

ANEXOS





A. BIOMASA

El término biomasa se refiere a cualquier tipo de materia orgánica, procedente de plantas o animales y a muchos productos y coproductos que provienen de ella. Entre estos productos destacamos los materiales vegetales como la leña, cultivos, residuos agrícolas, lodos procedentes del proceso de obtención de la pulpa de papel, estiércol, incluso porciones procedentes de residuos sólidos urbanos (alimentos, jardinería, papel), etc. También es susceptible de considerarse como biomasa a los lodos procedentes de estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR), y la denominada biomasa acuática, donde se incluirían algas.

La energía derivada de la biomasa se incluye dentro de las denominadas “energías renovables”, además es la fuente de energía renovable más antigua conocida: a lo largo de la historia los humanos la han utilizado desde el descubrimiento del fuego y presenta un alto contenido de energético. Como hemos indicado anteriormente, los recursos locales de biomasa además de abarcar los desechos agrícolas y forestales, los desperdicios sólidos municipales y algunos los desechos industriales, se consideran también biomasa los cultivos terrestres y acuáticos cultivados únicamente con el propósito de producir energía, conocidos como cultivos energéticos.

Desde el punto de vista técnico, podemos considerar una definición formal que es la que ha sido propuesta por diversos investigadores y gobiernos en todo el mundo. Esta definición describe biomasa como “toda la materia orgánica de origen no fósil que tenga un contenido energético químico. Se incluyen todas las formas de vegetación acuática o terrestre, y componentes orgánicos presentes en materiales residuales como residuos sólidos urbanos, residuos biológicos urbanos (aguas residuales) y residuos animales (estiércol), residuos forestales y agrícolas y algunos tipos de residuos industriales”

La biomasa es una atractiva fuente de energía por diversas razones. En primer lugar, es una fuente renovable de energía en la medida en que administremos los recursos vegetales apropiadamente. Además, presenta una distribución más homogénea sobre la superficie de la Tierra que los recursos energéticos finitos (petróleo, gas natural, carbón) y por otra parte, puede ser explotada utilizando tecnologías de capital menos intensivo. Una



característica muy importante es que provee la oportunidad de autosuficiencia en materia energética tanto local, como regional y nacional, en cualquier parte del mundo. Y, como ya hemos indicado anteriormente, la energía derivada de la biomasa no tiene el impacto ambiental negativo asociado a las fuentes energéticas no renovables, con lo que contribuyen a mitigar el “efecto invernadero” al que se considera responsable del cambio climático en el planeta, disminuyendo las emisiones de dióxido de carbono y evitando la deforestación.

La biomasa vegetal contiene la energía que ha sido almacenada mediante los procesos fotosintéticos, este contenido energético permanece cuando las plantas son procesadas para producir otros materiales tales como el papel y los desechos animales y aun en formas de energía que utilizamos a diario como es el caso de la electricidad y el combustible para transporte. La clave para acceder al contenido de energía de la biomasa es convertir la materia prima en una forma utilizable, lo que se consigue mediante la combustión o bien mediante procesos bioquímicos o termoquímicos.

Se considera que la utilización de biomasa no contribuye al aumento en las emisiones globales de CO₂, la razón radica en que en la fotosíntesis se consumen primariamente el dióxido de carbono y la luz solar como fuente de energía. Tras su utilización, se puede considerar este dióxido de carbono como el mismo que será producido en el empleo de la biomasa como recurso energético. Por tanto no se produce dióxido de carbono en el proceso global ya que se produce la misma cantidad que se ha empleado en el proceso de obtención de la biomasa. Aunque la fotosíntesis es un proceso de eficiencia muy baja si tenemos en cuenta el cómputo total de energía solar que recibe el planeta (<1% de la energía solar es convertida en biomasa), da lugar a infinidad de productos, que pueden ser desde utilizados desde formas simples de energía hasta alimentos.

A pesar de todo lo indicado anteriormente, tanto la utilización de la biomasa como recurso energético, como la consideración de ésta como energía renovable, están sujetas a ciertas consideraciones ambientales.



Cuadro A.1. Consideraciones ambientales referidas a la biomasa.

CONSIDERACIONES AMBIENTALES

Se considerará como recurso renovable únicamente si se repone la materia vegetal cultivada al mismo nivel al que son cosechadas.

Se deberán utilizar sistemas avanzados de alta eficiencia en la combustión de la biomasa, con el fin de disminuir las emisiones de hidrocarburos.

Los productos intermedios, como gases y líquidos derivados de la biomasa pueden ser peligrosos, inflamables o tóxicos. Éstos deben ser manipulados con la suficiente seguridad en sus aplicaciones industriales.

La ceniza, procedente de cualquier sistema de conversión, es generalmente reciclable, exceptuando el caso de que haya presencia de metales pesados, como en el caso de los RSU. En cualquier caso el tamaño de las partículas de ceniza hará necesaria la implementación de nuevas regulaciones ambientales.

A.1 PRODUCCIÓN DE BIOMASA

La fotosíntesis puede considerarse el primer nivel de la cadena de producción de biomasa. A grandes rasgos la función fotosintética consiste en la fijación del dióxido de carbono atmosférico, pasando por la materia orgánica, para desembocar finalmente en los hidrocarburos que la constituyen.

En el proceso de fijación del dióxido de carbono ambiental intervienen el agua, que se descompone en electrones, protones y oxígeno, la luz, que aporta la energía necesaria para la fijación de la molécula de dióxido de carbono, y los agentes de transferencia de electrones, que se denominan NADPH (Nicotinamida Adenina Dinucleótido) y ATP (Adenosín trifosfato).



Suponiendo el dióxido de carbono en fase gas el intercambio de entalpía es de 0,47 MJ/mol CO₂. Las máximas eficiencias alcanzadas varían entre 8-15% de la energía solar radiante. Además de la fotosintética, existen otras rutas de fijación del dióxido de carbono basadas en otros agentes fijadores del dióxido de carbono.

El sistema de fijación de dióxido de carbono de cada planta va a influir en la eficiencia energética del proceso. En la selección de la especie, se seleccionará la planta en función de dicha eficiencia energética. No obstante no va a ser el único criterio a tener en cuenta, también importará la disponibilidad de agua, nutrientes, insolación o las pérdidas bioquímicas de energía.

Como hemos indicado anteriormente, la procedencia de la biomasa puede ser muy diversa, pero este capítulo de producción se refiere a su obtención a partir de cultivos específicos, los denominados cultivos energéticos.

Los cultivos energéticos son aquellos desarrollados específicamente para la obtención posterior de combustible. Estos cultivos comprenden árboles de rápido crecimiento, arbustos y pastos tales como los álamos híbridos, los sauces y cierto tipo de pasto alto y delgado, conocido como "switchgrass".

Los cultivos energéticos pueden producirse en terrenos agrícolas no necesarios para alimentos, pasturas o fibras. Además, pueden plantarse cultivos energéticos a lo largo de las riberas de los ríos, alrededor de los lagos o en espacios entre establecimientos agrícolas, bosques naturales o áreas pantanosas, de manera que en adición permiten crear un hábitat para la fauna silvestre, renovar los suelos y mejorar la biodiversidad. Los árboles se pueden hacer crecer durante una década para luego ser talados con fines energéticos.

Otra ventaja de los cultivos energéticos es que ellos proveen de una diversidad de producción al sector agrícola, reduciendo los riesgos provenientes de la fluctuación de los mercados y estabilizando los ingresos del sector. La explotación agrícola-ganadera moderna típica generalmente produce sólo uno o dos productos de importancia comercial, tales como maíz, soja, leche o carne vacuna. A menudo, el ingreso neto operativo es vulnerable a las fluctuaciones de la demanda de mercado, costos de producción inesperados y el clima, entre otros factores. Por otra parte los cultivos energéticos son,



además, más resistentes a enfermedades y plagas y relativamente más baratos de producir.

