

FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA. LEIOA

TRABAJO FIN DE GRADO

INGENIERÍA QUÍMICA

HIDRODINÁMICA Y COMBUSTIÓN DE BIOMASA VEGETAL RESIDUAL EN SPOUTED BED CÓNICO

Alumna/o *Atxutegi Narbona, Aitor*

Fecha *Junio 2014*


Dr. Roberto Aguado
Zarraga

Curso Académico

2013/14

Índice general

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Problemática actual	1
1.2. Optimización de la combustión	4
1.3. Spouted bed	6
1.3.1. Dependencias de la velocidad mínima de spouting	9
1.3.2. Descripción de los draft tubes	10
1.3.3. Combustión de biomasa en spouted bed	11
1.4. Análisis de regresión. Prueba de F	12
2. OBJETIVOS	16
3. EXPERIMENTAL	17
3.1. Propiedades de las biomosas	20
3.2. Experimentación en frío	22
3.2.1. Experimentación sin draft tubes	22
3.2.2. Experimentación con draft tubes	23
3.2.3. Fluidodinámica y ajuste de ecuaciones	24
3.3. Experimentación en caliente	26
4. RESULTADOS EXPERIMENTALES	31
4.1. Análisis fluidodinámico	31
4.2. Ajuste de ecuaciones	35
4.2.1. Análisis estadístico	37
4.2.2. Adición de nuevos bloques adimensionales	38
4.3. Mapas de operación	42
4.3.1. Perfiles de temperatura	44
5. CONCLUSIONES	47
6. NOMENCLATURA	49
7. BIBLIOGRAFÍA	52
8. APÉNDICE	55

1. CAPÍTULO

INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia de la humanidad, la energía y sus derivados han estado estrechamente ligados al nivel de desarrollo de una comunidad, posibilitando la ejecución de tareas en principio vetadas a nuestra naturaleza. Por este motivo, la disponibilidad en abundancia de este recurso implica, por lo general, un progreso tecnológico y social de la comunidad propietaria del codiciado recurso.

Al comienzo de la explotación energética, la única fuente de esta era la de la biomasa. Por la riqueza en oxígeno de la atmósfera, la liberación de la energía acumulada mediante la combustión se convirtió en la mejor forma de explotar la biomasa. Dada la posibilidad de liberar energía cuando fuera requerida, su abundancia y la total falta de otras fuentes energéticas, la biomasa se convirtió en la primera fuente de energía explotada a escala global.

A medida que las poblaciones crecieron, también lo hicieron los requerimientos energéticos de estos emplazamientos. Teniendo el uso de la principal fuente de energía, como era la madera, ampliamente diversificado (muebles y construcción) se hizo necesaria una nueva fuente de energía. Este nuevo recurso debía cumplir una serie de requisitos como eran: no estar diversificada, ser abundante y tener una mayor densidad energética que la madera. En consecuencia, el carbón vegetal y más tarde todos los carburantes englobados en la familia de los combustibles fósiles se empezaron a utilizar masivamente.

1.1. Problemática actual

La utilización masiva de estas fuentes energéticas junto al aumento del consumo de estos, ha convertido nuestro sistema de abastecimiento y producción de energía en algo insostenible desde el punto de vista tanto económico como medioambiental. En las últimas décadas están haciéndose palpables ciertos problemas en los que en un principio no se pensó, como son; el agotamiento de recursos, la dependencia económica y el calentamien-

to global.

El problema del agotamiento de recursos viene dado por el largo periodo necesario para la recuperación de una reserva de combustibles fósiles. En cuanto al segundo problema, este reside en la focalización de las reservas, lo que hace que ciertos países que no disponen de estas fuentes entre sus fronteras sean profundamente dependientes de aquellas que si las tienen.

El último problema está ligado a la naturaleza de la combustión. Por definición, la combustión es un proceso de oxidación en la que el compuesto de alimentación, si el proceso tiene la duración necesaria, alcanza su mayor número de coordinación. Los compuestos que suelen alimentarse a una combustión son orgánicos, lo que hace que los principales productos de una combustión suelen identificarse como CO_2 y H_2O , pero también en menor cantidad compuestos sulfurados y nitrados que tienen un gran impacto ambiental.

En principio, los dos productos típicos de una combustión son inertes y no nocivos. A pesar de ello, como es ampliamente conocido, el CO_2 tiene un potencial de efecto invernadero moderado y las grandes cantidades que se emiten a la atmósfera, junto con el hecho de que la vegetación decreciente de nuestro planeta no es capaz de absorberlo, hacen que la concentración neta de CO_2 atmosférica esté aumentando. Esta idea del aumento del CO_2 atmosférico, la posibilidad del aumento de la temperatura terrestre y los dos problemas antes mencionados, están obligando a pensar en nuevas fuentes de energía que sustituyan a los combustibles fósiles con objeto de preservar la estabilidad energética y el medio ambiente.

La principales propuestas y tecnologías alternativas puestas en marcha son: la energía solar tanto fotovoltaica como termo-eléctrica, energía eólica teniendo grandes esperanzas en la generación en mar abierto, energía nuclear con el desarrollo de la IV generación de reactores prevista para 2030 [Locatelli *et al.*, 2013] y finalmente la energía de la biomasa, siendo esta ultima la tercera fuente alternativa más utilizada en el mundo a día de hoy[IEA, 2012].

Mientras que actualmente la energía solar y eólica, desde un punto de vista económico, no son competitivas con los combustibles fósiles y tanto la fusión como la fisión plantean problemas sin soluciones concretas, la energía de la biomasa se presenta como la alternativa verde para todas aquellas comunidades que no dispongan de los ingentes recursos que precisan otras tecnologías.

Podría parecer que el progreso energético no debería pasar por recuperar fuentes obsoletas, pero el nuevo escenario mundial, junto con el desarrollo de la tecnología y el conocimiento humano otorga nuevas posibilidades a esta fuente. Como se ha explicado antes, el gran problema de los combustibles fósiles es su no renovabilidad y sus emisiones de CO_2 . La biomasa, por su parte, resuelve parcialmente los dos problemas; ya que la biomasa se regenera con mayor flexibilidad que las fuentes fósiles y además, el CO_2 liberado durante su combustión es el captado en las ultimas décadas por la vegetación, manteniendo el ba-

lance de CO₂ global nulo.

Aparte de ser una tecnología medioambientalmente sostenible, tiene otras importantes cualidades que favorecen la viabilidad de proyectos de generación de energía a partir de biomasa. La primera gran ventaja de la biomasa es su abundancia, ya que en toda explotación agrícola, ganadera y algunas industriales se generan productos no deseados, los cuales, tienen altos poderes caloríficos o composiciones interesantes para su transformación en fuentes de energía. Por su procedencia y cualidades se clasifican en tres grupos:

- **Biomasa agroforestales:** Engloba a toda la materia orgánica que se produce de manera natural sin ninguna actividad humana concreta. En este grupo se engloban, normalmente, materiales lignocelulósicos, los que su alto contenido en compuestos estructurales los veta para la producción de biocombustibles. Durante este proyecto las biomasa agroforestales utilizadas han sido el serrín, el rumex y las algas.
- **Biomasa agroindustriales:** Todo desecho orgánico debido a una actividad humana como son; la ganadería, los cultivos, la industria... son clasificados en este grupo. Presentan características muy dispares dependiendo de su procedencia, ya que si son recortes o descartes de la industria alimentaria podrían servir para producir biocombustibles y por el contrario si proceden de otra industria (lodos de papelera por ejemplo), presentan características similares a las biomasa agroforestales. En este proyecto las biomasa agroindustriales utilizadas han sido; la cáscara de arroz y el hueso de olivo.
- **Cultivos energéticos:** Son aquellas especies vegetales que por su gran concentración de azúcares son económicamente rentables para la producción de biocombustibles, como son: el maíz, la remolacha o la soja. En este proyecto no se han utilizado biomasa de este tipo, porque el objetivo es el de la revalorización de residuos y no el de producción de combustibles alternativos a los del petróleo.

Su gran variedad otorga a la biomasa la posibilidad de muchos y diversos tratamientos para obtener productos de utilidad. Esta característica, abre la posibilidad de cubrir la demanda de un amplio abanico de productos, para los que actualmente, son necesarias las fuentes fósiles. En las últimas décadas, diversos han sido los usos que se le han dado a esta materia:

- Gasificación de compuestos lignocelulósicos para la obtención de gas pobre, útil en la industria petroquímica [Bernocco *et al.* , 2013].
- Pirólisis de biomasa para la obtención de las diferentes fracciones. Las tres fracciones tienen utilidad pero actualmente la más fomentada es la líquida por su utilización en la producción de hidrocarburos.
- Fermentación de azúcares para la producción de alcoholes, los cuales son empleados como aditivos de motores de gasolina , como diluyente de carburantes o como alimentación pura en motores especialmente diseñados, estando Brasil actualmente a la cabeza de la producción y utilización de este recurso [Balat *et al.* , 2008].

- Extracción de aceites esenciales de semillas oleaginosas para la producción de biodiesel, con una importancia remarcable en países en vías de desarrollo [Avinash *et al.* , 2014].
- Digestión biológica en régimen anaerobio de biomasa para la obtención de gas de alto poder calorífico, cuyo compuesto principal es el CH_4 .
- Combustión directa de la biomasa para obtención de energía eléctrica mediante una conversión termo-eléctrica.
- Obtención de H_2 mediante la depuración del gas de síntesis, producido a partir de la gasificación.

De todos los tipo de tratamiento y utilización de la biomasa, la combustión directa es la que se va a tratar específicamente, ya que esta tecnología podría sustituir, como mínimo parcialmente, a las plantas de carbón para la producción masiva de electricidad, reduciendo significativamente las emisiones a la atmósfera de compuestos sulfurados y nitrados [Zhang *et al.* , 2010].

La sostenibilidad y las nulas emisiones netas de CO_2 de esta tecnología dependen por lo general de la eficiencia de combustión del sistema y del transporte de la materia prima. Por este motivo, en las últimas décadas, se ha puesto especial atención en estos dos factores para implementar el uso masivo de la biomasa a escala industrial para la producción eléctrica.

Desde el punto de vista del transporte y la optimización, los esfuerzos se han centrado en la caracterización de un gran volumen de tipos de biomasa. Sus razones son; la no disponibilidad en cantidades industriales de ciertas biomásas, la localización de ciertas especies y la falta de poder calorífico de algunas especies para posibilitar la rentabilidad de su explotación energética.

Por otro lado, si la materia prima no es abundante en un radio pequeño a la zona de explotación, la huella de carbono del transporte anula los beneficios ecológicos del uso de esta fuente. Además, la oferta de ella en el mercado fluctúa mucho con los ciclos agrícolas o de poda forestal, de manera que una planta de combustión de biomasa debería ser flexible a diferentes tipos de alimentación, sin tener esto un impacto crítico en los costes de operación. Por todo ello, este análisis sistemático elaborado a lo largo de las ultimas décadas y ampliamente publicado en la bibliografía [Vassilev *et al.* , 2012], ha sido la principal estrategia a la hora de reducir el impacto del transporte . De manera que el siguiente objetivo es el de la mejora del proceso optimizando la combustión.

1.2. Optimización de la combustión

Una reacción de combustión con biomasa es una operación gas-sólido, siendo el contacto y la difusión entre fases el factor crítico a la hora de mejorar el proceso y de reducir las

pérdidas energéticas. Para este tipo de contacto, el sistema que ha demostrado ser el más eficiente es el lecho fluidizado [Bernocco *et al.*, 2013]. Como es lógico, cada sistema de fluidización tiene características inherentes a la naturaleza del sistema, pero por lo general, la fluidización podría definirse como la suspensión de sólidos en una zona delimitada, mediante un fluido que lo mantiene en este estado. Este fluido, por lo general siendo aire o agua, suele formar parte de la reacción que quiere llevarse a cabo o del proceso específico para el que se diseña el sistema. El utilizar este clase de sistema otorga ciertas ventajas como: la flexibilidad de la alimentación, la excelente mezcla mezcla gas-sólido, la homogeneidad térmica y el control de emisiones efectivas [Sirisomboon *et al.*, 2010].

Dentro de un determinado equipo, este puede operar de diversas formas dependiendo del caudal y velocidad del fluido de entrada. A grandes rasgos en la Figura 1.2 se muestran los principales regímenes de operación de un reactor de lecho fluidizado.

