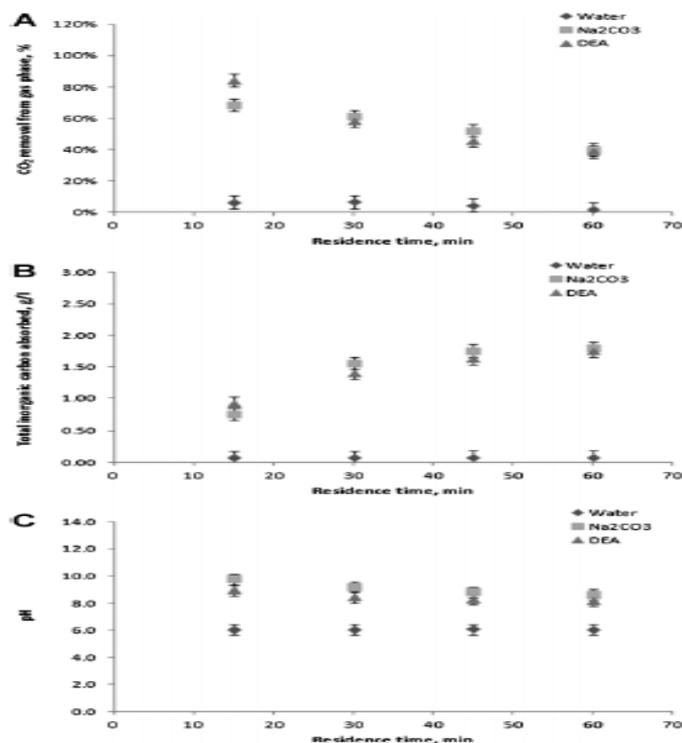


Figura 4. Influencia del tiempo y la composición de la fase líquida, mediante ensayos de absorción en continuo, en la eficiencia de eliminación de CO₂ de la fase gaseosa (1), la concentración de carbono orgánico total absorbido por la fase líquida (2) y el pH (3).

3.4. Ventajas del empleo de disoluciones carbonatadas

- Rendimientos de captura de CO₂ similares a la absorción química con aminas.
- El compuesto utilizado como absorbente es más barato y disponible.
- El compuesto utilizado como absorbente no es tóxico o nocivo.
- Permite la utilización de cualquier calidad de agua.
- En un único sistema se produce la desulfuración, reducción de NO_x y captura de CO₂.
- Transformación y utilización del CO₂ directamente, bien como combustible (biomasa, bioetanol, etc.) cuyas emisiones de CO₂ son neutras.
- Empleo de un sistema de regeneración biológica.

4. ELECCIÓN DE LA COLUMNA DE ABSORCIÓN

Se han considerado dos equipos de contacto para la absorción: columna de relleno y columna de burbujeo. Si bien los rendimientos de depuración de CO₂ obtenidos en ambos son similares, en la columna de burbujeo es posible conseguir concentraciones de carbono inorgánico absorbido en la fase líquida más elevadas, lo cual permite reducir en un orden de magnitud el volumen de líquido necesario por volumen de gas a tratar. Además, la baja concentración de gases como NO_x y SO_x no afecta a la absorción de CO₂, ya que la capacidad tampón del medio permite absorber dichos gases sin modificar significativamente las características de la fase líquida. Por el mismo motivo, la presencia de uno de estos gases no afecta a la capacidad de absorción de los otros.

5. DISEÑO DE LA COLUMNA DE ABSORCIÓN

El procedimiento consiste en poner en contacto una fase líquida con sales tampón de carbonato-bicarbonato en una relación aproximada de 2:1, cuya concentración de carbono inorgánico total menor o igual que 25 g/L y un pH comprendido entre 8 y 12, con una corriente gaseosa que contiene CO₂.

El contacto entre la fase gaseosa a depurar y la fase líquida se hará empleando una columna de burbujeo. En este caso el tiempo de residencia recomendado de la fase acuosa es de entre 15 y 30 minutos. Así una columna de burbujeo de 100 L es suficiente para depurar una corriente gaseosa de 200 L/min, capturando el 80% del CO₂ contenido en la misma, mediante la circulación de 4 L/min de fase acuosa enriquecida en carbonato-bicarbonato, con una concentración de NaHCO₃ comprendida entre 5 y 22 g/L y una concentración de Na₂CO₃ entre 10 y 44 g/L. Este proceso es compatible con el uso tanto de agua dulce como de agua de mar o

salobre para la preparación de la fase acuosa enriquecida en carbonato-bicarbonato, e incluso de aguas procedentes de usos agrícolas o del tratamiento secundario de aguas residuales, con lo que se obtiene una ventaja medioambiental y económica adicional.

Operando con esta columna, con mezclas binarias aire-CO₂ al 100% como fase gaseosa y agua de la red como fase líquida, se ha determinado el coeficiente volumétrico de transferencia de materia. Los resultados muestran como el valor de dicho coeficiente es elevado, alcanzándose valores de K_{LaL} de 50 h⁻¹.

Adaptando la información experimental anterior al presente proyecto, teniendo en cuenta que el caudal de fase gaseosa a depurar es 4684,75 L/min y que debe cumplirse el criterio de escalado:

- Mantener las relaciones $\frac{\text{Caudal fase gaseosa}}{\text{Volumen columna}}$, $\frac{\text{Caudal fase acuosa}}{\text{Volumen columna}}$
 - Mantener la relación $\frac{\text{Altura columna}}{\text{Diámetro columna}}$
 - Factor de escalado de la columna comprendido entre 10 y 30
-
- Caudal de fase gaseosa (gases de escape del generador): 4684,75 L/min
 - Caudal de fase acuosa enriquecida en carbonato-bicarbonato: 93,70 L/min
 - Concentración de NaHCO₃ en la fase acuosa: 11 g/L
 - Concentración de Na₂CO₃ en la fase acuosa: 22 g/L
 - Tiempo de residencia de la fase acuosa: 15 min
 - Volumen de la columna de burbujeo: 2342,38 L
 - Altura y diámetro de la columna de burbujeo: Las columnas de burbujeo están formadas por un recipiente cilíndrico generalmente con alturas superiores al doble del diámetro. Asumiendo una relación altura/diámetro de 2,5:

Diámetro: 1,06 m

Altura: 2,65 m

- Caudal de CO₂ capturado:

Caudal másico de fase gaseosa (gases de escape): 151,775 kg/h

Fracción másica de CO₂ en los gases de escape: 14,525%

Porcentaje de CO₂ recuperado: 80%

Caudal másico de CO₂ absorbido por la fase líquida: 17,636 kg/h

- Caudal de gas de escape de la columna:

Caudal másico de vapor de agua que condensa: 11,445 kg/h

Caudal másico de CO₂ absorbido por la fase líquida: 17,636 kg/h

Caudal de gases de escape de la columna: 122,694 kg/h

6. BIBLIOGRAFÍA

- González-López, C.V., Acién Fernández, F. G., Fernández Sevilla, J. M., Molina Grima, E. Development of a Process for Efficient Use of CO₂ From Flue Gases in the Production of Photosynthetic Microorganisms.
- González López, C. V. 2010. Eliminación de CO₂ de gases de combustión mediante microorganismos fotosintéticos. Tesis Doctoral. Universidad de Almería. Facultad de Ciencias Experimentales. Departamento de Ingeniería Química.
- Endesa Generación S.A. Captación de Gases en Fase Líquida. Número publicación internacional WO 2009/112624 A1.

ANEJO N° 9
DISEÑO ESTÁNDAR DE
UNA TURBINA

ÍNDICE

- 1. EQUIPOS PARA LA AGITACIÓN**
- 2. DISEÑO ESTÁNDAR DE UNA TURBINA**
- 3. CONSUMO DE POTENCIA EN TANQUES AGITADOS**
 - 3.1. Potencia consumida para la agitación**
- 4. DISEÑO DEL TANQUE DE MEZCLA DE LA DISOLUCIÓN CARBONATADA**
- 5. BIBLIOGRAFÍA**

1. EQUIPOS PARA LA AGITACIÓN

Generalmente, los líquidos se agitan en un recipiente cilíndrico que puede estar abierto o cerrado. La altura del líquido en el tanque debe ser del orden del diámetro del tanque. Un motor impulsa al agitador montado sobre un eje.

- Agitador de tres aspas. Estos agitadores giran a velocidades de 400 a 1750 rpm y son adecuados para líquidos de baja viscosidad.
- Agitadores de paletas. Para velocidades de 20 a 300 rpm se emplean diversos tipos de agitadores de paletas. Se tienen sistemas de dos a cuatro paletas planas. Estos agitadores nos son efectivos para sólidos en suspensión porque, aunque hay un buen flujo radial, hay poco flujo axial o vertical. Se emplea con líquidos viscosos que pueden generar depósitos en las paredes y para mejorar la transferencia de calor hacia las mismas, pero no es buen mezclador. Se suele usar para procesar pastas de almidón, pinturas, adhesivos y cosméticos.
- Agitadores de turbina. Normalmente tienen cuatro o seis aspas. Las turbinas con aspas planas producen un flujo radial. Con la turbina de hojas inclinadas con las aspas a 45°, se imparte cierto flujo axial, de modo que hay una combinación de flujos radial y axial. Este tipo es útil para sólidos en suspensión, ya que las corrientes fluyen hacia abajo y luego levantan los sólidos depositados.
- Agitadores de banda helicoidal. Se usa para disoluciones sumamente viscosas y opera a pocas rpm, en la región laminar.

La viscosidad del fluido es uno de los diferentes factores que influyen en la selección del tipo de agitador. En seguida se dan algunas indicaciones de los intervalos de viscosidad de esos agitadores. Los propulsores se usan para viscosidades del fluido inferiores a 3 Pa.s (3000 cp); las turbinas pueden usarse por debajo de unos 100 Pa.s (100000 cp); las paletas modificadas como los agitadores tipo anca se pueden usar desde más de 50 Pa.s hasta unos 500 Pa.s (500000 cp); los agitadores helicoidales y de tipo banda se suelen usar por encima de este intervalo hasta cerca de 1000 Pa.s y han utilizado hasta más de 25000 Pa.s. Para viscosidades mayores de unos 2,5 a 5 Pa.s (5000 cp) o más, los deflectores no se necesitan porque hay poca turbulencia.

2. DISEÑO ESTÁNDAR DE UNA TURBINA

El agitador de turbina que se muestra en la Figura 1 es el agitador más usado en las industrias de proceso. Para diseñar un sistema de agitación ordinario, genralmnete se usa este tipo de agitador en el diseño inicial. Las proporciones geométricas del sistema de agitación que se considera como el diseño "normal" típico se muestra en la Tabla 1. Estas proporciones relativas son la base de las correlaciones principales del desempeño de los agitadores en muchas publicaciones.

En algunos casos, para las correlaciones del agitador. $W/D_a = 1/8$. El número de deflectores en la mayoría de los usos es 4. El claro o brecha entre los deflectores y la pared suele ser de 0,1 a 0,15 J para asegurar que el líquido no forme bolsas estancadas cerca de esa zona. En pocas correlaciones la relación entre el deflector y el diámetro del tanque es $J/D_T = 1/10$ en lugar de $1/12$.

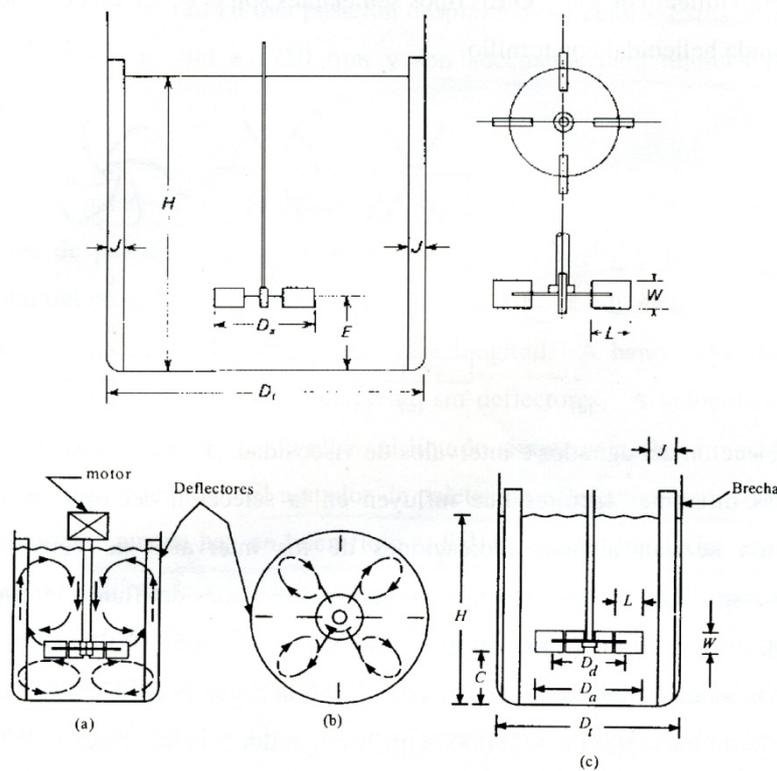


Figura 1. Esquema de un sistema de agitación

Tabla 1. Proporciones geométricas para un sistema de agitación "normal"

$\frac{D_a}{D_t} = \frac{1}{3}$	$\frac{H}{D_t} = 1$	$\frac{J}{D_t} = \frac{1}{12}$
$\frac{W}{D_a} = \frac{1}{5}$ $\frac{D_d}{D_a} = \frac{2}{3}$	$\frac{C}{D_t} = \frac{1}{3}$	$\frac{L}{D_a} = \frac{1}{4}$

3. CONSUMO DE POTENCIA EN TANQUES AGITADOS

Para que un tanque de proceso sea eficaz, con independencia del problema de agitación, el volumen de fluido movido por el agitador debe ser suficiente para llevar las corrientes hasta las partes más remotas del tanque. En las operaciones de mezcla y dispersión la velocidad de circulación no es el único factor, ni siquiera el más importante, sino que con frecuencia la turbulencia de la corriente controla la eficacia de la operación. La turbulencia es una consecuencia de que las corrientes estén adecuadamente dirigidas y de que se generen grandes gradientes de velocidad en el líquido. Tanto la circulación como la generación de turbulencia consumen energía. Algunos problemas de agitación requieren grandes flujos o elevadas velocidades medias, mientras que otros necesitan una elevada turbulencia o disipación local de potencia. Aun cuando tanto la velocidad de flujo como la disipación de potencia aumentan con la velocidad del agitador, la selección del tipo y tamaño del agitador influye sobre los valores relativos de la velocidad de flujo y la disipación de potencia. En general, se utilizan grandes agitadores que se mueven a velocidades medias para promover el flujo, y agitadores más pequeños a velocidad elevada cuando lo que se requiere es una elevada turbulencia interna.

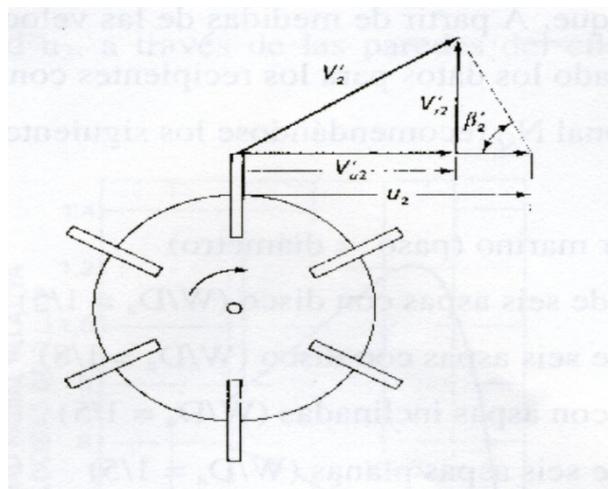


Figura 2. Velocidad en las palas de un rodete de turbina

3.1. Potencia consumida para la agitación

Un factor trascendental en el diseño de un recipiente de agitación es la potencia necesaria para mover el impulsor. Cuando el flujo en el tanque es turbulento, la potencia necesaria podría estimarse a partir del producto del caudal generado Q y la energía cinética por unidad de volumen de fluido, E_k .

$$Q = N \cdot D_a^3 \cdot N_Q \quad (1)$$

$$E_k = \frac{\rho \cdot V_2^2}{2} \quad (2)$$

La velocidad V_2 es ligeramente menor que la velocidad en el extremo u_2 . Si la relación V_2/u_2 se representa por α , $V_2 = \alpha \cdot \pi \cdot N \cdot D_a$ y la potencia necesaria sería:

$$P = N \cdot D_a^3 \cdot N_Q \cdot \frac{\rho \cdot (\alpha \cdot \pi \cdot N \cdot D_a)^2}{2} = \rho \cdot N^3 \cdot D_a^5 \cdot \frac{\alpha^2 \cdot \pi^2}{2} \cdot N_Q \quad (3)$$

que expresado de forma adimensional resulta:

$$N_p = \frac{P}{\rho \cdot N^3 \cdot D_a^5} = \frac{\alpha^2 \cdot \pi^2}{2} \cdot N_Q \quad (4)$$

donde el número de potencia es: $N_p = \frac{P}{\rho \cdot N^3 \cdot D_a^5}$, siendo P = potencia en J/s o W.

Puesto que la potencia requerida para un sistema dado no puede predecirse teóricamente, se tienen correlaciones empíricas para estimar los requerimientos de potencia. La presencia o ausencia de turbulencia puede correlacionarse con el número de Reynolds del impulsor, que se define como:

$$N'_{Re} = \frac{\rho \cdot N \cdot D_a^2}{\mu} \quad (5)$$

donde

D_a : diámetro del impulsor (agitador), m

N : velocidad de rotación, rev/s

ρ : densidad del fluido, kg/m^3

μ : viscosidad, kg/m.s . El flujo es laminar en el tanque cuando $N'_{Re} < 10$, turbulento cuando $N'_{Re} > 10000$ y para un intervalo de 10 a 10000, el flujo es de transición, mostrándose turbulento en el impulsor y laminar en las partes más recónditas del recipiente.

El consumo de potencia se relaciona con la densidad del fluido ρ , su viscosidad, μ , la velocidad de rotación N y el diámetro del impulsor D_a , por medio de gráficas de número de potencia N_p en función de N'_{Re} .

La Figura 3 es una correlación de impulsores de uso común con líquidos newtonianos contenidos en recipientes cilíndricos con deflectores. Estas curvas también son prácticas para tanques sin deflectores cuando N'_{Re} vale 300 o menos. Cuando N'_{Re} es superior a 300, el consumo de potencia en un recipiente sin deflectores es considerablemente menor que en uno con deflectores. Existen también curvas para otros tipos de impulsores.

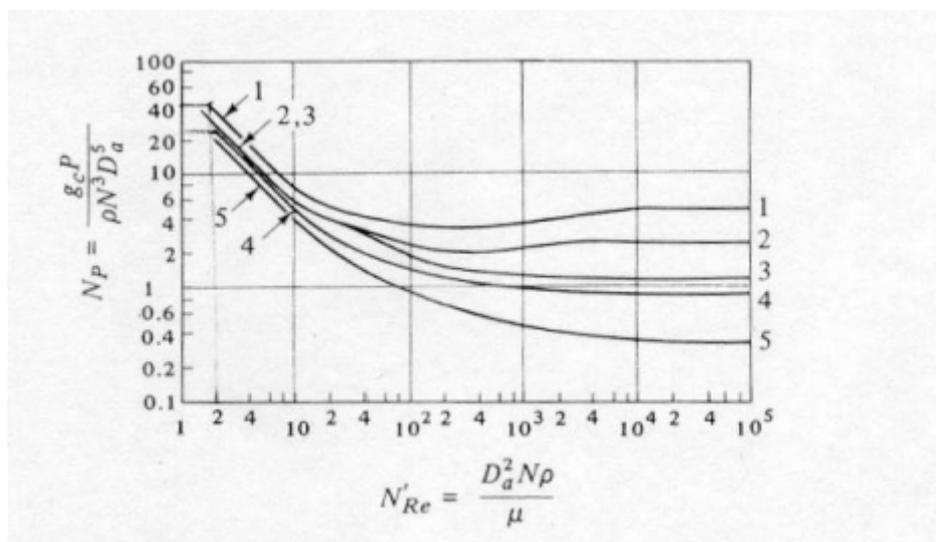


Figura 3. Correlaciones de potencia para diversos impulsores y deflectores

Curva 1. Turbina de seis aspas planas con cuatro deflectores, con $D_a/W = 5$

Curva 2. Turbina abierta de seis aspas planas con cuatro deflectores $D_a/W = 8$

Curva 3. Turbina abierta de seis aspas planas a 45° con cuatro deflectores

Curva 4. Propulsor; inclinación $2D_a$ con cuatro deflectores

Curva 5. Propulsor; inclinación D_a con cuatro deflectores

Las diversas relaciones geométricas que difieren del diseño "normal" pueden tener diferentes efectos en el número de potencia N_p en la región turbulenta de los distintos agitadores de turbina, como se indica:

- Para la turbina abierta de seis aspas planas, $N_p \propto (W/D_a)^{1,0}$
- Para la turbina abierta de seis aspas planas, si se hace variar D_a/D_t de 0,25 a 0,50 prácticamente no hay efectos sobre N_p .
- Para dos turbinas abiertas de seis aspas instaladas en el mismo eje, y si el espaciamiento entre los dos impulsores (la distancia vertical entre los bordes inferiores de las dos turbinas) es al menos igual a D_a , la potencia total es 1,9 veces la de un impulsor de una aspa plana. Para dos turbinas de seis aspas inclinadas (45°), la potencia también es de cerca de 1,9 veces la de un impulsor de aspa inclinada.
- Un tanque cuadrado vertical con deflectores y un tanque cilíndrico horizontal tienen el mismo número de potencia que un tanque cilíndrico vertical, pero en ellos se producen patrones de flujo marcadamente diferentes,

El número de potencia de un agitador simple de tipo ancla, sin barras transversales horizontales, es como sigue para $N'_{Re} < 100$:

$$N_p = 215. (N'_{Re})^{-0,955} \quad (6)$$

donde

$$D_a/D_t = 0,90$$

$$W/D_t = 0,10$$

$$C/D_t = 0,05$$

El número de potencia para un agitador de banda helicoidal para líquidos muy viscosos, con $N'_{Re} < 20$, es como se indica:

$$N_p = 186. (N'_{Re})^{-1} \quad (\text{paso del agitador / diámetro del tanque} = 1,0)$$

$$N_p = 290. (N'_{Re})^{-1} \quad (\text{paso del agitador/diámetro del tanque} = 0,5)$$

Las proporciones dimensionales típicas que se usan son $D_a/D_t = 0,95$, con algunas tan bajas como 0,75 y $W/D_t = 0,095$

4.DISEÑO DEL TANQUE DE MEZCLA DE LA DISOLUCIÓN CARBONATADA

Datos de partida:

$$\text{Caudal: } Q := 134.921 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

$$\text{Tiempo de residencia: } \tau := \frac{10}{60 \cdot 24} = 6.944 \times 10^{-3} \text{ días}$$

$$\text{Volumen de mezcla: } V_m := Q \cdot \tau = 0.937 \text{ m}^3$$

Volumen vacío : 20%

$$\text{Volumen del tanque: } V := 1.2 \cdot V_m = 1.124 \text{ m}^3$$

- **Altura y diámetro del tanque:**

Tanque cilíndrico

$$\text{Relación altura/diámetro: } h_{Dt} := 1.5$$

$$\text{Diámetro: } Dt := \sqrt[3]{\frac{4 \cdot V}{\pi \cdot 1.5}} = 0.91 \text{ m}$$

$$\text{Altura: } h := 1.5Dt = 1.477 \text{ m}$$

$$\text{Diámetro real: } \underline{Dt} := 1 \text{ m}$$

$$\text{Altura real: } \underline{h} := 1.5 \text{ m}$$

$$\text{Volumen real del tanque: } \underline{V} := \frac{\pi \cdot \underline{Dt}^2}{4} \cdot \underline{h} = 1.178 \text{ m}^3$$

- **Agitación mecánica**

Diseño de una turbina abierta de seis aspas a 45° con cuatro deflectores.

$$\text{Densidad de la mezcla: } d := 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (\text{Asumido igual a la del agua})$$

$$\text{Viscosidad dinámica de la mezcla: } \nu := 0.001003 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}} \quad (\text{Asumida igual a la del agua})$$

$$\text{Altura de la mezcla en el tanque: } \underline{H} := \frac{V_m \cdot 4}{\pi \cdot Dt^2} = 1.193 \text{ m}$$

Proporciones geométricas para un sistema de agitación normal

$$Da_{Dt} := \frac{1}{3} = 0.333 \quad C_{Dt} := \frac{1}{3} = 0.333 \quad J_{Dt} := \frac{1}{12} = 0.083$$

$$W_{Da} := \frac{1}{8} = 0.125 \quad Dd_{Da} := \frac{2}{3} = 0.667 \quad L_{Da} := \frac{1}{4} = 0.25$$

$$Da := Dt \cdot Da_{Dt} = 0.333 \text{ m} \quad \underline{C} := C_{Dt} \cdot Dt = 0.333 \text{ m} \quad \underline{J} := J_{Dt} \cdot Dt = 0.083 \text{ m}$$

$$\underline{W} := Da \cdot W_{Da} = 0.042 \text{ m} \quad \underline{Dd} := Da \cdot Dd_{Da} = 0.222 \text{ m} \quad \underline{L} := L_{Da} \cdot Da = 0.083 \text{ m}$$

Velocidad de rotación del agitador: $N := 50 \text{ rpm}$ $N := \frac{50}{60} = 0.833 \text{ rps}$

Número de Reynolds: $N_{re} := \frac{Da^2 \cdot N \cdot d}{\nu} = 9.232 \times 10^4$ (Regimen turbulento)

Número de potencia: $N_p := 1.2$ (Gráfico de la Figura 3)

Potencia requerida: $P := N_p \cdot d \cdot N^3 \cdot Da^5 = 2.858 \frac{\text{J}}{\text{s}}$

5. BIBLIOGRAFÍA

- Ampliación de fenómenos de transporte: Agitación y mezcla de fluidos. Necesidades de potencia. Asignatura de 4º curso de Ingeniería Química (Plan 1999). Universidad de Almería.

ANEJO N° 10
TUBERÍAS Y BOMBAS

ÍNDICE

- 1. TUBERÍAS**
 - 1.1. Proceso de cálculo**
 - 1.1.1. Diámetro óptimo**
 - 1.1.2. Pérdida de carga**
 - 1.2. Tuberías necesarias**
 - 1.2.1. Tuberías para líquidos**
 - 1.2.2. Tuberías para gases**
- 2. BOMBAS**
 - 1.1. Tipos de bombas**
 - 1.1.1. Bombas centrífugas**
 - 1.2. Diseño de bombas**
- 3. BIBLIOGRAFÍA**

1. TUBERÍAS

Los materiales seleccionados para las tuberías del proceso son PVC para las líneas de líquidos, y acero al carbono para los gases de combustión, debido a que los cultivos no requieren un nivel alto de desinfección y esterilización. Los materiales escogidos para las conducciones de líquidos, permiten realizar limpiezas a través de ellas con ácidos e hipoclorito sódico con altos niveles de concentración. Son materiales económicos y funcionales.

1.1. Proceso de cálculo

1.1.1. Diámetro óptimo

Se debe determinar la sección de la tubería; para ello se estima una velocidad de circulación aproximada de 1 m/s para líquidos y de 10 a 30 m/s para gases. Con el caudal volumétrico y la siguiente ecuación se puede determinar la sección de transversal de paso del fluido, de donde despejar el diámetro interior de la misma.

$$Q = v \cdot s \quad (1)$$

donde

Q: caudal volumétrico, m³/s.

v: velocidad lineal, m/s.

s: sección de la tubería, m².

Si se considera una tubería circular, la sección viene expresada como:

$$s = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (2)$$

D: diámetro de la tubería, m.

Por lo tanto, considerando las ecuaciones 1 y 2 se obtiene el diámetro óptimo de tubería:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot v}} \quad (3)$$

Una vez conocido el valor, se elegirá el diámetro normalizado que mejor se ajuste al comercial, según el material a emplear.

Tabla 1. Dimensiones de una tubería de PVC comercial

Diámetros nominales			
in	m, PVC	in	m, PVC
0,13	0,0033	5	0,127
0,25	0,0064	6	0,1524
0,38	0,0095	8	0,02032
0,5	0,0127	10	0,254
0,75	0,0191	14	0,3048
1	0,0254	16	0,3556
1,25	0,0318	18	0,4064
1,5	0,0381	20	0,4572
2	0,0508	24	0,508
2,5	0,0635	30	0,6096
3	0,0762	36	0,762
3,33	0,0847	43,2	0,9144
4	0,1016		

Por último, elegido el diámetro normalizado adecuado, se calculará la velocidad real de circulación por dicho tramo, según la ecuación siguiente:

$$v = \frac{Q}{\frac{\pi}{4} D^2} \quad (4)$$

1.1.2. Pérdida de carga

Para evaluar la pérdida de carga, se utiliza la ecuación de Bernouilli, anulando el término correspondiente en cada caso, si fuera necesario.

$$g \cdot (z_2 - z_1) + \frac{P_2 - P_1}{\rho} + \frac{v_2^2}{2 \cdot \alpha_2} - \frac{v_1^2}{2 \cdot \alpha_1} + \sum F = W \quad (5)$$

donde:

g: aceleración de la gravedad, m/s²

(z₂ - z₁): carga estática, diferencia de alturas en la tubería m

α: factor que relaciona la velocidad media y la velocidad eficaz. α = $\frac{v_m^2}{v_e^2}$ (para flujo turbulento es igual a 1).

v: velocidad del fluido, m/s.

ρ : la densidad del fluido, kg/m^3 .
 P : presión, N/m^2 .

ΣF : pérdidas de energía a través de la conducción debido al rozamiento del fluido con las paredes de la tubería y a los accesorios en los tramos, J/kg .

W : trabajo de la bomba, J/kg .

La pérdida de energía ΣF en el sistema viene dada por la ecuación:

$$\Sigma F = \Sigma F_{\text{tubo}} + \Sigma F_{\text{accesorios}} \quad (6)$$

Para el cálculo de las pérdidas de carga por fricción, debida al rozamiento del fluido por las paredes y accesorios, se utiliza la ecuación de Fanning.

$$\Sigma F = 2 \cdot f_F \cdot \frac{(L+L_{eq}) \cdot v^2}{D} \quad (7)$$

donde:

f_F : factor de fricción o de rozamiento, adimensional.