Para la obtención de biomasa mediante su cultivo específico se precisa el crecimiento, cosecha y transporte de grandes cantidades de primeras materias hasta las plantas de transformación. Existen además, múltiples variables que deben ser consideradas para la selección de la especie o mezcla de especies que se va a cultivar, como son la fertilización, insolación, temperatura, precipitaciones, procedimiento de plantación, necesidades de agua y suelo, métodos de cosecha, resistencia a enfermedades, competencia con otros cultivos alimenticios, disponibilidad de terreno, posibilidad de cultivo de biomasa y alimentos alternativa o simultáneamente.

En el desarrollo de los cultivos energéticos, se debe tener en cuenta la compatibilidad de la especie cultivada con las condiciones ambientales y climáticas del entorno. Los factores climáticos más importantes son la insolación, las lluvias y la temperatura. Además de estos también juegan un papel importante la concentración de dióxido de carbono y la disponibilidad de nutrientes. Para los cultivos energéticos se han propuesto multitud de especies. Una de las propuestas más atractivas es la caña de azúcar, ya que la fibra residual resultante de la producción del azúcar, puede usarse en muchas industrias como combustible.

Desde el punto de vista de los cultivos energéticos distinguimos entre biomasa terrestre y acuática. Podemos dividir la biomasa terrestre en bosques (biomasa forestal), hierbas y plantas cultivadas. Dentro de la biomasa acuática distinguimos entre algas y plantas acuáticas.

Biomasa forestal. La técnica seguida se denomina agricultura intensiva de rotación corta (SRIC) y está basada en árboles de crecimiento rápido, como algodón o arbustos que se talan mecánicamente cada 3-6 años. Se cortan en trozos que pueden ser directamente quemados o transformados por alguno de los procesos que se estudiarán posteriormente.

Hierbas. Debido a que tradicionalmente se han utilizado para infinidad de aplicaciones, para evitar erosión de terrenos, mantener la capacidad productiva de terrenos en cultivos rotativos, con fines estéticos, etc., se han desarrollado numerosas técnicas para su cultivo, pero es en la década de los 80 cuando se empiezan a considerar como cultivos energéticos, para quemar directamente o mediante algún proceso de transformación



intermedio. Se han propuesto además como materia prima para gas de síntesis. La principal ventaja consiste en que en ciertas áreas, la pluviosidad permite su cosecha cada 3-4 semanas con rendimientos entre 18-24 t/ (hm².año).

Plantas cultivadas. Se han estudiado todo tipo de cultivos, entre los que destacan el girasol, o el kenaf (*Hibiscus cannabinus*), de la que se pueden obtener dos cosechas anuales. El girasol es el principal candidato por su rapidez de crecimiento y por su resistencia. Los rendimientos pueden llegar hasta 34t/hm².

Determinados estudios sugieren también la posibilidad de producir metano mediante técnicas de digestión anaerobia. La caña de azúcar se usa simultáneamente para producir azúcar y como cultivo energético. Las producciones medias son del orden de 50-60 t/hm²

En cuanto a la biomasa acuática, los estudios revelan que en los ecosistemas acuáticos existe mayor presencia de materia orgánica que en los ecosistemas terrestres, para los mismos climas. Por ello se considera que los ecosistemas acuáticos serían más apropiados para las aplicaciones de cultivos energéticos. Los tipos de biomasa acuática que se cultivan en la actualidad son los mencionados a continuación.

Algas. Las dividimos en dos grandes grupos, las algas unicelulares y pluricelulares. Las algas unicelulares, como la *Chlorella*, se cultivan en procesos continuos con altas eficiencias de fotosíntesis. Por las características de que presentan estas especies, los nutrientes suministrados pueden ser a base de ciertos residuos, como aguas residuales u otros residuos acuosos. Las algas pluricelulares también pueden considerarse recursos energéticos renovables. Su alto contenido en agua sugiere para su transformación tratamientos biológicos antes que termoquímicos.

Plantas acuáticas. Para los distintos tipos de plantas acuáticas que se utilizan en cultivos energéticos, las producciones oscilan entre 33-60 t/hm².

Como hemos indicado anteriormente además de la selección de la especie, se deben tener en cuenta la compatibilidad de la especie cultivada con las condiciones ambientales y climáticas del entorno. Los factores climáticos más importantes son la insolación, las precipitaciones, la temperatura, concentración de CO₂ y la presencia de nutrientes. Todos estos factores se presentan a continuación.



Insolación. La incidencia de radiación solar es imprescindible en el inicio del proceso de formación de la biomasa. Dicha incidencia varía mucho según la zona terrestre.

Precipitaciones. En general la biomasa terrestre puede tener limitaciones respecto al agua, no así la acuática. Para el buen desarrollo de los cultivos se necesitan alrededor de 50 a 76 cm (cm^3/cm^2) de lluvia anual, aunque algunos cultivos energéticos, como el trigo necesitan mucha menos agua. No obstante existen otros factores que pueden hacer un terreno más o menos apropiado, como son la tasa de evaporación o de infiltraciones. A pesar de existir baja pluviosidad, el terreno puede ser apropiado y podemos recurrir a la irrigación.

Temperatura. El margen de temperaturas idóneo para el cultivo de biomasa está entre 15,6 y 32,3 °C, por lo que ciertas épocas del año serán más adecuadas para el cultivo de la biomasa que otras. Sin embargo, en ciertos climas, como el Mediterráneo, se tienen normalmente estas temperaturas durante casi todo el año, por lo tanto también depende del clima en general.

Concentración de Dióxido de Carbono. Los ambientes con elevadas concentraciones de dióxido de carbono favorecen las producciones de los cultivos, por lo que se podrían aumentar los rendimientos de producción de biomasa en ambientes ricos en dióxido de carbono. En el caso de biomasa acuática, este factor cobra mayor importancia, de hecho es uno de los factores limitantes de la producción en este tipo de cultivos energéticos. El enriquecimiento del agua con dióxido de carbono se presenta como una alternativa interesante.

Nutrientes. Además de los nutrientes básicos (carbono, oxígeno e hidrógeno), los principales son nitrógeno, fósforo y potasio. Otros nutrientes secundarios, aunque no menos importantes, son azufre, sodio, cobre, magnesio, calcio, manganeso, cobalto, zinc, y molibdeno. En el caso de biomasa terrestre, estos elementos se suministran a través del terreno. En el caso de biomasa acuática, las plantas cultivadas toman estos nutrientes del agua marina.

En cuanto a la fertilización, una planta contiene un 2% wt N, 1 %wt K y 0.5% P, así que para una plantación de 20 t/hm² año se debe suministrar anualmente 400 kg N, 200 kg K y 100 kg P. Esto ilustra la importancia de este proceso.



Debe tenerse en cuenta que en la fabricación de los fertilizantes, especialmente los que presentan nitrógeno, intervienen procesos de gran consumo energético, para los que se suelen utilizar recursos energéticos de origen fósil. Así que se deberá hacer un análisis energético cuidadoso para estudiar los costes energéticos del proceso global, que se verán penalizados por estos procesos intermedios.

A.2 COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA BIOMASA. PROPIEDADES QUÍMICAS

La composición química de la varía según el tipo de biomasa y la procedencia de ésta. Aunque no podemos hablar de una composición genérica de esta, en general se puede considerar que el contenido másico en carbono está en torno al 44 %.

Teniendo en cuenta que la energía solar participa en la producción de la biomasa a través de la fotosíntesis, la biomasa se produce a partir de la energía solar según la siguiente ecuación simplificada:



El hidrocarburo genérico (CH_2O) representa el bloque primario del producto orgánico. Como hemos indicado anteriormente, para cada caso particular variarán las proporciones de estos tres elementos mayoritarios. En el caso de la madera, por ejemplo, la lignocelulosa responde a la fórmula $\text{CH}_{1,4}\text{O}_{0,6}$.