Por lo general, tres son los regímenes principales; primeramente está el régimen de mínima fluidización en el que el lecho se levanta y fluidiza completamente por primera vez, una velocidad del aire menor a esta convierte el lecho fluidizado en uno fijo. Si se le da mayor velocidad al fluido de entrada, el lecho se expande por la energía extra que el fluido sufre a las partículas y su comportamiento de expansión es descrita por la ecuación de Ergun en el caso de utilizar un contactor cilíndrico. En este tipo de régimen se evitan problemas de inestabilidad lecho fijo-fluidizado del régimen de mínima fluidización, pero por el contrario, requiere de mayores costes de operación. El último modo de operación es el de fluidización turbulenta en el que el aire tiene suficiente energía como para poder moverse sin un patrón o forma preferente. Este último régimen es adecuado para el secado de las partículas, ya que la transferencia de materia está favorecida por la turbulencia [Wachiraphansakul & Devahastin, 2007]. Como contrapartida de este último modo de operación, se aprecian los grandes costes de operación y el posible arrastre de partículas finas si estas no tienen la suficiente resistencia a la atrición.

Como puede verse en la Figura 1.1 hay diferentes tipos de sistemas de lecho fluidizado, dependiendo de la configuración que se quiera obtener y las propiedades del proceso. El reactor de lecho fluidizado clásico es cilíndrico y el fluido suele distribuirse mediante un plato perforado colocado en la parte inferior. Sin embargo, pese a la alta eficiencia del sistema y al relativo bajo coste, el sistema exige que el lecho sea denso y uniforme para la estabilidad de la fluidización. Si el lecho no cumple estas condiciones las partículas no fluidizan correctamente, creándose el fenómeno del *slugging* en el que se forman burbujas de aire en el lecho, aumentando significativamente la pérdida de carga y formándose una fluidización no estable. Además de lo indicado una fluidización de partículas no uniformes lleva a tener que utilizar caudales mayores para mover el lecho y al tener este una densidad baja, en comparación con la arena o el vidrio, pueden ser arrastrada la fracción más fina fuera del reactor, cosa que en principio no se desea y se trata de evitar

En este tipo de reactores el parámetro crítico a controlar y predecir junto con la ΔP es la velocidad mínima de fluidización, u_{mf} . Este parámetro fija el límite mínimo en el que un lecho se considera que está en una fluidización estable y en consecuencia, todas las partí-

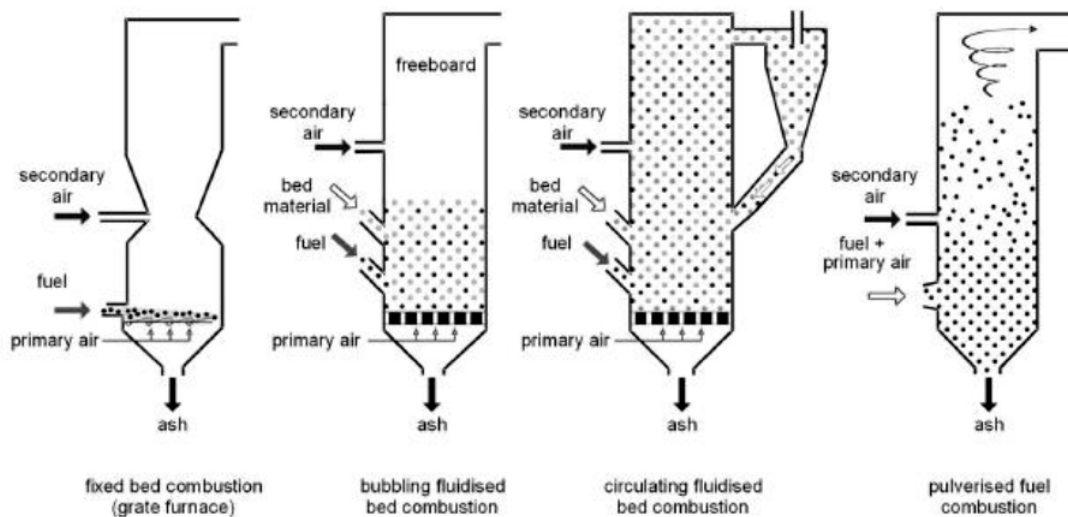


Figura 1.1. Diferentes diseños de lechos fluidizados.

culas están en continua fluidización. En este punto además, estando en régimen de fluidización la pérdida de carga suele ser mínima y por tanto, los costes de alimentación del fluido suspensor son mínimos. En resumidas cuentas, cuando un reactor está en régimen de mínima fluidización, el contacto mejora respecto al lecho fijo y se reducen los costes respecto a operar a mayores caudales, por lo que este punto de operación se ha fijado como la referencia para el resto de regímenes. Pese a que u_{ms} sea la referencia que marca el inicio de la fluidización, pocos procesos pueden operar en este régimen en lecho fluidizado cilíndrico, dado que la mezcla no es totalmente buena, en combustión por ejemplo, se ha necesitado en algunos casos (lecho circulante fluidizado) una relación u/u_{ms} entre 3 y 7 [Sun *et al.*, 2008] para que el movimiento sea mayor, pero no tanto como para segregar el inerte de la alimentación.

Si se tiene en cuenta que se quiere operar a la velocidad mínima de fluidización y que la biomasa por lo general tiene una baja densidad y una gran heterogeneidad en cuanto a las formas y tamaños de partículas, la inestabilidad del lecho y la mala fluidización son apreciables en los lechos fluidizados comunes [Abdullah *et al.*, 2003]. Por estos motivos se hace necesario utilizar un reactor de fluidización alternativo al cilíndrico que evite los problemas de estabilidad. En consecuencia, se ha propuesto la utilización del spouted bed como reactor de lecho fluidizado alternativo al cilíndrico y la modificación de las ecuaciones de predicción de u_{ms} en spouted bed, previamente publicadas, adecuándolas a la experimentación con partículas irregulares y poco densas como la biomasa.

1.3. Spouted bed

El spouted bed consiste en un sistema particular de lecho fluidizado, en el que en lugar de utilizar un reactor cilíndrico, parte o todo el reactor tiene un perfil cónico. La otra diferen-

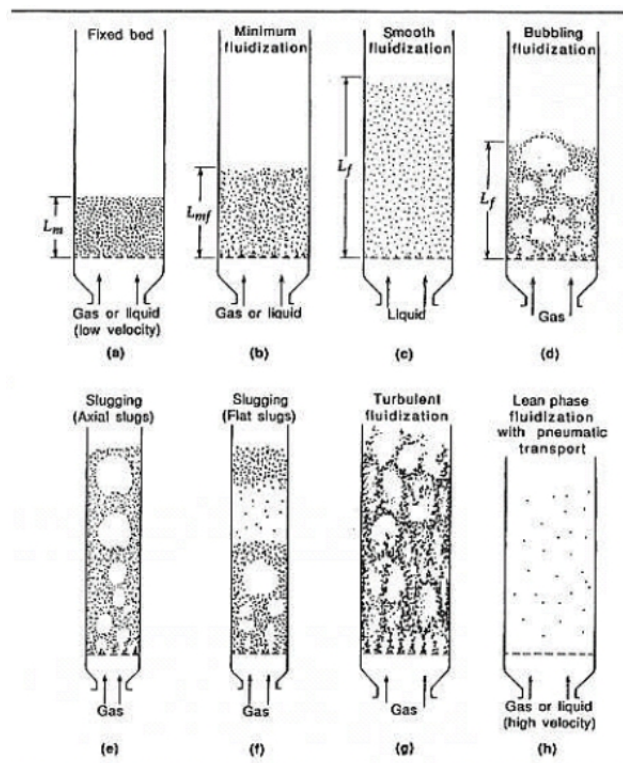


Figura 1.2. Representación de los diferentes regímenes de fluidización.

cia respecto a los reactores previamente explicados es que no utiliza platos perforados, ya que no se busca la distribución del fluido a través de toda la superficie radial del contactor. En el *spouted bed* una corriente de aire abre una cavidad en el centro del lecho (*spout*) arrastrando las partículas de la parte baja del reactor hacia arriba, saliendo estas del lecho en tiro parabólico (*fuelle*) y cayendo en la superficie del lecho. De esta manera se completa un ciclo en el que todas las partículas cercanas a la pared (*zona – anular*) se mueven y se ponen en contacto con el fluido suspensor. En la Figura 1.3 se muestra las diferentes zonas de un *spouted bed* en estado de fluidización. Como puede verse en esta representación, a diferencia del lecho fluidizado cilíndrico no todo el lecho tiene una velocidad homogénea, sino que en el *spout* los sólidos alcanzan su velocidad máxima y en la zona anular la mínima, nunca siendo esta nula.

Hasta ahora, el *spouted bed* ha tenido diversas aplicaciones debido principalmente; a su sencillez, su buen contacto, la poca segregación de partículas de igual densidad y la posibilidad de operar con partículas irregulares. Estas aplicaciones han sido;

- Secado de arenas y lodos con velocidades mayores al mínimo de fluidización. Este tipo de proceso ha tenido gran desarrollo en Canadá y el *spouted bed* se ha diversificado para diferentes usos y condiciones de operación.
- Se ha probado la posibilidad para utilizar el *spouted bed* para el recubrimiento o

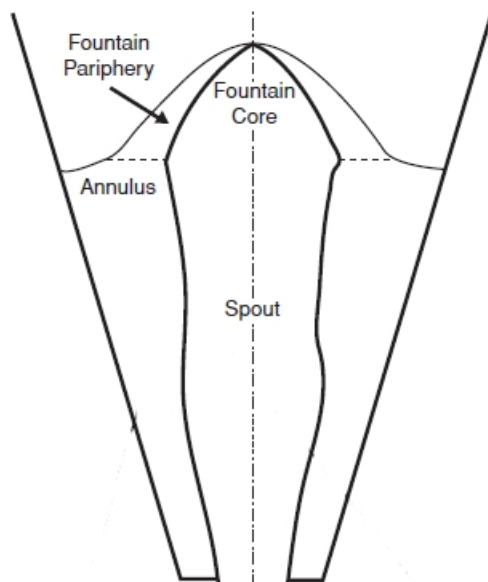


Figura 1.3. Zonas del spouted bed en fluidización.

Coating de partículas. Un ejemplo importante sería el recubrimiento de partículas de uranio para utilizarlas en reactores nucleares *HTGR* para la producción de energía eléctrica. Estos reactores necesitan de una alimentación de partículas radiactivas tri-capa *TRISO*, en los que un compuesto de UO_2 es recubierto de capas de carbono y de silicona. Debido a este tratamiento se evitan posibles fugas de productos durante y tras la fisión, a la vez que aumenta la seguridad en el transporte y el almacenamiento [Zhou, 2008]. Para este recubrimiento se ha experimentado la posibilidad de utilizar un spouted bed por su versatilidad y posibilidad de operar en continuo. Pese a que la investigación está en etapa de desarrollo la naturaleza de la empresa que se plantea desde el punto de vista de la seguridad y de la inversión necesaria evidencia el potencial de este reactor.

- Se ha utilizado un spouted bed como reactor de polimerización, ya que es capaz de fluidizar distribuciones amplias de partículas . [Olazar *et al.* , 1994b].
- Un reactor de spouted bed ha sido utilizado para la obtención de biogás a partir de biomasa y se ha analizado la viabilidad de una planta industrial utilizando esta tecnología [Bernocco *et al.* , 2013].

Se han efectuado diversos intentos para describir el comportamiento fluidodinámico del spouted bed mediante modelos teóricos especialmente mediante la combinación de las técnicas *CFD* y *DEM* [Rong & Zhang, 2010], pero la enorme cantidad de variables que modelan el resultado final y la todavía falta de comprensión del reactor, han hecho que los modelos empíricos por de pronto los superen. Estos modelos pretenden, mediante la experimentación y el ajuste de ecuaciones, predecir ciertos comportamientos y parámetros del sistema.

En este caso se abordará el tema de predecir la velocidad mínima de spouting, u_{ms} en este tipo de reactor. A diferencia de los contactores cilíndricos donde el u_{mf} es la velocidad de referencia a predecir, en el spouted bed la referencia se sitúa en el momento donde el lecho se abre y se crea la fuente.

1.3.1. Dependencias de la velocidad mínima de spouting

Si se quisiese hacer una clasificación de las variables del spouted bed, a grandes rasgos, se clasificarían en dos grupos; por un lado estando las variables descriptivas de la geometría del contactor y por otro las que describen la naturaleza de la interacción sólido-gas y sus propiedades.

Las variables del primer grupo ya han sido ampliamente estudiadas por anteriores autores en trabajos con partículas densas y relativamente uniformes. Como puede verse en la Figura 1.4 los parámetros son el D_0 , D_c , D_i , H_c y γ .

Estos parámetros deben de guardar ciertas relaciones esenciales para fomentar la estabilidad de la operación. Por ejemplo, la entrada al contactor debe ser de sección circular y de una relación L/D_0 como mínimo de 5, para que la entrada al contactor del fluido sea lo más laminar y uniforme posible [Olazar *et al.*, 1992]. Normalmente se procura operar en este límite, para reducir la pérdida de carga del sistema y las dimensiones del equipo. Por otro lado, la altura del lecho H_0 ha demostrado tener, bajo ciertas condiciones, límites superiores e inferiores fuera de los cuales la inestabilidad del reactor, en forma de burbujas y pérdidas de carga, es apreciable. El factor que más influencia a estos límites es el ángulo del contactor, γ , demostrándose que para los ángulos entre 28 y 45° estos dos límites desaparecen y se puede alcanzar la fluidización estable con todas las alturas probadas [Olazar *et al.*, 1993].