L : longitud de los tramos rectos, m.

L_{eq} : longitud equivalente debida a los accesorios, m.

v : velocidad media del fluido, m/s .

D : diámetro interno de la conducción, m.

Hay que tener en cuenta que en dicha ecuación se tienen en cuenta tanto las pérdidas mayores debidas a las longitudes de tubería, como las menores, debidas a los accesorios, como válvulas, codos, etc.

La longitud equivalente representa el tramo de tubería recta en el que se produce una pérdida de carga igual a la del accesorio. Su valor se expresa como múltiplo del diámetro interno de la tubería.

Tabla 2. Pérdidas por fricción en accesorios de tubería

Fitting or valve	K , number of velocity heads	number of equivalent pipe diameters
45° standard elbow	0.35	15
45° long radius elbow	0.2	10
90° standard radius elbow	0.6–0.8	30–40
90° standard long elbow	0.45	23
90° square elbow	1.5	75
Tee-entry from leg	1.2	60
Tee-entry into leg	1.8	90
Union and coupling	0.04	2
Sharp reduction (tank outlet)	0.5	25
Sudden expansion (tank inlet)	1.0	50
Gate valve		
fully open	0.15	7.5
1/4 open	16	800
1/2 open	4	200
3/4 open	1	40
Globe valve, bevel seat-		
fully open	6	300
1/2 open	8.5	450
Plug valve - open	0.4	18

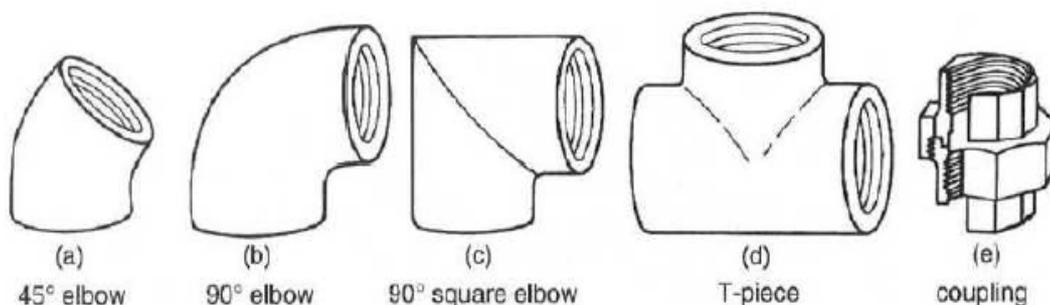


Figura 1. Accesorios normalizados de tuberías: a) codo de 45°, b) codo de 90°, c) codo recto de 90°, d) entrada en rama de pieza en T, e) uniones y acoplamiento.

En otras ocasiones, para calcular el valor de ΣF se suele despreciar el cálculo del parámetro $\Sigma F_{\text{accesorio}}$ y se suele utilizar la expresión de ΣF_{tubo} , en la cual el valor de longitud equivalente, longitud de la conducción, se suele incrementar en $0,1 \cdot L$, con lo cual se tiene en cuenta la pérdida de carga en los accesorios presentes en la conducción.

Para obtener el valor del coeficiente de fricción, f_F , se puede utilizar el siguiente diagrama, que relaciona el coeficiente de fricción frente al número de Reynolds con

la rugosidad relativa (ϵ/D) como tercer parámetro, tanto para régimen laminar, de transición o turbulento.

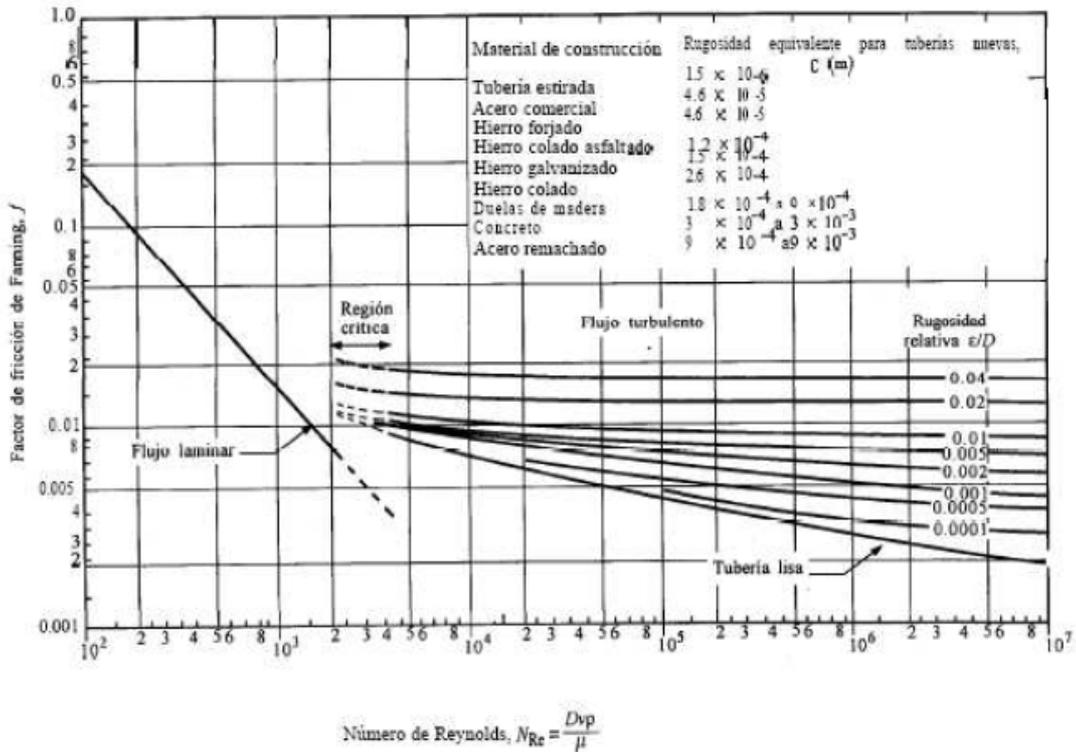


Figura 2. Factores de fricción para fluidos en tuberías

El termino rugosidad relativa (ϵ/D) se puede estimar usando la Figura 3, a partir del diámetro nominal de la tubería para distintos tipos de tubos.

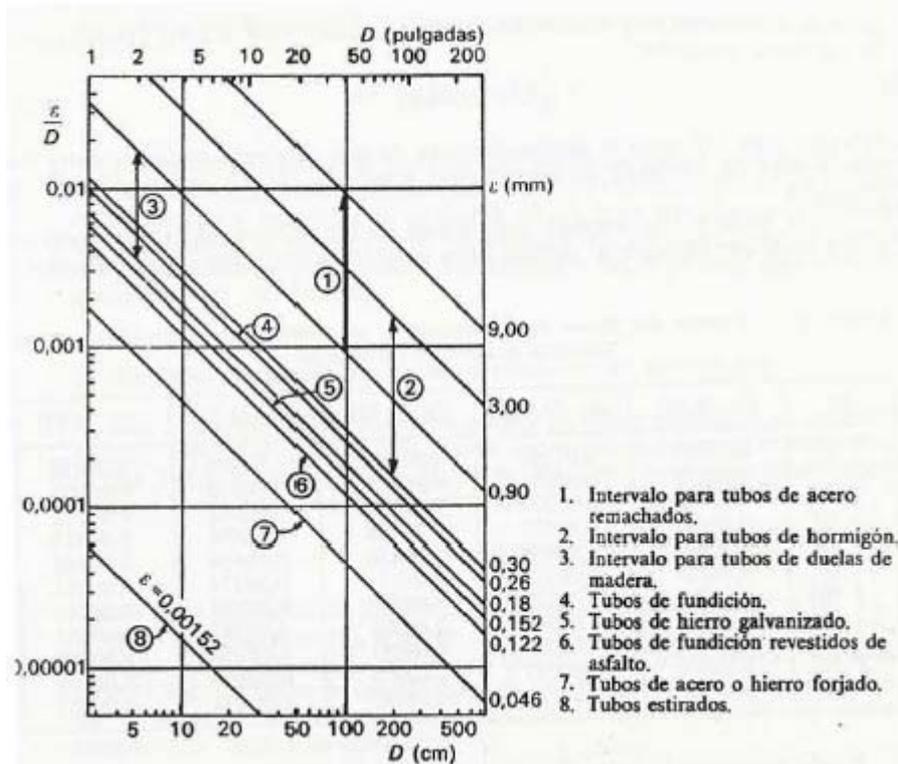


Figura 3. Rugosidades relativas de varios tubos comerciales

Otra forma de obtener el término de rugosidad relativa es mediante el parámetro de rugosidad (ϵ), que representa la altura promedio de las proyecciones de rugosidad de la pared para los distintos tipos de tubería.

Para el caso se toman como parámetros de rugosidad $\epsilon=0,000007$ m para tuberías de polipropileno y $\epsilon=0,000002$ para las tuberías de PVC.

Otra forma de obtener el coeficiente de fricción (f_F) es mediante la ecuación de Chen. Se trata de una ecuación empírica que obtiene el factor de rozamiento para cualquier rugosidad del tubo, pero únicamente válida para los regímenes de transición y turbulento.

$$\frac{1}{\sqrt{f_F}} = -4 \cdot \log \left[\frac{1}{3,7065} \cdot \left(\frac{\epsilon}{D} \right) - \frac{5,0452}{N_{Re}} \cdot \log \left[\frac{1}{2,8257} \cdot \left(\frac{\epsilon}{D} \right)^{1,1098} + \frac{5,8506}{N_{Re}^{0,8981}} \right] \right] \quad (8)$$

donde:

ϵ/D : rugosidad relativa, adimensional.

Re: número de Reynolds, que se calcula con la ecuación siguiente:

$$\text{Re} = \frac{D \cdot \rho \cdot v}{\mu} \quad (9)$$

donde:

D: diámetro de la tubería, m.

v: velocidad del fluido, m/s.

ρ : densidad del fluido, kg/m³.

μ : viscosidad del fluido, kg/m.s.

1.2. Tuberías necesarias

1.2.1. Tuberías para líquidos

En la Tabla 3 se muestran los resultados obtenidos según el proceso de cálculo explicado en el apartado anterior.

Tabla 3. Diseño de las tuberías para líquidos

TUBERÍAS PARA LÍQUIDOS															
Propiedades físicas	L-1	L-2	L-3	L-4a	L-4b	L-4c	L-5	L-6	L-7	L-10	L-11a	L-11b	L-11c	L-11d	L-11e
Caudal volumétrico, m ³ /s	0,0216	0,0215	0,0230	0,0224	0,0063	0,0016	0,0006	0,0001	0,0007	0,0016	0,0016	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004
densidad, kg/m ³	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1010	1010	1010	1000	1000	1000	1000	1000	1000
viscosidad, kg/m.s	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0020	0,0020	0,0020	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010
Caudal mástico, kg/s	21,5863	21,4860	23,0478	22,4375	6,3032	1,5616	0,5780	0,1014	0,6793	1,5616	1,5616	0,3904	0,3904	0,3904	0,3904
Selección de la tubería															
Velocidad del líquido en la tubería, m/s	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,5	0,5	0,5	1	1	1	1	1	1
Sección de tubería, m ²	0,0216	0,0215	0,0230	0,0224	0,0063	0,0016	0,0011	0,0002	0,0013	0,0016	0,0016	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004
Diámetro de la tubería, m	0,1658	0,1654	0,1713	0,1690	0,0896	0,0446	0,0382	0,0160	0,0414	0,0446	0,0446	0,0223	0,0223	0,0223	0,0223
Longitud de la tubería, m	10	10	10	2	200	10	30	220	10	5	195	60	25	25	60
Material de la tubería	PVC	PVC	PVC	PVC	PVC	PVC	PVC	PVC	PVC	PVC	PVC	PVC	PVC	PVC	PVC
Diámetro nominal de tubería comercial, m	0,1524	0,1524	0,1524	0,1524	0,0847	0,0508	0,0381	0,0191	0,0381	0,0508	0,0508	0,0254	0,0254	0,0254	0,0254
Sección real de tubería, m ²	0,0182	0,0182	0,0182	0,0182	0,0056	0,0020	0,0011	0,0003	0,0011	0,0020	0,0020	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
Velocidad real del líquido en la tubería, m/s	1,1832	1,1777	1,2633	1,2299	1,1185	0,7704	0,5019	0,3502	0,5899	0,7704	0,7704	0,7704	0,7704	0,7704	0,7704
Pérdida de carga															
Diferencia de alturas, m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Válvulas de bola	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
Codos 90º	0	0	0	0	2	1	1	1	2	2	0	1	0	0	1
T	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0
Rugosidad	0,000002	0,000002	0,000002	0,000002	0,000002	0,000002	0,000002	0,000002	0,000002	0,000002	0,000002	0,000002	0,000002	0,000002	0,000002
Rugosidad relativa, E/D	1,3123E-05	1,3123E-05	1,3123E-05	1,3123E-05	2,3613E-05	3,9370E-05	0,0001	0,0001	0,0001	0,0004	0,0004	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
Leq	4,5720E+01	0,0000E+00	0,0000E+00	4,5720E+01	5,9290E+00	1,7780E+00	1,3335	0,6685	2,6670	18,7960	18,2880	0,8890	1,5240	1,5240	0,8890
Re	1,8032E+05	1,7948E+05	1,9253E+05	1,8743E+05	9,4740E+04	3,9134E+04	9656,5267	3377,6697	11349,7747	39134,1502	39134,1502	19567,0751	19567,0751	19567,0751	19567,0751
fF, factor de rozamiento	4,0210E-03	4,0246E-03	3,9707E-03	3,9912E-03	4,5865E-03	5,5587E-03	0,0078	0,0105	0,0075	0,0056	0,0056	0,0066	0,0066	0,0066	0,0066
f, J/kg	4,1163E+00	7,3256E+01	8,3165E+01	3,7806E+00	2,7903E+01	1,5297E+00	3,2366	29,7109	1,7333	3,0905	27,7008	18,6509	8,1246	8,1246	18,6509

1.2.2 Tuberías para gases

En el caso de las tuberías para gases, se sigue el mismo procedimiento que antes.

Para la pérdida de carga se utilizará la ecuación de Weymouth, que se expresa a continuación:

$$\frac{M}{2.R.T} (P_1^2 - P_2^2) = 2 \cdot f_m \cdot \frac{G^2 \cdot L}{D} \quad (10)$$

donde

M: peso molecular del gas, kg/kmol.

R: cte. de los gases, 8,314 kJ/kmol.K.

T: temperatura del gas, K.

P_1, P_2 : presiones de entrada y salida de cada tramo, Pa.

f_m : factor de fricción con unas condiciones medias entre la entrada y la salida del tubo.

G: velocidad, m/s.

L: longitud total del tubo, incluidos los accesorios, m.

D, diámetro interno de la tubería, m.

La ecuación de Weymouth es válida sólo para régimen isoterma (o con una caída de temperaturas entre el principio y el final del tramo inferior al 10%), y velocidad del gas igual o inferior a 35 m/s.

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 4

Tabla 4. Diseño de las tuberías para gases

TUBERÍAS PARA GASES										
Propiedades físicas	L-8	L-9a	L-9b	L-9c	L-9d	L-9e	L-12a	L-12b	L-12c	L-12d
Caudal máxico, kg/s	0,0072	0,0823	0,0001	0,0421	0,0164	0,0422	0,00409425	0,0041	0,0041	0,0041
Presión , atm	1,1172	2,4652	1,3663	1,3663	1,0733	1,0733	1,0733	1,0733	1,0733	1,0733
Temperatura, K	305,0000	673,0000	373,0000	373,0000	293,0000	293,0000	293,0000	293,0000	293,0000	293,0000
Densidad, kg/m ³	1,1730	0,5400	0,5400	0,5400	0,5400	0,5400	0,5400	0,5400	0,5400	0,5400
Caudal volumétrico, m ³ /s	0,0062	0,1524	0,0001	0,0779	0,0303	0,0781	0,0076	0,0076	0,0076	0,0076
Selección de la tubería										
Velocidad del gas en a tubería, m/s	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000
Sección de la tubería, m ²	0,0002	0,0051	0,0000	0,0026	0,0010	0,0026	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003
Dámetro de la tubería, m	0,0162	0,0804	0,0023	0,0575	0,0359	0,0576	0,0179	0,0179	0,0179	0,0179
Longitud de la tubería, m	10,0000	2,0000	3,0000	2,0000	230,0000	5,0000	60,0000	25,0000	25,0000	60,0000
Material de la tubería	PVC	Acero al carbono	PVC	PVC	PVC	PVC	PVC	PVC	PVC	PVC
Diámetro nominal de la tubería, m	0,0847	0,0847	0,0033	0,0508	0,0381	0,0508	0,0847	0,0847	0,0847	0,0847
Sección real de la tubería, m ²	0,00564	0,0056	0,00001	0,0020	0,0011	0,0020	0,0056	0,0056	0,0056	0,0056
Velocidad real del gas, m/s	1,0965	27,0489	15,0156	38,4516	26,5977	38,5151	1,3455	1,3455	1,3455	1,3455

La pérdida de carga en estas tuberías es muy pequeña, tanto es así que se puede decir que la presión permanece constante en todos los tramos.

4. BOMBAS

Cuando un fluido no posee la energía suficiente para vencer las diferencias de altura, velocidad o presión que se requieran, es necesario comunicársela con los aparatos necesarios que, en el caso de líquidos, son las bombas, que suministran la energía o fuerza impulsora que incrementa la energía mecánica del fluido. La forma en que se impulsa al líquido puede ser variada, pero lo general es que sea por desplazamiento volumétrico, conseguido mecánicamente, o por la acción de una fuerza centrífuga.

Los criterios de selección del tipo de bomba son los siguientes:

- Tipo de líquido que se va a impulsar: densidad, viscosidad, presión de vapor, contenido en sólidos propiedades corrosivas, abrasivas y lubricantes, etc.
- Condiciones de bombeo: caudal, presión de salida presión de entrada, temperatura y caudal, etc.
- La presencia de sólidos pueden acelerar la erosión del material o tener tendencia a depositarse a aglomerarse. En estos casos, todas las cavidades internas de la bomba deben tener dimensiones adecuadas, procurando que no existan zonas muertas, ni proximidad excesiva entre partes fijas y móviles en caso de que sólidos sean abrasivos.

2.1. Tipos de bombas

La principal clasificación de las bombas es:

Según **el funcionamiento** en que se base:

1) Bombas de desplazamiento positivo o volumétricas, en las que el principio de funcionamiento está basado en la hidrostática, de modo que el aumento de presión se realiza por el empuje de las paredes de las cámaras que varían su volumen. En este tipo de bombas, en cada ciclo el órgano propulsor genera de manera positiva un volumen dado o cilindrada, por lo que también se denominan bombas volumétricas. En caso de poder variar el volumen máximo de la cilindrada se habla de bombas de volumen variable. Si ese volumen no se puede variar, entonces se dice que la bomba es de volumen fijo. El líquido es confinado en un espacio de la bomba, donde se le comunica la energía, siendo desplazado a continuación hasta la zona de expulsión. Proporcionan una cantidad constante de líquido en cada embolada o revolución de la parte móvil, sin que el líquido pueda circular libremente a través del cuerpo de la

bomba. No pueden funcionar con la salida cerrada. A su vez este tipo de bombas pueden subdividirse en:

- Bombas de émbolo alternativo, en las que existe uno o varios compartimentos fijos, pero de volumen variable, por la acción de un émbolo o de una membrana. En estas máquinas, el movimiento del fluido es discontinuo y los procesos de carga y descarga se realizan por válvulas que abren y cierran alternativamente. Algunos ejemplos de este tipo de bombas son la bomba alternativa de pistón, la bomba rotativa de pistones o la bomba de pistones de accionamiento axial.
- Bombas volumétricas rotativas o rotoestáticas, en las que una masa fluida es confinada en uno o varios compartimentos que se desplazan desde la zona de entrada (de baja presión) hasta la zona de salida (de alta presión) de la máquina. Algunos ejemplos de este tipo de máquinas son la bomba de paletas, la bomba de lóbulos, la bomba de engranajes, la bomba de tornillo o la bomba peristáltica.

2) Bombas rotodinámicas, en las que el principio de funcionamiento está basado en el intercambio de cantidad de movimiento entre la máquina y el fluido, aplicando la hidrodinámica. En este tipo de bombas hay uno o varios rodets con álabes que giran generando un campo de presiones en el fluido. El líquido no necesita ser confinado en espacios interiores, puede circular libremente a través de la bomba. En este tipo de máquinas el flujo del fluido es continuo. Estas turbomáquinas hidráulicas generadoras pueden subdividirse en:

- Radiales o centrífugas, cuando el movimiento del fluido sigue una trayectoria perpendicular al eje del rodete impulsor. El líquido recibe la energía por la acción de una fuerza centrífuga que le comunica un disco giratorio a gran velocidad.
- Axiales, cuando el fluido pasa por los canales de los álabes siguiendo una trayectoria contenida en un cilindro.
- Diagonales o helicentrífugas cuando la trayectoria del fluido se realiza en otra dirección entre las anteriores, es decir, en un cono coaxial con el eje del rodete.

Según el tipo de accionamiento:

1) Electrobombas: Genéricamente, son aquellas accionadas por un motor eléctrico, para distinguirlas de las motobombas, habitualmente accionadas por motores de combustión interna.

2) Bombas neumáticas: son bombas de desplazamiento positivo en las que la energía de entrada es neumática, normalmente a partir de aire comprimido.

3) Bombas de accionamiento hidráulico, como la bomba de ariete o la noria.

4) Bombas manuales: Un tipo de bomba manual es la bomba de balancín.

2.1.1. Bombas centrífugas

Se decide utilizar bombas centrífugas, ya que son de gran versatilidad, bajo coste, y fácil diseño, operación y mantenimiento.

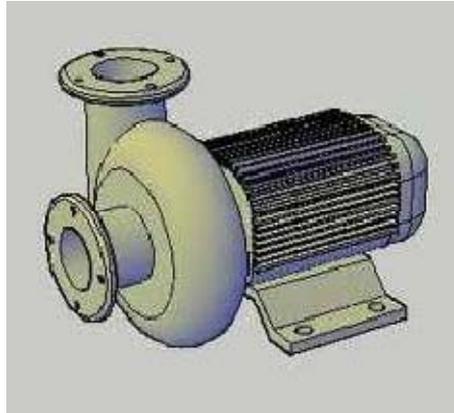


Figura 4. Bomba centrífuga

Una bomba centrífuga consiste, en su forma más simple, en un propulsor que gira dentro de una armadura. El líquido entra axialmente a la bomba por la línea de aspiración y penetra hasta el centro de rotación del propulsor, de donde se distribuye de manera radial. Al hacerlo así, se introduce en los canales, entre las paletas, y fluye por dichos canales hacia su extremo, situado en la periferia del impulsor. Aquí se recolecta en la cámara espiral y fluye hacia la descarga de la bomba.

La rotación del impulsor imparte una carga de alta velocidad al fluido, que se transforma en carga de presión a medida que el líquido pasa a la cámara espiral y de aquí a la descarga. Algunas unidades se construyen como bombas de dos etapas o de etapas múltiples.

Son las más usadas en la industria de procesado por las siguientes ventajas:

- Son de construcción sencilla y barata. Pueden, por tanto, construirse en una amplia gama de materiales.
- No tienen válvulas.
- Operan a una velocidad elevada, y por tanto, se pueden acoplar directamente a un motor eléctrico. En general, en cuanto mayor es la velocidad, menor es la bomba y el motor para un servicio determinado.
- Proporciona un caudal estacionario.
- Los costes de mantenimiento son menores que para cualquier otro tipo de bomba.
- No se estropea si se bloquea la línea de descarga.
- Tiene un tamaño mucho menor que el de otras bombas para igual capacidad. Pueden, por tanto, construirse en una unidad aislada con el motor y sumergida en el tanque de succión.
- Operan fácilmente con líquidos que contienen elevadas proporciones de sólidos en suspensión.

- Pueden proporcionar caudales variables desde algunos litros /min. Hasta varios miles de m³/min.
- Son resistentes a ambientes desfavorables. Por lo que, en el caso de que se tuvieran que colocarse a la intemperie, no perturbaría en funcionamiento.

2.2. Diseño de bombas

Las bombas operan casi siempre a velocidad constante, por lo que el caudal suministrado, denominado capacidad de la bomba, depende solamente, para una misma bomba, de las presiones de aspiración y descarga.

Para calcular el trabajo que tendrá que realizar cada una de las bombas que se habrán de instalar, se aplica la ecuación de Bernoulli entre el punto final (2) y el inicial (1):

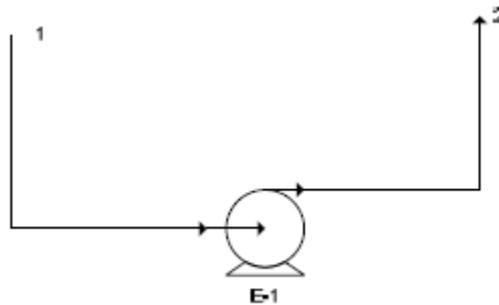


Figura 5. Esquema para el diseño de bombas

$$g \cdot (z_2 - z_1) + \frac{P_2 - P_1}{\rho} + \frac{v_2^2}{2 \cdot \alpha_2} - \frac{v_1^2}{2 \cdot \alpha_1} + \sum F = W \quad (5)$$

donde:

g: aceleración de la gravedad, m/s².

(z₂ - z₁): carga estática, diferencia de alturas en la tubería, m.

α: factor que relaciona la velocidad media y la velocidad eficaz. $\alpha = \frac{v_m^2}{v_e^2}$ (para flujo turbulento es igual a 1).

v: velocidad del fluido, m/s.

ρ: la densidad del fluido, kg/m³.

P: presión, N/m².

ΣF: pérdidas de energía a través de la conducción debido al rozamiento del fluido con las paredes de la tubería y a los accesorios en los tramos, J/kg.

W: trabajo de la bomba, J/kg.

Partiendo de los datos obtenidos en el anterior apartado se procede al cálculo de las bombas necesarias.

Para obtener la potencia teórica necesaria se utiliza la ecuación siguiente:

$$P = \frac{m \cdot W}{R} \quad (11)$$

donde:

P: potencia teórica de la bomba, W.

m: caudal másico de flujo, kg/s.

W: trabajo de la bomba, J/kg.

R: rendimiento de la bomba (80%).

A continuación se muestra una tabla con las bombas utilizadas y sus características:

Tabla 5. Diseño de las bombas

Parámetros	BOMBAS							
	B-1	B-2	B-3	B-4	B-5	B-6	B-7	B-8
Caudal volumétrico, m ³ /s	0,0216	0,0215	0,0001	0,0230	0,0224	0,0006	0,0007	0,0016
Caudal másico, kg/s	21,5863	21,4860	0,1014	23,0478	22,4375	0,5780	0,6793	1,5616
Longitud de tubería de aspiración, m	4,0000	1,0000	2,0000	1,0000	1,0000	1,0000	2,0000	1,0000
Longitud de tubería de impulsión, m	6,0000	9,0000	218,0000	9,0000	1,0000	29,0000	8,0000	194,0000
Diámetro de tubería, m	0,1524	0,1524	0,0191	0,1524	0,1524	0,0381	0,0381	0,0508
f impulsión e impulsión, J/kg	4,1163	0,7326	29,7109	0,8316	3,7806	3,2366	1,7333	27,7008
Altura tramo de aspiración, m	0,0000	0,0000	-1,0000	0,0000	0,0000	-1,0000	0,0000	-1,0000
Altura tramo de impulsión, m	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Energía potencial, J/kg	0,0000	0,0000	9,8100	0,0000	0,0000	9,8100	0,0000	9,8100
Energía cinética, J/kg	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Energía por fricción, J/kg	4,1163	0,7326	29,7109	0,8316	3,7806	3,2366	1,7333	27,7008
W trabajo a realizar, J/kg	4,1163	0,7326	39,5209	0,8316	3,7806	13,0466	1,7333	37,5108
Rendimiento de la bomba	0,8000	0,8000	0,8000	0,8000	0,8000	0,8000	0,8000	0,8000
Potencia necesaria de la bomba, W	111,0708	19,6747	5,0068	23,9596	106,0344	9,4261	1,4719	73,2205
Potencia necesaria de la bomba, CV	0,1510	0,0268	0,0068	0,0326	0,1442	0,0128	0,00200	0,0996

5. BIBLIOGRAFÍA

- Geankoplis, C.J. Procesos de transporte y operaciones unitarias. Ed. Ceca.
- Levenspil, O. Flujo de fluidos e intercambio de calor. Ed. Reverte, S.A.
- Costa Novella, E. Ingeniería Química: Volumen 4: Flujo de fluidos. Ed. Alhambra.
- Coulson and Richardson; 2005. Chemical engineering desing. Vol. 6. Ed. Elsevier.
- Reza García, C; Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías. McGraw-Hill.

ANEJO N° 11
VENTILADORES,
SOPLANTES Y
COMPRESORES

ÍNDICE

- 1. INTRODUCCIÓN**
- 2. VENTILADORES**
- 3. SOPLANTES Y COMPRESORES**
 - 3.1. Ecuaciones para soplantes y compresores**
 - 3.1.1. Compresión adiabática**
 - 3.1.2. Compresión isotérmica**
 - 3.1.3. Compresión politrópica**
 - 3.1.4. Eficiencia del compresor**
 - 3.1.5. Ecuación de la potencia**
- 4. CÁLCULO DE LA POTENCIA DEL COMPRESOR Y LAS SOPLANTES**
- 5. BIBLIOGRAFÍA**

1. INTRODUCCIÓN

Los ventiladores, soplantes y compresores son máquinas que mueven y comprimen gases. Los ventiladores descargan grandes volúmenes de gas (normalmente aire) dentro de los espacios abiertos o conductos grandes. Son máquinas de baja velocidad que generan presiones muy bajas, del orden de 0,04 atm. Las soplantes son aparatos rotatorios de alta velocidad (que usan desplazamiento positivo o la fuerza centrífuga) que desarrollan una precisión máxima de cerca de 2 atm. Los compresores, los cuales también son de desplazamiento positivo o máquinas centrífugas, descargan a presiones bajas hasta varios miles de atmósferas. En los ventiladores la densidad del fluido no cambia de manera apreciable y por lo tanto se considera como constante. Sin embargo, en las soplantes y compresores, el cambio en la densidad es demasiado grande para justificar esta suposición. Para el estudio de estos aparatos de flujo compresible se requiere de la teoría.