En lo referente a la composición molecular, también es muy variable. En general la celulosa suele suponer hasta el 50% del peso en base seca, aunque no siempre es el componente mayoritario. Las proteínas suelen suponer una fracción mucho menor y en ellas el contenido en nitrógeno es del 16%. También se puede destacar que la presencia de azufre es cuantitativamente baja. La Tabla A.1 muestra la composición típica de la biomasa y de algunos residuos que podemos comparar con la del carbón.

En cuanto a las propiedades químicas, nos referimos al poder calorífico el cual nos permite evaluar el valor energético de la biomasa, nos referimos por tanto a la energía desprendida en la combustión de esta.



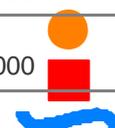
En cuanto a las necesidades energéticas que se podrían cubrir utilizando recursos no fósiles, a partir de diferentes formas de biomasa, teniendo en cuenta que la tasa de insolación media en la superficie terrestre es de 220 W/m^2 , y que el consumo mundial de energía en un año ($321 \times 10^{18} \text{ J}$), el aprovechamiento energético supone tan solo el 0.01% del la insolación total en la superficie terrestre.

Tabla A.1 Composición típica de la biomasa, residuos y carbón.

Análisis	Celulosa Pura	Madera de Pino	Residuos Urbanos	Lodos de Aguas Residuales	Carbón Bituminoso Illinois
Elemental wt%					
C	44.44	51.8	41.2	43.75	69.0
H	6.22	6.3	5.5	6.24	5.4
O	49.34	41.3	38.7	19.35	14.3
N		0.1	0.5	3.16	1.6
S		0.0	0.2	0.97	1.0
Carbono (base seca sin cenizas)	44.44	52.1	17.9	59.5	75.6
Inmediato wt%					
Humedad		5-50	18.4	90-97	7.3
Volátiles		99.5	86.1	73.47	91.3
Cenizas		0.5	13.19	26.53	8.7

Tabla A.3. Áreas potenciales necesarias para la sustitución potencial de gas natural por cultivos.

DEMANDA DE BIOMASA %	ÁREA MEDIA REQUERIDA, Km ²		
	25 t/(hm ² .año)	50 t/(hm ² .año)	100 t/(hm ² .año)
1.58	20.400	10.200	5.100
10	129.000	64.500	32.300
50	645.500	323.000	161.000
100	1.291.000	645.500	323.000



A.3 PROCESOS DE CONVERSIÓN DE LA BIOMASA

La estimación de la cantidad y distribución del carbono en la superficie terrestre es un problema prácticamente irresoluble. No obstante, existen estimaciones de la cantidad y disponibilidad de la biomasa existente, lo que se ilustra en la Tabla A.4.

Tabla A.4.

Ecosistema	Área, 10 ⁶	Producción neta de carbón		Carbón en biomasa permanente	
		t/(hm ² año)	10 ⁹ t/año	t/(hm ²)	10 ⁹ t
Selva tropical	17	9.90	16.83	202.5	344
Bosque boreal	12	3.6	4.32	90	108
Bosque estacional	7.5	7.2	5.40	157.5	118
Bosque de hoja caduca	7.0	5.4	3.78	135.0	95
Bosque de hoja perenne	5.0	5.85	2.93	157.5	79
Desierto de rocas, arena o hielo	24.0	0.01	0.02	0.1	0.2
Desierto y semidesierto	18.0	0.41	0.74	3.2	5.8
Sabana	15.0	4.05	6.08	18.0	27.0
Tierra cultivada	14.0	2.93	4.10	4.5	6.3
Pasto	9.0	2.70	2.43	7.2	6.5
Matorrales	8.5	3.15	2.68	27.0	23.0
Tundra y zonas alpinas	8.0	0.63	0.50	2.7	2.2



Pantanos y ciénagas	2.0	13.50	2.70	67.5	14
Lagos	2.0	1.80	0.36	0.1	0.02
Total continental	149.5		52.87		829
Océano abierto	332.0	0.56	18.59	0.1	3.3
Plataforma continental	36.6	1.62	4.31	0.004	0.1
Estuarios	1.4	6.75	0.95	4.5	0.6
Lechos de algas y acantilados	0.6	11.25	.068	9.0	0.5
Zona intermareal	0.4	2.25	0.09	0.9	0.04
Total marino	361.0		24.62		4.5
<i>Total absoluto</i>	510.0		77.49		883.5

La transformación de la biomasa en combustibles comprende una serie de procesos cuyo resultado y características condicionarán el tipo de biomasa a emplear (residuos, cultivos energéticos) así como sus características y tratamientos previos necesarios. Los biocombustibles resultantes de dichos procesos se presentan en estado sólido, líquido o gaseoso.

El tipo de material de partida determinará la idoneidad de un determinado proceso en función de multitud de factores. La humedad es uno de los factores fundamentales, así, unas algas con casi el 95% de humedad no podrán ser llevadas a un proceso térmico de gasificación sin previo secado, sin embargo puede ser transformada directamente mediante un proceso de digestión anaerobia.

Los procesos de transformación de la biomasa se pueden clasificar en cuatro grandes grupos: físicos, químicos, térmicos y biológicos. El Cuadro A.2 presenta las distintas alternativas de proceso desde el punto de vista de la conversión de la biomasa.



Cuadro A.2. Posibles procesos de conversión de la biomasa y productos.

PROCESOS DE CONVERSIÓN	SEPARACIÓN, COMBUSTIÓN, PIROLISIS, HIDROGENACIÓN, FERMENTACIÓN ANAEROBIA, FERMENTACIÓN AEROBIA, OXIDACIÓN PARCIAL, STEAM REFÓRMING, BIOFOTÓLISIS, HIDRÓLISIS QUÍMICA, HIDRÓLISIS ENZIMÁTICA, PROCESOS NATURALES.
PRODUCTOS	ENERGÍA (TÉRMICA, ELÉCTRICA, VAPOR), COMBUSTIBLES LÍQUIDOS (METANOL, ETANOL, HIDROCARBUROS PESADOS, ACEITES), SÓLIDOS, GASEOSOS (METANO, HIDRÓGENO, HIDROCARBUROS LIGEROS, OTROS), COMPUESTOS QUÍMICOS.

A.3.1 PROCESOS FÍSICOS

Comprende todos aquellos procesos orientados a transformar las propiedades físicas de las materias primas tales como el tamaño, contenido en humedad, manejabilidad, etc. También están presentes en tratamientos intermedios. Las más importantes se describen a continuación.

1. *Separación.* Para el caso de derivados agrícolas, consiste en la separación de los productos alimenticios y de los residuos que constituirán la biomasa para su aprovechamiento energético. En el caso de residuos urbanos hay que separar la fracción combustible de la fracción reciclable compuesta por metales y vidrio. Para la separación se usan los procesos habituales de separación: tamices, separación magnética, filtración, destilación, cristalización o extracción.
2. *Reducción de tamaño.* Es un paso previo donde se adapta el tamaño de partícula. Es un proceso importante y se persiguen diferentes objetivos: posterior transporte neumático, una separación más eficaz de los componentes, aumentar la reactividad de las partículas o trabajar en lecho en lecho fluido. Cuando se prepara la materia prima para introducirla en los distintos procesos, se obtiene lo que se denomina fuel-pellets, por ello es preciso ajustar el tamaño de la biomasa. Los equipos más comunes para la reducción de tamaño son molinos de martillos, que pueden ser verticales u horizontales.



3. *Secado*. Este proceso consiste en la eliminación de la fracción de humedad presente en la biomasa mediante evaporación. El proceso más barato de secado es al aire libre. En el caso de que la materia prima no fuese lo suficientemente estable se precisa el uso de otros sistemas más rápidos, como son los spray dryers, tanques de secado u hornos de convección.
4. *Manufactura*. Se refiere a procesos de fabricación de fuel-pellets, a partir de madera o madera mezclada con residuos agrícolas. Los pellets se fabrican generalmente por extrusión. Con esto se consigue la uniformidad de combustible de un combustible sólido, inicialmente heterogéneo.