Desde el punto de vista de las variables del contacto sólido-gas y la naturaleza de las dos fases, la mayoría de los autores han decidido agruparlas todas en un mismo parámetro adimensional. El bloque que engloba todas las propiedades de la materia es el número adimensional de Arquímedes, Ar . En él, se encuentran representadas las densidades de ambas fases y sus propiedades físicas, ya que estas tienen un efecto crítico en la fluidización. Por poner un ejemplo, en el caso del diámetro de partícula, d_p , se ha demostrado que el reactor debe guardar una relación D_0/d_p dentro del intervalo 2 – 60. Si esta relación es menor al límite mínimo, las partículas son demasiado grandes como para fluidizar con los caudales que se alcanzan y si es mayor al límite superior, el arrastre de partículas finas y la inestabilidad son apreciables [Olazar *et al.*, 1992].

u_{ms} ha demostrado tener unas relaciones claras con los componentes geométricos del contactor. Este parámetro aumenta claramente, por ejemplo, con la altura inicial del lecho, H_0 por el mayor peso al que tiene que hacer frente el fluido. En relación al ángulo del contactor γ , u_{ms} tiene un mínimo en torno a los 36°. La razón de esto último es que a pequeños ángulos, el contactor cónico se parece al cilíndrico por lo que la pared no tiene una fuerza

normal apreciable que sostenga parte del lecho, obligando al aire a vencer esta resistencia extra. Por su parte, a ángulos muy grandes aumenta la cantidad de materia contenida en el lecho a una altura dada, por lo que su peso aumenta siguiéndole en esta tendencia u_{ms} , la anulación de estos dos efectos causa que a un ángulo determinado u_{ms} se reduzca provocando un mínimo local [Olazar *et al.*, 1993]. El D_0 por su parte no tiene una relación clara con u_{ms} ya que mientras algunas correlaciones tratan el D_0 con una potencia positiva otras lo hacen con una negativa lo que demuestra que la relación depende de los datos experimentales tomados. Este efecto se justifica con que por un lado el aumento del diámetro de entrada supone de un mayor caudal al lecho a una velocidad dada, pero por el otro al aumentar la entrada se fuerza a que el *spout* tenga un mayor volumen por lo que los dos efectos están muy cerca de compensarse.

Estas y otras relaciones de las variables respecto a u_{ms} ya han sido estudiadas, dando como resultado el ajuste de ciertas ecuaciones empíricas que más adelante serán mencionadas. A pesar de toda esta experimentación publicada, las partículas no homogéneas y en especial la biomasa, exceptuando el serrín, no han tenido relevancia. Con intención de llenar este vacío y simplificar la experimentación con otros tipos de biomásas, se ha experimentado con un amplio rango de ellas en múltiples condiciones; tras lo cual se han ajustado las ecuaciones necesarias para poder predecir u_{ms} , siempre, cuidando de no salirse de los límites de estabilidad del lecho.

1.3.2. Descripción de los draft tubes

Aparte de experimentar sin ningún dispositivo interno también se quiere predecir u_{ms} con draft tubes. Estos dispositivos previamente explicados en la bibliografía publicada [Altzibar *et al.*, 2009], [Altzibar *et al.*, 2013] son comúnmente llamados draft tubes y están representados en la Figura 1.5. Por lo general, son cilindros metálicos que alojados en la parte inferior del contactor modifican el patrón de comportamiento del aire a través del lecho. Los draft tubes se colocan en el eje axial del contactor y son sostenidos en la base mediante tres patas perpendiculares al dispositivo en cuestión.

Estos dispositivos pueden ser de diversos tipos dependiendo del patrón del aire que se quiera alcanzar, pero todos tienen una parte del cilindro abierta para el flujo del sólido de la zona anular al *spout*. Lo que diferencia cada tipo de dispositivo de otro es la distribución y proporción de la apertura del cilindro. Por ello se puede pasar de un draft tube sólido con una apertura nula del cilindro superior a un draft tube abierto en el que una parte del cilindro superior esta expuesta al movimiento *spout*-anular y viceversa.

En la bibliografía se han encontrado más tipos de draft tube. Como ejemplo caben indicar los draft tube porosos, en los que el cilindro tiene orificios abiertos en vez de una sección sin cubrir, pero como se ha indicado la elección del dispositivo adecuado depende del comportamiento del fluido que se quiera alcanzar.

Al haber sido ampliamente estudiados en previos estudios, los parámetros geométricos de

los dispositivos escogidos se han basado en estas investigaciones. A la hora de describir los draft-tubes se seguirá la nomenclatura representada en la Figura 1.5, dado que es como se muestra en las citadas publicaciones [Altzibar *et al.*, 2013]. Los draft-tubes abiertos aparte de clasificarse por sus medidas principales, como diámetro del tubo D_T o altura del cilindro L_T también es de vital importancia caracterizarlos mediante la fracción del cilindro abierto ω_T . En el caso de los draft-tubes sólidos el parámetro característico es la altura de entrada L_H , ya que determina la superficie en la que existe el flujo de sólidos de la zona anular al spout.

Estos dispositivos consiguen reducir la pérdida de carga a través del lecho a la vez que pueden mejorar el contactor entre el gas. De este modo se pueden obtener fluidizaciones estables en rangos en los que sin draft tube no se puede. Por estas razones son interesantes a la hora de tratar implantar esta tecnología a escala industrial con lo que el estudio fluidodinámico es tan importante como la operación si ellos.

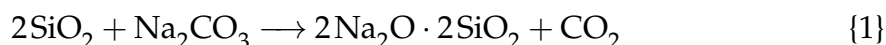
1.3.3. Combustión de biomasa en spouted bed

Como se ha indicado con anterioridad la mezcla fluido-sólido es notablemente mejor en los lechos fluidizados y el spouted bed como lecho fluidizado específico permite operar con una variedad mayor de alimentaciones [Sutkar *et al.*, 2013]. El hecho de utilizar el spouted bed para la conversión termoeléctrica de la energía de la biomasa tiene sus ventajas y desventajas como se resume en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1. Ventajas y desventajas de la combustión de biomasa en spouted bed.

Ventajas	Desventajas
- Simplicidad del sistema	- Normalmente se necesita de un lecho inerte
- Cortos tiempos de residencia	- Gran volumen de alimentación
- Posibilidad de recircular cenizas	- Alto contenido de O_2 y humedad en la entrada
- Buena contacto del fluido	- Apelmazamiento de las cenizas
- Adaptabilidad del sistema	

Como se observa en la Tabla 1.1 las desventajas de utilizar biomasa en el combustor de spouted bed son propias del tipo de alimentación y no del reactor, exceptuando la última. Esta última desventaja viene relacionada con la primera de ellas, ya que para la fluidización de algunas biomásas se necesita de un lecho inerte cuya función es homogeneizar la fluidización. El inerte por lo general siendo arena puede reaccionar con parte de los compuestos inorgánicos de la biomasa según la siguiente reacción:



Este tipo de reacción convierte el sílice con un punto de fusión de 1450 °C en una mezcla que cambia de fase a 874 °C y para sales de potasio la mezcla se funde a 754 °C. Este efecto crea problemas de fluidización e incluso de medida de la temperatura (dado que parte del líquido puede quedarse adherida a la superficie de medida) [Du *et al.*, 2014]. Las soluciones a este problema son; la utilización de aditivos, el preprocesamiento de la alimentación (eliminar las sales), el cambio del lecho inerte o el control de la temperatura para que el lecho inerte nunca supere la temperatura de fusión [Epstein & Grace, 2010].

Otra desventaja que se ha mencionado en la Tabla 1.1 es el alto contenido (entre un 30 – 40%) de O_2 de la alimentación lo que reduce la eficiencia energética del sistema, pero a su vez reduce el oxígeno necesario en el fluido de entrada por lo que podría colocarse en cualquiera de las dos columnas.

La mayoría de ventajas en cambio, si que son propias del reactor, por lo que se considera que el spouted bed es un reactor a tener en cuenta en la producción de energía a partir de biomasa en el futuro. Las ventajas que caben reseñar son la posibilidad de recircular cenizas y la adaptabilidad del sistema. El poder recircular las cenizas se debe a que el spouted bed dependiente de la densidad de las partículas es capaz de separar aquellas con densidades diferentes de una forma continua, lo que permitiría a escala industrial recircular aquellos inquemados con algún poder calorífico para aumentar la eficiencia térmica. La adaptabilidad del sistema viene dado por las pocas restricciones que el sistema tiene a la hora de fluidizar un compuesto ya que estas restricciones están más enfocadas a la geometría del contactor y de la relación del diámetro de partícula con alguno de estos factores que a las propiedades químicas del compuesto.

Todas las biomásas utilizadas han sido del tipo lignocelulósico (las algas no se han utilizado en el combustor) de manera que su fracción orgánica se puede resumir en tres compuestos; hemicelulosa, celulosa y lignina [Vassilev *et al.*, 2012]. Cada uno de estos compuestos tiene una cinética de combustión, la que fue analizada en previos estudios mediante la deconvolución de la curva *DTG* obtenida en una termobalanza, determinándose las constantes cinéticas y las fracciones de cada compuesto para las biomásas que se utilizarán. De modo que para analizar en futuros trabajos la transferencia de calor y efectuar su modelado se debe determinar que condiciones limite permite el reactor en combustión desde un punto de vista fluidodinámico y el perfil de temperatura en las diferentes condiciones.

1.4. Análisis de regresión. Prueba de F

Hay ocasiones en ingeniería y en la ciencia en general que se quieren hacer comparaciones entre métodos o sistemas y se tiene que determinar cual es el mejor. Otras veces se quiere comprobar si una suposición o afirmación es cierta o no. Como el rigor científico requiere de imparcialidad para comprobar ciertas afirmaciones se utiliza la estadística para mediar en la elección.

Dado que normalmente se trabaja con muestras reducidas de la población, como son los datos experimentales, las desviaciones o errores de medida pueden hacer variar en la decisión final. Por este motivo, cuando se comprueba una afirmación siempre se hace con cierto grado de confianza dada la incertidumbre en la medida de las muestras.

En este caso se pretende hacer un análisis de regresión no lineal múltiple. Para ello, con algunos ajustes óptimos posibles se pretende determinar cual es estadísticamente mejor. El contraste de hipótesis para este caso es;

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 1 \quad (1.1)$$

$$H_1 : \forall x \{1, 2, \dots, K\} \beta_x \neq 1 \quad (1.2)$$

Lo que significa, que se quiere confirmar si todas las β van a igualar a la unidad o por el contrario hay alguna reducción del error que no es posible justificar mediante la varianza del sistema y que por tanto hay algún β que no iguala a la unidad.

Así como en la adición de nuevos factores a una regresión lineal múltiple los factores de la hipótesis nula igualan a 0, en este caso igualan a la unidad porque solo se pretenden modificar los coeficientes y no determinar su adición a las ecuaciones. Con objeto de simplificar la explicación supongamos que se tiene solo un punto experimental, por tanto los datos calculados mediante los dos modelos posibles y su diferencia es

$$Re_{calc} = \beta_1 a A r^{\beta_2 b} \quad (1.3)$$

$$Re_{orig} = a A r^b \quad (1.4)$$

$$SSR_{orig}^{1/2} - SSR^{1/2} = a A r^b [1 - \beta_1 A r^b (\beta_2 - 1)] \quad (1.5)$$

Si la ecuación original ajustase perfectamente a los datos experimentales no podría haber ninguna combinación de coeficientes posibles más que la de la ecuación original. Esto es, como máximo la diferencia de los errores sería 0 lo que solo se obtiene si $\beta_1 = \beta_2 = 1$.

Por el contrario, si es posible reducir el error significa, que como mínimo alguno de estos dos coeficientes no es 1, lo que se resume en la existencia de un mejor ajuste. Después es trabajo del factor F decidir si esta desviación puede estar justificada por la varianza propia del sistema o de la medida para determinar si el 'mejor' ajuste es realmente mejor o es simple casualidad debido al error experimental [Uriel, 2013].

Como es lógico, el ejemplo anterior no refleja la distribución de toda una serie de datos experimentales y para poder comparar dos modelos se debe comparar los sumatorios de todos los residuales de un buen número de muestras, pero la idea es la misma.