2. VENTILADORES

Los ventiladores de gran tamaño por lo general son centrífugos y operan exactamente sobre el mismo principio que las bombas centrífugas. Sin embargo, es posible que las aspas del impulsor sean curvadas hacia adelante; esto puede llevar a la inestabilidad en la bomba, pero no en un ventilador. Las holguras son grandes y las cargas de salida pequeñas, desde 5 hasta 60 in. (130 a 1500 mm) de H₂O. A veces, como ocurre en los aparatos de ventilación casi toda la energía suministrada se convierte en energía de velocidad y casi nada en carga de presión. La eficiencia total, donde la potencia de salida recibe influencia tanto de la carga de presión como de la velocidad, es de alrededor de 70%.

Debido a que la variación de la densidad en un ventilador es pequeña, resultan adecuadas las ecuaciones utilizadas al estudiar el funcionamiento de las bombas centrífugas con fluidos no compresibles.

3. SOPLANTES Y COMPRESORES

Cuando aumenta adiabáticamente la presión de un fluido compresible, aumenta también la temperatura del mismo. Este aumento de temperatura tiene varias desventajas. Debido a que el volumen específico del fluido se incrementa con la temperatura, el trabajo requerido para comprimir una libra de fluido es mayor que si la compresión fuera isotérmica. Las temperaturas excesivas ocasionan problemas con los lubricantes, cajas prensaestopas y materiales de construcción. El fluido puede ser tal que no tolere temperaturas elevadas sin descomponerse.

Para el cambio isoentrópico de presión (adiabático y sin fricción) de un gas ideal, la relación de temperatura es

$$\frac{T_b}{T_a} = \left(\frac{P_b}{P_a}\right)^{\frac{1}{\gamma}} \quad (1)$$

Para un gas dado, la relación de temperatura aumenta con la relación de compresión P_b/P_a . Esta relación es un parámetro básico en la ingeniería de sopladores y compresores. En los sopladores con una relación de compresión por debajo de aproximadamente 3 o 4, el incremento adiabático en la temperatura no es grande, y no se toman medidas especiales para reducirlo. Sin embargo, en los compresores, donde la relación de compresión puede ser tan grande como de 10 o más, la temperatura isoentrópica es excesivamente elevada. Además, como los compresores reales carecen de fricción, el calor que se genera en la fricción también es absorbido por el gas, y se alcanzan temperaturas más altas que la temperatura isoentrópica. Por lo tanto, los compresores se enfrían mediante chaquetas a través de las cuales circula agua fría o refrigerante. En compresores pequeños enfriados, la temperatura del gas a la salida se aproxima a la de la entrada, hasta alcanzar una compresión esencialmente isotérmica. En unidades muy pequeñas es suficiente utilizar aletas externas integradas con el cilindro y que intercambian aire enfriado. En las unidades grandes, donde la capacidad de enfriamiento es limitada, se sigue una trayectoria diferente de flujo isotérmico o compresión adiabática, llamada compresión politrópica.

3.1. Ecuaciones para soplantes y compresores

En soplantes y compresores, las energías mecánica diferencial, cinética y potencial no varían de forma apreciable, y se ignoran en la ecuación de Bernoulli los términos de la carga estática y la velocidad. Además, suponiendo que el compresor carece de fricción, $\eta=1$ y $h_f=0$. Con estas simplificaciones, la ecuación de Bernoulli, en forma diferencial, se convierte en

$$dW_{pr} \frac{dp}{\rho} \quad (2)$$

La integración entre la presión de succión, P_a , y la presión de descarga P_b conduce al trabajo de compresión de un gas ideal sin fricción.

$$W_{pr} = \int_{P_a}^{P_b} \frac{dp}{\rho} \quad (3)$$

Para usar la ecuación 2, hay que evaluar la integral, lo cual requiere información acerca de la trayectoria seguida por el fluido en el equipo desde la succión hasta la descarga. El procedimiento es el mismo si el compresor es una unidad reciprocante, una unidad rotatoria de desplazamiento positivo, o una unidad centrífuga, con la única condición de que el flujo no tenga fricción y de que en una máquina reciprocante la ecuación se aplique a un número integral de ciclos, así que no debe haber acumulación ni disminución del fluido en los cilindros. De ser así, la suposición básica del flujo estacionario no se cumpliría.

3.1.1. Compresión adiabática

Para unidades sin enfriamiento, el fluido sigue una trayectoria isoentrópica. Para gases ideales, la relación entre p y ρ está dada por la ecuación 4,

$$\frac{p}{\rho} = \frac{P_a}{\rho_a^\gamma} \quad (4)$$

La ecuación del trabajo de compresión en el caso adiabático se transforma en

$$W_{pr} = \frac{P_a \cdot \gamma}{(\gamma - 1) \cdot \rho_a} \cdot \left[\left(\frac{P_b}{P_a} \right)^{1 - 1/\gamma} - 1 \right] \quad (5)$$

3.1.2. Compresión isotérmica

Cuando el enfriamiento durante la compresión es completo, la temperatura permanece constante y el proceso es isotérmico. La relación entre p y ρ es simplemente

$$\frac{p}{\rho} = \frac{P_a}{\rho_a} \quad (6)$$

La ecuación del trabajo de compresión en el caso isotérmico se transforma en

$$W_{pr} = \frac{R \cdot T_a}{M} \cdot \ln \frac{P_b}{P_a} \quad (7)$$

3.1.3. Compresión politrópica

En los compresores de gran tamaño, la trayectoria del fluido no es isotérmica ni adiabática. Sin embargo, el proceso permanece suponiendo que no tiene fricción. Se acostumbra considerar que la relación entre la presión y la densidad está dada por la ecuación

$$\frac{p}{\rho^n} = \frac{P_a}{\rho_a^n} \quad (8)$$

cuando n es una constante.

El valor de n se encuentra en forma experimental, al medir la densidad y la presión en dos puntos en la trayectoria del proceso, por ejemplo, en la succión y descarga.

3.1.4. Eficiencia del compresor

La relación entre el trabajo teórico (o potencia del fluido) y el trabajo real (o entrada de potencia total) es la eficiencia y se representa por η . La eficiencia máxima de los compresores reciprocantes es alrededor de 80 a 85%; inclusive alcanza 90% en compresores centrífugos.

3.1.5. Ecuación de la potencia

La potencia que requiere un compresor adiabático se calcula fácilmente mediante la ecuación 5. La fórmula dimensional es

$$P_b = \frac{0,371 \cdot T_a \cdot \gamma \cdot q_0}{(\gamma - 1) \cdot \eta} \cdot \left[\left(\frac{P_b}{P_a} \right)^{1-1/\gamma} - 1 \right] \quad (9)$$

donde

P_b = potencia, kW.

q_0 = caudal del gas comprimido, $\frac{m^3}{s}$ std, evaluado a 0 °C y 760 mmHg.

T_a = temperatura de entrada, K.

4. CÁLCULO DE LA POTENCIA DEL COMPRESOR Y LAS SOPLANTES

- **Potencia del compresor para el transporte del digestor al gasómetro:**

La potencia que requiere un compresor adiabático se calcula fácilmente mediante la ecuación 9.

$$\text{Caudal: } q_0 := 6.179 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$\text{Densidad: } d_a := 1.173 \cdot \frac{273}{305} = 1.0 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Eficiencia mecánica: } E := 0.8$$

$$\text{Temperatura de entrada: } T_a := 32 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\text{Presión de entrada: } P_a := 1 \text{ atm}$$

$$\text{Presión de salida: } P_b := 6 \text{ atm}$$

$$\text{Relación de calores específicos: } n := 1.31$$

$$\text{Potencia del compresor: } P := \frac{0.371 \cdot (T_a + 273) \cdot n \cdot q_0}{(n - 1) \cdot E} \cdot \left[\left(\frac{P_b}{P_a} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right] = 1.95 \text{ kW}$$

$$\text{Temperatura de salida: } T_b := \left(32 \cdot \frac{9}{5} + 32 + 460 \right) \cdot \left(\frac{P_b}{P_a} \right)^{\frac{1}{n}} = 839.826 \text{ R}$$

$$T_{\text{max}} := \frac{5}{9} \cdot (T_b - 32 - 460) = 193.237 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- **Potencia de la soplante para el transporte del generador a la columna de absorción:**

$$\text{Caudal másico: } \dot{m} := 0.0421 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$\text{Densidad: } d_a := 0.54 \cdot \frac{673}{273} = 1. \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Presión de entrada: } P_a := 1 \cdot 10^5 = 1 \times 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

$$\text{Presión de salida: } P_b := P_a + 30000 = 1.3 \times 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

$$\text{Relación de calores específicos: } n := 1.31$$

$$\text{Trabajo de compresión: } W := \left(\frac{n}{n - 1} \right) \cdot \left(\frac{P_a}{d_a} \right) \cdot \left[\left(\frac{P_b}{P_a} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] = 2.033 \times 10^4 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

$$\text{Potencia de la soplante: } P := W \cdot \dot{m} = 857.256 \text{ W}$$

- **Potencia de la soplante para el transporte del generador a los fotobiorreactores:**

Caudal másico: $\dot{m} := 0.01637 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$

Densidad: $d_a := 0.54 \cdot \frac{673}{273} = 1. \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Presión de entrada: $P_a := 1 \cdot 10^5 = 1 \times 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$

Presión de salida: $P_b := P_a + 30000 = 1.3 \times 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$

Relación de calores específicos: $n := 1.31$

Trabajo de compresión: $W := \left(\frac{n}{n-1} \right) \cdot \left(\frac{P_a}{d_a} \right) \cdot \left[\left(\frac{P_b}{P_a} \right)^{\left(\frac{n-1}{n} \right)} - 1 \right] = 2.033 \times 10^4 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$

Potencia de la soplante: $P := W \cdot \dot{m} = 332.858 \text{ W}$

5. BIBLIOGRAFÍA

- L. McCabe, Warren L., Smith, Julian C., Harriott Peter.2007. Operaciones unitarias en Ingeniería Química. Séptima edición. Ed. McGraw-Hill.

ANEJO N° 12
CONTROL E
INSTRUMENTACIÓN

ÍNDICE

1. CONTROL

1.1. Estrategias generales de control

1.2. Características de las acciones de un controlador Proporcional Integral Derivativo (PID)

1.3. Control del pH en los fotobiorreactores

1.4. Control en los equipos

2. INSTRUMENTACIÓN

2.1 Diagrama de instrumentación de la planta

3. BIBLIOGRAFÍA

1. CONTROL

El objetivo general de una planta química es transformar unas materias primas en unos productos deseados de forma segura, económica y respetuosa con el medio ambiente. Para lograr esto, los equipos que integran la planta deben operarse correctamente desde que se arranca hasta que, después de un período de tiempo más o menos largo, se para para hacer una revisión general, reparar algún equipo, o por cualquier otro motivo. Durante este período de funcionamiento la planta química está sujeta a perturbaciones o influencias externas inevitables tales como cambios en la composición de las materias primas, cambios en la cantidad o en la calidad del producto fabricado, etc. Estas perturbaciones obligan a ejercer una vigilancia continua sobre el proceso y también a actuar constantemente sobre el mismo al objeto de corregir las desviaciones que se detecten. La automatización de un proceso o de una planta química consiste en efectuar ambas acciones de forma automática, mediante la instalación de un conjunto de instrumentos de medida y manipulación del proceso que constituyen el sistema de control.

Conforme aumenta el grado de automatización, más segura y eficiente es la operación de la planta, y menos operadores requiere, si bien, más complejo y costoso será el sistema de control. El sistema de control debe ser capaz de operar la planta en las condiciones óptimas, aquellas con las que se consigue el menor coste de operación o el máximo beneficio.

Los objetivos de un sistema de control son:

- Mantener el set-point (valor de consigna).
- Minimizar el efecto de las perturbaciones

En este apartado se va a desarrollar el control del pH de los fotobioreactores, que es uno de los puntos de control más importantes. El sistema a desarrollar, se ha puesto a punto en La Estación Experimental de La Fundación Cajamar, en donde se utiliza un control PI y un sistema feedforward (control anticipativo).

1.1. Estrategias generales de control

1.1.1. Control feedback (por realimentación)

La actuación sobre el proceso para compensar el efecto de las variables de perturbación puede basarse en el *error*, es decir, en la diferencia observada entre el valor medido de la variable a controlar y el valor deseado o punto de consigna. Sólo se mide la variable a controlar.

1.2.2. Control feedforward (en adelante)

Consiste en actuar sobre el proceso en función de las perturbaciones observadas. Es capaz de un control perfecto del proceso, en contraposición con el control feedback que requiere que haya error para empezar a corregir o a compensar el efecto de las perturbaciones. Sin embargo, en la práctica no es posible alcanzar ese control perfecto por varias razones:

- No es posible medir todas las perturbaciones y actuar en función de todas ellas.
- Todos los instrumentos presentan errores de medida y es evidente que una acción de control basada en una medida con error de las perturbaciones nunca puede ser perfecta,
- Requiere un modelo del proceso.

Por esta razón, en la práctica se emplea conjuntamente con el control feedback, que se encarga de corregir el efecto de las perturbaciones no medidas y de compensar el efecto de las imperfecciones inherentes al control por realimentación.

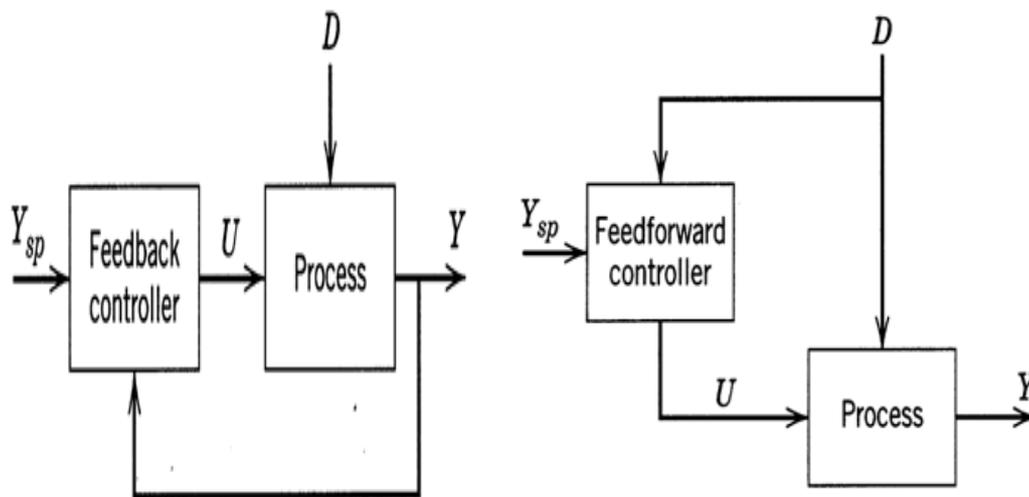


Figura 1. Diagrama de bloques simplificado de los sistemas de control feedback y feedforward

1.2. Características de las acciones de un controlador Proporcional Integral Derivativo (PID)

1.2.1. Proporcional (P)

- No modifica la dinámica del proceso (el orden de la función de transferencia es el mismo).
- La respuesta es más rápida.

- Produce error de estado estacionario ("offset").

1.2.2. Integral (I)

- Incrementa el orden de la función de transferencia.
- Elimina el error en régimen permanente.
- Produce problemas debidos a la saturación de la acción integral ("reset windup").
- Se usa en combinación.

1.2.3. Derivativa (D)

- No cambia el orden de la función de transferencia.
- Respuesta rápida a los cambios.
- Necesitan filtrado de la señal para evitar excesos de acción correctiva (procesos muy ruidosas).
- Se usa en combinación).

1.2.4. PI

- Elimina el error en régimen permanente y acelera la respuesta.
- Es muy sensible a problemas de inestabilidad (respuesta excesivamente oscilatoria).

1.2.5. PID

- Proporciona un control robusto (contiene las propiedades de los 3 modos de control)
- Aumenta la complejidad de sintonizado.

1.3. Control del pH en los fotobiorreactores

1.3.1. Control PI con feedforward

El controlador PI (Proporcional-Integral) es la mejor opción para intentar mantener el pH en el valor de consigna, con el mínimo error respecto al óptimo del cultivo, y obtener así una mejora del crecimiento de los cultivos. Se ha descartado la acción derivativa para simplificar el controlador y porque la variable medida (pH) es ruidosa, por lo que la acción derivativa amplificaría este ruido y a su vez el error que genera, siendo esto perjudicial para la vida útil del actuador. En el mismo sentido, se ha optado por un control anticipativo para minimizar las desviaciones respecto al valor de consigna en presencia de perturbaciones y mantener así el sistema en su

óptimo (ver figura 2). Este sistema de control permite considerar, además de las dinámicas del sistema relacionadas con su física, la influencia de la radiación en el comportamiento biológico del sistema. Esto repercute en una mejora considerable del control de pH y menores pérdidas de CO_2 .

El control anticipativo o feedforward es una herramienta de control que se utiliza para tener en cuenta las perturbaciones de un sistema anticipadamente y mejorar el control, siempre y cuando estas perturbaciones sean conocidas y medibles. En este caso la bondad del controlador es función directa de la adecuación del modelo del sistema. En el caso de los cultivos de microalgas, el comportamiento del pH viene determinado principalmente por las inyecciones de CO_2 , pero los niveles de radiación también influyen en el comportamiento del pH, por lo que es necesario considerar esta última variable como una perturbación del sistema. De esta forma, conociendo el efecto que tendrá la radiación sobre el sistema es posible alimentarla al sistema de control PI anticipadamente y de ese modo el controlador corregirá los efectos producidos por la perturbación antes de que alteren al sistema.

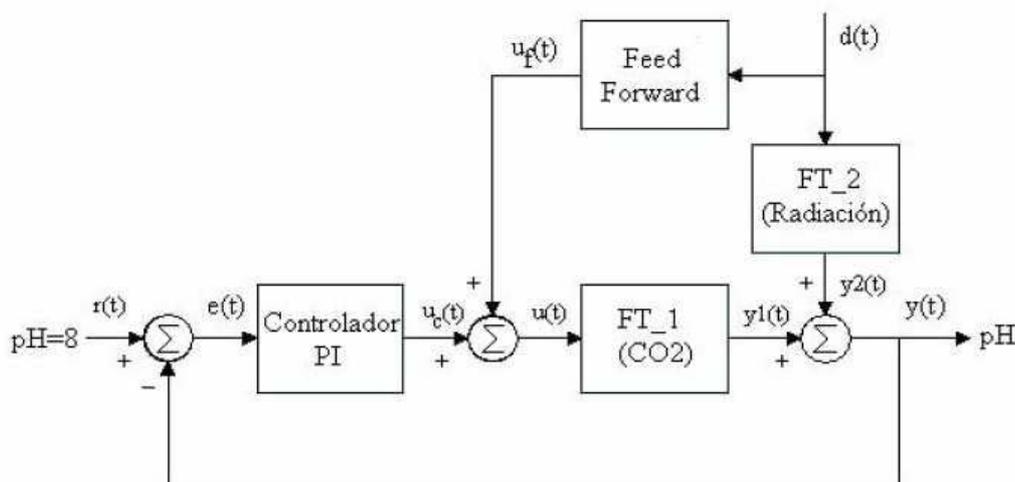


Figura 2. Esquema del controlador PI con feedforward seleccionado

1.3.2. Desarrollo del modelo

El pH de un cultivo de microalgas se ve influenciado principalmente por dos fenómenos. Por un lado el aporte de CO_2 como nutriente provoca la formación de ácido carbónico y éste un descenso del pH en el cultivo. Por otro lado, las microalgas realizan la fotosíntesis en presencia de radiación solar consumiendo el CO_2 y generando O_2 , lo que provoca una subida paulatina del pH. El consumo de nitratos también supone una alcalinización del pH del medio.

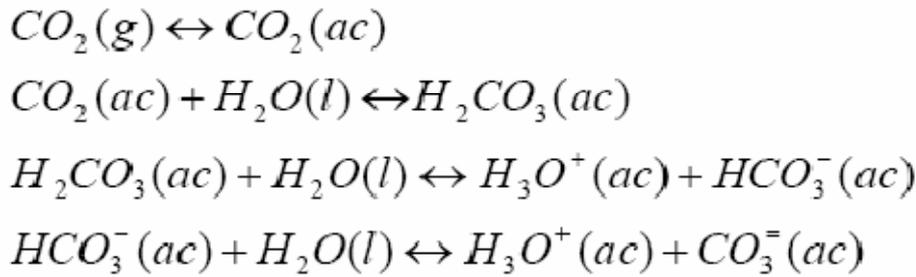


Figura 3. Disolución de CO₂ en agua (Tampón Carbonato-Bicarbonato).

Para mantener el crecimiento máximo y por lo tanto maximizar el rendimiento de los cultivos se requiere que ciertas variables del entorno sean mantenidas en los valores óptimos. Entre ellas, el pH es una de las variables críticas, la cual tiene que ser regulada adecuadamente. Esto se lleva a cabo por la interacción con el sistema amortiguador de bicarbonato a través de la inyección de una corriente de CO₂. La actividad biológica produce un descenso en el carbono inorgánico disuelto que es consumido para el crecimiento microalgal, forzando un desplazamiento en el equilibrio del tampón carbonato/bicarbonato (Figura 3) y resultando un incremento del pH. La inyección de CO₂ como acción reguladora tiene dos objetivos: en primer lugar, se produce una acidificación del medio de cultivo recuperando la capacidad del tampón y llevando el pH al punto óptimo de equilibrio para la microalga, y en segundo lugar proporciona una fuente de carbono inorgánico indispensable para el crecimiento.

El control del pH es un problema no lineal que puede ser linealizado bajo ciertas circunstancias. Para ello el modelo que se va a utilizar relaciona el pH con la inyección de CO₂ y la radiación solar a través de dos funciones de transferencia de primer orden en la variable *s* de Laplace:

$$V_{pH} = \underbrace{\frac{K_1}{(1 + \tau_1 \cdot s)}}_{FT1_1} \cdot \underbrace{\frac{K_{1_2} \cdot \omega_n^2}{(s^2 + 2 \cdot \delta \omega_n \cdot s + \omega_n^2)}}_{FT1_2} \cdot e^{-m_1 \cdot s} \cdot VCO_2 + \underbrace{\frac{K_2}{(1 + \tau_2 \cdot s)}}_{FT2} \cdot VI$$

donde:

V_{pH}: pH del cultivo.

VCO₂: porcentaje de apertura de la válvula de CO₂.

VI: valor de la radiación global.

La primera función de transferencia, que relaciona el pH con el CO₂ inyectado (FT1), se divide a su vez en otras dos funciones de transferencia. Por un lado FT1_1 que es de primer orden y que representa la dinámica principal del sistema, y por otro lado FT1_2 que es de segundo orden y representa la pequeña dinámica oscilatoria que se observa sobre la dinámica principal debido a la recirculación que se produce

en los fotobiorreactores. Como el sistema tiene retardo, también se debe añadir la función del retardo ($e^{-tr_1 \cdot s}$). La función de transferencia FT2 relaciona el efecto de la radiación solar en el pH y también se trata de una función de transferencia de primer orden, pero en este caso sin retardo, ya que este es despreciable.

Las funciones de transferencia de primer orden tienen como parámetros la ganancia estática (K) y la constante de tiempo (τ). La ganancia estática del sistema proporciona una medida de la amplitud de la respuesta del sistema en función de la amplitud de la entrada al mismo. Es decir, es el cociente entre el cambio experimentado por la salida una vez alcanzado el régimen permanente final y el cambio efectuado en la variable de entrada (magnitud del escalón). La constante de tiempo es el tiempo que tarda el sistema en alcanzar el 63% del valor final de la señal de salida desde que comienza a variar el sistema frente a la entrada en escalón. Es una medida de la rapidez de respuesta del sistema a una señal escalón. La función retardo tiene como parámetro tr que es el tiempo de retardo.

En las funciones de transferencia de segundo orden, los parámetros son la ganancia (K1_2), la frecuencia natural no amortiguada (ω_n) y el coeficiente de amortiguamiento (δ). La frecuencia natural no amortiguada corresponde a la frecuencia con la que oscilaría el sistema si no existiera amortiguamiento, mientras que el coeficiente de amortiguamiento es un parámetro que en función de su valor se puede deducir si el sistema es inestable, críticamente amortiguado, sobreamortiguado o subamortiguado (en este caso además su valor determina la amplitud de las sobreoscilaciones).

Conocidos los efectos de la inyección de CO₂ y de la radiación solar, así como las funciones de transferencia que lo representan, se considera que la dinámica principal del sistema viene determinada por la inyección de CO₂, mientras que la radiación solar será considerada como una perturbación del sistema.

El control anticipativo o feedforward consiste básicamente en realimentar el efecto de la perturbación (la radiación solar) al lazo de control para que posteriormente se corrijan los efectos de ésta. El esquema de control es el mismo que el del controlador PI, sólo que se añade la función de transferencia GFF (feedforward) que es la que introduce el efecto de la radiación en el lazo de control. El cálculo de GFF se realiza del siguiente modo:

$$G_{FF} = \frac{TF2(s)}{TF1_1(s)}$$

El control anticipativo feedforward reduce las pérdidas de CO₂ con respecto al Todo-Nada y al PI, consiguiendo mantener el pH entorno al valor óptimo inyectando la menor cantidad de CO₂, y por consiguiente perdiendo menos cantidad de CO₂.

Por otro lado, reduce el número de actuaciones de la válvula de CO₂, ya que el control del pH está mejor regulado, evitando un desgaste excesivo de la válvula, alargando la vida útil de ésta.

1.4. Control en los equipos

1.4.1. Intercambiador de calor

Puesto que la temperatura de entrada del fango en el digestor debe ser 32°C, se instalará un termómetro en la corriente de fango a la salida del cambiador de calor que manda señales a un controlador PID que actúa sobre la válvula de regulación del caudal de gas a la entrada del cambiador.

1.4.2. Digestor anaerobio

Para mantener el volumen de fango en el digestor a un nivel constante se instalará un sensor de caudal a la salida de la válvula que regula el caudal de fango que sale del digestor. Dicho sensor manda señales a un controlador PID que actúa sobre el grado de apertura de la válvula.

1.4.3. Gasómetro

Para evitar en el interior del gasómetro se alcance una presión superior a 6 atmósferas, se instalará un sensor de presión en la corriente de salida del gasómetro que manda señales a un controlador PID que actúa sobre la válvula que regula el caudal de biogás que sale del mismo.

1.4.4. Generador

Se regulará el caudal de entrada de aire en función del caudal de entrada de biogás. Para ello se empleará un tipo especial de control anticipativo, el “ratio control”, es decir, se calcula la relación entre los caudales de entrada (midiéndolos, mediante sensores de caudal situados en las entradas, y dividiéndolos), es decir, la variable a controlar, la cual se envía a un controlador PID de realimentación cuyo punto de consigna es la relación entre ambos caudales. El controlador actúa sobre el grado de apertura de la válvula de entrada de aire.

1.4.5. Columna de absorción

Se regulará el caudal de entrada de disolución carbonato/bicarbonato en función del caudal de entrada de gas de escape del generador empleando el ratio control. Se miden los caudales de entrada y se calcula la relación entre ambos, la cual se envía a un controlador PID que actúa sobre el grado de apertura de la válvula de entrada de la fase líquida.

Relación caudal fase gaseosa/caudal fase líquida: 50

1.4.6. Tanque de disolución carbonatada

En este caso también se empleará el ratio control. Se regulará el caudal de entrada de disolución de bicarbonato en función del caudal de entrada de disolución de carbonato. Se miden los caudales de entrada y se calcula la relación entre ambos la cual se envía a un controlador PID que actúa sobre el grado de apertura de la válvula de entrada de disolución de bicarbonato.

Relación caudal carbonato/caudal bicarbonato: 2

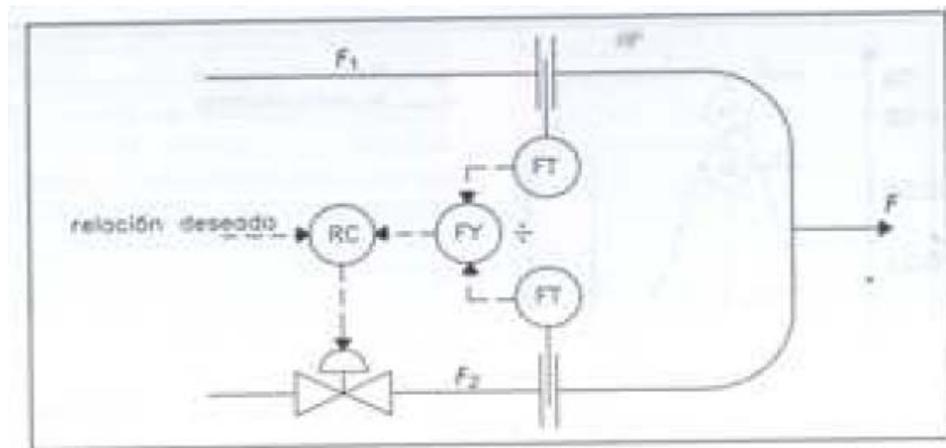


Figura 4. Control de la relación de dos caudales mediante ratio control

2. INSTRUMENTACIÓN

Sea cual sea la estrategia de control seleccionada, para implementar físicamente el sistema de control habrá que medir variables del proceso (niveles, caudales, temperaturas, etc.), calcular las acciones de control y manipular determinadas variables de entrada. La instrumentación requerida para llevar a cabo estas funciones se puede clasificar en cuatro tipos:

1. Instrumentos de medida o dispositivos para medir las variables controladas u otras variables que utilice el sistema de control.
2. Actuadores o dispositivos capaces de mover las variables manipuladas del proceso en la dirección adecuada.
3. Sistemas de transmisión de información capaces de llevar las señales medidas a los controladores y las señales de control a los actuadores.
4. Controladores o dispositivos capaces de determinar las actuaciones necesarias a partir de la información obtenida del proceso y del comportamiento deseado.