A.3.2 PROCESOS QUÍMICOS

Se consideran procesos químicos aquellos procesos similares a otros procesos químicos convencionales. Tradicionalmente se ha utilizado la pirolisis en continuo de madera, aunque también se han utilizado otros procesos como la destilación destructiva de combustibles fósiles para la producción de compuestos químicos orgánicos.

Actualmente, se puede decir que la producción de productos químicos a partir de biomasa no puede competir con la generación de los mismos productos químicos a partir de materias primas fósiles, aunque existen casos en los que la alternativa a partir de la biomasa es realmente más atractiva que la tradicional, a partir de las materias primas fósiles. El valor de la alternativa escogida en un determinado momento va a depender del precio en ese momento del petróleo y del gas natural.

Los productos que se pueden obtener a partir de la pirólisis en continuo de la madera son, entre otros gases, char, acetato de etilo, aceite de cresota, etanol, formato de etilo, acetato de metilo, metiletilcetona y otras cetonas, alcoholes superiores, alquitranes solubles, asfaltos, etc.

A.3.3 PROCESOS TÉRMICOS

Los principales procesos térmicos son la combustión, la pirolisis y la gasificación, que se puede interpretar como una combinación de combustión y pirolisis con un reactivo adicional que puede ser vapor de agua, hidrógeno o dióxido de carbono. Mediante pirolisis y gasificación se pueden producir multitud de combustibles sólidos, líquidos y gaseosos.



Los procesos térmicos de obtención directa de energía o combustibles a partir de biomasa y residuos, implican normalmente reacciones químicas irreversibles, además de requerir calor y transferencia de energía química a los reactivos o a los productos. A continuación describiremos brevemente estos procesos.

1. *Combustión.* El proceso de combustión consiste en una reacción química súbita en presencia de oxígeno, que normalmente se suministra alimentando aire al proceso, siendo los productos de la reacción dióxido de carbono, agua y calor. Normalmente se queman residuos agrícolas, como el residuo de la producción de azúcar a partir de la caña, y también se pueden utilizar residuos sólidos urbanos, incluso basuras. El calor generado en la combustión se aprovecha para producir vapor que normalmente generará electricidad en una turbina de vapor, aunque éste calor se puede aprovechar también para secado.

Existen distintos modelos de combustión y los diferentes equipos suelen tener en común el hogar, que es donde tiene lugar la combustión, y diferenciándose principalmente en los quemadores, en la cámara de combustión, la temperatura de operación y el mecanismo de transferencia de calor. A partir de la década de los 80 se han impuesto los incineradores de pared de agua. El aire debe ser introducido en exceso para limitar la temperatura de pared. En este tipo de incineradores en el hogar se disponen bancos de tubos por los que circula agua, produciéndose vapor de agua.

Otro modelo de combustión es el de lecho fluido, donde el aire es dispersado a través de un plato con múltiples orificios, y que mantiene en suspensión un lecho con partículas de combustible, mezclado con arena o cualquier otro inerte. Con este sistema se produce la combustión a unos 650°C, con lo que se consiguen mejores eficiencias térmicas y calidad de las emisiones (disminuyen las emisiones de NO_x).

También existen incineradores denominados de escoria fundida, en los que la combustión se lleva a cabo a unos 1600 °C, y es la ceniza fundida el medio de transporte del calor.

2. *Pirolisis.* Este proceso consiste fundamentalmente en la descomposición de la materia orgánica en ausencia de oxígeno. Ejemplos son la carbonización o destilación destructiva. Para biomasa procedente de cultivos o de residuos, la pirolisis tiene lugar normalmente entre 300-375°C. Los productos de la reacción son char (residuo



carbonizado), agua, gases y líquidos en distintas cantidades, dependiendo de la composición de la alimentación, del calor aplicado, de la temperatura y del tiempo de residencia en la cámara de pirolisis. La previsión de la composición de los productos de la pirolisis es muy compleja, y las selectividades a cada producto en concreto suelen ser bajas.

El gas producto de la pirolisis es de bajo valor energético, 3.9-15.7 MJ/m³. Está formado mayoritariamente por dióxido de carbono, metano, hidrógeno, etano, etileno y cantidades minoritarias de hidrocarburos superiores y vapor de agua. El líquido contiene una mezcla compleja de compuestos de peso molecular muy inferior al peso molecular de la corriente de alimentación. La separación de los productos constituye un problema importante.

La reacción puede ser endotérmica o exotérmica, dependiendo de la temperatura a la que se lleve a cabo la pirolisis. En cuanto a la sensibilidad con respecto a este parámetro, en aumento de la temperatura de 500°C a 900°C, produce un aumento de la producción de la fracción gaseosa.

En cuanto a los equipos, el diseño de los reactores de pirolisis es muy variable, existiendo diversos tipos como lechos fijos, lechos fluidos, lechos de arrastre o estacionarios. Uno de los posibles mecanismos consiste en suministrar el calor a la reacción a través de un medio de transmisión (arena u otro sólido inorgánico inerte), que es calentado mediante la combustión de parte de la misma biomasa en otro equipo paralelo.

El gas obtenido directamente de la pirolisis de la celulosa tiene una composición aproximada de 37% molar de hidrógeno, 35% molar de monóxido de carbono, 16% molar de dióxido de carbono y 11% molar de metano. El poder calorífico superior (PCS) será de 13.5 MJ/m³ aproximadamente.

3. *Procesos térmicos combinados.* Existen multitud de procesos de conversión que pueden considerarse como oxidaciones parciales de la biomasa, entre ellos destaca la gasificación. En estos procesos se alimenta oxígeno puro, pero en menor cantidad que el estequiométricamente necesario para la oxidación completa la biomasa introducida. Los gases generados son similares a los generados en la pirolisis, pero con mayores concentraciones de monóxido de carbono e hidrógeno.



Las reacciones que tienen lugar se distribuyen en distintas zonas del reactor. Una composición típica de un gas de gasificación puede ser 40% molar monóxido de carbono, 20% molar hidrógeno, 23% molar de dióxido de carbono, 5% molar metano y 5% molar C_2 . El PCS de un gas con esta composición es de unos 14.5 MJ/m^3 aproximadamente.

La gasificación con vapor (steam gasification) consiste en alimentar los equipos de gasificación con una mezcla vapor de agua y el oxígeno, con el fin de favorecer la reacción endotérmica del vapor de agua con el carbón para formar monóxido de carbono e hidrógeno. El gas así obtenido tiene un poder calorífico del orden de 5.9 MJ/m^3 , y los rendimientos son del orden del 70% del valor energético de la alimentación.

Otra opción consiste en alimentar dióxido de carbono, para desplazar el equilibrio hacia la producción de monóxido de carbono, generándose mayor cantidad de este a la salida.

4. *Hidrogenación.* El proceso de hidrogenación consiste en hacer reaccionar hidrógeno con la alimentación o con productos intermedios, a temperaturas y presiones altas, para producir combustibles de sustitución. Este hidrógeno puede obtenerse a partir de la alimentación, de productos intermedios, a través de gasificación, o de una fuente independiente.

En teoría se podrían obtener combustibles oxigenados de cualquier nivel a base de oxigenar en primer lugar metano, resultando metanol, y partir este tras una nueva hidrogenación, se obtienen alcoholes superiores, ésteres aldehídos o cualquier otro hidrocarburo oxigenado.

Para materiales celulósicos, que contienen grupos hidroxílicos, las reacciones consistirán en la dehidroxilación y polimerización a través de hidrogenolisis, que se realiza a través de una transición de sólido a líquido y gas.

La mayor parte de los esfuerzos llevados a cabo en la investigación en hidrogenación han sido en la hidrogasificación, que consiste en una gasificación en presencia de hidrógeno para desplazar la producción hacia el metano.