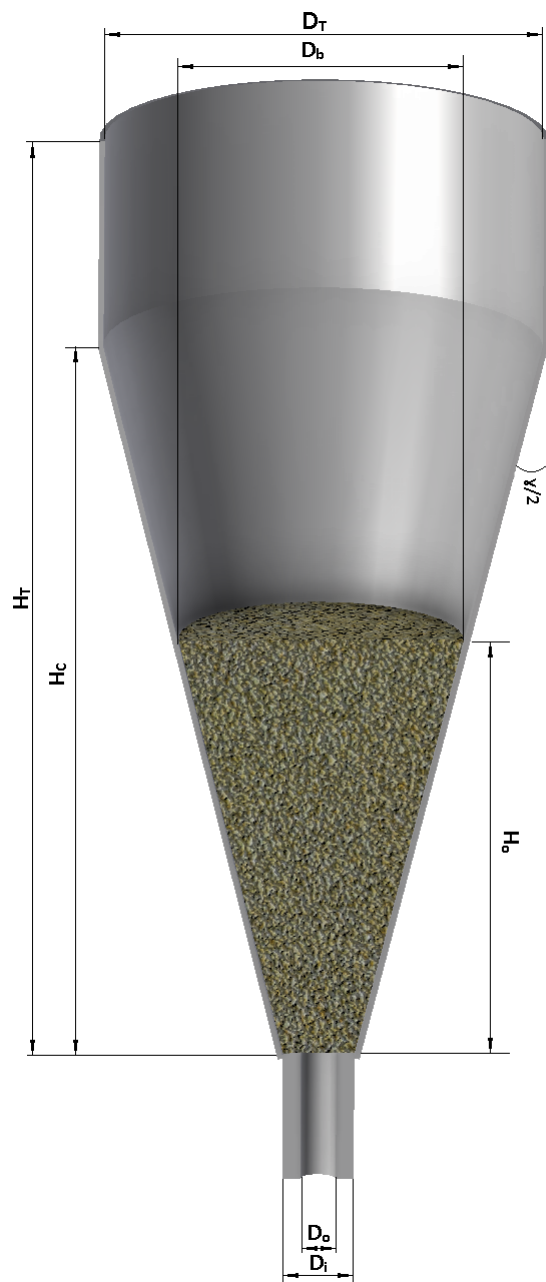


Figura 1.4. Corte transversal del contactor y los parámetros geométricos.

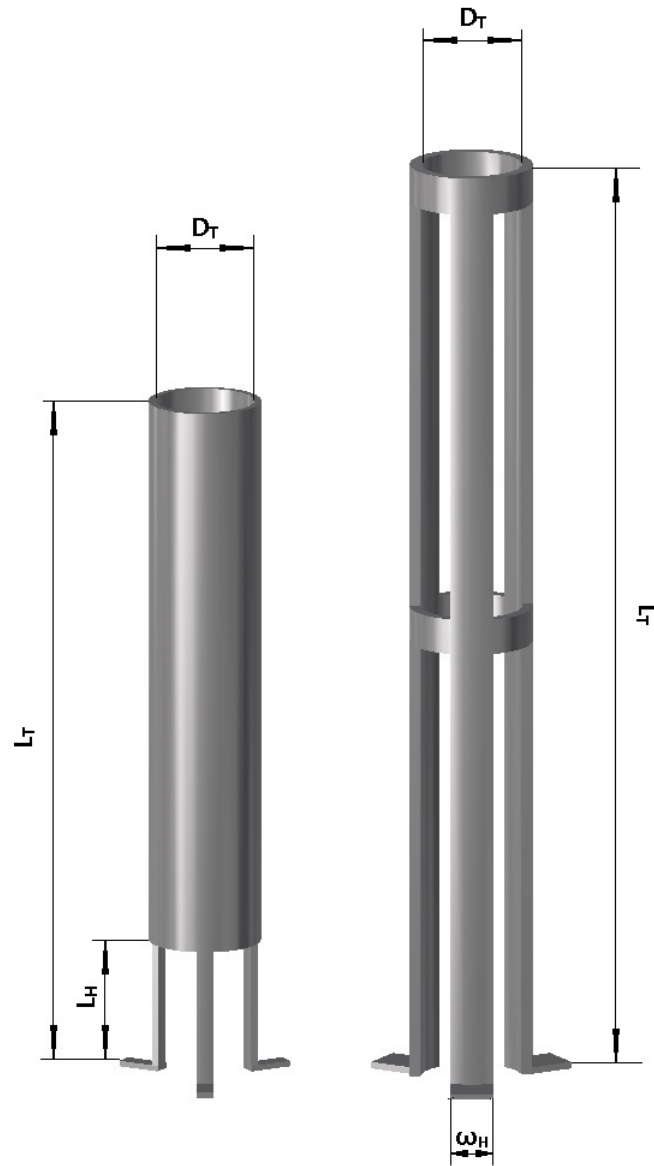


Figura 1.5. Diagrama de draft tube sólido (izquierda) y abierto (derecha).

2. CAPÍTULO

OBJETIVOS

Los objetivos principales de este proyecto son por un lado, obtener el u_{ms} para ciertas biomásas en diferentes condiciones, por otro, ajustar ecuaciones que predigan el u_{ms} en spouted bed mediante las condiciones del sistema y finalmente obtener los mapas de operación de combustión de diferentes biomásas en spouted bed.

La experimentación en frío se llevará a cabo de tres formas: primeramente se experimentará sin ningún dispositivo interno, luego se utilizarán diversos draft tubes abiertos y finalmente, utilizando draft tubes cerrados. Operando de esta manera se cubrirá un amplio rango de dispositivos, con el fin de abarcar todas las condiciones posibles. Para cada modo de operación se han ajustado únicamente aquellas ecuaciones que en sus rangos de operación mejor describen el sistema. Con objeto de no hacer cambios innecesarios en las ecuaciones establecidas, estas serán las pautas a seguir:

- Medir el u_{ms} en diferentes condiciones, tanto con draft tube como sin draft tube con las cinco biomásas.
- Utilizar las mejores ecuaciones bibliográficas para predecir el u_{ms} experimental.
- Minimizar el error de las ecuaciones bibliográficas debido, en gran medida, a la utilización de partículas no uniformes y unas densidades aparentes más pequeñas a aquellas para las cuales estas ecuaciones fueron desarrolladas.
- Mediante parámetros estadísticos, determinar los coeficientes cuyo cambio es representativo, para lograr el menor error junto con la menor cantidad de coeficientes modificados.
- Adición de nuevos bloques adimensionales en el caso de que sean estadísticamente representativos.

Para obtener los mapas de operación en caliente de tres de las biomásas se va a utilizar un combustor, obteniendo las condiciones bajo las cuales la combustión es estable junto con los perfiles de temperatura para cada caso .

3. CAPÍTULO

EXPERIMENTAL

Como se ha explicado previamente, se ha realizado el estudio fluido-dinámico en un contactor cónico para la determinación de ecuaciones que predigan u_{ms} con biomasa en cada modo de operación de manera adecuada. El equipo utilizado ha sido ampliamente explicado por anteriores autores en la bibliografía [Altzibar *et al.*, 2013], [Olazar *et al.*, 1992]; estando el diagrama de este equipo representado en la Figura 3.1. Una soplante que puede proporcionar un caudal de aire de hasta $300 \text{ N m}^3 \text{ h}^{-1}$ sule al sistema del aire necesario para la experimentación. El fluido es guiado hasta dos rotámetros (cada uno con una válvula) con intervalos de medida del caudal de $2.5 - 30$ y $30 - 250 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ respectivamente. Los rotámetros están conectados con la entrada del contactor mediante una tubería de sección circular y en la entrada una lamina de goma ajusta el diámetro de entrada. El fluido es expulsado por la parte superior mientras que con un manómetro de 1500 mm de columna de agua se mide la diferencia de presión dinámica entre la entrada del contactor y la salida de este.

Los contactores están fabricados de poli (metil metacrilato) y se ha trabajado únicamente en la parte del contactor de perfil cónico. La nomenclatura que se utilizará al describir los parámetros geométricos se encuentra descrita en la Figura 1.4.

En el caso de la obtención de los mapas de operación en caliente de tres de las biomosas el equipo ha sido diferente. En este caso se ha utilizado un cono de acero con dos resistencias eléctricas: una alojada en la pared y otra en la entrada del aire (en rojo en la Figura 3.2).

La entrada del aire esta calorifugada para poder controlar mejor la temperatura y reducir así pérdidas. A su vez, la sección diagonal del alimentador previa a entrar al combustor esta refrigerada por motivos que se explicarán más adelante.

El sistema es capaz de controlar las temperaturas del aire y la pared e indicar los valores que van tomando estos a medida que la temperatura aumenta por la alimentación de la biomasa. Las temperaturas dentro del reactor se registran como se ve en la Figura 3.3 mediante un termopar multipunto y las señales $0 - 10 \text{ V}$ producidas por los indicadores-

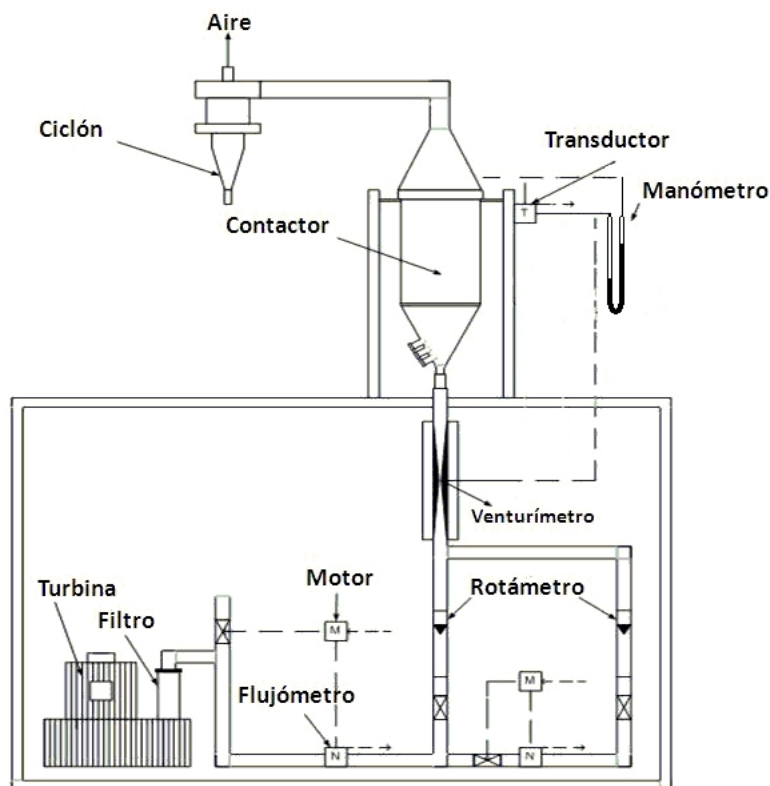


Figura 3.1. Diagrama del equipo experimental de la fluidodinámica en frío.

transmisores (TIT en la Figura 3.3) se introducen al ordenador mediante una tarjeta NI-6008 de *National Instruments*. Esta tarjeta tiene una resolución de 12 bits lo que se traduce en que puede producir 4096 valores digitales distintos. Para un termopar tipo *K* y un rango de temperaturas 0 – 1250 °C la sensibilidad de la tarjeta es de 0.3 °C lo que es más que suficiente para la aplicación que se le va a dar. Las consignas a los controladores (TIC en la Figura 3.3) solo se envían del ordenador una vez o cuando se quiere cambiar la temperatura del proceso, ya que el propio controlador es el que calcula el tiempo que el circuito de la resistencia eléctrica debe estar cerrado para obtener una temperatura determinada. La velocidad de alimentación se controla mediante un relé temporizador dada que la velocidad del motor eléctrico y el reductor (aumenta el par y reduce la velocidad del eje) es fija.

Para extraer los gases de combustión y que estos no se introduzcan en el alimentador, impidiendo la caída de la biomasa, se utiliza una bomba de vacío. Esta bomba (descrita como un eyector en la Figura 3.3) crea el vacío necesario para mover el ciclón y el gas a través de todas las tuberías. El vacío es creado por el efecto *venturi* con aire comprimido a un máximo de 6 bar de presión de entrada. A medida que la temperatura aumenta en el reactor, los gases se expanden y el trabajo que ha de efectuar este aparato aumenta, haciéndose necesario el ajuste de la presión de entrada. Para ajustar esta presión se utiliza un mechero en la que la succión adecuada es aquella que consigue arrastrar parcialmente la llama del mechero. Esta succión por su parte, no puede ser excesiva ya que de lo contrario produce arrastre de finos con las ineficiencias y probables atascamientos del ciclón.