2.1. Diagrama de instrumentación de la planta

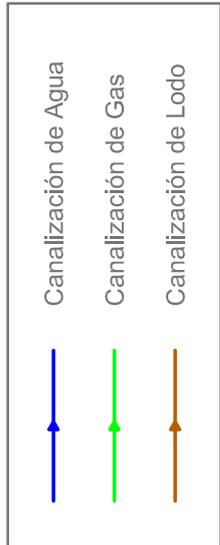
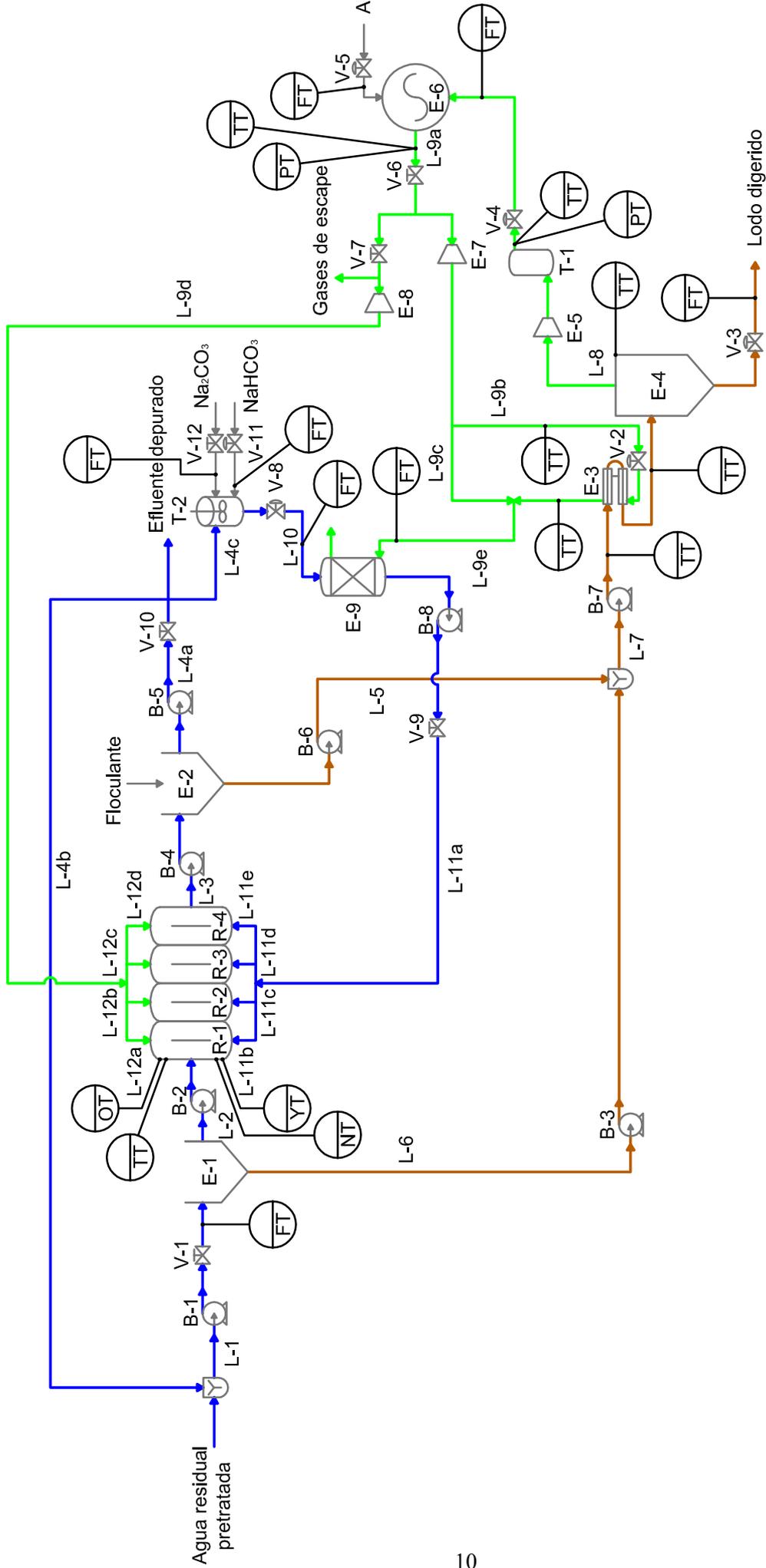


Tabla 1. Nomenclatura de sensores

KT	Sensor/transmisor de tiempo
CT	Sensor/transmisor de conductividad
LT	Sensor de nivel
PT	Sensor/transmisor de presión
TT	Sensor/trnasmisor de temperatura
FT	Sensor/transmisor de flujo o caudal
AT	Sensor/trnasmisor-analizador de CO₂
YT	Sensor/transmisor de pH
OT	Sensor/transmisor-analizador de O₂
NT	Sensor/transmisor de radiación solar
MT	Sensor/ transmisor de humedad

Tabla 2. Nomenclatura de válvulas

	Válvula automática de control
	Válvula manual

3. BIBLIOGRAFÍA

- Creus Solé, A. Instrumentación industrial; Ed. Marcombo.
- Coulson and Richardson. Chemical engineering design. Vol. 6; Ed. Elsevier.
- Peña Martín, J. Septiembre 2009. Proyecto fin de carrera: Diseño e implementación de una herramienta de control avanzado para el control de pH en fotobiorreactores tubulares verticales con microalgas.
- Ollero de Castro, P., Fernández Camacho, E. Control e instrumentación de procesos químicos.
- Control e instrumentación de procesos químicos. Asignatura de 4º curso de Ingeniería Química (Plan 1999). Universidad de Almería.

ANEJO N° 13
DISTRIBUCIÓN EN
PLANTA

ÍNDICE

- 1. INTRODUCCIÓN**
- 2. OBJETIVOS**
- 3. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA SELECCIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN EN PLANTA**
- 4. ASPECTOS GENERALES DE LA DISTRIBUCIÓN EN PLANTA**
- 5. MÉTODO SLP (PLANIFICACIÓN SISTEMÁTICA DE LA DISTRIBUCIÓN EN PLANTA)**
- 6. DISTRIBUCIÓN EN PLANTA SELECCIONADA**
 - 6.1. Factores que afectan a la distribución en planta**
 - 6.1.1. Factor material**
 - 6.1.2. Factor maquinaria**
 - 6.1.3. Factor trabajador**
 - 6.1.4. Factor movimiento**
 - 6.1.5. Factor espera**
 - 6.1.6. Factor servicio**
 - 6.1.7. Factor edificio**
 - 6.1.8. Factor cambio**
 - 6.2. Evaluación multicriterio**
- 7. BIBLIOGRAFÍA**

1. INTRODUCCIÓN

La planificación de la distribución en planta incluye decisiones acerca de la disposición física de los centros de actividad económica dentro de una instalación. El objetivo de la planificación de la distribución en planta consiste en permitir que los empleados y el equipo trabajen con mayor eficacia.

Por lo general, la mayoría de las distribuciones quedan diseñadas eficientemente para las condiciones de partida; sin embargo, a medida que la organización crece y/o ha de adaptarse a los cambios internos y externos, la distribución inicial se vuelve menos adecuada, hasta llegar el momento en el que la redistribución se hace necesaria. Los motivos que justifican esta última se deben, con frecuencia, a tres tipos básicos de cambios:

- En el volumen de producción, que puede requerir un mayor aprovechamiento del espacio.
- En la tecnología y en los procesos, que pueden motivar un cambio en recorridos de materiales y hombres, así como en la disposición relativa a equipos e instalaciones.
- En el producto, que puede hacer necesarias modificaciones similares a las requeridas por un cambio en la tecnología.

La frecuencia de la redistribución dependerá de las exigencias del propio proceso en este sentido. En ocasiones, esto se hace periódicamente, aunque se limite a la realización de ajustes menores en la distribución instalada; otras veces, las redistribuciones son continuas, pues están previstas como situación normal y se llevan a cabo casi ininterrumpidamente; pero también se da el caso en el que las redistribuciones no tienen una periodicidad concreta, surgiendo, bien por alguna de las razones expuestas anteriormente, bien porque la existente se considera una mala distribución.

Algunos de los síntomas que ponen de manifiesto la necesidad de recurrir a la redistribución de una planta productiva son:

- Congestión y deficiente utilización del espacio.
- Acumulación excesiva de materiales en proceso.
- Excesivas distancias a recorrer en el flujo de trabajo.
- Simultaneidad de cuellos de botella y ociosidad en centros de trabajo.
- Trabajadores cualificados realizando demasiadas operaciones poco complejas.
- Ansiedad y malestar de la mano de obra. Accidentes laborales.
- Dificultad de control de las operaciones y del personal.

Al abordar el problema de la ordenación de los diversos equipos, materiales y personal, se aprecia cómo la distribución en planta, lejos de ser una ciencia, es más bien un arte en el que la pericia y experiencia juegan un papel fundamental. Todas las técnicas son muy simples, puesto que su única utilidad es servir de soporte al verdadero ejecutor que es el ingeniero que desarrolla la distribución.

2. OBJETIVOS

Se procurará encontrar aquella ordenación de los equipos y de las áreas de trabajo que sea más económica y eficiente, al mismo tiempo que segura y satisfactoria para el personal que ha de realizar el trabajo. De forma más detallada, se podría decir que este objetivo general se alcanza a través de la consecución de hechos como:

- Disminución de la congestión.
- Supresión de áreas ocupadas innecesariamente.
- Reducción del trabajo administrativo e indirecto.
- Mejora de la supervisión y el control.
- Mayor facilidad de ajuste a los cambios de condiciones.
- Mayor y mejor utilización de la mano de obra, la maquinaria y los servicios.
- Reducción de las mantenuciones y del material en proceso.

Es evidente que, aunque los factores enumerados puedan ser ventajas concretas a conseguir, no todas podrán ser alcanzadas al mismo tiempo y, en la mayoría de los casos, la mejor solución será un equilibrio en la consecución de los mismos. En cualquier caso, los objetivos básicos que ha de conseguir una buena distribución en planta son:

- Unidad. Al perseguir el objetivo de unidad se pretende que no haya sensación de pertenecer a unidades distintas ligada exclusivamente a la distribución en planta.
- Circulación mínima. El movimiento de productos, personas o información se debe minimizar.
- Seguridad. La Seguridad en el movimiento y el trabajo de personas y materiales es una exigencia en cualquier diseño de distribución en planta.
- Flexibilidad. Se alude a la flexibilidad en el diseño de la distribución en planta como la necesidad de diseñar atendiendo a los cambios que ocurrirán en el corto y medio plazo en volumen y en proceso de producción.

3. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA SELECCIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN EN PLANTA

Al realizar una buena distribución, es necesario conocer la totalidad de los factores implicados en la misma, así como sus interrelaciones. La influencia e importancia relativa de los mismos puede variar con cada organización y situación concreta; en cualquier caso, la solución adoptada para la distribución en planta debe conseguir un equilibrio entre las características y consideraciones de todos los factores, de forma que se obtengan las máximas ventajas. De manera agregada, los factores que tienen influencia sobre cualquier distribución pueden encuadrarse en ocho grupos:

- Los materiales
- La maquinaria

- La mano de obra
- El movimiento
- Las esperas
- Los servicios auxiliares
- El edificio
- Los cambios

4. ASPECTOS GENERALES DE LA DISTRIBUCIÓN EN PLANTA

La distribución en planta de cualquier proceso químico presenta una serie de elementos comunes:

- **Recinto de la planta**

El emplazamiento donde va a construirse la planta debe estar rodeado en todos sus límites por una valla de seguridad, y todas las entradas deben tener puerta. Por razones de seguridad, el número de puertas debe ser mínimo. Las zonas de actividades con sustancias peligrosas deben aislarse del resto siempre que sea posible mediante la instalación de sus propias vallas de seguridad y de muros de contención. La red de tuberías de la planta, tanto las de proceso como las de servicios se disponen normalmente en paralelo al sistema de carreteras.

- **Edificios**

Las distintas secciones de la planta, según sus características, necesitan un determinado tipo de edificio, o al menos de estructura que las albergue. Para facilitar el buen funcionamiento del proceso o para albergar determinados servicios generales, auxiliares y sociales suele ser necesario aislar correctamente determinados volúmenes del exterior.

Los edificios auxiliares deben incluir:

- Almacenaje de materias primas : tanques y almacenes
- Almacenes de suministro para el mantenimiento y operación
- Talleres de mantenimiento
- Laboratorios para el control de proceso
- Servicios
- Aparcamiento

Los edificios administrativos se suelen situar cerca de la entrada principal y aguas debajo de la dirección del viento.

Los laboratorios se colocan en el centro de la planta a la que sirven, pero siempre en áreas seguras.

La sala de calderas, subestación eléctrica, centro de mando de motores, estaciones de bombeo, salas de control, etc. Deben quedarse en sitio donde no

corran peligro de quedar fuera de servicio por efecto de un incendio, explosión o inundación.

Las bombas y los motores eléctricos que accionan los diferentes equipos deben situarse en el interior de los edificios, para evitar que puedan sufrir daños debido a agentes meteorológicos. Además, es conveniente localizar las bombas en línea a cada lado de un camino de acceso, con los motores alineados hacia el exterior, para un fácil acceso.

Los compresores, debido a su elevado coste, deben instalarse de modo que permitan un rápido desmontaje y posterior montaje, aliviando así la necesidad de proveer de equipos de repuesto.

Todos los edificios y zonas de acceso deben disponer de vías libres y amplias para que los operadores puedan salvar desniveles y obstáculos, y de plataformas o pasarelas con dos o más salidas de escape.

- **Accesos y zonas de carga o descarga**

Las zonas de acceso a la planta del tráfico rodado deben situarse en la periferia del recinto. Del mismo modo, las áreas de carga y descarga se ubicaran en un lugar cercano a la entrada de la planta y a las zonas de acceso por carretera. Debe evitarse, en la medida de lo posible, que las carreteras atraviesen áreas de proceso o áreas peligrosas.

En el interior de la planta se intentara que las distancias que recorran los productos desde/hacia el almacenamiento durante su procesado sean mínimas.

- **Evacuación del efluente**

El agua de lluvia y las corrientes de agua no dañinas pueden ir directamente al alcantarillado. La lluvia recogida contaminada se tratara junto con los efluentes acuosos del proceso. Los efluentes líquidos no inocuos deberán ir en sistemas cerrados y auto lavables.

La pendiente mínima en áreas pavimentadas debe ser de 1.25% y 2.5% para líquidos corrosivos.

Para la construcción del plano de distribución de la planta se ha utilizado datos típicos encontrados en bibliografía de las distancias mínimas de seguridad.

5. MÉTODO SLP (PLANIFICACIÓN SISTEMÁTICA DE LA DISTRIBUCIÓN EN PLANTA)

El método SLP, es una forma organizada para realizar la planeación de una distribución y está constituida por cuatro fases, en una serie de procedimientos y símbolos convencionales para identificar, evaluar y visualizar los elementos y áreas involucradas de la mencionada planeación. Esta técnica, incluyendo el método simplificado, puede aplicarse a oficinas, laboratorios, áreas de servicio, almacén u

operaciones manufactureras y es igualmente aplicable a mayores o menores readaptaciones que existan, nuevos edificios o en el nuevo sitio de planta planeado. El SLP consiste en un esqueleto de pasos, un patrón de procedimientos de Planificación Sistemática de la Distribución en Planta y un juego de conveniencias.

Las fases del método son:

- **Localización**

Aquí debe decidirse donde va a estar el área que va a ser organizada, este no es necesariamente un problema de nuevo físico. Muy comúnmente la nueva organización o reorganización es en el mismo lugar que esta al principio, en un edificio recientemente adquirido o en un tipo similar de un área potencialmente disponible.

- **Organización general completa**

Establece el patrón o patrones básicos de flujo para el área que va a ser organizada. Esto también indica el tamaño, relación y configuración de cada actividad mayor, departamento o área.

- **Preparación en detalle**

Del plan de organización e incluye planear donde va a ser localizada cada pieza de maquinaria o equipo.

- **Instalación**

Esto envuelve ambas partes, planear la instalación y hacer físicamente los movimientos necesarios. Indica los detalles de la distribución y se realizan los ajustes necesarios conforme se van colocando los equipos.

Estos pasos vienen en secuencia y para mejores resultados, deben traslaparse uno a otro, es decir, que todos pueden iniciarse antes de que termine el anterior, ya que son complementarios.

Frecuentemente los pasos 1 y 4 no son una parte del proyecto específico de organización de la planeación de los ingenieros, aunque su proyecto debe pasar en cada caso por estos primeros y los últimos pasos. Por lo tanto, el planeador de la organización se concentra en los estrictos pasos del plan de organización: 2, organización general total y 3 plan de organización detallada.

6. DISTRIBUCIÓN EN PLANTA SELECCIONADA

- **Localización**

La planta se ubicará en las proximidades de la Estación Depuradora de Aguas Residuales El Toyo, en el término municipal de Almería.

- **Organización general**

- Zona de depuración y tratamiento de la biomasa
- Laboratorio
- Zona de almacenamiento de materias primas y productos químicos
- Zonas auxiliares

- **Preparación en detalle**

La disposición de los equipos elegida se representa en el plano de distribución en planta. Dicha disposición ha sido elegida considerando que el proceso es continuo, así como criterios de ahorro de espacio.

- **Instalación**

Colocación y ensamblaje de los equipos proyectados.

6.1. Factores que afectan a la distribución en planta

6.1.1. Factor material

- **Materias primas:** Agua residual, carbonato sódico, bicarbonato sódico, actipol FB1.
- **Producto:** Agua residual depurada.
- **Subproductos:** Fango digerido (biomasa).

6.1.2. Factor maquinaria

- **Decantador primario:** Decantador circular de flujo vertical, de 3 m de altura y 11 de diámetro, siendo su superficie 95,03 m².
- **Fotobiorreactores:** Cuatro reactores raceway, de 0,3 m de profundidad y 353,55 m de largo y 17,678 m de ancho cada uno.

- **Decantador secundario:** Decantador circular de flujo vertical, de 3 m de altura y 11 de diámetro, siendo su superficie 95,03 m².
- **Intercambiador de calor:** Intercambiador de calor de dos tubos concéntricos, de 1 m de longitud y 0,038 m de diámetro externo.
- **Digestor:** Digestor anaerobio de hormigón armado, de 10 m de altura total y 10 m de diámetro, siendo su superficie 78,54 m².
- **Gasómetro:** Gasómetro cilíndrico con cabezas semiesféricas de acero al carbono, con 8 m de carcasa y 6,14 m de diámetro, que opera a 6 atm de presión interna.
- **Columna de absorción:** Columna de burbujeo, de 2,65 m de altura y 1,06 m de diámetro.
- **Tanque de mezcla:** Tanque de mezcla de la disolución carbonatada, cilíndrico con 1,47 m de altura y 0,98 m de altura.

6.1.3. Factor trabajador

- Director.
- Ingeniero.
- Técnico de laboratorio.
- Equipo de mantenimiento y gestión.

6.1.4. Factor movimiento

No se considera este factor puesto que no influye en el proceso. Sólo afectaría en la necesidad de control de acceso y de espacio para vehículos del personal, así como camiones para el transporte del lodo digerido.

6.1.5. Factor espera

El factor espera tiene también muy poca influencia sobre el proceso, el elemento más importante que puede integrarse en este apartado es el almacenaje de materias primas, un almacén pequeño para almacenar el floculante, así como carbonatos y bicarbonatos.

6.1.6. Factor servicio

- Vías de acceso: Se accederá fácilmente a la planta a través de la autovía del Mediterráneo y la N-340.
- Protección contra incendios: Se dispondrá de elementos protectores en caso de incendios en distintas zonas de la fábrica así como una instalación adecuada en cumplimiento de la norma NBE-CPI-96.
- Iluminación: Independientemente de que la planta genere energía eléctrica para su autoabastecimiento, estará conectada a la red eléctrica general para garantizar la continuidad en el servicio.
- Instalaciones y equipos para uso personal: Servicio de vestuario, ducha y baño para uso personal.

6.1.7. Factor edificio

- Aparcamiento para el personal.
- Sala de control, con una superficie de 5m².
- Almacén de materias primas y otras herramientas de equipos, con una superficie de 10m².
- Laboratorio: integrado en la misma planta de proceso, consiste en una zona de medida de parámetros de calidad del agua residual, registro de muestras y recepción de productos químicos. La superficie ocupada por el laboratorio será 12m².
- Planta de proceso: La superficie ocupada por la planta será 7,2 ha.

6.1.8. Factor cambio

La construcción se realizará en una zona con más amplitud de la necesaria para posibles modificaciones o ampliaciones a lo largo de la vida útil del proyecto para mejorar el proceso.

6.2. Evaluación multicriterio

Para justificar la distribución en la planta y organización de la maquinaria y de las actividades se aplica la evaluación multicriterio:

- Definir las actividades que forman parte del proceso y que se quieren organizar ordenadamente según criterios coherentes.
- Definir unas pautas de posible proximidad por las que se razona la relación previamente establecida entre las diversas actividades.
- Enumerar distintas justificaciones por las que se razona la relación, previamente establecida, entre las diversas actividades.

Aplicando los pasos citados anteriormente, la distribución en planta más adecuada es la manifiesta en los planos.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Baasel W.D. Preliminary Chemical Engineering Plant Design; Ed. Van Nostrand Reinhold.

DOCUMENTO N° 3
PLANOS

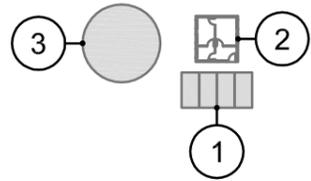
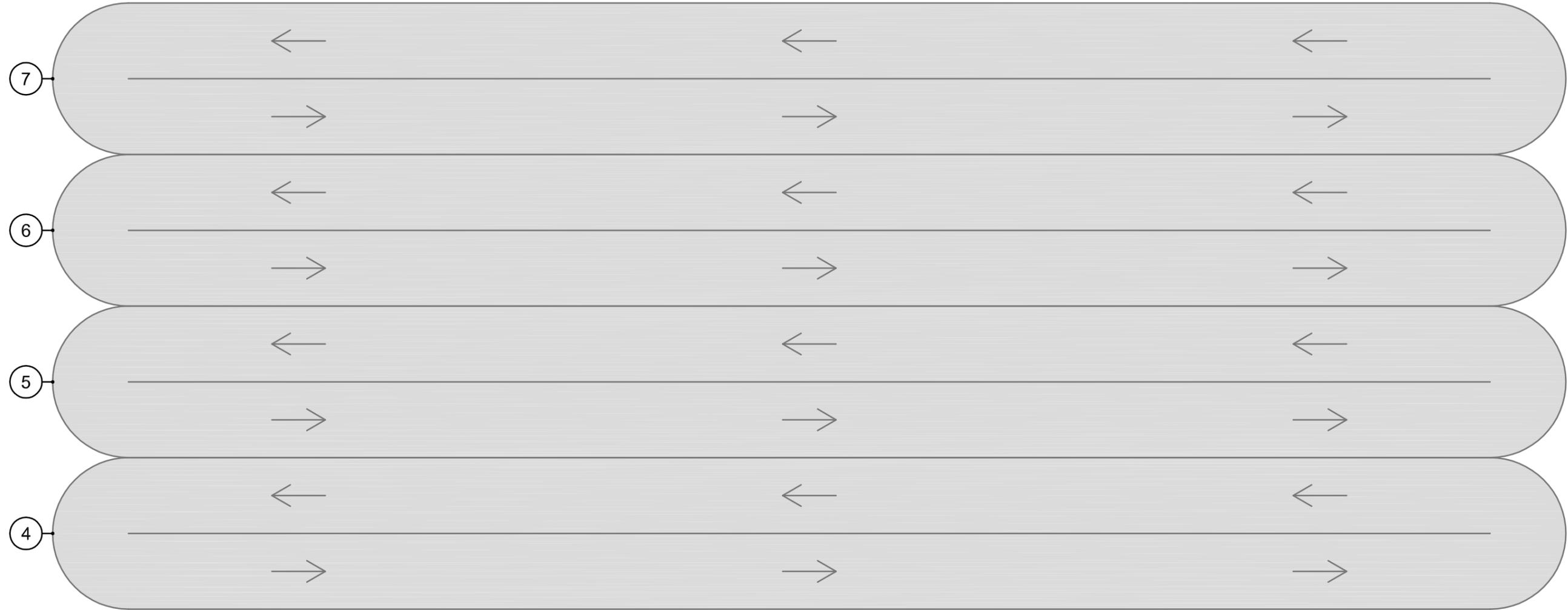
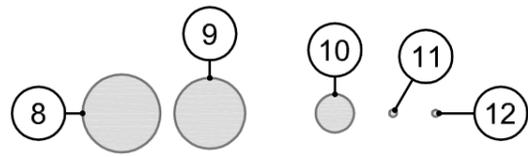
ÍNDICE

PLANO N°1: DISTRIBUCIÓN EN PLANTA

PLANO N°2: CANALIZACIONES DE AGUA, GAS Y LODO

PLANO N°3: DIAGRAMA DE FLUJO

PLANO N°4: DIAGRAMA DE INSTRUMENTACIÓN

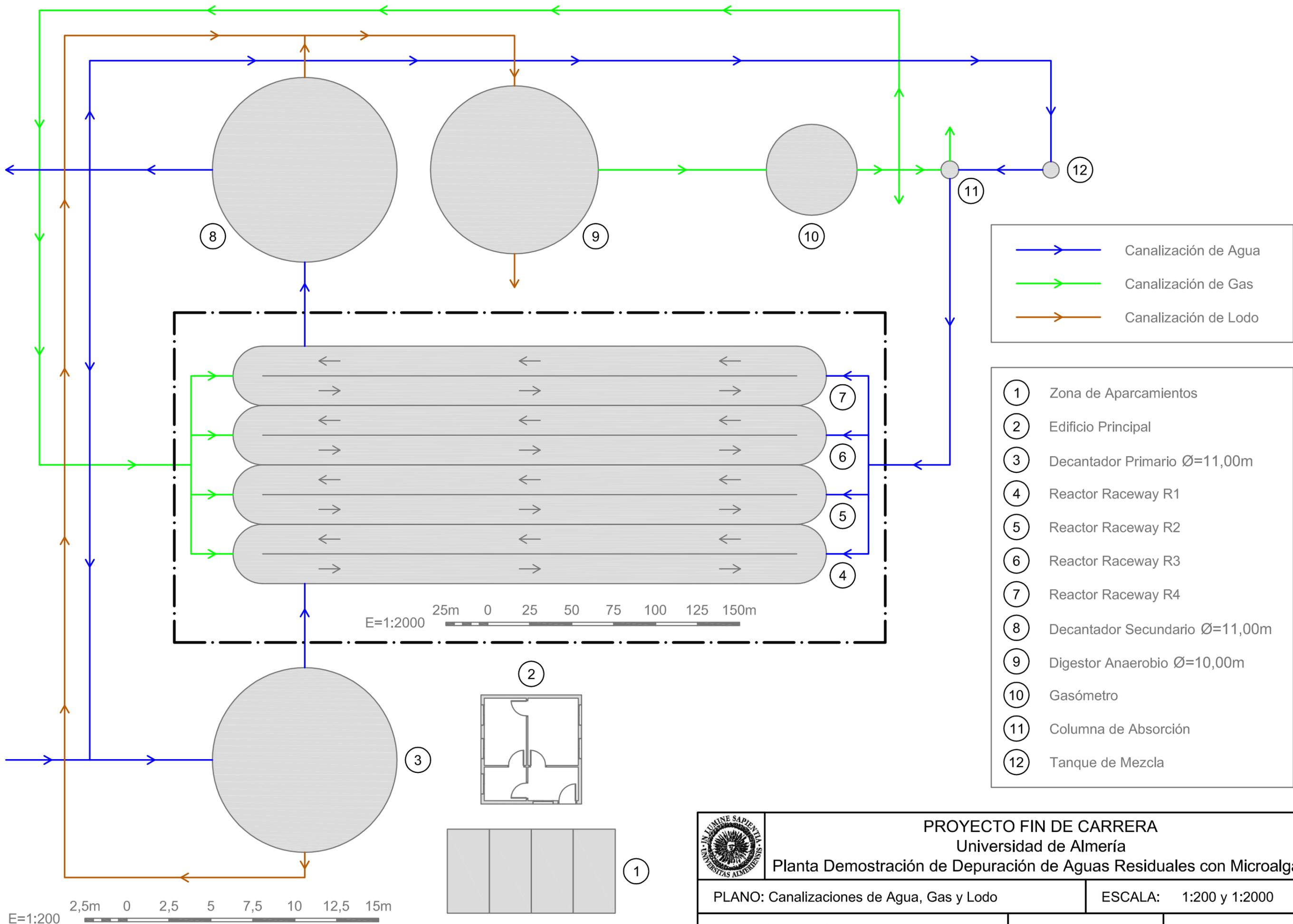


① Zona de Aparcamientos	⑦ Reactor Raceway R4
② Edificio Principal	⑧ Decantador Secundario Ø=11,00m
③ Decantador Primario Ø=11,00m	⑨ Digestor Anaerobio Ø=10,00m
④ Reactor Raceway R1	⑩ Gasómetro
⑤ Reactor Raceway R2	⑪ Columna de Absorción
⑥ Reactor Raceway R3	⑫ Tanque de Mezcla



PROYECTO FIN DE CARRERA
 Universidad de Almería
 Planta Demostración de Depuración de Aguas Residuales con Microalgas