Los estudios realizados en gasificación en presencia de vapor de agua e hidrógeno muestran que los rendimientos en presencia de vapor son mejores, del orden del 30-40% para los mismos los mismos tiempos de residencia. También influyen en las producciones y en las concentraciones de los productos las diversas condiciones de reacción, como los catalizadores empleados, la concentración de la alimentación o las condiciones de operación en el reactor.

Otra de las reacciones de hidrogenación es la hidrolíquificación de biomasa o residuos, que consiste en un tratamiento de hidrogenación de astillas de madera con un catalizador de níquel, entre temperaturas comprendidas entre 340-350 °C y a una presión de 10.132 kPa. Los productos de la reacción consisten en una mezcla de aceites, metano e hidrocarburos gaseosos. El aceite presenta un poder calorífico de unos 37.2 MJ/m³ aproximadamente. Tras someterlo a una destilación, una fracción importante ebulliciona a la misma temperatura que el gasoil, siendo además totalmente miscible con éste.

A.3.4 PROCESOS BIOLÓGICOS

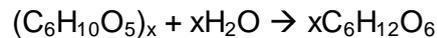
Los procesos biológicos son aquellos que involucran organismos vivos, concretamente microorganismos, en la transformación. Dentro de estos, el proceso de mayor importancia es la fermentación. Éste es un proceso biológico en el que las materias primas se precisan en solución acuosa, lo que se denomina slurry, en este medio se produce la interacción con las colonias de microorganismos, y en dónde tiene lugar la transformación en productos. Los dos procesos más comunes de fermentación se utilizan para la producción de metano y etanol.

También se consideran como procesos bioquímicos los que ocurren en la biomasa de forma espontánea.

1. *Digestión anaerobia.* Este proceso a sido ampliamente utilizado en la estabilización de lodos procedentes de aguas residuales municipales. Consiste en la producción de metano a partir de slurrys de biomasa, a través de la digestión anaerobia, esto es en ausencia de oxígeno, realizada por una población de bacterias. Suponiendo la biomasa como celulosa, la sucesión de reacciones que ocurre es ls mostrada a continuación:



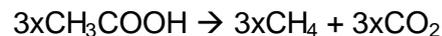
? Hidrólisis:



? Acidificación:



? Metanación:



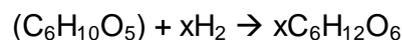
Las temperaturas de los digestores oscilan entre 35°C y 55°C y el pH se mantiene entre 6.8 y 7.2. El gas producto está compuesto fundamentalmente por metano y dióxido de carbono. El poder calorífico en condiciones normales, oscila entre 19,6-29,4 MJ/m³.

El rendimiento térmico del proceso suele estar entre el 30-60%, sin tener en cuenta el tratamiento previo. Las productividades de metano rondan lo 30 Nm³/kg de sólidos con volátiles alimentados al digestor.

2. *Fermentación alcohólica.* Consiste en la producción de alcohol etílico a partir de una fermentación anaerobia de la biomasa procedente de plantas con alto contenido en almidón, como el maíz, o los azúcares. En la práctica se puede llevar a cabo el proceso a partir de cualquier tipo de biomasa, como la madera o residuos urbanos con altos contenidos en celulosa, transformándola primeramente en azúcar a través de un proceso de hidrólisis catalizada con ácidos o enzimas apropiados.

Sin tener en cuenta este proceso previo de transformación, las reacciones que tienen lugar son las mostradas a continuación:

■ Hidrólisis:



■ Fermentación:



El rendimiento másico respecto al alcohol suele ser del 40-50% wt de la fracción fermentable de la alimentación.

La eficiencia térmica del proceso de fermentación en sí es alta, pero la eficiencia del proceso en global se ve seriamente penalizado por la presencia de numerosos pasos en los que se consume energía

3. *Biofotólisis*. El proceso de biofotólisis se basa en la descomposición del agua en hidrógeno y oxígeno, aprovechando la energía radiante de la luz solar. Los métodos que se están desarrollando se basan en membranas que contienen catalizadores bioquímicos que permiten la hidrólisis y simulan el proceso fotosintético. Se han llegado a conseguir rendimientos de hasta un 3%. Esta técnica de producción de hidrógeno es muy atractiva, pero el nivel de desarrollo es aún incipiente.
4. *Procesos naturales*. La producción de hidrocarburos en cultivos terrestres es tradicionalmente conocida y está muy extendida. El caso más común es el del caucho, donde se genera el 1-cis 4-poli-isopreno. El peso molecular de la goma natural está entre 500.000 y 2.000.0000. Otro ejemplo es el de la resina de pino. También se ha propuesto la producción a partir de cultivos, de aceites e hidrocarburos de peso molecular inferior al de la goma natural. En la separación de componentes se lleva a cabo una extracción con cetona y benceno, donde la cetona capta los polifenoles, glicerinas y esteroides, y el benceno los hidrocarburos.

Otra fuente para la producción de aceites es la utilización de semillas oleaginosas y microalgas. En algunos casos se pueden producir incluso aceites parafínicos con características similares a los combustibles usados en los motores diesel. El cracking catalítico de estos aceites vegetales sobre zeolitas selectivas (tamices moleculares), puede dar lugar a gasolinas ricas en aromáticos. Otra opción es producir aditivos para combustibles diesel o gasolinas de alta calidad mediante cracking catalítico.



En cuanto a la generación de residuos en todos estos procesos de conversión descritos, los residuos sólidos y líquidos deben ser tratados e incinerados, o bien depositados en vertedero. Con respecto al coste global del proceso, la necesidad de cumplir con las exigencias ambientales puede condicionar mucho el coste final. Para el caso del aprovechamiento de residuos como biomasa, el coste de la materia prima puede imputarse como negativo.



B. ABSORCIÓN DE GASES

La absorción, aplicada a la depuración de gases, comprende una serie de procesos, que se diferencian dependiendo del tipo de interacción entre el absorbente y el componente a eliminar. Distinguimos entre absorción física y absorción química, y dentro de esta última, con reacción reversible o irreversible.

En la absorción física, el componente que va a ser absorbido es más soluble en el líquido absorbente que los otros componentes de la fase gas, y no reacciona químicamente con este. La concentración de equilibrio del absorbato en la fase líquida es fuertemente dependiente de su presión parcial en la fase gas.

Absorción con reacción química. Muchos procesos comerciales de absorción de gases implican sistemas en cuya fase líquida tienen lugar reacciones químicas. En general, dichas reacciones implican un aumento de la velocidad de absorción y por tanto de la capacidad de la fase líquida por disolver soluto, comparándolos con los sistemas de absorción física.

Dentro de la absorción química, distinguimos:

Absorción química con reacción reversible. Este tipo de absorción involucra la reacción química entre el componente gaseoso y un componente de la fase líquida para formar un compuesto en una reacción reversible. Dicho compuesto presenta una presión de vapor con respecto al absorbato que aumenta con la temperatura, lo que permite la operación de desorción. Como ejemplo tenemos la reacción entre el CO_2 y las soluciones de aminas.

Absorción química con reacción irreversible. En este tipo de absorción el componente que se absorbe reacciona químicamente con un componente de la fase líquida para formar un compuesto que generalmente no puede descomponerse para liberar el absorbato. Un ejemplo de este tipo de procesos es la absorción de SH_2 en soluciones de hierro para formar un slurry de partículas de sulfuro elemental. El análisis de estos sistemas que involucran reacciones irreversibles se simplifica con respecto al anterior si tenemos en cuenta la ausencia de una presión de vapor de equilibrio del absorbato respecto a la



solución, pero también puede ser complicado el estudio en el caso de que la reacción no sea instantánea o se desarrolle en varias etapas.