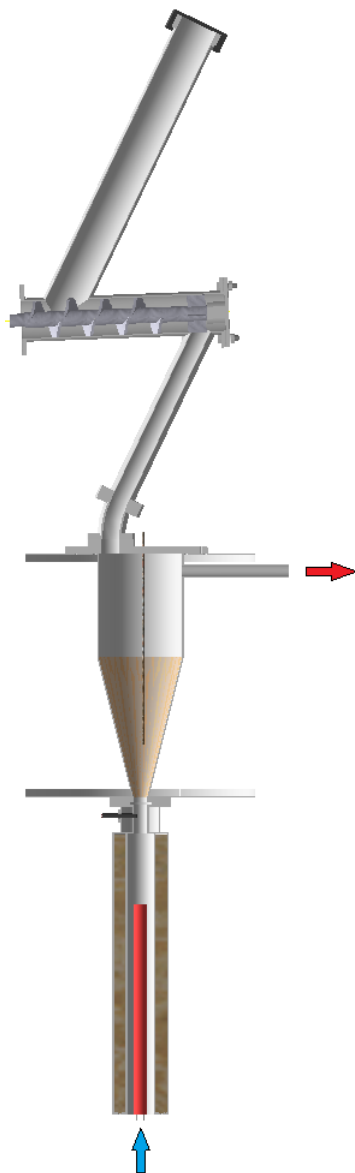


Figura 3.2. Corte del combustor de spouted bed con el alimentador de biomasa.

Por razones geométricas la biomasa no cae libremente por gravedad al combustor, de manera que hay que mantener refrigerada siempre la zona diagonal inferior para que la alimentación no desprenda vapores o se condense humedad en esta zona por el cambio de temperatura. De no hacerlo así la biomasa se queda adherida a las paredes del tubo, favoreciendo que la materia se amontone en el tornillo y finalmente este deje de girar por el exceso de carga que se le exige.

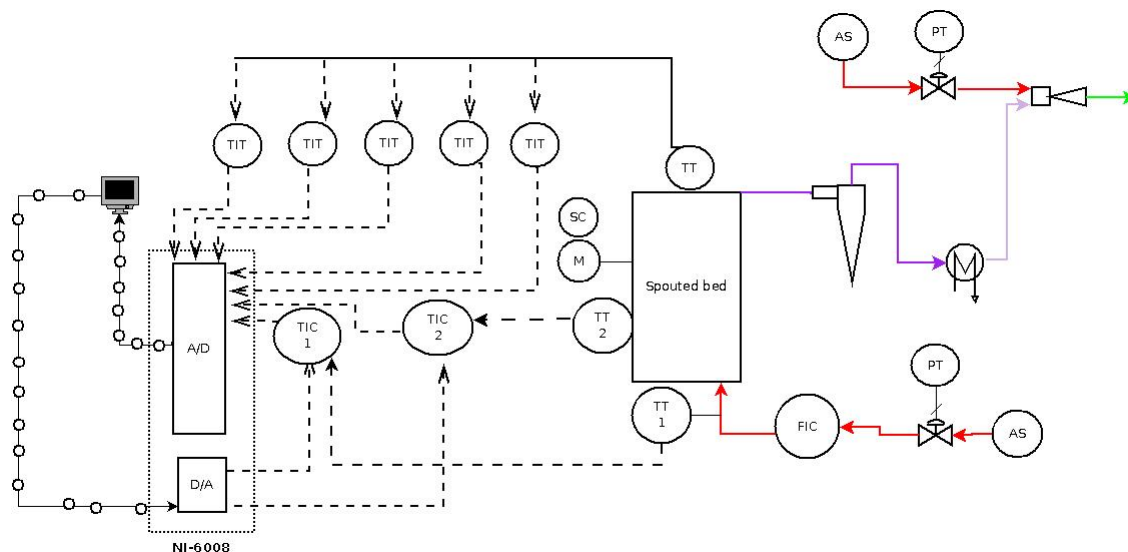


Figura 3.3. Diagrama de flujo del equipo con las líneas de aire a presión en rojo y succión en morado.

3.1. Propiedades de las biomazas

Las biomazas utilizadas en la experimentación en frío han sido cinco, observándose su comportamiento con todas las condiciones que se explicarán más adelante. La fluidización de las diferentes biomazas viene en gran medida condicionada por las propiedades de la materia, de modo que conocer las propiedades de cada tipo de biomasa es de vital importancia.

Por un lado ha de conocerse el diámetro medio de partícula que conforma el lecho, ya que este parámetro influye en el modo de empaquetarse el lecho y además el spouted bed solo admite operar de manera estable en unos rango de D_0/d_p . Para obtener el diámetro de partícula de cada biomasa, se han cogido aproximadamente 10 gr de cada biomasa y se han tamizado utilizando tamices de 0.5, 1, 2, 3, 4 y 5 mm de apertura. Pesando la cantidad de biomasa retenida en cada tamiz y considerando que el diámetro de las rejillas del tamiz es igual al de la partículas, se ha calculado el diámetro medio mediante la Ecuación 3.1.

$$\bar{d}_p = \frac{m_i d_{p_i}}{\sum_{i=1}^N m_i d_{p_i}} \quad (3.1)$$

Otros parámetros físicos importantes de la materia han sido las densidades aparentes y del lecho. Para calcular las densidades aparentes se han utilizado la porosimetría de mercurio. Dado que las biomazas utilizadas son higroscópicas, el volumen de las partículas irregulares no se ha podido determinar mediante el desplazamiento de agua. Con el mercurio, por el contrario, si que se puede utilizar el desplazamiento de volumen debido a la tensión superficial de las partículas. De manera que efectuando una prueba de porosime-

tría de mercurio, además de obtener la porosidad de una muestra se mide con precisión su densidad de partícula, ρ_b . Para calcular la densidad del lecho se ha utilizado una probeta de diámetro aproximadamente 10 veces mayor al diámetro medio de cada biomasa y se ha enrasado esta en 30 ml. Pesando la probeta antes y después de llenarla se ha obtenido la densidad de lecho, ρ_s , para cada material .

La humedad determina en gran medida la eficiencia de la combustión y su fluidización, de manera que este parámetro también se ha medido con un medidor halógeno HR83, MetterToledo tomando muestras del rango 0.5 – 1 g. Las muestras en este medidor son calentadas con una luz halógena a 105°C durante un determinado periodo de tiempo y la masa pérdida de la muestra se asocia a la masa de la humedad que la partícula tenía inicialmente. El tiempo necesario depende de la humedad de la muestra, ya que en vez de operar por tiempo el medidor determina cuando una muestra se ha secado suficiente mediante su velocidad de pérdida de masa dm/dt .

El ultimo parámetro físico medido por su importancia en biomosas de esta naturaleza ha sido la esfericidad. Ha diferencia de otras pruebas de fluidodinámica en frío realizadas, las partículas utilizadas en esta han cubierto un rango de esfericidades muy grande. Por la dificultad que tiene la medida de este parámetro se han efectuado dos tipos de ensayos. Por un lado se ha utilizado la correlación gráfica de Brown existente en la bibliografía, que relaciona la porosidad del lecho con la esfericidad de la partícula [Brown, 1970]. La porosidad del lecho se ha calculado mediante la comparación de la densidad aparente y la del lecho, atribuyendo la diferencia de estos dos datos al volumen extra que ocupan los huecos entre partículas (porosidad del lecho, ϵ_s).

$$\frac{\Delta P_s}{L} = \frac{150(1 - \epsilon)^2 \mu u}{\epsilon d_p^2 \phi} + \frac{1.75(1 - \epsilon) \rho u^2}{\phi \epsilon^3 d_p} \quad (3.2)$$

El segundo método utilizado para calcular la esfericidad de partícula ha sido la expresión de *Ergun* para la expansión de un lecho de partículas no uniformes mostrada en la Ecuación 3.2. Debido a que todos los sólidos utilizados pertenecen a el grupo D de la clasificación Geldart [Geldart, 1973] algunos sólidos no se han expandido debidamente, pero los que lo han hecho han medido una esfericidad con un error de un 15% respecto a la medida por la correlación de Brown. En consecuencia, se han tomado por ciertas las medidas de esfericidad mediante la correlación de Brown, dado que la expresión de *Ergun* puede tener hasta un error de un 20% [Ozahi *et al.*, 2008].

Las propiedades de la biomasa se muestran en la Tabla 3.1 y serán utilizadas en el análisis estadístico que se explicará más adelante. Para finalizar con las propiedades de la materia, también se ha utilizado la composición elemental de cada biomasa para determinar el caudal de aire estequiométrico que una determinada alimentación necesita en el combustor. Estos datos se encuentran en la Tabla 8.1 del Apéndice dado que no se consideran datos de excesiva relevancia para la comprensión del proceso seguido.

Tabla 3.1. Propiedades de las biomásas utilizadas.

Propiedades	Arroz	Olivo	Rúmex	Serrín	Algas
\bar{d}_p, mm	1.48	2.33	0.93	0.76	1.02
$\phi, \% p / pb.h$	19.93	72.98	39.58	51.65	23.77
Densidad, $\rho_b, kg/m^3$	975.40	1292.20	406.10	496.40	702.40
Densidad, $\rho_s, kg/m^3$	126.67	650.00	121.33	188.67	119.33
Humedad, %	9.17	8.83	8.86	9.53	8.2
Ar	93162.79	489135.43	9684.73	6596.98	22292.08
Clasificación Geldart	D	D	D	D	D

3.2. Experimentación en frío

Como ya se ha adelantado se ha experimentado en frío con tres modos de operación: sin draft tube, con draft tube sólido y con draft tube abierto. Cada modo de operación tiene sus propiedades y ecuaciones específicas dado que el patrón del aire que el lecho describe es completamente diferente, por ello se han analizado por separado.

3.2.1. Experimentación sin draft tubes

De todos los factores geométricos los únicos que no han sido modificados en toda la experimentación han sido el diámetro de la sección circular D_c y la base del contactor D_i , siendo sus valores 36 y 6 cm respectivamente. El resto de parámetros se han modificado, experimentando con todas las combinaciones posibles entre ellos. Los diferentes parámetros modificados en la experimentación se muestran en la Tabla 3.2, cambiándose tanto los parámetros físicos del contactor como la altura del lecho, H_0 .

Tabla 3.2. Parámetros geométricos modificados durante la experimentación en frío.

Parámetros	Niveles	
	Sin Draft Tubes	Con Draft Tubes
$\gamma, ^\circ$	28, 33, 36, 45	28, 33, 36, 45
D_0, cm	3, 4, 5, 6	4, 5
H_0, cm	5, 10, 15, 20, 30	20, 30

El objetivo de la experimentación ha sido el cálculo de u_{ms} en diferentes condiciones, para ello, el caudal de aire se ha controlado con una válvula, aumentando el caudal por encima de Q_{ms} , rompiendo el lecho y creando la fuente. Una vez creada la fuente y el spouting

estable, la válvula se ha cerrado poco a poco observando en que caudal el contenido de la zona anular ha dejado de fluidizar en todas sus partes. El caudal límite en el que el lecho aun fluidiza en todas sus partes pero al bajarlo se pierde el movimiento de todo el lecho se ha tomado como Q_{ms} .

$$Re = \frac{\rho_g \bar{d}_p u_{ms}}{\mu} \quad (3.3)$$

Como se ve en la Tabla 3.4, algunas ecuaciones en lugar de ajustar u_{ms} han ajustado el número adimensional Re . El motivo principal es el de normalizar los resultados, ya que el movimiento de fluidos, por lo general, tienden a comportarse de manera similar a Re cercanos. En la experimentación y a la hora de comparar datos experimentales con aquellos predichos por las ecuaciones se ha utilizado este factor con objeto de normalizar los resultados. Para calcular el Re , se ha utilizado la expresión de Re para un flujo externo. Esta expresión estando representada en la Ecuación 3.3 requiere del conocimiento de la velocidad del fluido así como de diversos factores dependientes de las condiciones de operación.

$$\mu = 5.310^{-7} T^{0.634} \quad (3.4)$$

El factor que relaciona u_{ms} y Q_{ms} es la sección de entrada, siendo esta $f(D_0)$. Para la obtención de la densidad del aire, ρ_g , se ha considerado que el fluido es ideal y que en todo momento se opera a la misma temperatura. Mediante la ecuación de estado de gases ideales se ha obtenido el dato, considerando una masa molecular del aire de 28.9 g mol^{-1} y una temperatura de 298 K . Finalmente, se requiere del conocimiento de la viscosidad del aire, μ , por lo que mediante la correlación obtenida de la bibliografía [Perry & Green, 1997] y expresada en la Ecuación 3.4 se ha calculado el factor suponiendo que no cambia durante toda la experimentación.