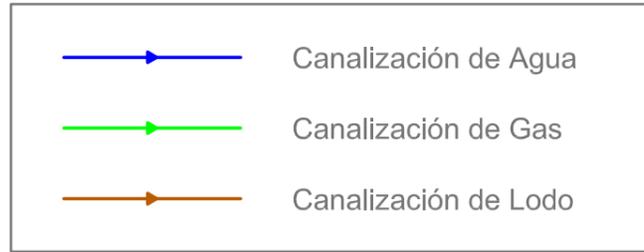
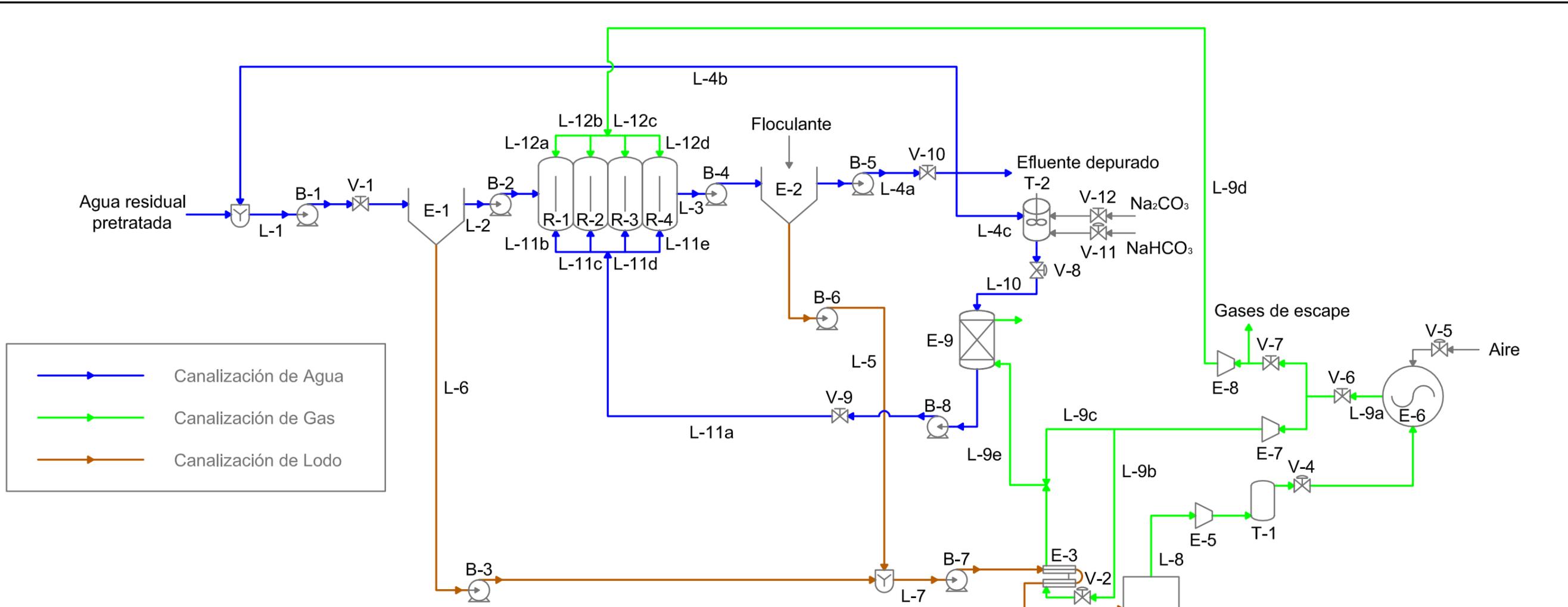
PLANO: Distribución en Planta	ESCALA: 1:1000
ALUMNO: Paula Soriano Molina	FECHA: Junio 2014
	PLANO Nº: 1



	Canalización de Agua
	Canalización de Gas
	Canalización de Lodo

- ① Zona de Aparcamientos
- ② Edificio Principal
- ③ Decantador Primario Ø=11,00m
- ④ Reactor Raceway R1
- ⑤ Reactor Raceway R2
- ⑥ Reactor Raceway R3
- ⑦ Reactor Raceway R4
- ⑧ Decantador Secundario Ø=11,00m
- ⑨ Digestor Anaerobio Ø=10,00m
- ⑩ Gasómetro
- ⑪ Columna de Absorción
- ⑫ Tanque de Mezcla

	PROYECTO FIN DE CARRERA Universidad de Almería Planta Demostración de Depuración de Aguas Residuales con Microalgas		
	PLANO: Canalizaciones de Agua, Gas y Lodo		ESCALA: 1:200 y 1:2000
ALUMNO: Paula Soriano Molina		FECHA: Junio 2014	PLANO Nº: 2



L-1	Entrada de agua al decantador primario	L-9d	Gases de escape a reactores
L-2	Entrada de agua a reactores	L-9e	Gases de escape a columna de absorción (L-9b+L-9c)
L-3	Entrada de agua al decantador secundario	L-10	Entrada de disolución $\text{Na}_2\text{CO}_3/\text{NaHCO}_3$ a la columna de absorción
L-4a	Salida de agua depurada	L-11a	Salida de disolución carbonatada de la columna de absorción
L-4b	Recirculación de agua depurada	L-11b	Entrada de disolución carbonata al reactor R-1
L-4c	Entrada de agua depurada al tanque de disolución $\text{Na}_2\text{CO}_3/\text{NaHCO}_3$	L-11c	Entrada de disolución carbonata al reactor R-2
L-5	Salida de lodo secundario	L-11d	Entrada de disolución carbonata al reactor R-3
L-6	Salida de lodo primario	L-11e	Entrada de disolución carbonata al reactor R-4
L-7	Entrada de lodo al digestor	L-12a	Entrada de gases de escape al reactor R-1
L-8	Salida de biogás del digestor	L-12b	Entrada de gases de escape al reactor R-2
L-9a	Gases de escape del generador	L-12c	Entrada de gases de escape al reactor R-3
L-9b	Gases de escape a intercambiador	L-12d	Entrada de gases de escape al reactor R-4
L-9c	Gases de escape a columna de absorción		



PROYECTO FIN DE CARRERA
 Universidad de Almería
 Planta Demostración de Depuración de Aguas Residuales con Microalgas

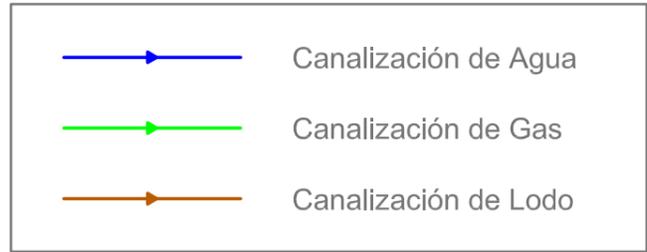
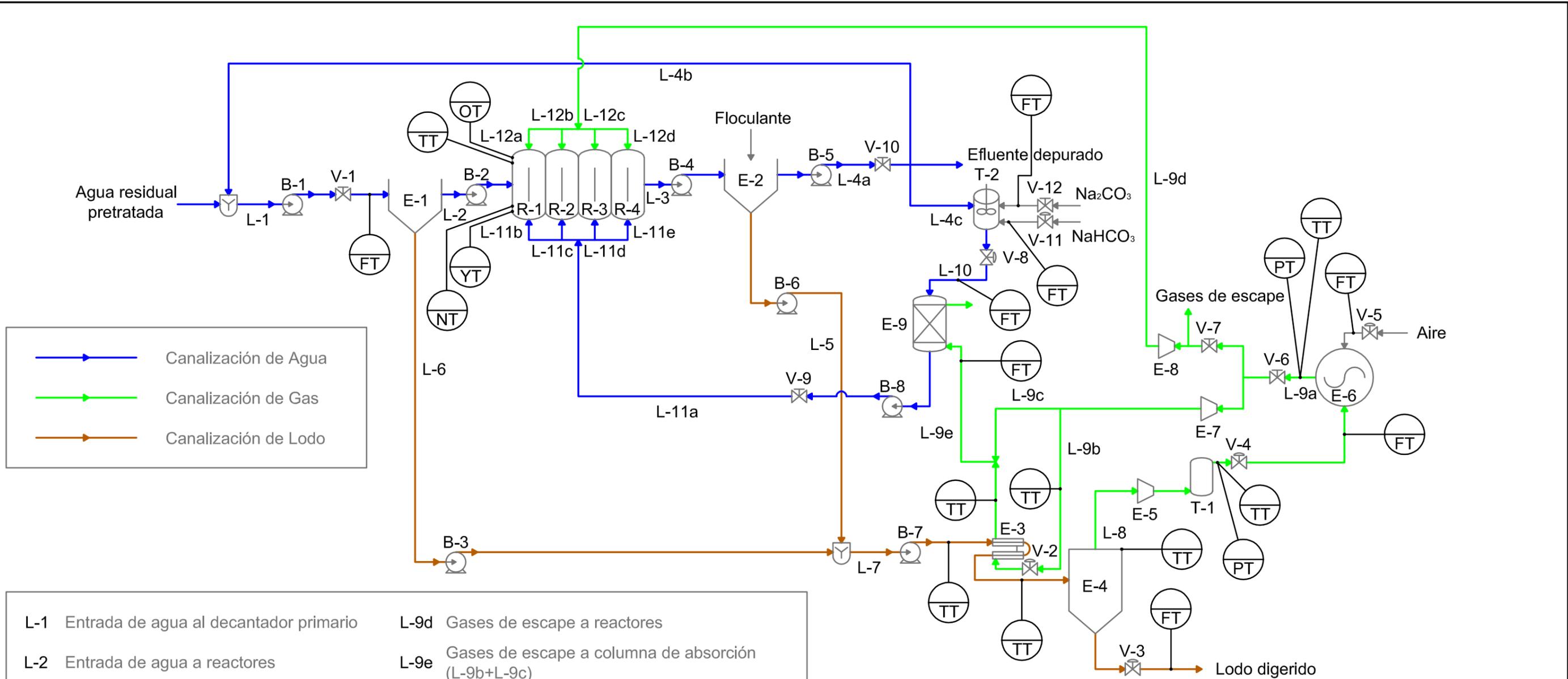
PLANO: Diagrama de Flujo

ESCALA: Sin Escala

ALUMNO: Paula Soriano Molina

FECHA: Junio 2014

PLANO Nº: 3



L-1	Entrada de agua al decantador primario	L-9d	Gases de escape a reactores
L-2	Entrada de agua a reactores	L-9e	Gases de escape a columna de absorción (L-9b+L-9c)
L-3	Entrada de agua al decantador secundario	L-10	Entrada de disolución Na ₂ CO ₃ /NaHCO ₃ a la columna de absorción
L-4a	Salida de agua depurada	L-11a	Salida de disolución carbonatada de la columna de absorción
L-4b	Recirculación de agua depurada	L-11b	Entrada de disolución carbonata al reactor R-1
L-4c	Entrada de agua depurada al tanque de disolución Na ₂ CO ₃ /NaHCO ₃	L-11c	Entrada de disolución carbonata al reactor R-2
L-5	Salida de lodo secundario	L-11d	Entrada de disolución carbonata al reactor R-3
L-6	Salida de lodo primario	L-11e	Entrada de disolución carbonata al reactor R-4
L-7	Entrada de lodo al digestor	L-12a	Entrada de gases de escape al reactor R-1
L-8	Salida de biogás del digestor	L-12b	Entrada de gases de escape al reactor R-2
L-9a	Gases de escape del generador	L-12c	Entrada de gases de escape al reactor R-3
L-9b	Gases de escape a intercambiador	L-12d	Entrada de gases de escape al reactor R-4
L-9c	Gases de escape a columna de absorción		

	Sensor/Transmisor de Tiempo		Sensor/Transmisor-Analizador de CO ₂
	Sensor/Transmisor de Conductividad		Sensor/Transmisor de pH
	Sensor de Nivel		Sensor/Transmisor-Analizador de O ₂
	Sensor/Transmisor de Presión		Sensor/Transmisor de Radiación Solar
	Sensor/Transmisor de Temperatura		Sensor/Transmisor de Humedad
	Sensor/Transmisor de Flujo o Caudal		

	PROYECTO FIN DE CARRERA Universidad de Almería Planta Demostración de Depuración de Aguas Residuales con Microalgas		
	PLANO: Diagrama de Instrumentación		ESCALA: Sin Escala
ALUMNO: Paula Soriano Molina		FECHA: Junio 2014	PLANO Nº: 4

DOCUMENTO N° 4
PLIEGO DE
CONDICIONES

ÍNDICE

- 1. DISPOSICIONES GENERALES**
 - 1.1. Obras objeto del presente proyecto**
 - 1.2. Obras accesorias no especificadas**
 - 1.3. Documentos que definen las obras**
 - 1.4. Compatibilidad y relación entre los documentos**
 - 1.5. Protección individual frente a riesgos mecánicos**
 - 1.6. Dirección de las obras**
 - 1.7. Disposiciones generales a tener en cuenta**

- 2. PLIEGO DE CONDICIONES TÉCNICAS**
 - 2.1. Replanteo.**
 - 2.2. Movimiento de tierras**
 - 2.4. Cimentaciones**
 - 2.5. Forjados**
 - 2.6. Hormigones**
 - 2.7. Acero laminado**
 - 2.8. Cubiertas y coberturas**
 - 2.9. Albañilería**
 - 2.10. Carpintería y cerrajería**
 - 2.11. Aislamientos**
 - 2.12. Red vertical de saneamiento**
 - 2.13. Instalación eléctrica**
 - 2.14. Instalación de fontanería**
 - 2.15. Instalaciones de climatización**
 - 2.16. Instalaciones de protección**
 - 2.17. Obras o instalaciones no especificadas**

- 3. CONDICIONES DE ÍNDOLE FACULTATIVA**
 - 3.1. Obligaciones y derechos del contratista**
 - 3.1.1. Remisión de solicitud de ofertas.**
 - 3.1.2. Subcontratas**
 - 3.1.3. Residencia del contratista**
 - 3.1.4. Reclamaciones contra las órdenes de dirección**
 - 3.1.5. Despido por insubordinación e incapacidad**
 - 3.1.6. Copia de los documentos**
 - 3.2. Trabajo, materiales y métodos auxiliares**
 - 3.2.1. Libro de órdenes**
 - 3.2.2. Comienzo de los trabajos y plazo de ejecución**
 - 3.2.3. Condiciones generales de ejecución de los trabajos**
 - 3.2.4. Trabajos defectuosos**
 - 3.2.5. Obras y vicios ocultos**
 - 3.2.6. Materiales no utilizables o defectuosos**
 - 3.2.7. Medios auxiliares**
 - 3.3. Recepción y liquidación**
 - 3.3.1. Recepciones provisionales**
 - 3.3.2. Plazo de garantía**

1. DISPOSICIONES GENERALES

1.1. Obras objeto del presente proyecto

Se considerarán sujetas a las condiciones de este Pliego, todas las obras características, planos y presupuestos, que se adjuntan en las partes correspondientes del presente Proyecto, así como todas las obras necesarias para dejar completamente terminados los edificios e instalaciones con arreglo a los planos y documentos adjuntos.

Se entiende por obras accesorias, aquellas que por su naturaleza, no pueden ser previstas en todos sus detalles, sino a medida que avanza la ejecución de los trabajos. Las obras accesorias, se construirán según se vaya conociendo su necesidad. Cuando su importancia lo exija se construirán en base a los proyectos adicionales que se redacten. En los casos de menor importancia se llevarán a cabo conforme a la propuesta que formule la Dirección de la Obra.

1.2. Obras accesorias no especificadas

Si en el transcurso de los trabajos se hiciese necesario ejecutar cualquier clase de obras o instalaciones que no se encuentren descritas en este Pliego de Condiciones, el Adjudicatario estará obligado a realizarlas con estricta sujeción a las órdenes que, al efecto, reciba de la Dirección de Obra y, en cualquier caso, con arreglo a las reglas del buen arte constructivo.

La Dirección de Obra tendrá plenas atribuciones para sancionar la idoneidad de los sistemas empleados, los cuales estarán expuestos para su aprobación de forma que, a su juicio, las obras o instalaciones que resulten defectuosas total o parcialmente, deberán ser demolidas, desmontadas o recibidas en su totalidad o en parte, sin que dé derecho a ningún tipo de reclamación por parte del Adjudicatario.

1.3. Documentos que definen las obras

Los documentos que definen las obras y que la propiedad entregue al Contratista, pueden tener carácter contractual o meramente informativo.

Son documentos contractuales los Planos, Pliego de Condiciones, Cuadros de Precios y Presupuestos Parcial y Total, en su caso, que se incluyen en el presente Proyecto. Los datos incluidos en la Memoria y Anejos, así como la justificación de precios tienen carácter meramente informativo.

Cualquier cambio en el planteamiento de la Obra que implique un cambio sustancial respecto de lo proyectado deberá ponerse en conocimiento de la Dirección Técnica para que lo apruebe, si procede, y redacte el oportuno proyecto reformado.

1.4. Compatibilidad y relación entre los documentos

En caso de contradicción entre los planos y el Pliego de Condiciones, prevalecerá lo prescrito en este último documento. Lo mencionado en los planos y omitido en el Pliego de Condiciones o viceversa, habrá de ser ejecutado como si estuviera expuesto en ambos documentos.

1.5. Protección individual frente a riesgos mecánicos

Se van a enumerar los equipos de protección individual más utilizados para hacer frente a los riesgos mecánicos (golpes, pinchazos, abrasiones, etc) que afectan fundamentalmente al cráneo y a las extremidades.

1.6. Dirección de las obras.

El contratista deberá seguir las instrucciones del Director de la obra en todo lo referente a calidad y acopio de materiales, ejecución de la obra, modificaciones del proyecto, programa de trabajo y precauciones a adoptar.

La propiedad nombrará en su representación a un Técnico Titulado, en quién recaerán las labores de dirección, control y vigilancia de las obras del presente Proyecto. El Contratista proporcionará toda clase de facilidades para que la Dirección de Obra, o sus subalternos, puedan llevar a cabo su trabajo con el máximo de eficacia.

No será responsable ante la propiedad de la tardanza de los Organismos competentes en la tramitación del Proyecto. La tramitación es ajena al Director, quien una vez conseguidos todos los permisos, dará la orden de comenzar la obra.

1.7. Disposiciones generales a tener en cuenta

- Ley de contratos del Estado aprobado por Decreto 923/1965 de 8 de Abril.
- Reglamento General de Contratación para aplicación de dicha Ley aprobado por Decreto 3354/1967 de 28 de Diciembre.
- Pliegos de Prescripciones Técnicas Generales vigentes del M.O.P.U.
- Normas Básicas (NBE) y Tecnológicas de la Edificación (NTE).
- Instrucción EHE de hormigón estructural.

- Instrucción EP-93 para el proyecto y la ejecución de obras de hormigón pretensado.
- Métodos y Normas de Ensayo de Laboratorio Central del M.O.P.U.
- Reglamento Electrotécnico de Alta y Baja Tensión y Normas MIBT complementarias.
- Reglamento sobre recipientes y aparatos a presión.
- Resolución General de Instrucciones para la construcción de 31 de Octubre de 1966.

2. PLIEGO DE CONDICIONES TÉCNICAS

2.1. Replanteo

Antes de dar comienzo las obras, la Dirección de las obras, auxiliado del personal subalterno necesario y en presencia del Contratista o de su representante, procederá al replanteo general de la obra. Una vez finalizado el mismo se levantará acta de comprobación del replanteo. Los replanteos de detalle se llevarán a cabo de acuerdo con las instrucciones y órdenes de la Dirección de la Obra, quien realizará las comprobaciones necesarias en presencia del Contratista o de su representante. El Contratista se hará cargo de las estacas, señales y referencias que se dejen en el terreno como consecuencia del replanteo.

2.2. Movimiento de tierras

Se refiere el presente artículo a los desmontes y terraplenes para dar al terreno la rasante de explanación, la excavación a cielo abierto realizada con medios manuales y/o mecánicos y a la excavación de zanjas y pozos. Se adoptan las condiciones generales de seguridad en el trabajo así como las condiciones relativas a los materiales, control de la ejecución, valoración y mantenimiento que especifican las normas:

- NTE-AD "Acondicionamiento del Terreno. Desmontes".
- NTE-ADE "Explanaciones".
- NTE-ADV "Vaciados".
- NTE-ADZ "Zanjas y pozos".

2.3. Red horizontal de saneamiento

Contempla el presente artículo las condiciones relativas a los diferentes aspectos relacionados con los sistemas de captación y conducción de aguas del subsuelo para protección de la obra contra la humedad. Se adoptan las condiciones generales de ejecución y seguridad en el trabajo, condiciones relativas a los

materiales y equipos de origen industrial, control de la ejecución, criterios relativos a la prueba de servicio, criterios de valoración y normas para el mantenimiento del terreno, establecidas en la NTE "Saneamientos, Drenajes y Arrendamientos", así como lo establecido en la Orden de 15 de septiembre de 1986, del M.O.P.U.

2.4. Cimentaciones

Las secciones y cotas de profundidad serán las que la Dirección de la obra señale, con independencia de lo señalado en el Proyecto, que tienen carácter meramente informativo. No se rellenarán los cimientos hasta que lo ordene la Dirección de Obra. La Dirección de la obra queda facultada para introducir las cimentaciones especiales o modificaciones que juzgue oportuno en función de las características particulares que presente el terreno. Se adoptan las condiciones relativas a materiales, control, valoración, mantenimiento y seguridad especificados en las normas:

- NTE-csz "Cimentaciones superficiales. Zapatas".
- NTE-csc "Cimentaciones superficiales corridas".
- NTE-csl "Cimentaciones superficiales. Losas".

2.5. Forjados

Regula el presente artículo los aspectos relacionados con la ejecución de forjados pretensados autoresistentes armados de acero o de cualquier otro tipo con bovedillas cerámicas de hormigón y fabricado en obra o prefabricado bajo cualquier patente. Las condiciones de ejecución, de seguridad en el trabajo, de control de ejecución, de valoración y de mantenimiento, son las establecidas en las normas NTE-EHU y NTE-EHR así como en el R.D. 1630/1980 de 18 de Julio y en la NTE-EAF.

2.6. Hormigones.

Se refiere el presente artículo a las condiciones relativas a los materiales y equipos de origen industrial relacionados con la ejecución de las obras de hormigón en masa o armado o pretensado fabricados en obra o prefabricados, así como las condiciones generales de ejecución, criterios de medición, valoración y mantenimiento. Regirá lo prescrito en la Instrucción EHE de hormigón estructural y la instrucción EP-93 para las obras de hormigón pretensado. Asimismo se adopta lo establecido en las normas NTE-EH "Estructuras de hormigón", y NTE-EME "Estructuras de madera. Encofrados". Las características mecánicas de los materiales y dosificaciones y niveles de control son las que se fijan en los planos del presente proyecto (Cuadro de características EHE y especificaciones de los materiales).

2.7. Acero laminado.

Se establecen en el presente artículo condiciones relativas a los materiales y equipos industriales relacionados con los aceros laminados utilizados en las estructuras de edificación, tanto en sus elementos estructurales, como en sus elementos de unión. Asimismo se fijan las condiciones relativas a la ejecución, seguridad en el trabajo, control de la ejecución, valoración y mantenimiento. Se adopta lo establecido en las normas:

- NBE-MV-102: "Ejecución de las estructuras de acero laminado en edificación". Se fijan los tipos de uniones, la ejecución en taller, el montaje en obra, las tolerancias y las protecciones.
- NBE-MV-103: "Acero laminado para estructuras de edificaciones", donde se fijan las características del acero laminado, la determinación de sus características y los productos laminados actualmente utilizados.
- NBE-MV-105: "Roblones de acero".
- NBE-MV-106: "Tornillos ordinarios calibrados para estructuras de acero".
- NTE-EA: "Estructuras de acero".
- NBE-EA/95. "Estructuras de acero en la edificación".

2.8.- Cubiertas y coberturas.

Se refiere el presente artículo a la cobertura de edificios con placas, tejas o plaquetas de fibrocemento, chapas finas o paneles formados por doble hoja de chapa con interposición de aislamiento de acero galvanizado, chapas de aleaciones ligeras, piezas de pizarra, placas de poliéster reforzado, cloruro de polivinilo rígido o polimetacrilato de metilo, tejas cerámicas o de cemento o chapas lisas de zinc, en el que el propio elemento proporciona la estanqueidad. Asimismo se regulan las azoteas y los lucernarios. Las condiciones funcionales y de calidad relativa a los materiales y equipos de origen industrial y control de la ejecución, condiciones generales de ejecución y seguridad en el trabajo, así como los criterios de valoración y mantenimiento son los especificados en las siguientes normas:

- NTE-QTF: "Cubiertas. Tejados de fibrocemento".

- NTE-QTG: "Cubiertas. Tejados galvanizados".
- NTE-QTL: "Cubiertas. Tejados de aleaciones ligeras".
- NTE-QTP: "Cubiertas. Tejados de pizarra".
- NTE-QTS: "Cubiertas. Tejados sintéticos".
- NTE-QTT: "Cubiertas. Tejados de tejas".
- NTE-QTZ: "Cubiertas. Tejados de zinc".
- NTE-QAA: "Azoteas ajardinadas".
- NTE-QAN: "Cubiertas. Azoteas no transitables".
- NTE-QAT: "Azoteas transitables".
- NTE-OLC: "Cubiertas. Lucernarios. Claraboyas".
- NTE-QLH: "Cubiertas. Lucernarios de hormigón translúcido".
- NBE-MV-301/1970 sobre impermeabilización de cubiertas con bituminosos. (Modificada por RD 2085/86 de 12 de Septiembre).

2.9. Albañilería

Se refiere el presente artículo a la fábrica de bloques de hormigón, ladrillo o prefabricados y revestimientos de parámetros, suelos, escaleras u techos. Las condiciones funcionales y de calidad relativa a los materiales y equipos de origen industrial, control de ejecución y seguridad en el trabajo, así como los criterios de valoración y mantenimiento son las que especifican las normas:

- NTE-FFB: "Fachadas de bloque".
- NTE-FFL: "Fachadas de ladrillo".
- NTE-EFB: "Estructuras de fábrica de bloque".
- NTE-EFL: "Estructuras de fábrica de ladrillo".
- NTE-EFP: "Estructuras de fábrica de piedra".
- NTE-RPA: "Revestimiento de paramentos. Alicatados".
- NTE-RPE: "Revestimiento de paramento. Enfoscado".
- NTE-RPG: "Revestimiento de paramentos. Guarnecidos y enlucidos".
- NTE-RPP: "Revestimiento de paramentos. Pinturas".
- NTE-RPR: "Revestimiento de paramentos. Revocos".
- NTE-RSC: "Revestimiento de suelos continuos".
- NTE-RSF: "Revestimiento de suelos flexibles".
- NTE-RCS: "Revestimiento de suelos y escaleras continuos".
- NTE-RSS: "Revestimiento de escaleras y suelos. Soleras".
- NTE-RSB: "Revestimiento de suelo y escaleras. Terrazos".
- NTE-RSP: "Revestimiento de suelos y escaleras. Placas".
- NTE-RTC: "Revestimiento de techos. Continuos".
- NTE-PTL: "Tabiques de ladrillo".
- NTE-PTP: "Tabiques prefabricados".

2.10. Carpintería y cerrajería

Se refiere el presente artículo a las condiciones de funcionalidad y calidad que han de reunir los materiales y equipos industriales relacionados con la ejecución y montaje de puertas, ventanas y demás elementos utilizados en particiones y accesos interiores. Asimismo, regula el presente artículo las condiciones de ejecución, medición, valoración y criterios de mantenimiento. Se adoptará lo establecido en las normas:

- NTE-PPA "Puertas de acero".
- NTE-PPM "Puertas de Madera".
- NTE-PPV "Puertas de vidrio".
- NTE-PMA "Mamparas de madera".
- NTE-PML "Mamparas de aleaciones ligeras".

2.11. Aislamientos

Los materiales a emplear y ejecución de la instalación de aislamiento estará de acuerdo con lo prescrito en la norma NBE-CT/79 sobre condiciones térmicas de los edificios que en su anexo 5 establece las condiciones de los materiales empleador para aislamiento térmico así como control, recepción y ensayos de dichos materiales, y en el anexo nº6 establece diferentes recomendaciones para la ejecución de este tipo de instalaciones. La medición y valoración de la instalación de aislamiento se llevará a cabo en la forma prevista en el presente proyecto.

2.12. Red vertical de saneamiento

Se refiere el presente artículo a la red de evacuación de aguas pluviales y residuos desde los puntos donde se recogen, hasta la acometida de la red de alcantarillado, fosa aséptica, pozo de filtración o equipo de depuración, así como a estos medios de evacuación. Las condiciones de ejecución, condiciones funcionales de los materiales y equipos industriales, control de la ejecución, seguridad en el trabajo, medición, valoración y mantenimiento son las establecidas en las normas:

- NTE-ISS: "Instalaciones de salubridad y saneamiento".
- NTE-ISD: "Depuración y vertido".
- NTE-ISA: "Alcantarillado".

2.13. Instalación eléctrica

Los materiales y ejecución de la instalación eléctrica cumplirán lo establecido en el Reglamento Electrotécnico de Alta y Baja Tensión y Normas MIBT complementarias. Asimismo se adoptan las diferentes condiciones previstas en las normas:

- NTE-IEB: "Instalación eléctrica de baja tensión".
- NTE-IEE: "Alumbrado exterior".
- NTE-IEI: "Alumbrado interior".
- NTE-IEP: "Puesta a tierra".

- NTE-IER: "Instalaciones de electricidad. Red exterior".

2.14. Instalación de fontanería

Regula el presente artículo las condiciones relativas a la ejecución, materiales y equipos industriales, control de la ejecución, seguridad en el trabajo, medición, valoración y mantenimiento de las instalaciones de abastecimiento y distribución de agua. Se adopta lo establecido en las normas:

- NTE-IFA: "Instalaciones de fontanería".
- NTE-IFC: "Instalaciones de fontanería. Agua caliente".
- NTE-IFF: "Instalaciones de fontanería. Agua fría".

2.15. Instalaciones de climatización

Se refiere el artículo a las instalaciones de ventilación, refrigeración y calefacción. Se adoptan las condiciones relativas a funcionalidad y calidad de materiales, ejecución, control, seguridad en el trabajo, pruebas de servicio, medición, valoración y mantenimiento, establecidas en las normas:

- Reglamento de Seguridad para plantas e instalaciones frigoríficas e instrucciones MIIF complementarias.
- Reglamentos vigentes sobre recipientes a presión y aparatos a presión.
- NTE-ICI: "Instalaciones de climatización industrial".
- NTE-ICT: "Instalaciones de climatización-torres de refrigeración".
- NTE-ID: "Instalaciones de depósitos".
- Reglamento de instalaciones de calefacción, climatización y agua caliente sanitaria (R.D. 1618/1980 de 4 de Julio).
- NTE-ISV: "Ventilación".

2.16. Instalaciones de protección

Se refiere el presente artículo a las condiciones de ejecución, de los materiales de control de la ejecución, seguridad en el trabajo, medición, valoración y mantenimiento, relativas a las instalaciones de protección contra fuegos y rayos. Se cumplirá lo prescrito en la norma NBE-CPI-91 y NBE-CPI-96 sobre condiciones de protección contra incendios y se adoptará lo establecido en la norma NTE-IPF "Protección contra el fuego", y EHE. Así como se adoptará lo establecido en la norma NTE-IPP "Pararrayos".