B.1 CONSIDERACIONES DE DISEÑO

El diseño de equipos de absorción consta de una serie de pasos:

- Selección del tipo de contacto (isocorriente, contracorriente, flujo cruzado) y el tipo de columna (relleno, platos) basado en los requerimientos del proceso y las expectativas de servicio.
- Cálculo de los balances de materia y energía.
- Estimación de la altura requerida de la columna (número de platos o altura de relleno) basado en el análisis de los procesos de transferencia de masa.
- Cálculo del diámetro de la columna requerido, así como los parámetros del tipo de contacto, basados en los caudales de líquido y gas a tratar y consideraciones hidrodinámicas.
- Diseño mecánico de los equipos.

Los datos necesarios en el diseño de absorbedores son principalmente físicos, termodinámicos, propiedades de transporte de gases en líquidos, datos de equilibrio líquido-vapor, y, en el caso de que se vean involucradas reacciones químicas, datos de la cinética o conversión. Además se precisan datos de configuración del relleno o de los platos.

Para el diseño de absorbedores o strippers, se realizan cálculos de balance simultáneo de materia y energía etapa por etapa, generalmente asistidos por ordenador. Estos cálculos permitirán la estimación del número de etapas teóricas, y, consecuentemente el número de platos o altura de relleno tras considerar la eficiencia de plato. Los programas disponibles actualmente permiten modelos no basados en el equilibrio (etapas de equilibrio), sino que consideran las etapas reales (stages), realizando balances de materia y energía para cada fase en cada etapa real, basados en las velocidades de transferencia de masa y energía en dichas etapas.



B.2 SELECCIÓN DEL TIPO DE CONTACTO

La función principal del equipo de contacto es proporcionar una superficie de contacto gas- líquido necesaria y bajo condiciones que favorezcan la transferencia de masa. Estos equipos normalmente emplean al menos, alguno de los siguientes mecanismos:

- (1) Dividir el gas en pequeñas burbujas en la fase líquida.
- (2) Diseminar el líquido en pequeñas películas que fluyen a través de la fase gas.
- (3) Goteo de la fase líquida en la fase gas.

El tipo de contacto mas empleado es flujo en contracorriente en columna. Distinguimos a su vez entre columnas de contacto por etapas, que emplean cálculos separados para gas y líquido en cada etapa de contacto individual, columna de contacto diferencial, que utilizan zonas de contacto continuo gas-líquido, y columnas de pseudoequilibrio, que combinan los contactos diferenciales de ambos flujos con las etapas individuales.

En el Cuadro B.1 podemos ver los principales equipamientos de transferencia de materia clasificados según su idoneidad y eficacia en la absorción, en orden decreciente.



Cuadro B.1. Principales medios de contacto en columna

TIPO DE CONTACTO
1. Grid-structured parking
2. Baffle trays (shed trays, disc-and-donut trays, side-to-side trays...)
3. Dual-flow trays
4. Tab trays (fixed tabs, jet tabs...)
5. Sieve trays (with downcomers)
6. Bubble-cab trays
7. 3 rd generation random packings (Glitsch CMR)
8. 2 nd generation random packings (smooth-surface structured packings)
9. Aggressive-surface structured packings
10. 1 st generation random packings (Raschig rings...)
11. Complex trays (film, valve trays,...)
12. Wire packings

COLUMNAS DE PLATOS

Las columnas de platos o bandejas, son particularmente apropiadas para el caso de grandes instalaciones, que manejan líquidos no corrosivos, sin sólidos o partículas, no espumantes, y en un rango de caudal medio-bajo. Suelen también emplearse para los casos en los que es necesario refrigeraciones intermedias en la columna.

De entre las opciones señaladas en el cuadro anterior, las columnas con campanas de burbujeo, se utilizan fundamentalmente cuando se requieren bajas velocidades de flujo de



líquido, con considerables tiempos de contacto, al igual que ocurre en el caso de del relleno estructurado. La mayor parte de los diseños de las bandejas (válvulas, baffles) se han desarrollado para salvar las limitaciones que presentan diseños más simples como los platos perforados o las campanas de burbujeo. De entre ellos, los de válvulas han sido especialmente populares por permitir operaciones dentro de un amplio rango de caudales y velocidades de flujo.

Tanto las válvulas, como los platos perforados o las campanas operan en flujo cruzado, dónde el líquido circula horizontalmente, mientras que el gas asciende verticalmente por las aberturas de las bandejas. Sin embargo son posibles otros contactos, generalmente en contracorriente, y, a pesar de presentar eficiencias razonables, son sistemas poco flexibles y las características de operación dependen fuertemente de las velocidades del flujo.

COLUMNAS DE RELLEÑO

Actualmente las columnas de relleno están ganando terreno ya que el desarrollo y la mejora de los rellenos permiten su utilización en un amplio rango de aplicaciones. El relleno más común es al azar. Los rellenos estructurados originariamente se desarrollaron para aplicaciones a pequeña escala para columnas de destilación en separaciones complejas. Actualmente, su utilización se ha extendido, y se emplean fundamentalmente en casos en los que se precisan altas eficiencias de transferencia de materia y bajas pérdidas de carga.

En cuanto al flujo, generalmente el contacto suele ser en contracorriente, aunque también existen configuraciones que permiten flujo cruzado o bien en isocorriente.

En comparación con las columnas de platos, suelen preferirse cuando se trata de instalaciones pequeñas, sustancias corrosivas, líquidos con tendencia a formar espumas, grandes ratios gas-líquido y aplicaciones en las que se precisan bajas pérdidas de carga.

B.3 EFECTO DE LAS REACCIONES QUÍMICAS

La reacción química entre el soluto y un componente de la fase líquida, incrementa el coeficiente de absorción de la película líquida, lo que provoca un aumento del coeficiente



de global de absorción en columnas de relleno y de la eficiencia de plato en las columnas de bandeja.

En el caso de reacciones lentas, como por ejemplo la que tiene lugar entre el dióxido de carbono y el agua, las moléculas disueltas se desplazan considerablemente en el seno del líquido antes de que tenga lugar la reacción, con lo que la velocidad de absorción global no se incrementa considerablemente por la ocurrencia de la reacción química. En este tipo de situaciones, la resistencia de la película líquida es el factor controlante y puede asumirse que el líquido en la interfase se encuentra en equilibrio con la fase gas, por lo que la velocidad de transferencia de materia está gobernada por el gradiente de concentración de componente entre la interfase y el seno de la fase líquida.

Por otra parte, en el caso de reacciones muy rápidas o instantáneas, como es el caso de las que tienen lugar entre gases ácidos y amoníaco, las moléculas disueltas prácticamente no se desplazan antes de que tenga lugar la reacción. El emplazamiento de la zona de reacción y el valor del coeficiente de absorción dependen principalmente de la velocidad de difusión de los reactivos y productos hacia y desde la zona de reacción y de la concentración de reactante en el seno del líquido. En comparación con la absorción física, la distancia que el soluto recorre por difusión antes de reaccionar es considerablemente más corta, lo que se observa un alto coeficiente de película de la fase líquida y como consecuencia, la resistencia de la película gaseosa se convierte en el factor controlante.

Esto condiciona en gran medida el tipo de contacto necesario ya que dependiendo del tipo de absorción (física, química) o de la velocidad de reacción en este último caso, tendremos que centrar nuestros esfuerzos en reducir las resistencias de las fases dependiendo de las necesidades de cada caso.

B.4 ALTURA DE LA TORRE

El cálculo de la altura de las torres de absorción depende del tipo de equipo de contacto. Para el caso de columnas de relleno, tenemos que tener en cuenta el concepto de coeficiente de absorción basado en la teoría de la doble película propuesta originariamente por Whitman en 1923. Para el cálculo se consideran:

- Balances de masa y energía en la fase vapor y líquido.



- Balance de masa y energía en la interfase.
- Equilibrio vapor-líquido en la interfase.
- Correlaciones para estimar los coeficientes de transferencia de masa y energía y el área interfacial.
- Reacciones en el seno del líquido.