3.2.2. Experimentación con draft tubes

Durante la experimentación se han utilizado draft tubes sólidos y draft tubes abiertos de diferentes tamaños e índices de apertura, estando estos dispositivos descritos en la Tabla 3.3. Cabe indicar que en el caso del draft tube sólido se han utilizado dos alturas de entrada (0.15 y 0.075 m) pero con la de 0.15 m no se ha obtenido una fluidización estable, por lo que solo se ha efectuado el estudio fluidodinámico con el de 0.075 m . En el caso de los draft tubes abiertos, se observa que se han utilizado dispositivos ligeramente más largos a los sólidos, esto se debe a que en previos estudios se indica que la parte superior del draft tube debe sobresalir del lecho como mínimo $2/3$ del H_0 , para que la fuente reduzca su altura y aumente su densidad, reduciendo a su vez la pérdida de carga del sistema [Altzibar *et al.*, 2009], por lo que se ha seguido este criterio.

Tabla 3.3. Características de los draft tubes utilizados.

Tipo de dispositivo	$D_T, \text{ m}$	$L_T, \text{ m}$	$L_H, \text{ m}$	$\omega_T, \%$
Draft Tube Abierto	0.053	0.5	-	78.8
	0.053	0.5	-	61.09
Draft Tube Solido	0.053	0.37	0.075	-

Las condiciones utilizadas en la experimentación, mostradas en la Tabla 3.2, con draft tube no han sido de un rango tan amplio como el hecho sin dispositivos internos, ya que en esta primera experimentación ya se han identificado las condiciones más propicias para la fluidización estable.

3.2.3. Fluidodinámica y ajuste de ecuaciones

Para predecir y ajustar el comportamiento del sistema el parámetro a predecir es u_{ms} , por ello se han utilizado algunas de las mejores ecuaciones publicadas en relación a este factor. El problema reside en que a pesar de que las ecuaciones funcionan bien en condiciones en las que el solido es denso y uniforme, a la hora de utilizarla con biomasa su ajuste no es adecuado. Por ello, se ha propuesto cambiar los coeficientes empíricos poniendo en lugar de los de la bibliografía, los que mejor ajusten a los datos experimentales. Para medir el error entre u_{ms} predicha y experimental se ha utilizado el método de mínimos cuadrados normalizados. Las ecuaciones ajustadas han sido diferentes dependiendo el modo de operación (sin draft tubes o con cada tipo de ellos) mostrándose las ecuaciones utilizadas con sus coeficientes originales en la Tabla 3.4.

$$ASRE = \left(\frac{Re_{calc} - Re_{exp}}{Re_{exp}} \right)^2 \quad (3.5)$$

Para el ajuste se ha utilizado un programa ejecutado en *Scilab* que, mediante un algoritmo basado en el método de máximos de *Nelder – Mead*, cambia todos los coeficientes de las ecuaciones minimizando el error entre los datos experimentales y los calculados mediante el error normalizado descrito en la Ecuación 3.5. El algoritmo de *Nelder – Mead* ha utilizado como valores iniciales los coeficientes originales de la Tabla 3.4, para evitar posibles mínimos locales y así conseguir, si los hubiera, coeficientes cercanos a los anteriores.

Las ecuaciones de la bibliografía, al haber sido probadas con éxito con muchos tipos de partícula [San José *et al.*, 2007], se ha decidido tratar de cambiar solo los coeficientes relacionados con la naturaleza del lecho, ya que estos son los que más han influenciado en

el mal ajuste de las ecuaciones publicadas. Para este fin, se ha modificado ligeramente el programa anterior, para que solo cambiase los parámetros antes mencionados y todas sus combinaciones mostrando los errores de cada una de ellas.

Dado que se observó que algunas combinaciones eran mejores que otras se decidió que se debía utilizar la estadística para que esta fuese la herramienta que mediase entre los coeficientes que eran merecedores de ser cambiados y los que no, para así conseguir el menor error con el mínimo de coeficientes cambiados.

La representatividad de cada cambio ha sido medido mediante la distribución F de Fisher como ya se ha indicado con anterioridad. Para calcular la F se ha comparado el SSR que se obtiene sin cambiar ningún coeficiente respecto a hacerlo con uno. Este proceso se ha realizado para todos los coeficientes de cada ecuación, obteniendo una F para cada una siguiendo la Ecuación 3.6. La mayor F de todas para cada iteración se ha tomado como la adecuada a evaluar si es representativa o no.

$$F_i = \frac{SSR_{i-1} - SSR_i}{\frac{SSR_i}{N-i}} \quad (3.6)$$

Una vez obtenido el F más representativo entre todas las posibles combinaciones, con los grados de libertad que aparecen en la Ecuación 3.6 (1 para el numerador y $N - i$ para el denominador) se ha interpolado el valor crítico de F en las tablas del 95% de confianza y si esta ΔF ha sido mayor a 0, se ha considerado que el cambio es representativo y por consiguiente se ha modificado el coeficiente en cuestión.

Al finalizar la iteración, la ecuación recién cambiada a pasado a ser la ecuación de referencia y se ha intentado buscar de nuevo, otro coeficiente cuyo cambio junto a las anteriormente modificados sea representativo.

Este procedimiento se ha seguido hasta que el programa ha determinado que ya no era representativo ninguno de los posibles cambios o hasta cambiar todos los coeficientes.

Aparte de esta primera estrategia de análisis se ha utilizado una segunda estrategia para obtener mejores resultados si los hubiera. En esta segunda estrategia, de cada ecuación se han valorado tres casos. A el primero se le ha forzado a que la K sea el primer cambio significativo y luego se le ha dejado libre como en la anterior estrategia. En el segundo caso se ha forzado el Ar para que sea el primer cambio significativo y en el tercer caso se han forzado a que la K y Ar sean conjuntamente los primeros dos cambios significativos.

El motivo de efectuar esta segunda estrategia es que lo único modificado en este estudio fluidodinámico son las propiedades de la materia, por tanto, se ha analizado si al forzar alguna de las constantes relacionadas con el material se obtiene un error razonable con una menor cantidad de coeficientes modificados.

Al finalizar todo este análisis, el algoritmo ha calculado cuatro posibles ajustes por ecuación junto con sus respectivos coeficientes y errores. Para elegir cual es el mejor de todos se ha utilizado de nuevo la Ecuación 3.6 pero en este caso los grados de libertad del numerador han sido la diferencia de coeficientes cambiados entre una estrategia y otra. Como ultima sección en el ajuste de las ecuaciones de u_{ms} , se ha efectuado el análisis estadístico recién explicado, pero añadiendo un nuevo bloque adimensional. Los dos bloques adimensionales probados por separado han sido la porosidad de partícula (ϵ_b) y la esfericidad (ϕ). Se han escogido estos dos parámetros por ser importantes en la fluidización de partículas poco densas e irregulares.

Este ultimo análisis está esquematizado en el diagrama de flujo de la Figura 3.4, en el que se ha comenzado con una potencia respecto al bloque adimensional nuevo de 0. El motivo es que, de esta manera se puede comparar la ecuación con y sin esfericidad. Así, el programa decide si una ecuación con algunos parámetros cambiados es menos representativa respecto a una ecuación con algunos parámetros cambiados más la adición del nuevo bloque adimensional.

Desde el punto de vista del algoritmo cabe aclarar que el algoritmo ha tenido como objetivo siempre la minimización de la Ecuación 3.5 y los *SSR* solo se han utilizado para obtener la *F*, ya que el mínimo del *ASRE* no coincide con el mínimo del *SSR* al no estar este último normalizado.

3.3. Experimentación en caliente

El equipo antes descrito para la combustión de la biomasa tiene algunas características ligeramente diferentes a las utilizadas en la experimentación en frío. Por un lado la escala del reactor es mucho menor, con un diámetro de base de 2 cm frente a los 6 cm del reactor en frío. Además el único ángulo utilizado en la experimentación en caliente ha sido el de 28° dada la dificultad y inviabilidad de cambiarlo.

En primer lugar se ha efectuado un estudio fluidodinámico para la arena a diferentes alturas y temperaturas. El motivo de efectuar un estudio de estas características es determinar cual es el caudal mínimo que las diferentes alturas de arena necesitan para fluidizar a una temperatura dada, ya que con la expansión del fluido al aumento de temperatura un menor caudal de aire puede hacer fluidizar un lecho con el que a temperatura ambiente no puede.

$$V = \frac{m}{\rho_s} = \frac{H_0 \pi (D_i^2 + D_b^2 + D_b D_i)}{12} \quad (3.7)$$

La característica principal que se va a utilizar es la densidad del lecho de la arena, siendo

para esta en particular 1640 kg m^{-3} . Con este parámetro y la Ecuación 3.7 para el volumen del tronco de un cono, se determina la masa necesaria de arena para conseguir la altura inicial de lecho que se quiera, siendo $D_i: 2 \text{ cm}$ y $D_b = f(\text{tg}(\gamma/2))$.

Con el objeto de cubrir un amplio rango de operaciones se ha determinado Q_{ms} para alturas de lecho de 3,5, 10 y 15 cm y temperaturas 400, 500 y 600 °C. La razón de comenzar desde 400 °C es que a esta temperatura se produce la autoignición de la biomasa y será la temperatura de inicio en el controlador en los mapas de operación. Determinar la fluidización de la arena a 500 y 600 °C permite fijar el caudal que necesita la arena una vez la combustión está empezando, ya que como se verá esta etapa de arranque es muy importante en aquellas biomasas con un alto contenido de cenizas (la cáscara de arroz, en concreto).

$$Q_{\text{Aire}}^{NPT} (l/min) = \frac{m(1 - \chi_A - \chi_M)N_{O_2} 0.082 * 298}{0.21 M} \quad (3.8)$$

Como se ha mencionado con anterioridad se debe conocer el caudal de aire estequiométrico para una cierta alimentación. Para calcularlo se ha utilizado la Ecuación 3.8 considerando que solo el carbono e hidrógeno se oxidan y que lo hacen totalmente. De esta manera con los datos de la Tabla 8.1 del Apéndice se han obtenido las líneas estequiométricas que aparecerán a lo largo de estas páginas.

Una vez determinados los límites principales de alimentación, se ha analizado la fluidodinámica alimentando biomasa, en un principio solo en aquellos caudales cuyo estequiométrico esté cerca del caudal mínimo de spouting de la arena. De este modo se puede determinar cual es el caudal mínimo de biomasa que se puede fluidizar. Este estudio se ha efectuado con serrín, hueso de olivo y cáscara de arroz, ya que entre las tres se cubren las biomasas densas (olivo), medias (serrín) y ligeras (arroz).

Tras haber determinado el mínimo caudal de biomasa a alimentar se ha aumentado la alimentación de biomasa, siempre siguiendo la línea estequiométrica o caudales superiores a este. Utilizando una altura de 3 cm por su correcta fluidización y relativo bajo consumo de aire, se han registrado en estos puntos las temperaturas a cinco alturas diferentes con una separación de 2 cm entre ellas y estando la primera a la altura inicial del lecho (3 cm en este caso). Al registrar las temperaturas en diferentes ratios de excesos de aire y caudales de biomasa se puede hacer una primera aproximación de las condiciones en el combustor durante la experimentación y su dependencia de las variables principales (caudal de biomasa y aire).

Para el mapa de operaciones del serrín se han elegido cuatro alimentaciones de biomasa : 3.61, 4.97, 6.19, 7.97 g min^{-1} siendo estos las alimentaciones que se obtienen para el serrín en algunas de las posiciones del relé que controla la corriente al motor del alimentador. Los caudales de aire han sido los estequiométricos para cada alimentación y aquellos hasta $40^{NPT} \text{ l min}^{-1}$. Como es lógico este caudal máximo solo se ha utilizado con las dos alimen-

taciones de biomasa más grandes, con las alimentaciones de 3.61 y 4.97 se ha llegado a máximos de caudal de alimentación de 30 y $35^{NPT} \text{ l min}^{-1}$ respectivamente.

En el caso del olivo solo se han elegido dos alimentaciones de biomasa muy próximas entre si, siendo estas 8.32 y 8.88 g min^{-1} dado que una pequeña variación en el relé cambia mucho el caudal de entrada por la gran densidad del olivo en comparación con las otras dos biomasa. Por esta gran densidad de la materia el caudal estequiométrico necesario para la experimentación aumenta siendo como mínimo $32^{NPT} \text{ l min}^{-1}$ y en consecuencia la succión y el vacío del equipo se complica. Los caudales por encima del estequiométrico han sido para los dos casos de 35 y $40^{NPT} \text{ l min}^{-1}$.

Para la ultima biomasa, primeramente la cáscara de arroz se ha triturado a un $d_p < 2 \text{ mm}$ y se le ha quitado la fracción $d_p < 0.3 \text{ mm}$. El principal motivo ha sido la falta de fluidización de la cáscara de arroz al convertirse en ceniza, dado que como esta ampliamente publicado el arroz suele tener un alto contenido de cenizas de entorno a $13 - 24 \% p/p_{b.s}$ cuya composición es un 95% sílice. Este esqueleto del arroz no mengua en volumen al quemarse sino que se mantiene con un volumen muy parecido al inicial. Al no reducirse en volumen, por un lado dificulta la fluidización fomentando el apelmazamiento siendo este un efecto que se retroalimenta.