2.17. Obras o instalaciones no especificadas

Si en el transcurso de los trabajos fuera necesario ejecutar alguna clase de obra no regulada en el presente Pliego de Condiciones, el Contratista queda obligado a ejecutarla con arreglo a las instrucciones que reciba de la Dirección de la Obra

quien, a su vez, cumplirá la normativa vigente sobre el particular. El Contratista no tendrá derecho a reclamación alguna.

3. CONDICIONES DE ÍNDOLE FACULTATIVA

3.1. Obligaciones y derechos del contratista

3.1.1. Remisión de solicitud de ofertas

Por la Dirección Técnica se solicitarán ofertas a las Empresas especializadas del sector, para la realización de las instalaciones especificadas en el presente Proyecto para lo cual se pondrá a disposición de los ofertantes un ejemplar del citado Proyecto o un extracto con los datos suficientes. En el caso de que el ofertante lo estime de interés deberá presentar además de la mencionada, la o las soluciones que recomiende para resolver la instalación. El plazo máximo fijado para la recepción de las ofertas será de un mes.

3.1.2. Subcontratas

Ninguna parte de la obra podrá ser subcontratada sin consentimiento previo, solicitado por escrito, del Director de la obra. Dicha solicitud incluirá los datos precisos para garantizar que el subcontratista posee la capacidad suficiente para hacerse cargo de los trabajos en cuestión.

La aceptación del subcontrato no libelará al Contratista de su responsabilidad contractual. El Director de la obra está facultado para decidir la exclusión de aquellos subcontratistas que no demuestren durante los trabajos poseer las condiciones requeridas para la ejecución de los mismos. El contratista deberá adoptar las medidas precisas e inmediatas para la rescisión de dichos contratos.

3.1.3. Residencia del contratista

Desde que se dé principio a las obras, hasta su recepción definitiva, el Contratista o un representante suyo autorizado deberá residir en un punto próximo al de ejecución de los trabajos y no podrá ausentarse de él sin previo conocimiento de la Dirección de Obra y notificándole expresamente, la persona que, durante su ausencia le ha de representar en todas sus funciones. Cuando se falte a lo anteriormente prescrito, se considerarán válidas las notificaciones que se efectúen al individuo más caracterizado o de mayor categoría técnica de los empleados u operarios de cualquier ramo que, como dependientes de la contrata, intervengan en las obras y, en ausencia de ellos, las depositadas en la residencia, designada como oficial, de la Contrata en los documentos del proyecto, aún en ausencia o negativa de recibo por parte de los dependientes de la Contrata.

3.1.4. Reclamaciones contra las órdenes de dirección

Las reclamaciones que el Contratista quiera hacer contra las órdenes emanadas de la Dirección de Obra, solo podrá presentarlas a través del mismo ante la propiedad, si ellas son de orden económico y de acuerdo con las condiciones estipuladas en los Pliegos de Condiciones correspondientes. Contra disposiciones de orden técnico o facultativo de la Dirección de Obra, no se admitirá reclamación alguna, pudiendo el Contratista salvar su responsabilidad, si lo estima oportuno, mediante exposición razonada, dirigida al Director, el cual podrá limitar su contestación al acuse de recibo que, en todo caso, será obligatorio para este tipo de reclamaciones.

3.1.5. Despido por insubordinación e incapacidad

Por falta del cumplimiento de las instrucciones de la Dirección de Obra o sus subalternos de cualquier clase, encargados de la vigilancia de las obras; por manifiesta incapacidad o por actos que comprometan y perturben la marcha de los trabajos, el Contratista tendrá obligación de sustituir a sus dependientes y operarios, cuando la Dirección de Obra lo reclame.

3.1.6. Copia de los documentos

El contratista tiene derecho a sacar copias a su costa, de los Pliegos de Condiciones, presupuestos y demás documentos de la contrata. La Dirección de la Obra, si el Contratista solicita estos, autorizará las copias después de contratadas las obras.

3.2. Trabajo, materiales y métodos auxiliares

3.2.1. Libro de órdenes

En la casilla y oficina de la obra, tendrá el Contratista el Libro de Ordenes, en el que se anotarán las que la Dirección de Obra precise dar en el transcurso de la obra. El cumplimiento de las órdenes expresadas en dicho Libro es tan obligatorio para el Contratista como las que figuran en el Pliego de Condiciones.

3.2.2. Comienzo de los trabajos y plazo de ejecución

Obligatoriamente y por escrito, deberá el Contratista dar cuenta al Director del comienzo de los trabajos, antes de transcurrir veinticuatro horas de su iniciación: previamente se habrá suscrito el acta de replanteo en las condiciones establecidas en el artículo 7. El adjudicatario comenzará las obras dentro del plazo de 15 días desde la fecha de adjudicación. Dará cuenta al Director, mediante oficio, del día en que se propone iniciar los trabajos, debiendo este dar acuse de recibo. Las obras quedarán terminadas dentro del plazo establecido. El Contratista está obligado al cumplimiento de todo cuanto se dispone en la Reglamentación Oficial del Trabajo.

3.2.3. Condiciones generales de ejecución de los trabajos.

El Contratista, como es natural, debe emplear los materiales y mano de obra que cumplan las condiciones exigidas en las "Condiciones Generales de índole Técnica" del "Pliego General de Condiciones Varias de la Edificación" y realizará todos y cada uno de los trabajos contratados de acuerdo con lo especificado también en dicho documento. Por ello, y hasta que tenga lugar la recepción definitiva de la obra, el Contratista es el único responsable de la ejecución de los trabajos que ha contratado y de las faltas y defectos que en estos puedan existir, por su mala ejecución o por la deficiente calidad de los materiales empleados o aparatos colocados, sin que pueda servirle de excusa ni le otorgue derecho alguno, la circunstancia de que la Dirección de Obra o sus subalternos no le hayan llamado la atención sobre el particular, ni tampoco el hecho de que hayan sido valorados en las certificaciones parciales de la obra que siempre se supone que se extienden y abonan a buena cuenta.

3.2.4. Trabajos defectuosos

Como consecuencia de lo anteriormente expresado, cuando la Dirección de Obra o su representante en la obra adviertan vicios o defectos en los trabajos ejecutados, o que los materiales empleados, o los aparatos colocados no reúnen las condiciones preceptuadas, ya sea en el curso de la ejecución de los trabajos, o finalizados estos y antes de verificarse la recepción definitiva de la obra, podrán disponer que las partes defectuosas sean demolidas y reconstruidas de acuerdo con lo contratado, y todo ello a expensas de la contrata. Si esta no estimase justa la resolución y se negase a la demolición y reconstrucción ordenadas, se procederá de acuerdo con lo establecido en el artículo 35.

3.2.5. Obras y vicios ocultos

Si la Dirección de Obra tuviese fundadas razones para creer en la existencia de vicios ocultos de construcción en las obras ejecutadas, ordenará efectuar en cualquier tiempo y antes de la recepción definitiva, las demoliciones que crea necesarias para reconocer los trabajos que suponga defectuosos. Los gastos de la demolición y de la reconstrucción que se ocasionen, será de cuenta del Contratista, siempre que los vicios existan realmente; en caso contrario correrán a cargo del propietario.

3.2.6. Materiales no utilizables o defectuosos

No se procederá al empleo y colocación de los materiales y de los aparatos sin que antes sean examinados y aceptados por la Dirección de Obra, en los términos que prescriben los Pliegos de Condiciones, depositando al efecto del Contratista, las muestras y modelos necesarios, previamente contraseñados, para efectuar con ellos

comprobaciones, ensayos o pruebas preceptuadas en el Pliego de Condiciones, vigente en la obra.

Los gastos que ocasionen los ensayos, análisis, pruebas, etc. antes indicados serán a cargo del Contratista. Cuando los materiales o aparatos no fueran de la calidad requerida o no estuviesen perfectamente preparados, la Dirección de Obra dará orden al Contratista para que los reemplace por otros que se ajusten a las condiciones requeridas en los Pliegos o, a falta de estos, a las órdenes de la Dirección de Obra.

3.2.7. Medios auxiliares

Es obligación de la Contrata el ejecutar cuanto sea necesario para la buena construcción y aspecto de las obras aún cuando no se halle expresamente estipulado en los Pliegos de Condiciones, siempre que, sin separarse de su espíritu y recta interpretación, lo disponga la Dirección de Obra y dentro de los límites de posibilidad que los presupuestos determinen para cada unidad de obra y tipo de ejecución.

Será de cuenta y riesgo del Contratista, los andamios, cimbras, máquinas y demás medios auxiliares que para la debida marcha y ejecución de los trabajos se necesiten, no cabiendo por tanto, al Propietario responsabilidad alguna por cualquier avería o accidente personal que pueda ocurrir en las obras por insuficiencia de dichos medios auxiliares. Serán asimismo de cuenta del Contratista, los medios auxiliares de protección y señalización de la obra, tales como vallado, elementos de protección provisionales, señales de tráfico adecuadas, señales luminosas nocturnas, etc. y todas las necesarias para evitar accidentes previsibles en función del estado de la obra y de acuerdo con la legislación vigente.

3.3.Recepción y liquidación

3.3.1.Recepciones provisionales

Para proceder a la recepción provisional de las obras será necesaria la asistencia del Propietario, de la Dirección de la Obra y del Contratista o su representante debidamente autorizado. Si las obras se encuentran en buen estado y han sido ejecutadas con arreglo a las condiciones establecidas, se darán por percibidas provisionalmente, comenzando a correr en dicha fecha el plazo de garantía, que se considerará de tres meses. Cuando las obras no se hallen en estado de ser recibidas se hará constar en el acta y se especificarán en la misma las precisas y detalladas instrucciones que la Dirección de Obra debe señalar al Contratista para remediar los defectos observados, fijándose un plazo para subsanarlos, expirado el cual, se efectuará un nuevo reconocimiento en idénticas condiciones, a fin de proceder a la recepción provisional de la obra.

Después de realizar un escrupuloso reconocimiento y si la obra estuviese conforme con las condiciones de este Pliego, se levantará un acta por duplicado, a la

que acompañarán los documentos justificantes de la liquidación final. Una de las actas quedará en poder de la propiedad y la otra se entregará al Contratista.

3.3.2. Plazo de garantía

Desde la fecha en que la recepción provisional quede hecha, comienza a contarse el plazo de garantía que será de un año. Durante este período, el Contratista se hará cargo de todas aquellas reparaciones de desperfectos imputables a defectos y vicios ocultos.

3.3.3. Conservación de los trabajos recibidos provisionalmente

Si el Contratista, siendo su obligación, no atiende a la conservación de la obra durante el plazo de garantía, en el caso de que el edificio no haya sido ocupado por el Propietario, procederá a disponer todo lo que se precise para que se atienda a la guardería, limpieza y todo lo que fuere menester para su buena conservación, abonándose todo aquello por cuenta de la contrata. Al abandonar el Contratista el edificio, tanto por buena terminación de las obras, como en el caso de rescisión de contrato, está obligado a dejarlo desocupado y limpio en el plazo que la Dirección de Obra fije.

Después de la recepción provisional del edificio y en el caso de que la conservación del mismo corra a cargo del Contratista, no deberá haber en él más herramientas, útiles, materiales, muebles, etc., que los indispensables para su guardería y limpieza y par los trabajos que fuere preciso realizar. En todo caso, ocupado o no el edificio, está obligado el Contratista a revisar la obra durante el plazo expresado, procediendo en la forma prevista en el presente "Pliego de Condiciones Económicas". El Contratista se obliga a destinar a su costa a un vigilante de las obras que prestará su servicio de acuerdo con las órdenes recibidas de la Dirección Facultativa.

3.3.4. Recepción definitiva

Terminado el plazo de garantía, se verificará la recepción definitiva con las mismas condiciones que la provisional, y si las obras están bien conservadas y en perfectas condiciones, el Contratista quedará relevado de toda responsabilidad económica; en caso contrario se retrasará la recepción definitiva hasta que, a juicio de la Dirección de la Obra, y dentro del plazo que se marque, queden las obras del modo y forma que se determinan en este Pliego. Si el nuevo reconocimiento resultase que el Contratista no hubiese cumplido, se declarará rescindida la contrata con pérdida de la fianza, a no ser que la propiedad crea conveniente conceder un nuevo plazo.

3.3.5. Liquidación final

Terminadas las obras, se procederá a la liquidación, que incluirá el importe de las unidades de obra realizadas y las que constituyen modificaciones del Proyecto, siempre y cuando hayan sido previamente aprobadas por la Dirección Técnica con sus precios. De ninguna manera tendrá derecho el Contratista a formular reclamaciones por aumentos de obra que no estuviesen autorizados por escrito a la propiedad con el visto bueno de la Dirección de Obra.

3.3.6. Liquidación en caso de rescisión

En este caso, la liquidación se hará mediante un contrato liquidatorio, que se redactará de acuerdo por ambas partes. Incluirá el importe de las unidades de obra realizadas hasta la fecha de la rescisión.

3.4. Facultades de la dirección de obras

Además de todas las facultades particulares, que corresponden al Director, expresadas en los artículos precedentes, es misión específica suya la Dirección de Obra y vigilancia de los trabajos que en las obras se realicen bien por sí o por medio de sus representantes técnicos y ello con autoridad técnica legal, completa e indiscutible, incluso en todo lo no previsto específicamente en el "Pliego General de Condiciones Varias de la Edificación", sobre las personas y cosas situadas en la obra y en relación con los trabajos que para la ejecución de los edificios y obras anejas se lleven a cabo, pudiendo incluso, pero con causa justificada, recusar al Contratista, si considera que el adoptar esta resolución es útil y necesaria para la debida marcha de la obra.

4. PLIEGO DE CONDICIONES ECONÓMICAS

4.1. Base fundamental

Como base fundamental de estas "Condiciones Generales de Índole Económica", se establece el principio de que el Contratista debe percibir el importe de todos los trabajos ejecutados, siempre que estos se hayan realizado con arreglo y sujeción y Condiciones Generales particulares que rigen la construcción del edificio y obra aneja contratada.

4.2. Garantía de cumplimiento y finanzas

4.2.1. Garantías

La Dirección de Obra podrá exigir al Contratista la presentación de referencias bancarias o de otras entidades o personas, al objeto de cerciorarse de si éste reúne todas las condiciones requeridas para el exacto cumplimiento del Contrato; dichas

referencias, si le son pedidas, las presentará el Contratista antes de la firma del Contrato.

4.2.2. Finanzas

Se podrá exigir al Contratista, para que responda del cumplimiento de lo contratado, una fianza del 10 % del presupuesto de las obras adjudicadas.

4.2.3. Ejecución de los trabajos con cargo a las finanzas.

Si el Contratista se negase a hacer por su cuenta los trabajos precisos para utilizar la obra en las condiciones tratadas, la Dirección de Obra, en nombre y representación del Propietario, los ordenará ejecutar a un tercero, o directamente por administración, abonando su importe con la fianza depositada, sin perjuicio de las acciones legales a que tenga derecho el propietario en el caso de que el importe de la fianza no baste para abonar el importe de los gastos efectuados en las unidades de obra que no fueran de recibo.

4.2.4. Devolución de la fiancia

La fianza depositada será devuelta al Contratista en un plazo que no excederá de 8 días, una vez firmado el acta de recepción definitiva de la obra, siempre que el Contratista haya acreditado, por medio de certificado del Alcalde del Distrito Municipal en cuyo término se halla emplazada la obra contratada, que no existe reclamación alguna contra él por los daños y perjuicios que sean de su cuenta o por deudas de los jornales o materiales, ni por indemnizaciones derivadas de accidentes ocurridos en el trabajo.

4.3. Precios y revisiones

4.3.1. Precios contradictorios

Si ocurriese algún caso por virtud del cual fuese necesario fijar un nuevo precio, se procederá a estudiarlo y convenirlo contradictoriamente de la siguiente forma. El Adjudicatario formulará por escrito bajo su firma, el precio que, a su juicio, debe aplicarse a la nueva unidad. La Dirección técnica estudiará el que, según su criterio, deba utilizarse. Si ambos son coincidentes se formulará por la Dirección Técnica el Acta de Avenencia, igual que si cualquier pequeña diferencia o error fuese salvado por simple exposición y convicción de una de las partes, quedando así formalizado el precio contradictorio. Si no fuera posible conciliar por simple discusión los resultados, el Sr. Director propondrá a la propiedad que adopte la resolución que estime conveniente, que podrá ser aprobatoria del precio exigido por el Adjudicatario o, en otro caso, la segregación de la obra o instalación nueva para ser ejecutada por administración o por otro adjudicatario distinto.

La fijación del precio contradictorio habrá de proceder necesariamente al comienzo de la nueva unidad, puesto que, si por cualquier motivo ya se hubiese comenzado el Adjudicatario estará obligado a aceptar el que buenamente quiera fijarle el Sr. Director y a concluir la satisfacción de éste.

4.3.2. Reclamaciones de aumento de precios

Si el Contratista antes de la firma del Contrato, no hubiese hecho la reclamación u observación oportuna, no podrá bajo ningún pretexto de error y omisión reclamar aumento de los precios fijados en el cuadro correspondiente del presupuesto que sirve de base para la ejecución de las obras. Tampoco se le admitirá reclamación de ninguna especie fundada en indicaciones que, sobre las obras, se hagan en la Memoria, por no servir este documento de base a la Contrata. Las equivocaciones materiales o errores aritméticos en las unidades de obra o en su importe, se corregirán en cualquier época que se observen, pero no se tendrán en cuenta a los efectos de la rescisión de contrato, señalados en los documentos relativos a las "Condiciones Generales o Particulares de Índole Facultativa", sino en el caso de que la Dirección de Obra o el Contratista los hubieran hecho notar dentro del plazo de 4 meses contados desde la fecha de adjudicación. Las equivocaciones materiales no alterarán la baja proporcional hecha en la Contrata, respecto del importe del presupuesto que ha de servir de base a la misma, pues esta baja se fijará siempre por la relación entre las cifras de dicho presupuesto, antes de las correcciones y la cantidad ofrecida.

4.3.3. Revisión de precios

Contratándose las obras a riesgo y ventura, es natural por ello, que no se debe admitir la revisión de los precios contratados. No obstante y dada la variabilidad continua de los precios de los jornales y sus cargas sociales, así como la de los materiales y transportes, que es característica de determinadas épocas anormales, se admite durante ellas, la revisión de los precios contratados, bien en alza o en baja y en anomalía con las oscilaciones de los precios en el mercado.

Por ello y en los casos de revisión en alza, el Contratista puede solicitarla del Propietario, en cuanto se produzca cualquier alteración de precio, que repercuta, aumentando los contratos. Ambas partes convendrán el nuevo precio unitario antes de comenzar o de continuar la ejecución de la unidad de obra en que intervenga el elemento cuyo precio en el mercado, y por causa justificada, especificándose y acordándose también previamente, la fecha a partir de la cual se aplicará el precio revisado y elevado, para lo cual se tendrá en cuenta y cuando así proceda, el acopio de materiales de obra en el caso de que estuviesen total o parcialmente abonados por el propietario.

Si el propietario o la Dirección de Obra, en su representación, no estuviese conforme con los nuevos precios de los materiales, transportes, etc., que el Contratista desea percibir como normales en el mercado, aquel tiene la facultad de proponer al Contratista, y éste la obligación de aceptarlos, los materiales,

transportes, etc., a precios inferiores a los pedidos por el Contratista, en cuyo caso lógico y natural, se tendrán en cuenta para la revisión, los precios de los materiales, transportes, etc. adquiridos por el Contratista merced a la información del propietario.

Cuando el propietario o la Dirección de Obra, en su representación, no estuviere conforme con los nuevos precios de los materiales, transportes, etc. concertará entre las dos partes la baja a realizar en los precios unitarios vigentes en la obra, en equidad por la experimentada por cualquiera de los elementos constitutivos de la unidad de obra y la fecha en que empezarán a regir los precios revisados. Cuando entre los documentos aprobados por ambas partes, figurase el relativo a los precios unitarios contratados descompuestos, se seguirá un procedimiento similar al preceptuado en los casos de revisión por alza de precios.

4.3.4. Elementos comprendidos en el presupuesto

Al fijar los precios de las diferentes unidades de obra en el presupuesto, se ha tenido en cuenta el importe de andamio, vallas, elevación y transporte del material, es decir, todos los correspondientes a medios auxiliares de la construcción, así como toda suerte de indemnizaciones, impuestos, multas o pagos que tengan que hacerse por cualquier concepto, con los que se hallen gravados o se graben los materiales o las obras por el Estado, Provincia o Municipio. Por esta razón no se abonará al Contratista cantidad alguna por dichos conceptos. En el precio de cada unidad también van comprendidos unos materiales accesorios y operaciones necesarias para dejar la obra completamente terminada y en disposición de recibirse.

4.4. Valoración y abonado de los trabajos

4.4.1. Valoración de la obra

La medición de la obra concluida se hará por el tipo de unidad fijada en el correspondiente presupuesto. La valoración deberá obtenerse aplicando a las diversas unidades de obra, el precio que tuviese asignado en el Presupuesto, añadiendo a este importe el de los tantos por ciento que correspondan al beneficio industrial y descontando el tanto por ciento que corresponda a la baja en la subasta hecha por el Contratista.

4.4.2.-Mediciones parciales finales

Las mediciones parciales se verificarán en presencia del Contratista, de cuyo acto se levantará acta por duplicado, que será firmada por ambas partes. La medición final se hará después de terminadas las obras con precisa asistencia del Contratista. En el acta que se extienda, de haberse verificado la medición de los documentos que se le acompañan, deberá aparecer la conformidad del Contratista o

de su representación legal. En caso de no haber conformidad, lo expondrá sumariamente y a reserva de ampliar las razones que a ello obliga.

4.4.3. Equivocaciones en el presupuesto.

Se supone que el Contratista ha hecho detenido estudio de los documentos que componen el Proyecto, y por tanto al no haber hecho ninguna observación sobre posibles errores o equivocaciones en el mismo, se entiende que no hay lugar a disposición alguna en cuanto afecta a medidas o precios de tal suerte, que la obra ejecutada con arreglo al Proyecto contiene mayor número de unidades de las previstas, no tiene derecho a reclamación alguna. Si por el contrario, el número de unidades fuera inferior, se descontará del presupuesto.

4.4.4. Valoración de obras incompletas.

Cuando por consecuencia de rescisión u otras causas fuera preciso valorar las obras incompletas, se aplicarán los precios del presupuesto, sin que pueda pretenderse hacer la valoración de la unidad de obra fraccionándola en forma distinta a la establecida en los cuadros de descomposición de precios.

4.4.5. Carácter provisional de las liquidaciones parciales

Las liquidaciones parciales tienen carácter de documentos provisionales a buena cuenta, sujetos certificaciones y variaciones que resulten de la liquidación final. No suponiendo tampoco dichas certificaciones aprobación y recepción de las obras que comprenden. La propiedad se reserva en todo momento y especialmente al hacer efectivas las liquidaciones parciales, el derecho de comprobar que el Contratista ha cumplido los compromisos referentes al pago de jornales y materiales invertidos en la Obra, a cuyo efecto deberá presentar el Contratista los comprobantes que se exijan.

4.4.6. Pagos

Los pagos se efectuarán por el Propietario en los plazos previamente establecidos y su importe corresponderá, precisamente, al de las Certificaciones de obra expedidas por la Dirección de Obra, en virtud de las cuales se verifican aquellos.

4.4.7. Suspensión por retrasos de los pagos

En ningún caso podrá el Contratista, alegando retraso en los pagos, suspender trabajos ni ejecutarlos a menor ritmo del que les corresponda, con arreglo al plazo en que deben terminarse.

4.4.8. Indemnización por retraso de los trabajos

El importe de la indemnización que debe abonar el Contratista por causas de retraso no justificado, en el plazo de terminación de las obras contratadas, será: el importe de la suma de perjuicios materiales causados por imposibilidad de ocupación del inmueble, debidamente justificados.

4.4.9. Indemnización por daños de causa mayor al contratista

El Contratista no tendrá derecho a indemnización por causas de pérdidas, averías o perjuicio ocasionados en las obras, sino en los casos de fuerza mayor. Para los efectos de este artículo, se considerarán como tales casos únicamente los que siguen:

- Los incendios causados por electricidad atmosférica.
- Los daños producidos por terremotos y maremotos.
- Los producidos por vientos huracanados, mareas y crecidas de ríos superiores a las que sean de prever en el país, y siempre que exista constancia inequívoca de que el Contratista tomó las medidas posibles, dentro de sus medios, para evitar o atenuar los daños.
- Los que provengan de movimientos del terreno en que estén construidas las obras.
- Los destrozos ocasionados violentamente, a mano armada, en tiempo de guerra, movimientos sediciosos populares o robos tumultuosos.
- La indemnización se referirá, exclusivamente al abono de las unidades de obra ya ejecutadas o materiales acopiados a pie de obra; en ningún caso comprenderá medios auxiliares, maquinaria o instalaciones, etc., propiedad de la Contrata.

4.5. Varios

4.5.1. Mejora de las obras

No se admitirán mejoras de obra, más que en el caso en que la Dirección de Obra haya ordenado por escrito la ejecución de los trabajos nuevos o que mejoren la calidad de los contratados, así como la de los materiales y aparatos previstos en el Contrato. Tampoco se admitirán aumentos de obra en las unidades contratadas, salvo caso de error en las mediciones del Proyecto, a menos que la Dirección de Obra ordene, también por escrito, la ampliación de las contratadas.

4.5.2. Seguro de los trabajos

El Contratista está obligado a asegurar la obra contratada durante todo el tiempo que dure su ejecución hasta la recepción definitiva; la cuantía del seguro coincidirá en todo momento, con el valor que tengan, por Contrata los objetos asegurados. El importe abonado por la Sociedad Aseguradora en caso de siniestro, se ingresará a

cuenta a nombre del propietario para que con cargo a ella, se abone la obra que se construya y a medida que ésta se vaya realizando. El reintegro de dicha cantidad al Contratista se efectuará por certificaciones, como el resto de los trabajos de la construcción. En ningún caso, salvo conformidad expresa del Contratista, hecha en documento público, el Propietario podrá disponer de dicho importe para menesteres ajenos a los de la construcción de la parte siniestrada; la infracción de lo anteriormente expuesto será motivo suficiente para que el Contratista pueda rescindir la contrata, con devolución de la fianza, abono completo de gastos materiales acopiados, etc., y una indemnización equivalente al importe de los daños causados al Contratista por el siniestro y que no le hubiesen abonado, pero solo en proporción equivalente a lo que suponga la indemnización abonada por la Compañía Aseguradora, respecto al importe de los daños causados por el siniestro, que serán tasados a estos efectos por la Dirección de Obra.

En las obras de reforma o reparación se fijará, previamente, la proporción de edificio que se debe asegurar y su cuantía, y si nada se previese, se entenderá que el seguro ha de comprender toda la parte de edificio afectada por la obra. Los riesgos asegurados y las condiciones que figuran en la póliza de seguros, los pondrá el Contratista antes de contratarlos en conocimiento del Propietario, al objeto de recabar de éste su previa conformidad o reparos.

5. PLIEGO DE CONDICIONES DE ÍNDOLE LEGAL

5.1. Jurisdicción

Para cuantas cuestiones, litigios o diferencias pudieran surgir durante o después de los trabajos, las partes se someterán a juicio de amigables componedores nombrados en número igual por ellas y presidido por la Dirección de la Obra, en último término, a los Tribunales de Justicia del lugar en que radique la propiedad, con expresa renuncia del fuero domiciliario. El Contratista es responsable de la ejecución de las obras en las condiciones establecidas en el Contrato y en los documentos que compone el Proyecto. El Contratista se obliga a lo establecido en la ley de Contratos de Trabajo y además a lo dispuesto por la de Accidentes de Trabajo, Subsidio Familiar y Seguros Sociales. Serán de cargo y cuenta del Contratista el vallado y la policía del solar, cuidando de la conservación de sus líneas del lindero y vigilando que, por los poseedores de las fincas contiguas, si las hubiese, no se realicen durante las obras actos que mermen o modifiquen la propiedad. Toda observación referente a este punto será puesta inmediatamente en conocimiento de la Dirección de la Obra. El Contratista es responsable de toda falta relativa a la política Urbana y a las Ordenanzas Municipales a estos aspectos vigentes en la localidad en que la edificación está emplazada.

5.2. Accidente de trabajo y daños a terceros

En casos de accidentes ocurridos con motivo y en el ejercicio de los trabajos para la ejecución de las obras, el Contratista se atendrá a lo dispuesto a estos respectos en la legislación vigente, y siendo, en todo caso, único responsable de su

cumplimiento y sin que por ningún concepto, pueda quedar afectada la Propiedad por responsabilidades en cualquier aspecto.

El Contratista está obligado a adoptar todas las medidas de seguridad que las disposiciones vigentes preceptúan para evitar, en lo posible, accidentes a los obreros o viandantes, no sólo en los andamios, sino en todos los lugares peligrosos de la obra. De los accidentes o perjuicios de todo género que, no cumplir el Contratista lo legislado sobre la materia, pudieran acaecer o sobrevenir, será éste el único responsable, o sus representantes en la obra, ya que se considera que en los precios contratados están incluidos todos los gastos precisos para cumplimentar debidamente dichas disposiciones legales. El Contratista será responsable de todos los accidentes que, por inexperiencia o descuido, sobrevinieran tanto en la edificación donde se efectúen las obras como en las contiguas. Será por tanto de su cuenta el abono de las indemnizaciones a quien corresponda y cuando a ello hubiera lugar, de todos los daños y perjuicios que puedan causarse en las operaciones de ejecución de las obras.

El Contratista cumplirá los requisitos que prescriben las disposiciones vigentes sobre la materia, debiendo exhibir, cuando ello fuera requerido, el justificante de tal cumplimiento.

5.3. Pago de arbitrarios

El pago de impuestos y arbitrios en general, municipales o de otro origen, sobre vallas, alumbrado, etc., cuyo abono debe hacerse durante el tiempo de ejecución de las obras por concepto inherente a los propios trabajos que se realizan correrá a cargo de la Contrata, siempre que en las condiciones particulares del Proyecto no se estipule lo contrario. No obstante, el Contratista deberá ser reintegrado del importe de todos aquellos conceptos que la Dirección de Obra considere justo hacerlo.