Para calcular los coeficientes de transferencia de masa suele utilizarse la correlación de Bravo, Rocha y Fair para rellenos estructurados. Para el caso de los coeficientes de transferencia de energía, se suele emplear la analogía de Chilton-Colburn (King, 1980).

Los cálculos se basan en el concepto de "altura de la unidad de transferencia" (HTU), propuesta por Chilton-Colburn en 1935, aunque generalmente se emplea una aproximación conocida como "altura equivalente a una etapa teórica" (HETP), en la que se calcularía la altura de relleno que sería teóricamente equivalente a un número de platos teóricos, teoría que suele emplearse en el caso de torres de platos.

En el caso de columnas de platos, el concepto empleado para el diseño es conocido como "cálculo del número de platos teóricos", Colburn (1939). Este concepto se basa en asumir que, como consecuencia de un contacto perfecto teórico, el líquido y el gas que abandonan una etapa, están en equilibrio. A pesar de que esta suposición no representa exactamente lo que ocurre en un plato o etapa real, simplifica enormemente el proceso, y la situación real puede resolverse asumiendo una "eficiencia de plato" conveniente.

Para la estimación de la eficiencia de plato, además del tipo de contacto, hay que tener en cuenta:

- La velocidad de transferencia de masa en la fase gas.
- La velocidad de transferencia de masa en la fase líquida.
- El grado de mezcla gas-líquido en cada plato.
- La magnitud de la distribución de las fases entre platos.



Las velocidades de transferencia de materia y energía se calculan basándonos en los coeficientes de película del líquido y el gas, así como en las fuerzas impulsoras (concentración y temperatura). Además se asumen equilibrios térmico y químico, en el caso de reacción química.

B.5 DIÁMETRO DE LA TORRE

Para el caso de columnas de relleno, el cálculo se basa en correlaciones que tienen en cuenta la tasa de inundación para estimar la caída de presión en la torre. Normalmente se considera una buena práctica considerar para el diseño, una velocidad de gas que provoque una pérdida de carga inferior a un valor que depende del proceso. Para el caso de absorbedores en las operaciones de purificación de gases, los ratios líquido-gas suelen estar en torno a 20, y se suele trabajar con rango de valores en torno al 85% de la tasa de inundación.

Considerando las densidades de las corrientes y su uniformidad en la distribución a lo largo del equipo, se tienen en cuenta las siguientes consideraciones en el diseño:

- El ratio entre el diámetro de la columna y el relleno suele debe ser al menos 15:1.
- Debido a las deformaciones provocadas por el peso del relleno, los lechos no deben superar una altura de entre 10-15 ft para el caso de plásticos, y entre 20-25 ft para el caso de relleno metálico.
- Se requieren redistribuidores del flujo situados a distintas alturas dependiendo del tipo de relleno. Para el caso de relleno al azar, cada 5-10 ft.

El cálculo del diámetro de la columna para el caso de torres de platos, se basa generalmente en la limitación de la velocidad del gas a través del área disponible (A_n), a un valor que no cause inundación o excesiva retención. En diámetro de la columna, espacio entre platos, y la configuración de estos, se establece basándonos en las propiedades del gas y del líquido (densidades),



sus respectivos caudales y ciertas correlaciones empíricas. La limitación de la velocidad del vapor se pone de manifiesto generalmente teniendo en cuenta una correlación propuesta por Souders y Brawn (1934), que calcula la velocidad superficial permitida (U), a partir de las densidades del gas y del líquido, teniendo en cuenta datos empíricos.

En cuanto a las consideraciones a la hora del diseño, se tiene en cuenta:

- El tipo de plato.
- Espaciado entre platos.
- El número y tamaño de las aberturas para el paso del gas.
- Dimensión del área activa.
- Número de fases.
- Tamaño y localización de los vertederos y las áreas de bajada.





C. PROBLEMAS DE CONVERGENCIA. ERRORES

En la simulación completa de la planta es posible que muchas de las especificaciones introducidas en la simulación preliminar de los equipos que constituyen el sistema tengan que modificarse para adaptarse a las condiciones globales impuestas por otros equipos. Generalmente vamos realizando estas modificaciones pasando por una serie de simulaciones hasta ajustar los parámetros necesarios.

Al pasar de una simulación a otra podemos proceder de dos formas:

- Aprovechar los valores obtenidos en la simulación anterior como valores iniciales para la nueva.
- Borrar los valores de la simulación anterior para partir de cero en cada nueva simulación.

La primera opción se utiliza cuando se conocen buenas estimaciones iniciales de alguna corriente (flujo de componentes, presión y temperatura) y esto es posible si se han realizado suficientes pruebas antes de realizar la nueva simulación, de manera que ya se está muy cerca de los resultados correctos, o bien se parte de datos bibliográficos fiables. Respecto a esta forma de proceder, si en un paso se obtienen resultados erróneos estos se arrastran al siguiente.

Con la segunda opción se tiene un punto de partida lejano a la solución final, con lo cual se necesita un método de convergencia más robusto.



En línea con estas opciones, se puede proceder a obtener la convergencia paso por paso, eligiendo una tolerancia muy grande del orden de 0.1 hasta una más pequeña del orden de 0.0001, partiendo en cada prueba de los resultados anteriores. Ahora bien, durante la simulación pueden ocurrir errores que inicializan el sistema, de manera que el diseño también ha sido realizado de la segunda forma. Para borrar los valores de la simulación anterior se pulsa el botón inicializar  y en la ventana que se abre, se elige simulación.

En un principio, se procede de la primera forma con objeto de disminuir el número de iteraciones para obtener la convergencia. Se estiman así los valores de flujo de las corrientes, a partir de estos se analizan tanto el orden de magnitud de las corrientes, como los errores que muestra la simulación en el panel de control.

Los errores se pueden visualizar todos juntos en el panel de control tras la simulación, o podemos verlos uno a uno por separado cada equipo si en este no han convergido las variables asociadas, en la carpeta de convergencia, o bien si los problemas se han producido en las especificaciones de diseño o análisis de sensibilidad, o cualquier otro elemento marcado con aspa roja. Pulsamos el icono , que nos detalla los errores producidos.

Los errores que pueden producirse son de distintos tipos:

- Relativos a la convergencia global.
- Relacionados con los equipos.
- Debidos a las especificaciones de diseño.
- De los análisis de sensibilidad.

Describiremos a continuación los errores más comunes y como aparecen indicados en el programa.

C.1 ERROR DE CONVERGENCIA

Cuando se producen este tipo de errores, se muestran en el panel de control una serie de mensajes, de los cuales destaca:



** ERROR

```
Convergence block $OLVER01 did not converge normally in the final pass
```

Para visualizar los errores se entra en *Convergence/Result*. Se muestra una tabla con el valor máximo de error/tolerancia para cada iteración y si ha convergido o no. Para ver la trayectoria que sigue la convergencia lo más cómodo es representar gráficamente dicha tabla, como hemos indicado anteriormente.

C.2 ERRORES EN LOS EQUIPOS

Los mensajes de error en los equipos suelen estar relacionados con los balances de materia y energía, de cargas en el caso de los electrolitos y con las especificaciones de diseño y análisis de sensibilidad relacionados con ellos. Siempre que el programa presente resultados, aunque contengan errores se deben analizar, ya que los errores pueden estar muy localizados, y tener corrección simple.

Hemos comentado anteriormente que en muchos casos se presentan errores de convergencia pero aparecen resultados congruentes, esto es debido a que los errores no son de gran importancia. Esta contradicción aparente se aclara fácilmente si tenemos en cuenta que se representa Max error/Tolerancia, siendo la tolerancia = 0.0001. Por tanto valores obtenidos en las últimas iteraciones nos lleva a errores de 0.005, que no son importantes.