Este efecto lleva a la necesidad de un gran caudal de aire para fluidizar el conjunto del lecho lo que no es factible con el hecho de que la mayoría de la composición con poder energético del arroz son volátiles los que no requieren de semejantes caudales de aire. Además de esto, está demostrado que el arroz por su estructura rígida guarda gran cantidad de carbono fijo en su estructura después de quemarse por lo que la atrición es la mejor solución para liberar esta energía. Para mejorar la atrición, reducir el volumen de biomasa, arrastrar las cenizas y ahorrar en caudal de aire la trituración del arroz se ha hecho necesaria [Natarajan *et al.*, 1998].

Los caudales de alimentación de la cáscara de arroz han sido tres: 4.67, 7.11 y 10.76 g min^{-1} alcanzándose una alimentación de aire máxima de $35^{NPT} \text{ l min}^{-1}$ para el mayor volumen de biomasa. En los otros dos los máximos han sido de 25 y $30^{NPT} \text{ l min}^{-1}$ respectivamente.

Para la toma de los datos se ha considerado que cuando el termopar más alejado del lecho se ha mantenido constante alimentando biomasa se ha alcanzado el perfil estable de temperaturas. Las otras cuatro temperaturas especialmente las dos primeras tienen valores muy vivos de temperaturas por depender mucho de quemas puntuales de más o menos material por lo que no se pueden tomar como referencias.

Tabla 3.4. Ecuaciones de la bibliografía.

Ecuación	Autor/es
Sin Draft Tube	
$Re_{ms} = 0.051 Ar^{0.59} \frac{D_i^{0.1}}{D_c} \frac{H_0^{0.25}}{D_c}$	Nikolaev and Golubev, 1964 (1)
$Re_{ms} = 0.174 Ar^{0.5} \frac{D_b^{0.85}}{D_i} tg \frac{\gamma}{2}^{-1.25}$	Gorshtein and Mukhlenov, 1964 (2)
$Re_{ms} = 0.4 Ar^{0.52} \frac{H_0^{1.24}}{D_i} tg \frac{\gamma}{2}^{0.42}$	Tsvik eta al., 1967 (3)
$Re_{ms} = 0.028 Ar^{0.57} \frac{D_b^{1.27}}{D_i} \frac{H_0^{0.48}}{D_i}$	Markowski and Kaminski, 1983 (4)
$Re_{ms} = 0.126 Ar^{0.5} \frac{D_b^{1.68}}{D_i} tg \frac{\gamma}{2}^{-0.57}$	Olazar et al., 1993 (5)
$Re_{ms} = 0.73 Ar^{0.14} \frac{H_0^{0.9}}{D_i} \frac{\rho_p^{0.47}}{\rho}$	Goltsiker, 1967 (6)
$u_{ms} = 0.147 (2gH_0)^{0.5} H_0^{0.51} d_p^{0.61} D_i^{0.24} D_C^{-1.36} \left[\frac{\rho_p - \rho}{\rho} \right]^{0.48}$	Choi and Meisen, 1992 (7)
Draft Tube Sólido	
$Re_{ms} = 0.25 Ar^{0.5} \frac{H_0^{1.2}}{D_0} \frac{L_H^{0.3}}{D_0}$	Altzibar et al., 2013 (8)
$Re_{ms} = 0.204 Ar^{0.475} \frac{H_0^{1.24}}{D_0} \frac{L_H^{0.168}}{D_T} tg \frac{\gamma}{2}^{-0.13}$	Altzibar et al., 2009 (9)
$Re_{ms} = 0.126 Ar^{0.5} \frac{D_b^{1.68}}{D_0} tg \frac{\gamma}{2}^{-0.57} \frac{H_0 - h_r^{0.45}}{H_0} \frac{D_i^{0.17}}{D_i - D_T}$	San José et al., 2007 (10)
$Re_{ms} = 0.0137 Ar^{0.714} \frac{V_r \psi^{0.411}}{V_0} \frac{D_b^{0.554}}{D_0} \gamma^{0.8}$	Kmieck et al., 2009 (11)
Draft Tube Abierto	
$Re_{ms} = 0.126 Ar^{0.5} \frac{D_b^{1.68}}{D_0} tg \frac{\gamma}{2}^{-0.57} \omega_T^{0.3}$	Altzibar et al., 2013 (12)

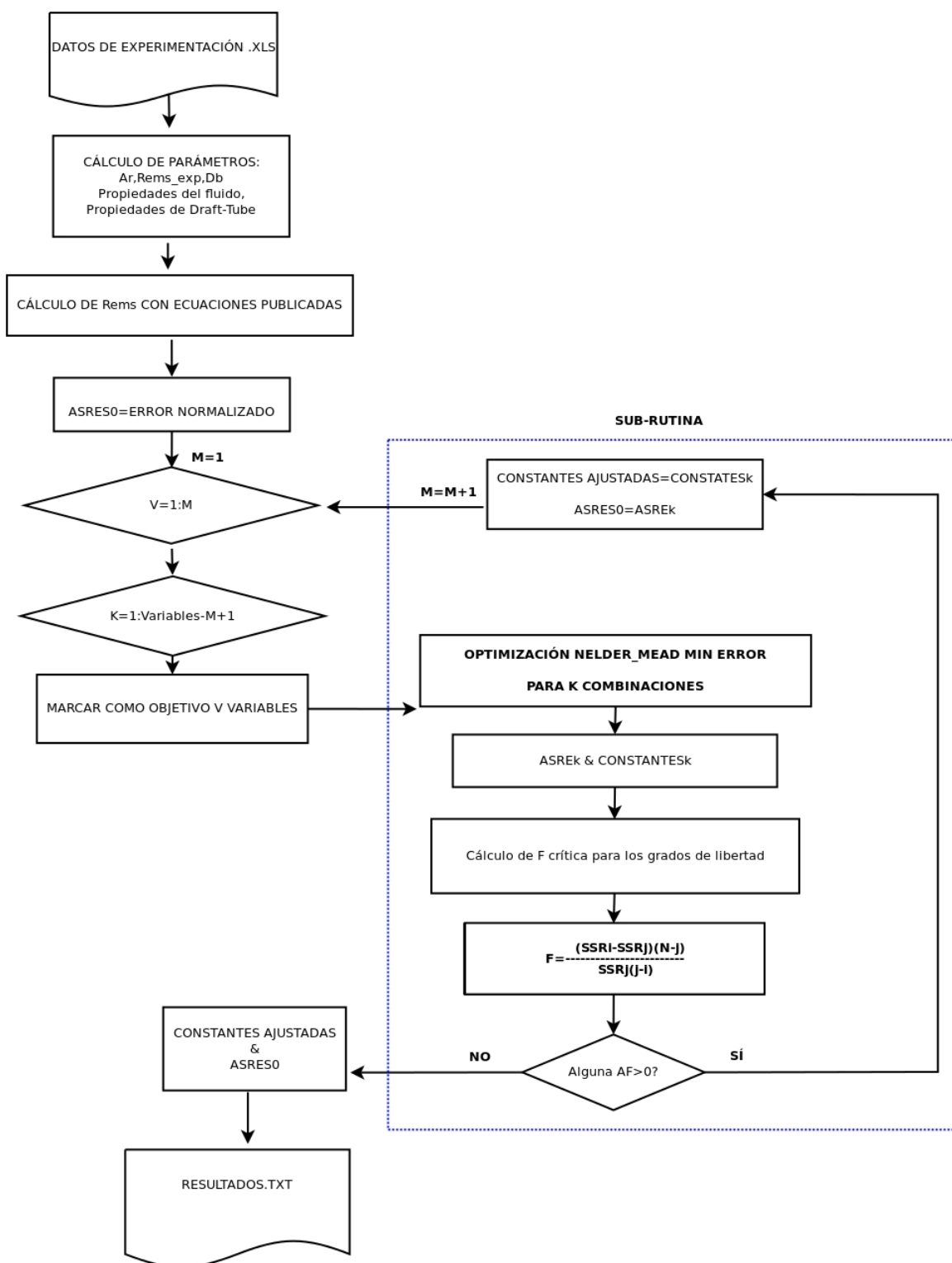


Figura 3.4. Diagrama de flujo de la rutina principal en el ajuste de ecuaciones mediante el estadístico F .

4. CAPÍTULO

RESULTADOS EXPERIMENTALES

En primer lugar se han analizado los datos experimentales desde un punto de vista fluidodinámico, con el objetivo de corroborar que el sistema no muestra ningún comportamiento no observado por anteriores autores. Para ello ha de relacionarse el parámetro a predecir, u_{ms} , con las diferentes características tanto del lecho como de los factores geométricos.

4.1. Análisis fluidodinámico

Como se ha explicado con anterioridad los factores modificados durante la experimentación pueden clasificarse en diferentes grupos, siendo el de los factores geométricos el primero que se analizará. Este grupo formado por el D_0 , γ y H_0 determinan en gran medida la cantidad de resistencia que tendrá que superar el aire para abrir el lecho, por lo que son de necesaria mención en las ecuaciones de predicción de u_{ms} si se quiere efectuar una correcta descripción del sistema.

Por un lado el D_0 determina el caudal que entra al contactor a una velocidad dada, por lo que podría suponerse que este factor reduce u_{ms} . Los datos publicados en cambio sugieren que esta relación no es totalmente cierta, dado que una entrada mayor implica la formación de un *spout* de mayor volumen por lo que la cantidad de sólido a desplazar es mayor y llega a compensar parcialmente al mayor caudal de entrada. En consecuencia la reducción de u_{ms} es más progresiva, como se observa en la Figura 4.1. La reducción lejos de ser lineal llega a tener un carácter asintótico para D_0 altos.

En estas misma representación se puede observar la relación entre u_{ms} y la densidad del lecho. A lechos más pesados como es el caso del olivo, la velocidad necesaria para levantar el lecho es mayor.

El segundo factor geométrico del contactor a analizar es el ángulo del cono, γ . Una vez

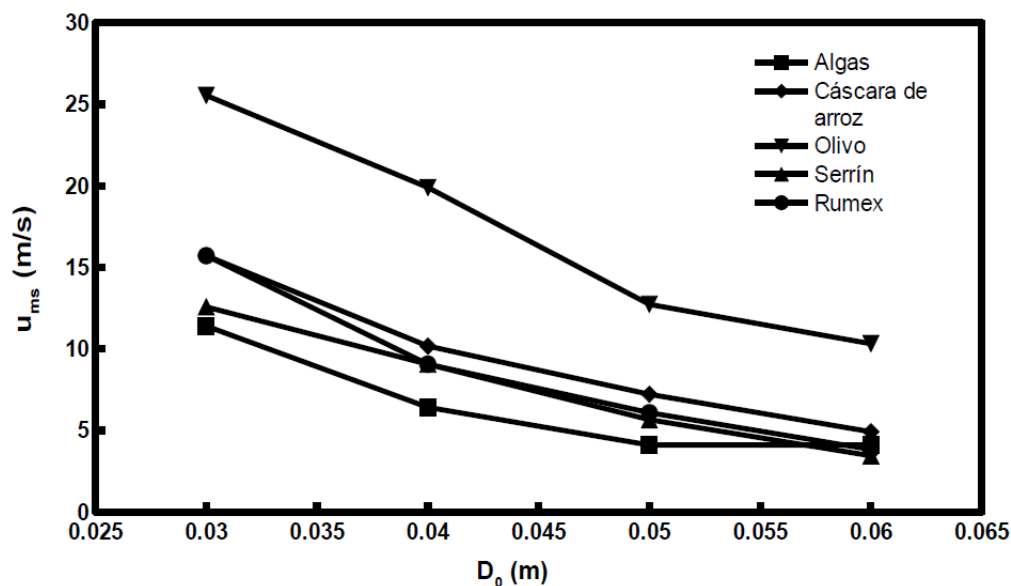


Figura 4.1. Representación de u_{ms} respecto al D_0 para los diferentes materiales.

más como se observa en la Figura 4.2 la relación no es lineal y se observa en algunos casos un mínimo local en ángulos comprendidos entre los 28 y los 36°. Este mínimo local también observado con anterioridad es debido nuevamente a equilibrio de dos efectos. Por un lado, al aumentar el ángulo del contactor la masa del lecho a una altura dada es mayor por razones geométricas. Pero por otro lado a ángulos muy pequeños la fuerza normal de la pared es despreciable y se comporta como una vertical. Por todo ello, u_{ms} tiene un mínimo local en el momento en el que la fuerza normal cobra fuerza y todavía la masa de lecho a una altura dada no ha aumentado suficiente. A ángulos grandes como se puede observar en las líneas de tendencia de la Figura 4.2 u_{ms} crece por el aumento del peso del lecho mencionado

El tercer y último factor geométrico a analizar es la altura inicial del lecho, H_0 . Al operar sin ningún dispositivo interno y al aumentar la altura del lecho el fluido debe vencer un mayor peso, por lo que u_{ms} es ascendente respecto a la altura como se representa en la Figura 4.3.