5.4. Causas de rescisión del contrato

Se considerarán causas suficientes de rescisión las que a continuación se señalan:

- La muerte o incapacidad del Contratista.
- La quiebra del Contratista.
- En los casos anteriores, si los herederos o síndicos ofrecieran de llevar a cabo las obras, bajo las mismas condiciones estipuladas en el Contrato, el Propietario puede admitir o rechazar el ofrecimiento, sin que en este último caso tengan aquellos derecho a indemnización alguna.
- Las alteraciones del Contrato por las causas siguientes:
- La modificación del Proyecto en forma tal que presente alteraciones fundamentales del mismo, a juicio de la Dirección de Obra y, en cualquier caso siempre que la variación del presupuesto de ejecución, como consecuencia de estas modificaciones, represente, en más o menos del 40 %, como mínimo, de algunas unidades del Proyecto modificadas.

- La modificación de unidades de obra, siempre que estas modificaciones representen variaciones en más o menos, del 40 %, como mínimo de las unidades del Proyecto modificadas.
- La suspensión de la obra comenzada y, en todo caso, siempre que, por causas ajenas a la Contrata, no se dé comienzo a la obra adjudicada dentro del plazo de tres meses, a partir de la adjudicación, en este caso, la devolución de la fianza será automática.
- La suspensión de la obra comenzada, siempre que el plazo de suspensión haya excedido un año.
- El no dar comienzo la Contrata a los trabajos dentro del plazo señalado en las condiciones particulares del Proyecto.
- El incumplimiento de las condiciones del Contrato, cuando implique descuido o mala fe, con perjuicio de los intereses de la obra.
- La terminación del plazo de ejecución de la obra, sin haberse llegado a ésta.
- El abandono de la obra sin causa justificada.
- La mala fe en la ejecución de los trabajos.

Almería, Junio de 2014.

Paula Soriano Molina.

DOCUMENTO N° 5
SEGURIDAD
INDUSTRIAL

ÍNDICE

- 1. TÉCNICAS DE SEGURIDAD**
 - 1.1. Técnicas analíticas**
 - 1.1.1. Técnicas analíticas anteriores al accidente**
 - 1.1.2. Técnicas analíticas posteriores al accidente**
 - 1.2. Técnicas operativas**
 - 1.2.1. Técnicas que actúan sobre el factor técnico**
 - 1.2.2. Técnicas que actúan sobre el factor humano**

- 2. TÉCNICAS ANALÍTICAS ANTERIORES AL ACCIDENTE**
 - 2.1. Análisis de trabajo**
 - 2.2. Inspecciones de trabajo**
 - 2.2.1. Objetivos**
 - 2.2.2. Lista de identificación de peligros**

- 3. PROTECCIÓN INDIVIDUAL**
 - 3.1. Protección individual frente a riesgos mecánicos**
 - 3.1.1. Protección del cráneo**
 - 3.1.2. Protección de extremidades**
 - 3.2. Protección integral**
 - 3.2.1. Ropa de protección**
 - 3.2.2. Protección contra caídas de altura**
 - 3.3. Protección colectiva**

- 4. TÉCNICAS DE SEGURIDAD APLICADAS A LAS MÁQUINAS**
 - 4.1. Protección de máquinas**
 - 4.2. Peligros generados por las máquinas**
 - 4.3. Mantenimiento de máquinas y equipos**

- 5. RIESGOS DE INCENDIOS Y EXPLOSIONES**
 - 5.1. Prevención y protección contra incendios**
 - 5.1.1. Sistemas de detección y alarma**
 - 5.1.2. Equipos y medios de extinción**

- 6. RIESGOS ELÉCTRICOS**
 - 6.1. Factores que intervienen en el riesgo eléctrico**
 - 6.2. Técnicas de seguridad ante contactos eléctricos**
 - 6.2.1. Técnicas de seguridad informativas**
 - 6.2.2. Técnicas de seguridad de protección**

- 7. UTILIZACIÓN DE PRODUCTOS QUÍMICOS**
 - 7.1. Almacenamiento de productos químicos**
 - 7.2. Manipulación de productos químicos**
 - 7.3. Mantenimiento de instalaciones peligrosas**

8. LEGISLACIÓN PARA LA SEGURIDAD INDUSTRIAL

9. BIBLIOGRAFÍA

1. TÉCNICAS DE SEGURIDAD

1.1. Técnicas analíticas

1.1.1. Técnicas analíticas anteriores al accidente

Inspección de Seguridad: Esta técnica tiene como objetivo básico de actuación el análisis de los riesgos y la valoración de los mismos para su posterior corrección antes de su actuación en accidentes.

Análisis de Trabajo: Consiste en identificar potenciales situaciones de riesgo asociado a cada etapa del proceso de trabajo.

Análisis Estadísticos: Su objeto es la codificación, tabulación y tratamiento de los datos obtenidos en los estudios de riesgos para poder obtener un conocimiento científico aproximado de las posibles causas de accidentes.

1.1.2. Técnicas analíticas posteriores al accidente

Notificación y Registro de Accidentes: Consiste en el establecimiento de métodos de notificación y registro de los accidentes ocurridos para su posterior tratamiento estadístico, a nivel de empresa, autonómico o nacional.

Investigación de Accidentes: Esta técnica tiene como objetivo la detección de las causas que motivan los accidentes notificados a fin de utilizar la experiencia obtenida en la prevención de futuros accidentes.

1.2. Técnicas operativas

1.2.1. Técnicas que actúan sobre el factor técnico

Diseño y Proyecto de Instalaciones o Equipos: Son técnicas operativas de concepción basadas en la inclusión de la seguridad en el proyecto o planificación inicial de las instalaciones o equipos, buscando la adaptación del trabajo al hombre y la supresión o disminución del riesgo.

Estudio y mejora de métodos: Son técnicas operativas de concepción basadas en el estudio, planificación y programación iniciales de los métodos de trabajo, buscando la adaptación de las condiciones de trabajo al hombre y la supresión o disminución del riesgo.

Normalización: Tiene como finalidad el establecer métodos de actuación ante diferentes situaciones de riesgo, evitando la adopción de soluciones improvisadas.

Sistemas de Seguridad: Son técnicas que actúan sobre los riesgos, anulándolos o reduciéndolos, sin interferir en el proceso (alimentación automática, interruptores diferenciales, etc.)

Señalización: Consiste en descubrir situaciones de riesgo que resultan peligrosas por el simple hecho de resultar desconocidos.

Mantenimiento Preventivo: Esta técnica, de gran importancia para la producción, consiste en evitar las averías, ya que si conseguimos su eliminación, estaremos suprimiendo los riesgos de accidentes.

Defensas y Resguardos: Consiste en obstáculos y barreras que impiden el acceso del hombre a la zona de riesgo.

Protecciones individuales: Esta técnica debe ser utilizada en último lugar o como complemento a técnicas anteriores cuando el riesgo no pueda ser eliminado a fin de evitar lesiones o daños personales.

1.2.2. Técnicas que actúan sobre el factor humano

Selección de Personal: Es la técnica operativa médico-psicológica, que mediante el empleo de análisis psicotécnicos permite acomodar el hombre al puesto de trabajo más acorde con sus características personales.

Formación: Es la técnica operativa que actúa sobre el sujeto de la prevención a fin de mejorar su comportamiento para hacerlo más seguro, debiendo actuar tanto sobre su comportamiento como sobre el conocimiento del trabajo que realiza, los riesgos que comporta y las formas de evitarlo.

Adiestramiento: Es la técnica operativa que actúa sobre el individuo a fin de enseñarle las habilidades, destrezas, conocimientos y conductas necesarias para cumplir con las responsabilidades del trabajo que se le asigna. Es una técnica de formación específica y concreta.

Propaganda: Es la técnica cuyo objetivo es conseguir un cambio de actitudes en los individuos por medio de la información hábilmente suministrada.

Acción de Grupo: Es la técnica que al igual que la propaganda, pretende conseguir un cambio de actitudes en el individuo por medio de la presión que el grupo ejerce sobre sus miembros. Actúa mediante las técnicas psicológicas de dinámica de grupo.

2.- TÉCNICAS ANALÍTICAS ANTERIORES AL ACCIDENTE

2.1. Análisis de trabajo

El análisis de trabajo o puesto de trabajo aplicado a la seguridad en la empresa, no sólo debe basarse en la determinación de las causas de lesiones sino que, simultáneamente, deberán estudiarse las repercusiones económicas que representan los accidentes en la empresa con el fin de buscar la correlación existente entre las lesiones corporales y los daños materiales, ya que la seguridad debemos considerarla como un integrante más del sistema productivo de la empresa.

Se entiende por análisis o estudio de trabajo el conjunto de técnicas de estudio de métodos y medida del trabajo, mediante las cuales se asegura el mejor

aprovechamiento posible de los recursos humanos y materiales para llevar a cabo una determinada tarea. Son numerosos los tipos de análisis de trabajo que se realizan en las empresas dependiendo del objetivo perseguido:

- Mejora de métodos de trabajo.
- Adecuación de la persona al puesto.
- Valoración del puesto.
- Adiestramiento de personal.
- Análisis de riesgos.

Es precisamente el análisis de riesgos el que mayor importancia reviste de cara a la prevención de riesgos laborales.

2.2. Inspecciones de trabajo

Por Inspecciones de Seguridad entendemos la técnica analítica que consiste en el análisis detallado de las condiciones de seguridad (máquinas, instalaciones, herramientas, etc.), a fin de descubrir las situaciones de riesgo que se derivan de ellas (condiciones peligrosas o prácticas inseguras) con el fin de adoptar las medidas adecuadas para su control, evitando el accidente (prevención) o reduciendo los daños materiales o personales derivado del mismo (protección).

2.2.1. Objetivos

Con la Inspección de Seguridad se pretende conseguir los siguientes objetivos:

- Identificación de causas.

La primera etapa a cubrir en la inspección consiste en la localización e identificación de las causas motivadas por las condiciones inseguras y las prácticas o actos inseguros, especificando claramente para cada una de ellas los elementos diferenciadores que permitan su clasificación y localización:

Forma o tipo de accidente previsible.

Agente material.

Parte del agente.

Previsible daño (tipo de lesión y ubicación).

- Estimación del riesgo.

La estimación del riesgo deberá realizarse determinando por un lado las potenciales consecuencias y por otro lado la probabilidad de que ocurra el suceso, pudiendo recurrir a su representación gráfica.

- Valoración del riesgo.

El valor obtenido en la estimación anterior permitirá establecer diferentes niveles de riesgo y su posterior representación sobre la matriz de análisis de riesgos.

- Control del riesgo.

Una vez realizada la valoración de los riesgos deberá procederse a su control mediante la aplicación de las técnicas operativas que se consideren adecuadas para

su eliminación o reducción. En las medidas propuestas deberá tenerse en cuenta su grado de eficacia y el coste que la misma supone para la economía de la empresa.

2.2.2. Lista de identificación de peligros

Para realizar de forma eficaz la inspección de seguridad resulta conveniente poder contar con una guía o lista de inspección, que informe y recuerde los puntos que deben ser inspeccionados (agentes materiales causantes de los accidentes de trabajo) contestando normalmente a preguntas sencillas “verdadero o falso” o “cumple o no cumple”. Estas listas, para que sean eficaces, deberán reunir las siguientes características:

Debe ser sistemática y adecuada al tipo de empresa o de instalación a inspeccionar conteniendo los peligros más frecuentes en la misma.

Debe informar claramente sobre lo que debemos observar y donde se encuentran localizados.

Debe permitir su utilización en sucesivas inspecciones para conocer la eficacia de la inspección y para facilitar su realización.

A continuación, se incluye una relación que podrá ser utilizada en una primera inspección de seguridad, permitiendo a partir de ella su actualización y adaptación a cada caso concreto.

RELACIÓN PARA DETERMINAR FACTORES DE RIESGO

I. INSTALACIONES GENERALES

Estado de locales.

Estado de pisos.

Escaleras (tipo, uso, estado, etc.)

Pasillos y superficies de tránsito.

Puertas.

Aberturas en paredes

Separaciones entre máquinas.

Orden y limpieza.

Señalización.

Iluminación general.

Condiciones climáticas: ventilación.

II. INSTALACIONES DE SERVICIO

Instalación eléctrica:

Estado.

Tensión máxima.

Protecciones, etc.

Instalación de agua:

Estado.

Proximidad canalizaciones eléctricas.

Instalaciones de gases:

Instalaciones fijas.

Recipientes a presión.

III. INSTALACIONES DE SEGURIDAD

Instalaciones de incendio:

Bocas hidrantes.

Sistemas automáticos de detección y/o extinción.

Salidas de evacuación: estado, número, tipo.

Extintores.

Personal del servicio.

Mantenimiento de instalaciones.

Simulacros, etc.

IV. OPERACIONES DE MANUTENCIÓN

Manipulación manual:

Transporte de cargas: forma y cargas máximas.

Levantamiento de cargas: frecuencia y formas.

Almacenamiento: sistema y ubicación.

Transporte mecánico:

Carretillas elevadoras.

Aparatos y equipos elevadores: montacargas, puentes-grúa, etc.

Cintas transportadoras.

Maniobras: paso de cargas sobre personas.

Almacenamiento.

V. MÁQUINAS

Características técnicas.

Antigüedad.

Sistemas de seguridad.

Métodos de trabajo.

Puntos de operación: accesibilidad.

Frecuencias de las operaciones.

Número de operarios por máquina.

Periodicidad del mantenimiento preventivo.

VI. HERRAMIENTAS PORTÁTILES

Manuales:

Estado, utilización y almacenamiento.

Eléctricas:

Estado, tensión de alimentación, utilización y protecciones.

VII. RECIPIENTES A PRESIÓN

Calderas.

Compresores.

Estado de conservación.

Instalaciones.

Comprobación de pérdidas y fugas.

Protecciones.

VIII. EQUIPOS DE PROTECCIÓN INDIVIDUAL

Existencia.
Marcado CE.
Estado y conservación.

IX. TRABAJOS CON RIESGOS ESPECIALES

Trabajos en altura.
Soldadura.
Manejo de sustancias tóxicas y peligrosas.
Exposición a radiaciones: tipo y tiempo de exposición.

X. CONDICIONES MEDIOAMBIENTALES

Vapores.
Humos.
Gases.
Polvos.
Ruido (tipo, niveles, tiempo de exposición).
Vibraciones.

XI. CARGA DE TRABAJO

Esfuerzos.
Cargas.
Posturas.
Nivel de atención, etc.
Tipo de jornada.
Ritmo, automatización, etc.

A partir de esta lista se podrán detectar los peligros y estimar los riesgos, elaborando a partir de estos datos una Hoja de Riesgos Localizados, la cual podrá contemplar los siguientes aspectos:

Zonas a inspeccionar con mayor atención.
Peligros detectados.
Lugar de cada zona en la que se localizan los riesgos.
Tipo de inspección a realizar
Periodicidad.
Personas encargadas de realizar la inspección, etc.

3. PROTECCIÓN INDIVIDUAL

Se entiende por protección personal o individual la técnica que tiene como objetivo proteger al trabajador frente a agresiones externas, ya sean de tipo físico, químico o biológico, que se pueden presentar en el desempeño de la actividad laboral. Cuando el uso de las técnicas colectivas no resulta posible o conveniente, como medida complementaria de ella, se deberá recurrir a la protección individual.

La misión de la protección individual no es la de eliminar el riesgo de accidente, sino reducir o eliminar las consecuencias personales o lesiones que este pueda

producir en el trabajador. De acuerdo con las Directivas Europeas 89/686/CEE y 89/656/CEE relativas a los equipos de protección individual, en lo sucesivo a EPIs, la primera de ellas traspuesta al ordenamiento jurídico español mediante el Real Decreto 1407/1992 de 20 de noviembre, por el que se regula las condiciones para la comercialización de los equipos de protección individual y la segunda por el Real Decreto 773/1997, de 30 de mayo, sobre condiciones mínimas de seguridad y salud en la utilización por los trabajadores de equipos de protección individual, se entiende por EPI “cualquier equipo destinado a ser llevado o sujetado por el trabajador para que le proteja de uno o varios riesgos que pueda amenazar su seguridad o su salud en el trabajo, así como cualquier complemento o accesorio destinado a tal fin”. Excluido de la definición anterior queda la ropa de trabajo corriente y los uniformes que no estén específicamente destinados a proteger la seguridad y la salud de los trabajadores.

3.1. Protección individual frente a riesgos mecánicos

Se van a enumerar los equipos de protección individual más utilizados para hacer frente a los riesgos mecánicos (golpes, pinchazos, abrasiones, etc) que afectan fundamentalmente al cráneo y a las extremidades.

3.1.1. Protección del cráneo

Los riesgos fundamentales a los que puede estar sometida la cabeza, comprendiendo fundamentalmente la protección del cráneo, ya que los equipos utilizados para la protección de la cara y los específicos para la protección de las vías respiratorias, ojos y oídos están comprendidos fuera de los riesgos mecánicos, son los siguientes:

- Condiciones atmosféricas.
- Choques, impactos y caídas de objetos.
- Enganches de cabello.
- Radiaciones.
- Sustancias contaminantes.
- Agresivos químicos diversos.

Siendo los riesgos mecánicos los que pueden dar lugar a consecuencias más graves para el individuo, ya que puede producirse la rotura del cráneo, el equipo más utilizado es el casco de protección que, en casos especiales, puede ofrecer también protección frente a riesgos eléctricos, baja temperatura, etc. Los cascos de protección suelen estar fabricados con materiales no metálicos como polietileno, polipropileno, poliéster, nylon, etc.

3.1.2. Protección de extremidades

Dado que son muchos y variados los trabajos existentes en la industria en los que pueden presentarse diferentes tipos de riesgos para las extremidades, resulta igualmente complejo poder establecer una clasificación de los elementos de

protección utilizados en cada caso. En general, podemos considerar los elementos de protección en dos grupos:

- Elementos de protección de manos y brazos:

Aunque la mayor parte de los dispositivos de protección utilizados en máquinas tienen la misión de proteger las manos contra los riesgos graves de aplastamiento, amputaciones, etc., existen otra serie de lesiones de menos importancia por su origen, pinchazos, abrasiones, cortes, quemaduras, etc., frente a los cuales la protección individual constituye una eficaz medida.

Existe una clasificación de los tipos de guantes utilizados en la industria, atendiendo a los tipos de riesgos que se pueden presentar en el puesto de trabajo. Frente a esta clasificación, existen otros criterios de clasificación muy extendidos que hacen referencia a forma, tamaño y material utilizado en la fabricación de estos elementos.

- Elementos de protección de pies y piernas:

El calzado de seguridad constituye el elemento de protección de extremidades inferiores de uso más generalizado, existiendo, al igual que con los guantes, un tipo de calzado adecuado a cada tipo de riesgo (pinchazos, golpes, aplastamientos, quemaduras, agresivos químicos, deslizamientos, etc).

3.2. Protección integral

Se entiende por protección integral la constituida por elementos destinados a proteger al individuo frente a riesgos que actúan sobre todo el cuerpo (trajes ignífugos, arneses antiácidas, ropa de protección, dispositivos antiácida, chalecos salvavidas, etc).

3.2.1. Ropa de protección

Son aquellas prendas cuya misión es la de proteger al trabajador frente a riesgos específicos concretos. Dentro del grupo podemos incluir:

- Ropa especial contra agresivos químicos.
- Ropa especial contra agresivos térmicos (frío o calor).
- Ropa especial contra radiaciones.
- Prendas de señalización.

3.2.2. Protección contra caídas de altura

Es conocida la problemática que encierran los trabajos en altura, motivada por una parte en la alta accidentabilidad con consecuencias graves o mortales y por otra parte, a la falta de planificación motivada generalmente por la brevedad y características de los trabajos. Para poder evitar o disminuir las consecuencias de las caídas de personas u objetos desde altura, deberán adoptarse una serie de medidas

preventivas basadas en el análisis y estudio del puesto de trabajo, lo que conducirá a la adopción de los medios adecuados de protección colectiva o individual.

Se entiende por equipo de protección individual contra caídas de altura, los destinados a sujetar a la persona a un punto de anclaje para evitar cualquier caída de altura o para detenerla en condiciones de seguridad. Se clasifican en:

- Sistemas de sujeción (cinturón de sujeción).
- Sistemas anticaídas (argollas, mosquetones, etc).
- Dispositivos de anticaídas (arnés y sistema de bloqueo automático).
- Dispositivos de descenso.

3.3. Protección colectiva

Se entiende por protección colectiva aquella técnica de seguridad cuyo objetivo es la protección simultánea de varios trabajadores expuestos a un determinado riesgo. Entre los equipos empleados para este fin podemos nombrar:

- Redes de seguridad:
Redes de prevención para evitar la caída de personas.
Redes de protección para limitar la caída de personas.
- Redes elásticas: empleadas para evitar la caída de los trabajadores que trabajan a alturas superiores a 6 m, amortiguando los efectos de la caída.

4. TÉCNICAS DE SEGURIDAD APLICADAS A LAS MÁQUINAS

4.1. Protección de máquinas

Para que los fabricantes, importadores y suministradores de máquinas puedan garantizar que los productos que fabriquen o comercialicen cumplen con las exigencias esenciales de seguridad y salud establecidas en las Directivas, deberán cumplir con las especificaciones de las correspondientes normas elaboradas por el CEN, ya que ello presupone la conformidad con los requisitos esenciales exigidos. En lo que se refiere al tema de protección de máquinas se han elaborado una serie de normas clasificadas según una jerarquía:

Normas de Tipo A: referidas a los principios y conceptos fundamentales de seguridad que pueden ser aplicados en todos los tipos de máquinas. Destacan por su interés:

UNE-EN 292-1: 1993 “Seguridad de las máquinas. Conceptos básicos, principios generales para el diseño. Parte 1: Terminología básica, metodología”.

UNE-EN 292-2: 1993 “Seguridad de las máquinas. Conceptos básicos, principios generales para el diseño. Parte 2: Principios y especificaciones técnicas”

UNE-EN V 1070: 1994 “Seguridad en las máquinas. Terminología Normas de Tipo B: referidas a aspectos de seguridad o de un tipo de dispositivo que condiciona la seguridad, válidas para una amplia gama de máquinas. Se clasifican en:

UNE-EN 294: 1993 “Seguridad de las máquinas. Distancias de Seguridad para impedir que se alcancen zonas peligrosas con los miembros superiores”.

UNE-EN 349: 1994 “Seguridad de las máquinas. Distancias mínimas para evitar el aplastamiento de partes del cuerpo humano”.

Normas de Tipo C: normas de seguridad relativas a prescripciones de seguridad para una máquina concreto o grupo de máquinas. Se ha contado con la autorización de AENOR para reproducir las tablas y esquemas en los que expresamente se citan las referencias a las correspondientes normas EN.

4.2. Peligros generados por las máquinas

Definido el peligro como toda fuente capaz de producir lesión o daño a la salud, podemos considerar los peligros de las máquinas clasificados en:

- mecánicos.
- eléctricos.
- térmicos.
- producidos por el ruido.
- producidos por las vibraciones.
- producidos por las radiaciones.
- producidos por materiales y sustancias.
- producidos por no respetar los principios ergonómicos en el diseño de máquinas.
- combinación de peligros.

4.3. Mantenimiento de máquinas y equipos

Las operaciones de reparación, limpieza o mantenimiento de las máquinas o equipos requieren que en ocasiones los medios de protección sean retirados de su sitio para facilitar estas operaciones, por lo que deberán adoptarse todas las precauciones y garantizar que una vez concluidas las operaciones de mantenimiento queden dispuestos en su mismo lugar.

Un buen servicio de inspección y mantenimiento debe garantizar que los medios de protección se encuentren siempre en perfecto estado de funcionamiento. Para lo cual su personal deberá haber recibido formación adecuada en cuanto a:

- Principios de seguridad en las máquinas.
- Seguridad frente a peligros eléctricos y mecánicos.
- Métodos seguros de trabajo, incluyendo permisos de trabajo y sistemas de bloqueo durante las operaciones de mantenimiento.

5. RIESGOS DE INCENDIOS Y EXPLOSIONES

La gran cantidad de siniestros que se producen y el elevado porcentaje de pérdidas personales y materiales que normalmente ocasionan los incendios, obliga a considerar en profundidad el problema de la lucha contra incendios, existiendo la necesidad de resaltar las situaciones de riesgos de incendios y tomar las medidas oportunas para su prevención.

Para que se produzca el incendio se precisa de la concurrencia de tres factores, que se han dado en llamar “triángulo del fuego”: combustible, comburente y fuente de calor. Actualmente se habla, más que de triángulo de fuego, de “tetraedro del fuego”, al introducir un cuarto factor, el de la reacción en cadena:

- a) Combustible: toda sustancia susceptible de combinarse con el oxígeno de forma rápida y exotérmica.
- b) Comburente: toda mezcla de gases en la cual el oxígeno está en proporción suficiente para que se produzca la combustión.
- c) Energía de activación: es la energía mínima necesaria para que se inicie la reacción. Depende del tipo de combustible y de las condiciones en las que se encuentra (presión, temperatura, concentración, etc). La energía de activación es proporcionada por todos los focos de ignición. Estos focos pueden ser eléctricos, mecánicos, térmicos y químicos.
- d) Reacción en cadena: es el conjunto de sucesos, correlativos en el tiempo, que definen un incendio. Se distinguen las etapas de ignición, propagación y consecuencias.

5.1. Prevención y protección contra incendios

Una vez analizados los diferentes factores que intervienen en el incendio y la necesidad de que se presenten de forma conjunta para que se produzca el incendio, se desprende que para evitar su inicio y propagación deberá actuarse:

- Retirando el material combustible.
- Disponiendo sistemas de detección y alarmas.
- Utilizando equipos y medios de extinción.
- Planificando sistemas de evacuación.

Las medidas preventivas deben comenzar a aplicarse desde la fase de proyecto o de montaje de la nave industrial, local, etc., que es cuando las medidas a adoptar pueden resultar más fáciles, eficaces y económicas. Las medidas de prevención contra incendios se señalan brevemente a continuación:

- 1) Situación de la industria. Diseño: Resulta imprescindible, a la hora de fijar la situación de una nueva planta industrial, la realización de un estudio detallado, en el que se tengan en cuenta los edificios próximos existentes o por construir, su carácter industrial o de vivienda, las condiciones climáticas de la zona, abastecimiento de agua, facilidades de acceso, etc. Deberá continuarse con el estudio del proceso de

trabajo y su disposición, localización correcta de almacenes de materias primas, productos semielaborados y acabados, etc.

Cuando no exista una completa separación entre los lugares peligrosos y el resto debemos disponer de sectores limitadores de incendio, mediante barreras verticales y horizontales resistentes al fuego. Entre los elementos de protección horizontal más significativos podemos incluir paredes cortafuegos, diques o cubetos, puertas cortafuegos, compartimentación, etc. y entre las de protección vertical están los techos, eliminación de cámaras huecas y conducciones, protección de aberturas que puedan favorecer el tiro vertical, ventanas de seguridad y evacuación de humos, etc.

2) Estructura y tipo de material a emplear: Los materiales a emplear en la construcción se clasifican atendiendo a su combustibilidad en las cuatro categorías siguientes:

- Materiales incombustibles o no inflamables. Aquellos que en su estado normal, bajo ninguna circunstancia pueden inflamarse, carbonizarse ni reducirse a cenizas.
- Materiales difícilmente combustibles o difícilmente inflamables. Aquellos que para inflamarse necesitan un contacto con llama, ardiendo lentamente y precisando de un aporte de calor exterior continuo.
- Materiales combustibles o medianamente inflamables. Aquellos que se inflaman en contacto con llama en un tiempo superior a 20 segundos y continúan ardiendo después de la inflamación sin necesidad de aporte exterior de calor.
- Materiales inflamables. Aquellos que se inflaman en contacto con llama en un periodo inferior a 20 segundos.

Los materiales inflamables no pueden emplearse en edificación, así como, aquellos materiales que al arder desprenden gases corrosivos y/o tóxicos.

3) Organización interna: Desde el punto de vista del riesgo de incendio, resulta de gran eficacia la ordenación correcta de los almacenes de materias primas, productos semielaborados, elaborados y subproductos, circulación de estos y su manejo. Es necesario recurrir a las normas y ordenanzas de aplicación a lo relativo a almacenamiento, volúmenes máximos, superficies máximas, pasillos, etc. Debe tenerse en cuenta el poder calorífico unitario de los productos almacenados, fijación de volúmenes máximos por unidad de superficie, altura de pilas, etc. Con lo cual se tendrá una idea de la intensidad y duración que cabe esperar en caso de incendio, así como, la velocidad y sentido de la propagación que nos permita programar y adoptar los medios de extinción adecuados.

4) Proceso de producción: El conocimiento del proceso de producción es de vital importancia para poder detectar las zonas con riesgos de incendios que puedan existir a lo largo del mismo. Deberán preverse instalaciones de extracción y ventilación adecuadas en aquellas instalaciones en las que existan operaciones que deben realizarse en atmósferas explosivas o inflamables de polvos o gases en los que basta un pequeño foco de ignición para que el incendio se produzca. De igual forma debe ser estudiada la ubicación de servicios e instalaciones auxiliares (instalación eléctrica, calderas, instalaciones de vapor, etc.) y los correspondientes elementos de protección.

5) Medidas generales: Las medidas de prevención básicas estudiadas deberán completarse con otras de tipo general, tales como:

Eliminación de los focos de ignición, atendiendo a las protecciones y aislamientos adecuados de las instalaciones eléctricas, protección contra la electricidad estática, aislamiento de focos caloríficos y atención especial a operaciones de soldadura separando las zonas de operación, prohibición de fumar, vigilancia, etc.

Orden y limpieza, evitando la acumulación de sustancias que puedan ser foco de ignición.

Creación de muros, pantallas y puertas cortafuegos, que aislen las zonas que se consideren más peligrosas.

5.1.1. Sistemas de detección y alarma

Se entiende por detección el descubrimiento de la existencia de un incendio, inevitablemente después de que se haya iniciado. La detección del foco de incendio es fundamental para evitar la propagación del fuego. Generalmente los incendios surgen lentamente, salvo los provocados por explosiones o inflamaciones rápidas, acompañado de las siguientes manifestaciones: gases, humos, llamas y calor. Y es precisamente en ellas, en las que se basan los sistemas de detección de incendios.