Este tipo de errores de balances de materia se presentan en el panel de control:

** ERROR

```
BLOCK STRIPPER IS NOT IN MASS BALANCE:
```

```
MASS INLET FLOW = 0.11867516E+02, MASS OUTLET FLOW =  
0.11781455E+02
```

```
RELATIVE DIFFERENCE = 0.73047507E-03
```

```
MAY BE DUE TO A TEAR STREAM OR A STREAM FLOW MAY HAVE  
BEEN CHANGED BY A FORTRAN, TRANSFER, OR BALANCE BLOCK  
AFTER THE BLOCK HAD BEEN EXECUTED.
```



Este error no es importante, es debido a que la convergencia global no ha finalizado con Max error/tolerancia < 1 y por tanto no se ha conseguido finalizar el balance de materia y energía en el mezclador, en las 50 iteraciones establecidas.

Un procedimiento para hacer converger el sistema poco a poco, es disminuir progresivamente el valor de tolerancia en cada paso de iteración, desde 0.1 hasta 0.0001. Este tipo de error suele aparecer en sus primeras iteraciones, ya que una diferencia de 0.1 entre los valores penúltimo y último de iteración de las variables de convergencia de las corrientes de corte, no nos garantiza que se cumpla el balance materia y energía de forma satisfactoria, que por defecto tiene una tolerancia de 0.0001 y un número máximo de iteraciones de 30.

El mensaje que se produce cuando se detectan errores de balance de cargas es similar al caso anterior:

```
** ERROR  
  
BLOCK PURGE IS NOT IN CHARGE BALANCE :  
  
    CHARGE INLET FLOW = 0.12920826E+02, CHARGE OUTLET FLOW =  
    0.1285252E+02  
  
RELATIVE DIFFERENCE = 0.683047507E-03  
  
MAY BE DUE TO A TEAR STREAM OR A STREAM FLOW MAY HAVE  
BEEN CHANGED BY A FORTRAN, TRANSFER, OR BALANCE BLOCK  
AFTER THE BLOCK HAD BEEN EXECUTED.
```

Este tipo de errores son debidos a los modelos empleados en el sistema y a las opciones de estos relativas al empleo de componentes reales o aparentes. En nuestro caso, cambiando la opción y seleccionando componentes aparentes podemos solucionar este problema.

Para el caso del intercambiador, los errores son de distintos tipos. La estimación inicial del calor intercambiado suele dar problemas cuando hay variaciones de las corrientes y no se llega o pasamos del valor indicado es la primera estimación. Además este tipo de equipos suelen generar advertencias (*warnings*) que no son tan importantes como los errores y no influyen en los resultados finales. Los mensajes en el panel de control son del tipo:



* WARNING

CALCULATED FEED TEMPERATURE FOR THE HOT SIDE (7.2655979D+02) IS INCONSISTENT WITH ITS INLET STREAM VALUE (7.2642407D+02)

PROBABLE CAUSE: UPSTREAM BLOCK WITH DIFFERENT NPHASE OR PROP SET

THE CALCULATED VALUE WILL BE USED IN BLOCK CALCULATIONS

Esta advertencia no es importante, es debida simplemente a que la convergencia no finalizó de forma correcta, o a que el modelo de propiedades no es el correcto. En el primer caso, se corregirá al cambiar de método de convergencia. Si no ocurriera así tendríamos que elegir un nuevo modelo de propiedades.

En el siguiente caso si se produce un error al estimar un caudal intercambiado mayor del disponible. El mensaje es del tipo:

** ERROR

TEMPERATURE CROSSOVER DETECTED

RE-CALCULATING WITH MINIMUM APPROACH TEMP. SPEC

Este tipo de errores se solucionan mejorando las estimaciones iniciales o bien realizando un cálculo más exhaustivo como fue nuestro caso.

C.3 ESPECIFICACIONES DE DISEÑO Y ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Las especificaciones de diseño también introducen errores en el sistema. Los errores más comunes se presentan de la siguiente forma:

***SEVERE ERROR

THE FOLLOWING STAGES DRIED UP (VAPOR OR LIQUID FLOW APPROACHES 0):

4 6 8 10

A LIMIT OF 0.10000E-04 * SUM OF FEEDS WAS IMPOSED ON THE FLOW RATES OR A LIMIT OF 0.10000E-04 WAS IMPOSED ON THE STAGE V/L OR L/V RATIO.



Este error severo se observa si nos vamos a la tabla del perfil de platos de la columna. En esta se aprecia como en los platos señalados el flujo de líquido es muy pequeño, valor tomado por defecto como mínimo aceptable por el programa debido a que el flujo calculado es prácticamente cero. Esto se produce cuando un bloque es ejecutado antes de contar con los resultados de las corrientes de entrada al equipo. Esto suele deberse a la secuencia de ejecución del bloque de convergencia, que, en muchos casos no es la correcta.

Otro de los errores comunes cuando trabajamos con especificaciones de diseño es el siguiente:

```
** ERROR
   RADFRAC NOT CONVERGED IN 25 OUTSIDE LOOP ITERATIONS.

*** SEVERE ERROR
   MATERIAL AND ENERGY BALANCES FAILED TO CONVERGE: CHECK COL-SPECS
   OR SUPPLY BETTER TEMPERATURE AND COMPOSITION ESTIMATES.

** ERROR
   DESIGN SPEC IS NOT SATISFIED BECAUSE ONE OR MORE MANIPULATED
   VARIABLE IS AT ITS BOUND.

** ERROR
   BLOCK B2 IS NOT IN MASS BALANCE:
   MASS INLET FLOW = 0.37589206E+03, MASS OUTLET FLOW = 0.37555648E+03
   RELATIVE DIFFERENCE = 0.89356658E-03
```

Que suele estar relacionado con la especificación, en este caso no puede alcanzarse el valor de dicha especificación que fijamos de partida (fuera de los límites). También es conveniente ajustar el número de iteraciones.

También se generan mensajes de advertencia cuando trabajamos con estos bloques, tenemos casos como el siguiente:

```
The following Unit Operation blocks were
completed with warnings:
```

```
ABSORBER
```

```
Initial enthalpy calculations completed with simulation errors
```



for the following streams:

MEA-LEAN

>> Loop \$OLVER02 Method: SECANT Iteration 2

* WARNING

VALUE OF DESIGN SPEC VARIABLE 1 RESET OUTSIDE OF CONV. BLOCK

FROM 0.277805E-01 TO 0.277803E-01 ;

PLEASE REVISE FLOWSHEET TO AVOID CONVERGENCE INSTABILITIES.

En este caso la tolerancia impuesta es alta y el programa no considera los errores de cálculo de las variables por debajo de esta tolerancia e indica que actualiza el valor.

Para cambiar de método se accede a **Convergence/Conv Options/Defaults/Defaults Methods**, y en el espacio asignado a **Tear** se selecciona el método deseado.

D. INFORMES COMPLEMENTARIOS DE LA EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LA PLANTA





E. BIBLIOGRAFÍA

E.1 ANEXO A

- Brower, M., Cool Energy: The Renewable Solution To Global Warming, Union of Concerned Scientist, 1990.
- Klass DL, 1994, "Fuel from biomass", Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology.
- Paisley MA, 2003, "Biomass Energy", Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology



- Quaak, P., Knoef, H., Stassen, H.E., Energy from Biomass: a review of combustion and gasification technologies. World Bank technical paper no. 422, Energy Series 1999.

E.2 ANEXO B

- Kohl A, Nielsen R, "Gas Purification", Gulf Publishing Company, 1997.
- Perry RH, Green DW, "Perry's Engineers' Handbook", McGraw Hill Co. 1999. Perry RH, Green DW, "Perry's Engineers' Handbook", McGraw Hill Co. 1999.

E.3 ANEXO C

- Aspen Plus. Aspen Plus User Manual. Cambridge , MA, US: Aspen Technology Limited; 2001.

E.4 ANEXO D

- Icarus Process Evaluator. IPE User Manual. Cambridge , MA, US: Aspen Technology Limited; 2001.