La detección rápida de un incendio debe ir acompañada de una correcta localización, ya que de no ser así los sistemas de detección serían ineficaces. La detección rápida y localización de un incendio puede conseguirse mediante los sistemas de detección, que tienen como misión la vigilancia permanente de los riesgos existentes. Estos pueden ser de dos tipos:

Detectores humanos o recorridos de inspección: consiste en la vigilancia continua del hombre mediante la realización de recorridos o visitas periódicas de inspección. Estos recorridos resultan efectivos al terminar la jornada y durante la noche. Otra modalidad es la vigilancia especial de todas aquellas operaciones consideradas como riesgo de incendio.

Detectores automáticos: son aparatos automáticos, sensibles a las variaciones del medio ambiente, que registran, comparan y miden automáticamente los fenómenos o variaciones que anuncian la aparición de un incendio (humo, gases, calor, llamas, etc.) transmitiendo la señal a la central.

5.1.2. Equipos y medios de extinción

Los procedimientos de extinción están basados en la eliminación de uno de los factores que componen el tetraedro del fuego. Debido a esto, la actuación sobre el incendio conlleva:

Eliminación del combustible.
Eliminación del comburente (sofocación).
Eliminación de la energía de activación (enfriamiento).
Eliminación de la reacción en cadena (inhibición).

AGENTES EXTINTORES:

Para lograr la extinción del incendio se recurre a los agentes extintores que se proyectan sobre los combustibles en ignición. Entre estos combustibles podemos mencionar los siguientes:

Agua: es la sustancia extintora más utilizada. Actúa como refrigerante y como sofocante de los incendios, ya que al evaporarse produce vapor de agua que cubre el fuego, dificultando el aporte de oxígeno. Unido a sus ventajas económicas, abundancia, disponibilidad, inocuidad, etc. presenta el inconveniente de que dispersa el incendio en líquidos y sólidos subdivididos, produce daños considerables y no puede utilizarse donde exista riesgo eléctrico.

Espuma: son burbujas de aire o gas, en base generalmente acuosa, que flotan en las superficies de los líquidos debido a su baja densidad, impidiendo que el combustible continúe en contacto con el aire. La espuma puede ser química (generada por reacción química) o física (generada por la mezcla de un producto espumógeno, agua y aire, con productos estabilizadores de la espuma). Presentan el inconveniente de no poder ser utilizada en fuego eléctrico (excepto la espuma de alta expansión) y ser muy corrosiva.

Anhídrido carbónico: es un gas que se licua por compresión y enfriamiento debiéndose almacenar en recipientes adecuados, ya que su presión es de 60 atmósferas a temperatura ambiente. Al descargar el CO₂ fuera del recipiente se expansiona produciéndose una especie de nieve conocida como nieve carbónica, la cual actúa como sofocante. Frente a la ventaja de no ser tóxica, su aplicación a fuegos eléctricos, no producir daños ni deterioros, salir autoimpulsado, etc. presenta los inconvenientes de no poder aplicarse a fuegos con brasas, ser poco efectivo en exteriores y producir asfixia en porcentajes superiores al 4%.

Polvos: se utilizan tres tipos de polvos: polvo normal B,C; polvo antibrasa A, B, C (polivalente); polvos especiales. Los polvos normales y polivalentes son sales metálicas con algunos aditivos, siendo el bicarbonato sódico o potásico el componente básico de los polvos normales. Los polvos normales, además de tener buenas cualidades extintoras son buenos inhibidores. Frente a la ventaja de ser aplicables a fuegos eléctricos y no ser tóxicos presentan el inconveniente de no poder utilizarse en máquinas o instalaciones delicadas y tener peligro de reactivación del fuego al cesar el aporte de polvo.

SISTEMAS DE EXTINCIÓN

Equipos portátiles (extintores): son recipientes cerrados que contienen en su interior una sustancia extintora que puede ser proyectada y dirigida sobre un fuego por la acción de una presión interior. Estos equipos deben mantenerse a plena carga,

en condiciones de funcionamiento y colocados en lugares adecuados, de forma visible. Deben someterse a inspecciones periódicas para verificar su estado.

Instalaciones fijas: formado por una red de tuberías, tanques de almacenamiento del agente extintor, equipos y elementos terminales que cubren permanentemente las zonas donde se localice algún riesgo de incendio.

6. RIESGOS ELÉCTRICOS

El hecho de que la corriente eléctrica sea en nuestros días la energía más utilizada y que sea difícil su detección por los sentidos hace que las personas caigan a veces en cierta despreocupación y falta de prevención en su uso.

El riesgo eléctrico puede producir daños sobre las personas (contracción muscular, parada cardíaca y respiratoria, fibrilación ventricular, quemaduras, etc.) y sobre las cosas (incendios y explosiones).

6.1. Factores que intervienen en el riesgo eléctrico

Si el riesgo eléctrico, lo definimos como la posibilidad de circulación de la corriente eléctrica a través del cuerpo humano, para que se de dicha probabilidad se requiere que:

El cuerpo humano sea conductor.

El cuerpo humano pueda formar parte del circuito.

Exista una diferencia de tensiones entre dos puntos de contacto.

En estas condiciones, el cuerpo humano se comporta como una resistencia de acuerdo con la ley de Ohm por lo que, teniendo en cuenta esto, se puede obtener la intensidad de corriente que pasa.

6.2. Técnicas de seguridad ante contactos eléctricos

Las medidas de seguridad utilizadas para controlar el riesgo pueden ser de dos tipos: informativos y de protección.

6.2.1. Técnicas de seguridad informativas

Reciben el nombre de medidas informativas aquellas que de algún modo previenen la existencia del riesgo. Pueden ser:

Normativas: consiste en establecer normas operativas de carácter específico para cada trabajo o generales coordinadas con las restantes medidas informativas.

Instructivas: consiste en la formación de los operarios que trabajan en riesgos eléctricos sobre la utilización correcta de aparatos y herramientas que manejan y el significado y simbología de la señalización.

De señalización: consiste en la colocación de señales de prohibición, precaución o información en los lugares apropiados.

De identificación y detección: consiste en la identificación y comprobación de tensiones en las instalaciones eléctricas antes de actuar sobre las mismas.

6.2.2. Técnicas de seguridad de protección

Las técnicas de seguridad de protección son las que protegen al operario frente a los accidentes eléctricos. Las podemos clasificar en: individuales y de la instalación.

Individuales: dentro de este grupo podemos considerar los guantes aislantes, cascos aislantes, tarimas y alfombras aislantes, pértigas de maniobra y de salvamento, calzado aislante, etc. Habrán de cumplir con las exigencias esenciales de seguridad y salud y consiguientemente llevar la marca CE.

De instalación: Se pueden dividir en:

- Protección de los contactos directos: Se basan en los siguientes principios:
 - Disposición que impida que la corriente eléctrica atraviese el cuerpo humano.
 - Limitación de la corriente que pueda atravesar el cuerpo humano a una intensidad no peligrosa.
 - Separación por distancia o alejamiento a las partes activas.
 - Recubrimiento o aislamiento de las partes activas.
- Protección de los contactos indirectos: Dentro de este grupo podemos considerarlas agrupadas en:
 - 1) Sistemas de clase A:
 - Separación de circuitos.
 - Empleo de pequeñas tensiones de seguridad.
 - Separación entre las partes activas y las masas accesibles por medio de aislamientos de protección.
 - Conexiones equipotenciales.
 - 2) Sistemas de clase B:
 - Corte automático cuando aparece un defecto susceptible de favorecer, en caso de contacto con las masas, el paso a través del cuerpo humano de una corriente considerada peligrosa.
 - Puesta a tierra de las masas y dispositivos de corte por intensidad de defecto.

7. UTILIZACIÓN DE PRODUCTOS QUÍMICOS

Desde el punto de vista de la seguridad e higiene, se consideran productos químicos peligrosos, aquellos que por su carácter: tóxico, corrosivo, inflamables, explosivos, oxidantes, radiactivo o nocivo entrañan una cierta peligrosidad.

Los riesgos químicos son debidos bien a factores intrínsecos, propios de los productos en función de sus propiedades físico-químicas o reactividad química en las condiciones de uso, o bien a factores extrínsecos, dependiendo de las condiciones de inseguridad en las que se utilizan.

7.1. Almacenamiento de productos químicos

Las medidas preventivas a tener en cuenta en estas operaciones son las siguientes:

- Almacenar sólo las cantidades imprescindibles de cada producto peligroso si no existen restricciones legales.
- Aislar las zonas destinadas al almacenamiento, dotándola de los medios de prevención adecuados y si fuese posible, utilizar locales especiales.
- Elegir los recipientes adecuados a cada sustancia. De vidrio sólo para cantidades inferiores a 2 litros, si se trata de productos muy tóxicos y corrosivos, y no superiores a 4 litros para líquidos inflamables. Si son de plástico es preciso tener en cuenta su posible envejecimiento. Por lo que cuando sea posible son más seguros los metálicos.

Si se trata de sustancias inflamables o combustibles y reductoras, deberán mantenerse separadas de las oxidantes y de las tóxicas, las cuales deberán mantenerse en locales bien ventilados.

En el caso de sustancias corrosivas los recipientes se colocarán lo más cerca posible del suelo y sobre bandejas que puedan retener posibles derrames por roturas.

7.2. Manipulación de productos químicos

Un elevado número de accidentes con productos químicos tienen lugar en las operaciones de manipulación y trasvase. Debiéndose por ello adoptar las medidas preventivas adecuadas para evitar los riesgos más frecuentes:

Contacto dérmico por rotura del envase durante el transporte o con sustancias derramadas.

- Transportar los envases de vidrio en contenedores de protección.
- Control de los envases de plástico.
- Empleo de envases seguros y diseñados ergonómicamente.
- Emplear envases adecuados.
- Neutralizar las sustancias derramadas con productos adecuados.

Proyecciones y salpicaduras en las operaciones de trasvase.

- Evitar el vertido libre desde recipientes (instalaciones fijas y sistemas de bombeo).

- Duchas de emergencia y lava ojos.
 - Equipos de protección individual adecuados.
- Incendios y/o intoxicaciones por evaporación de sustancias inflamables y/o tóxicas
- Controlar los desechos y residuos.
 - Controlar los focos de ignición.
 - Mantener los recipientes cerrados herméticamente.
- Incendios en trasvases de líquidos inflamables por electricidad estática.
- Trasvasar a velocidades lentas y llenar por el fondo.
 - Emplear recipientes metálicos.
 - No utilizar ropa de trabajo de fibras acrílicas, sino de algodón.
- Contactos dérmicos en laboratorios
- Emplear sistemas mecánicos de pipeteado y dosificación.

7.3. Mantenimiento de instalaciones peligrosas

En los casos en que sea necesario tener que realizar operaciones de inspección o reparaciones en instalaciones y procesos peligrosos, se requiere la adopción de medidas especiales de carácter preventivo, toda vez que el personal e mantenimiento no suele tener conocimiento de los riesgos existentes.

Entre las medidas preventivas de carácter general, cabe incluir las denominadas autorizaciones de trabajo que, una vez cumplimentadas por los responsable de Fabricación y de Mantenimiento, permitirán actuar en condiciones de seguridad, utilizando procedimientos de trabajo, materiales y protección adecuados. Se tiene por ejemplo:

- Evaluar el riesgo de la atmósfera interior.
- Limpiar y ventilar suficientemente la zona de trabajo.
- Aislar la zona de trabajo.
- Disponer de medios adecuados para casos de emergencia.
- Formación del personal.

8. LEGISLACIÓN PARA LA SEGURIDAD INDUSTRIAL

RIESGOS ESPECÍFICOS DE SEGURIDAD

1. Convenio 119 de la OIT de 26.6.93 sobre protección de máquinas (BOE 30.11.72)
2. RD 2177/1996, de 4 de octubre, por lo que se aprueba la norma Básica de Edificación NBE-CPI/96: Condiciones de protección contra incendios en los edificios (BOE 29.10.96).

3. RD 614/2001, de 8 de junio, sobre disposiciones mínimas para la protección de la seguridad y la salud de los trabajadores frente a riesgo eléctrico (BOE 21.6.01).
4. RD de 29.11.84, relativa al Manual de Autoprotección para el desarrollo del plan de emergencia contra incendios y de evacuación de locales y edificios (BOE 26.2 y 14.6.85).
5. RD 245/1989 de 27.2 sobre determinación y limitación de potencias acústicas admisible en determinado material y maquinaria de obra (BOE 11.3.89).
6. RD 2200/1995, de 28 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento de la Infraestructura para la Calidad y la Seguridad Industrial (BOE 6.2.96).
7. RD 3275/1982 sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en centrales eléctricas, subestaciones y centros de transformación (BOE 1.12.82).

MEDIO AMBIENTE

1. LEY DE PROTECCIÓN AMBIENTAL

B.O.J.A. 79; 31.05.94

Ley 7/1994, de 18 de mayo, de la Presidencia de la Junta de Andalucía.

2. REGLAMENTO DE RESIDUOS DE LA COMUNIDAD AUTÓNOMA ANDALUZA

B.O.J.A. 161; 19.12.95

Decreto 283/1995, de 12 de noviembre, de la CO de Medio Ambiente.

3. REGLAMENTO DE EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL DE LA COMUNIDAD AUTÓNOMA DE ANDALUCÍA

B.O.J.A. 166; 28.12.95

Decreto 292/1995, de 12 de diciembre, de la CO de Medio Ambiente.

4. REGLAMENTO DE CLASIFICACIÓN AMBIENTAL

B.O.J.A. 3; 11.01.96

Decreto 297/1995, de 19 de diciembre, de la CO de la Presidencia.

5. PROCEDIMIENTO PARA LA TRAMITACIÓN DE AUTORIZACIONES DE VERTIDOS AL DOMINIO PÚBLICO MARÍTIMO-TERRESTRE Y DE USO EN ZONA DE SERVIDUMBRE DE PROTECCIÓN

B.O.J.A. 175; 04.11.94

Decreto 334/1994, de 4 de octubre, de la CO de Medio Ambiente.

6. REGLAMENTO DE LA CALIDAD DEL AIRE

B.O.J.A. 30; 07.03.96

Decreto 74/1996, de 20 de febrero, de la CO de Medio Ambiente.

7. REGLAMENTO DE LA CALIDAD DEL AIRE, EN MATERIA DE MEDICIÓN, EVALUACIÓN Y VALORACIÓN DE RUIDOS Y VIBRACIONES

B.O.J.A. 30; 07.03.96

Orden de 23 de febrero de 1996, de la CO de Medio Ambiente.

8. REGLAMENTO DE INFORME AMBIENTAL

B.O.J.A. 69: 18.06.96

Decreto 153/1996, de 30 de abril de 1996, de la CO de Medio Ambiente.

9. PLAN DE GESTIÓN DE RESIDUOS PELIGROSOS DE ANDALUCÍA

B.O.J.A. 77; 05.07.97

Acuerdo de 17 de junio de 1997, de la CO de Medio Ambiente

B.O.J.A. 13.09.98

Decreto 134/1998, por el que se aprueba el Plan de gestión de Residuos Peligrosos de Andalucía.

10. REGLAMENTO DE ACTIVIDADES MOLESTAS, INSALUBRES, NOCIVAS Y PELIGROSAS

Las transferencias de competencias de la Administración del Estado a la Comunidad Autónoma de Andalucía afecta a los artículos 41, de 71 a 101, 151, 201, de 311 a 391, de 431 a 451 del presente Reglamento.

B.O.E. 292; 07.12.61

Decreto 2414/1961 de 30 de noviembre.

B.O.E. 57; 07.03.62

Orden de 15 de marzo de 1963. Instrucciones complementarias para la aplicación del Reglamento.

11. REGLAMENTO DE ALMACENAMIENTO DE PRODUCTOS QUÍMICOS Y SUS INSTRUCCIONES TÉCNICAS COMPLEMENTARIAS MIE APQ-1, MIE APQ-2, MIE APQ-3, MIE APQ-4, MIE APQ-5, MIE APQ-6 Y MIE APQ-7.

ABASTECIMIENTO DE AGUA Y VERTIDOS

1. PLIEGO DE PRESCRIPCIONES TÉCNICAS GENERALES PARA TUBERÍAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA

B.O.E. 236; 02.10.74

Orden de 28 de julio de 1.974 del MI de Obras Públicas y Urbanismo.

B.O.E. 260; 30.10.74

Corrección de errores.

2. NORMAS BÁSICAS PARA LAS INSTALACIONES INTERIORES DE SUMINISTRO DE AGUA

B.O.E. 11; 13.01.76

Orden de 9 de diciembre de 1.975 del MI de Industria

B.O.E. 37; 12.02.76

Corrección de errores.

B.O.E. 58; 07.03.80

Complemento del apartado 1.5 del Título 1.

3. REGLAMENTO DEL SUMINISTRO DOMICILIARIO DE AGUA B.O.J.A. 81; 10.09.91

Decreto de 11 de junio de 1.991, de la consejería de la Presidencia de la Junta

de Andalucía.

4. CONTADORES DE AGUA FRÍA

B.O.E. 55; 06.03.89

Orden de 28 de diciembre de 1.988 del MI de Obras Públicas y Urbanismo

5. CONTADORES DE AGUA CALIENTE

B.O.E. 25; 30.01.89

Orden de 30 de diciembre de 1.988 del MI de Obras Públicas y Urbanismo

AISLAMIENTO ACÚSTICO

1. NORMA NBE-CA-81 SOBRE CONDICIONES ACÚSTICAS EN LOS EDIFICIOS

B.O.E. 214; 07.09.81

Real Decreto 1909/1981 de 24 de julio del MI de Obras Públicas y Urbanismo

ELECTRICIDAD

1. REGLAMENTO ELECTROTÉCNICO PARA BAJA TENSIÓN

B.O.E. 109; 07.05.84

Regulación del apartado 4.5 de la MI. BT. 014.

B.O.E. 297; 12.12.85

Adición de un nuevo párrafo al artículo 2 del REBT.

2. AUTORIZACIÓN DEL EMPLEO DEL SISTEMA DE INSTALACIÓN CON CONDUCTORES AISLADOS BAJO CANALES PROTECTORES DE MATERIAL PLÁSTICO

B.O.E. 43; 19.02.88

Resolución de 18 de enero de 1.988 de la Dirección General de Innovación Industrial y Tecnológica, del MI de Industria y Energía.

3. EXIGENCIAS DE SEGURIDAD DEL MATERIAL ELÉCTRICO DESTINADO A SER UTILIZADO EN DETERMINADOS LÍMITES DE TENSIÓN

B.O.E. 147; 14.01.88

Real Decreto 7/1988 de 8 de enero, del MI de Industria y Energía.

B.O.E. 147; 21.06.89

Desarrollo del Real Decreto 7/1988 de 6 de junio de 1.989.

4. SUMINISTRO DE ENERGÍA ELÉCTRICA A LOS POLÍGONOS URBANIZADOS POR EL MI DE LA VIVIENDA

B.O.E. 83; 06.04.72

Orden de 18 de marzo de 1.972, del MI de Industria.

PROTECCIÓN CONTRA INCENDIOS

1. NORMA BÁSICA DE LA EDIFICACIÓN NBE-CPII96. CONDICIONES DE PROTECCIÓN CONTRA INCENDIOS EN LOS EDIFICIOS

B.O.E. 261; 29.10.96

Real Decreto 2177/1996 de 4 de octubre del MI de Fomento.
B.O.E. 274; 13.11.96
Corrección de errores.

SEGURIDAD E HIGIENE EN EL TRABAJO

1. DISPOSICIONES MÍNIMAS DE SEGURIDAD Y SALUD EN LAS OBRAS DE CONSTRUCCIÓN

B.O.E. 256; 25.10.97

Real Decreto 1627/1997 de 21 de octubre del MI de la Presidencia.

2. OBLIGATORIEDAD DE LA INCLUSIÓN DEL ESTUDIO DE LA SEGURIDAD E HIGIENE EN EL TRABAJO EN PROYECTOS DE EDIFICACIÓN Y OBRAS PÚBLICAS

Ver disposiciones derogatorias y transitorias del Real Decreto 1627/1997.

B.O.E. 69; 21.03.86

Real Decreto 555/1986 de 21 de febrero de la Presidencia del Gobierno.

3. ORDENANZA GENERAL DE SEGURIDAD E HIGIENE EN EL TRABAJO

Ver disposiciones derogatorias y transitorias de:

Ley 31/1995, Real Decreto 485/1997, Real Decreto 486/1997, Real Decreto 664/1997, Real Decreto 665/1997, Real Decreto 773/1997 y Real Decreto 1215/1997.

B.O.E. 64; 16.03.71

B.O.E. 65; 17.03.71

Orden de 9 de marzo de 1.971 del MI de Trabajo.

4. PREVENCIÓN DE RIESGOS LABORALES

B.O.E. 269; 10.11.95

Ley 31/1995 de 8 de noviembre de la Jefatura del Estado.

5. REGLAMENTO DE LOS SERVICIOS DE PREVENCIÓN

B.O.E. 27; 31.01.97

Real Decreto 39/1997, de 17 de enero, del MI de Trabajo y Asuntos Sociales.

B.O.E. 159; 04.07.97

Orden de 27, de junio de 1.997, del MI de Trabajo y Asuntos Sociales.

B.O.E. 104; 01.05.98

Real Decreto 780/1998, de 30 de abril, del MI de Trabajo y Asuntos Sociales.

6. DISPOSICIONES MÍNIMAS DE SEGURIDAD Y SALUD EN LOS LUGARES DE TRABAJO

B.O.E. 97; 23.04.97

Real Decreto 486/1997, de 14 de abril, del MI de Trabajo y Asuntos Sociales.

7. PROTECCIÓN DE LOS TRABAJADORES CONTRA LOS RIESGOS RELACIONADOS CON LA EXPOSICIÓN A AGENTES CANCERÍGENOS DURANTE EL TRABAJO

B.O.E. 124; 24.05.97

Real Decreto 665/1997, de 12 de mayo, del MI de la Presidencia.

**8. PROTECCIÓN DE LOS TRABAJADORES CONTRA LOS RIESGOS
RELACIONADOS CON LA EXPOSICIÓN A AGENTES BIOLÓGICOS
DURANTE EL TRABAJO**

B.O.E. 124; 24.05.97

Real Decreto 664/1997, de 12 de mayo, del MI de la Presidencia.

B.O.E. 76; 30.03.98

Orden 25 de marzo de 1.998 por la que se adapta el Real Decreto anterior.

**9. DISPOSICIONES MÍNIMAS DE SEGURIDAD Y SALUD EN EL TRABAJO
DE LAS EMPRESAS DE TRABAJO TEMPORAL**

B.O.E. 47; 24.02.99

Real Decreto 216/1999, de 5 de febrero, del MI de Trabajo y Asuntos Sociales.

9. BIBLIOGRAFÍA

- Cortés Díaz, J. M.,2003. “Técnicas de Prevención de Riesgos Laborales”. Ed. Tébar.
- Página web del Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales.

DOCUMENTO N° 6
PRESUPUESTO

ÍNDICE

- 1. ANÁLISIS ECONÓMICO**
 - 1.1. Capital inmovilizado**
 - 1.1.1. Costes de los equipos principales**
 - 1.1.2. Capital inmovilizado**
 - 1.2. Capital circulante**
 - 1.2.1. Costes de operación**
- 2. VIABILIDAD DEL PROYECTO**
- 3. BIBLIOGRAFÍA**

1. ANÁLISIS ECONÓMICO

La planta tendrá una vida útil de 15 años.

1.1. Capital inmovilizado

El capital inmovilizado incluye los costes de equipos, tuberías, bombas, electricidad, carpintería, fontanería, la construcción de la planta y todas las actividades relacionadas.

1.1.1. Costes de los equipos principales

El coste de los equipos principales, MEC (Mayor Equipment Costs), se detallan a continuación.

Tabla 1. Coste de los equipos principales

EQUIPO	CARACTERÍSTICAS	COSTE	UNIDADES	COSTE TOTAL, €	DISTRIBUCIÓN DE COSTES, %
Reactor raceway	12500,00	3	euros/m2	15000,00	51,63
Agitador paddlewheel		4169	euros/unidad	16674,00	5,74
Decantador	95,03	85	euros/m2	16155,61	5,56
Columna de absorción		813	euros	813,00	0,28
Digestor	78,54	450	euros/m2	35343,00	12,16
Generador	40,00	3000	euros	3000,00	1,03
Intercambiador de tubos concéntricos		148	euros	148,00	0,05
Gasómetro		55464	euros	55464,00	19,09
Tanque agitado		7688	euros	7688,00	2,65
Bomba centrífuga	0,50	100	euros	500,00	0,17
Bomba de lodo	0,50	250	euros	750,00	0,26
Compresor	3,00	1500	euros	1500,00	0,52
Agitador	0,0024	500	euros	500,00	0,17
Soplante	1,00	1000	euros	2000,00	0,69
Total				290535,61	100

1.1.2. Capital inmovilizado

El capital inmovilizado se ha estimado a partir de los costes de los equipos principales, aplicando un factor.

Tabla 2. Capital inmovilizado de la planta

CAPITAL FIJO DE INVERSIÓN	COSTE TOTAL, €
Equipos principales (MEC)	290535,61
Costes de instalación (0,1.MEC)	29053,56
Control e instrumentación (0,15.MEC)	43580,34
Tuberías (0,2.MEC)	58107,12
Electricidad (0,1.MEC)	29053,56
Edificios (0,05.MEC)	14526,78
Mejora del terreno (0,1.MEC)	29053,56
Facilidades de servicio (0,1.MEC)	29053,56
Terreno	-
Ingeniería y supervisión (0,1.MEC)	29053,56
Gastos de construcción (0,1.∑(1-9))	52296,41
Honorarios del contratista (0,05.∑(1-9))	27600,88
Contingencias (0,06 del capital fijo de inversión)	37914,90
Total	669829,85

Se ha estimado una inversión inicial de 669.829,85 €

1.2. Capital circulante

El capital circulante incluye los costes de operación (materias primas, consumo energético, limpieza y mantenimiento...), así como los ingresos derivados de la producción. El beneficio del proceso se calcula como la diferencia entre los ingresos y los gastos, si éste es negativo la planta no es rentable.

Al tratarse de una planta de depuración a nivel secundario, no se han considerado ingresos

1.2.1. Costes de operación

- Materias primas**

Tabla 3. Coste anual de las materias primas

MATERIAS PRIMAS	CANTIDAD, ton/año	PRECIO, €/ton	COSTE, €/año	DISTRIBUCIÓN DE COSTES (%)
Actipol FB1	3	1200	3600	0,78
Na2CO3	890,4	350	311640	67,43
NaHCO3	445,2	330	146916	31,79
Total			462156	100

El coste anual de las materias primas estimado es 462.156 €.

- Consumo de energía**

Al consumo energético necesario de la planta hay que descontarle la energía procedente de la combustión del biogás en el motor del generador para autoabastecimiento (40 kW).

Tabla 4. Gasto energético

EQUIPO	POTENCIA, kW	COSTE, €/kWh	COSTE, €/año	DISTRIBUCIÓN DE COSTES, %
Agitador tanque de mezcla	0,0029	0,129	2,69	-0,01
Ruedas de paletas	5,544	0,129	5149,27	-19,05
Bomba B-1	0,111	0,129	103,10	-0,38
Bomba B-2	0,02	0,129	18,58	-0,07
Bomba B-3	0,005	0,129	4,64	-0,02
Bomba B-4	0,024	0,129	22,29	-0,08
Bomba B-5	0,106	0,129	98,45	-0,36
Bomba B-6	0,011	0,129	10,22	-0,04
Bomba B-7	0,002	0,129	1,86	-0,01
Bomba B-8	0,073	0,129	67,80	-0,25
Compresor	3	0,129	2786,40	-10,31
Soplante E-7	1	0,129	928,80	-3,44
Soplante E-8	1	0,129	928,80	-3,44
Generador (autoabastecimiento)	40	0,129	-37152,00	137,45
Total			-27029,10	100,00

- Labor**

Incluyen los costes de dirección, limpieza y mantenimiento y gestión de la planta.

Tabla 5. Costes anuales de labor

FUNCIÓN	UNIDADES	COSTE €/(unidad.año)	COSTE €/año	DISTRIBUCIÓN DE COSTES, %
Dirección	1	50000	50000	20,24
Ingeniero	1	42000	42000	17,00
Técnico de laboratorio	1	30000	30000	12,15
Equipo de manteniendo y gestión	5	25000	125000	50,61
Total			247000	100

Los costes totales de operación se calculan como la suma de los costes de materias primas, energía y labor.

Tabla 6. Coste anual total de operación

	COSTE €/año	DISTRIBUCIÓN DE COSTES, %
Materias primas	462156	65,17
Energía	0	0
Labor	247000	34,83
Total	709156	100

2. VIABILIDAD DEL PROYECTO

En el proceso de fangos activos, la aireación supone un 45-75 % del coste energético total de la planta de tratamiento; mientras que el tratamiento en reactores raceway mediante cultivo microalgal requiere menor consumo energético, puesto que las microalgas consumen CO₂, produciendo, a través de la fotosíntesis, el oxígeno necesario para las bacterias aerobias.

Se estima que 1 kg de DBO eliminado en un proceso de lodos activados requiere 1 kWh de electricidad para la aireación, lo cual produce 1 kg de CO₂ derivado de la quema de combustible fósil para la generación de energía.

Además, mediante el consiguiente tratamiento de la biomasa obtenida en un proceso de digestión anaerobia se obtiene biogás suficiente para abastecer energéticamente la planta.

Por lo tanto, el proceso desarrollado en este proyecto, tiene dos importantes ventajas respecto al tratamiento de fangos activos típico de una planta de tratamiento de aguas residuales:

- Importante ahorro en términos de coste energético, autoabastecimiento de la propia planta, así como menor requerimiento de aireación del cultivo.
- Mejora medioambiental, puesto que las microalgas fijan el CO₂ de los gases de escape del generador.

Almería, Junio de 2014.

Paula Soriano Molina.

3. BIBLIOGRAFÍA

- Max Stone Peters, Klaus D. Timmerhaus. Plant Design and economics for Chemical Engineers. Editorial: McGraw – Hill.
- Proyectos. Asignatura de 5º curso de Ingeniería Química (Plan 1999). Universidad de Almería.
- <http://www.matche.com/EquipCost/index.htm>.
- Shaikh A. Razzak, Mohammad M. Hossais, Rahima A. Lucky, Amarjeet S. Bassi, Hugo de Lasa. Integrated CO₂ capture, wastewater treatment and biofuel production by microalgae culturing.