El segundo grupo de variables a analizar son los de la naturaleza del lecho. Estas variables son el factor adimensional de Arquímedes, Ar y la esfericidad, ϕ . Desde el punto del Ar al aumentar este, u_{ms} aumenta por el mayor peso del lecho o la menor viscosidad del fluido. Este efecto se puede representar en la Figura 4.4 que concuerda con las potencias positivas que se le atribuyen a este parámetro en las ecuaciones fluidodinámicas.

Desde el punto de vista de la esfericidad, ϕ cabe destacar que una mayor esfericidad lleva a un empaque más ordenado y denso por lo que la relación debería de ser ascendente como se muestra en la Figura 4.5. Cabe reseñar que solo se han utilizado el serrín, el rumex y las algas para hacer la comparación porque tienen densidades son parecidas por lo que

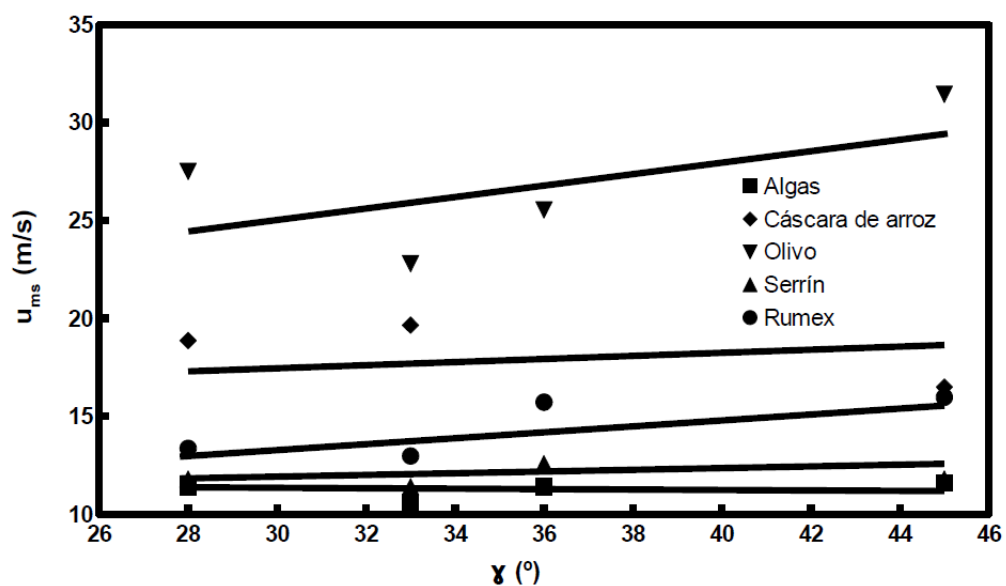


Figura 4.2. Representación de u_{ms} respecto al ángulo del contactor para las diferentes biomazas.

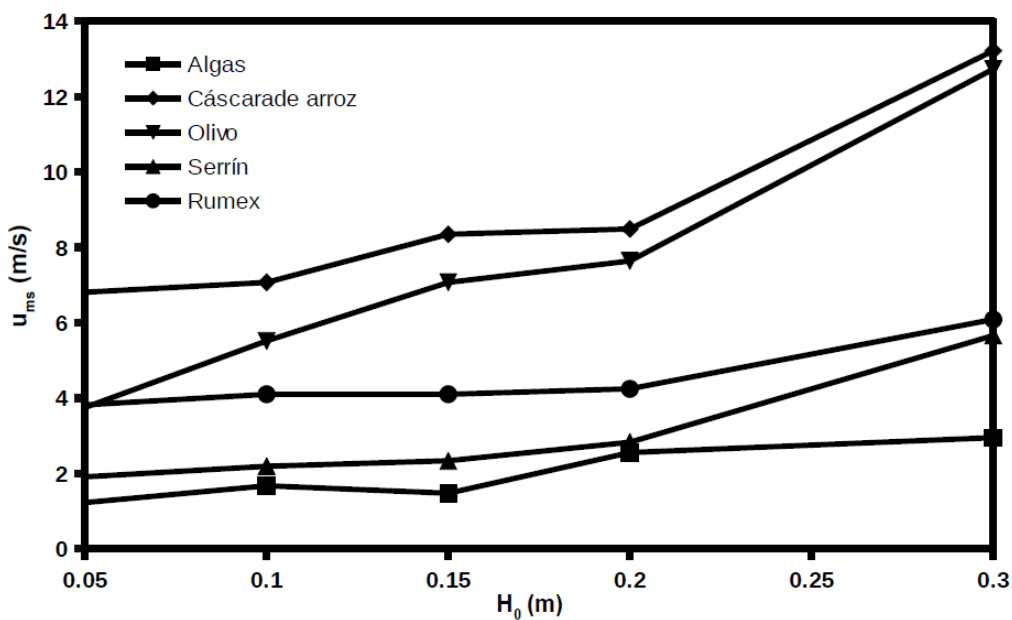


Figura 4.3. Representación de u_{ms} respecto a H_0 sin draft tube.

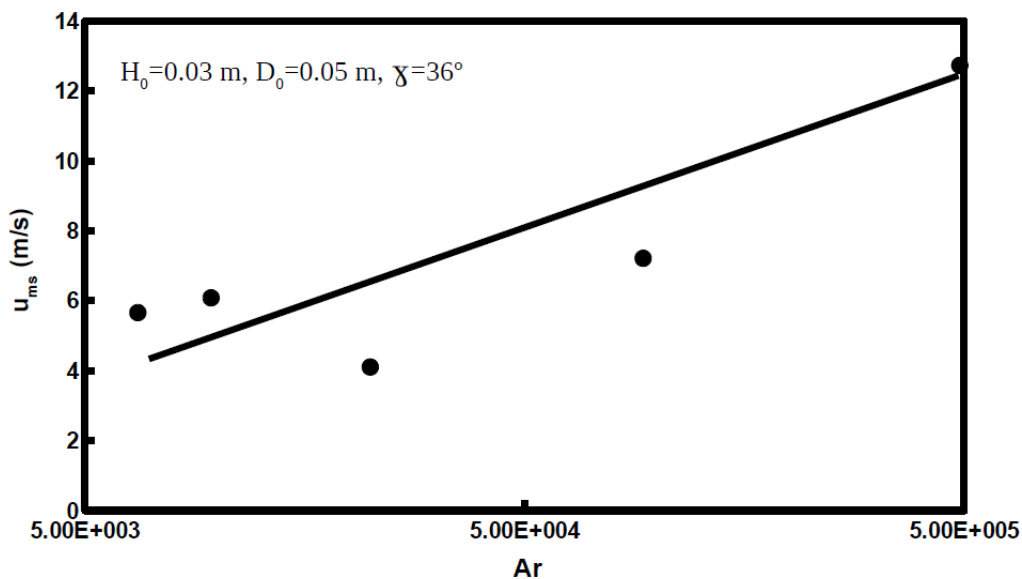


Figura 4.4. Representación de la tendencia ascendente de u_{ms} respecto al Ar .

son datos comparables, de lo contrario el Ar también cambiaría demasiado como para permitir una comparación.

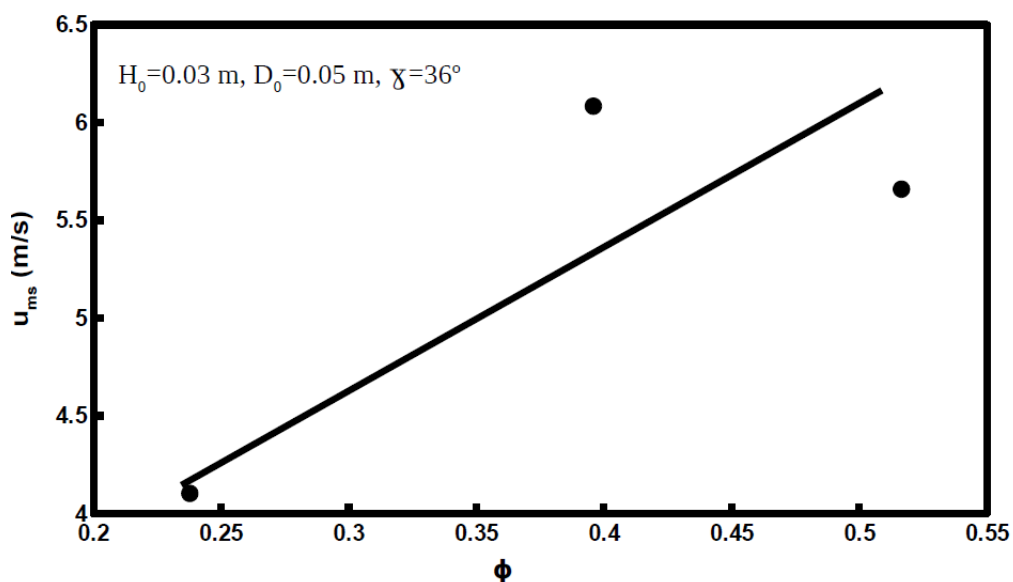


Figura 4.5. Tendencia de u_{ms} al aumento de la esfericidad.

Finalmente, para comparar entre las operaciones con diferentes dispositivos internos se ha optado por hacerlo utilizando el ángulo del contactor como variable independiente, dado que en todos los casos se han analizado los mismos ángulos y estos son suficientes para poder comparar tendencias. Como cabría esperar, teniendo en cuenta los estudios previos, en la Figura 4.6 se observa que el draft tube sólido reduce u_{ms} respecto a la operación sin dispositivos internos y el draft tube abierto por su parte está a medio camino entre los dos.

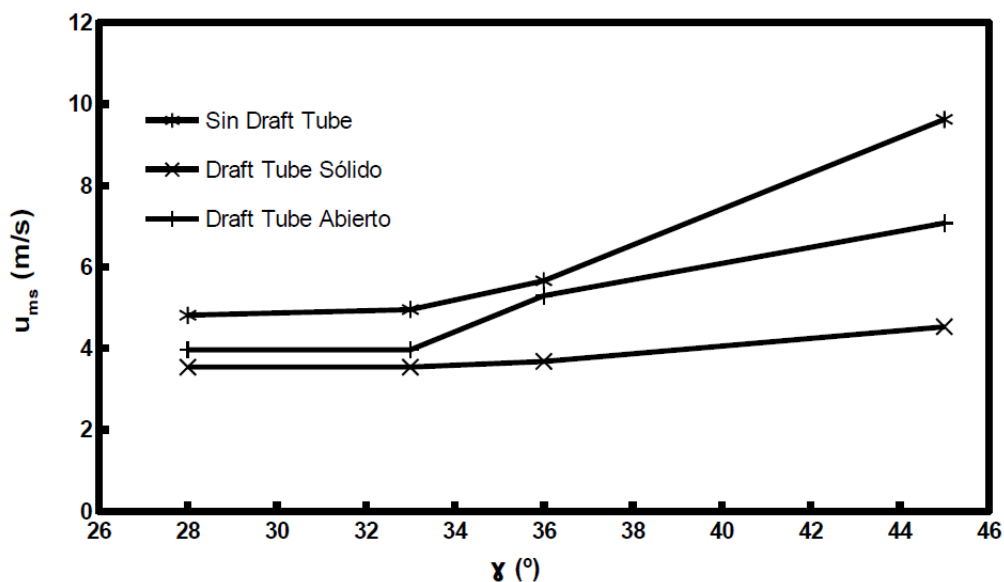


Figura 4.6. Comparativa de u_{ms} entre dispositivos.

Cabe mencionar que en la Figura 4.6 si no hay en todos los casos un mínimo local a los 33° como antes, si que suaviza la tendencia ascendente. Una vez sobrepasada esta cota la tendencia ascendente se hace más evidente.

Hasta ahora solo se ha confirmado que el sistema no se modifica con este tipo de materiales y que en consecuencia, las ecuaciones que describen los sistemas anteriores pueden aplicarse a este con un ajuste al rango de operaciones actual.

4.2. Ajuste de ecuaciones

En primer lugar, se ha efectuado la regresión no lineal para el ajuste de las ecuaciones de la Tabla 3.4 para determinar que grado de proximidad pueden llegar a alcanzar a los datos experimentales. Esta regresión no lineal se ha efectuado modificando todos y cada uno de los coeficientes, sin añadir ningún factor a las ecuaciones y sin ningún criterio más que el de la minimización del *ASRE* descrito mediante la Ecuación 3.5.

El resultado de este primer ajuste mostrado en la Tabla 4.1 evidencia, que pese a que las ecuaciones originales tienen un gran error, después del ajuste se aproximan mucho a los datos experimentales. En consecuencia, las ecuaciones serán aplicables a este tipo de lechos tras haber sido debidamente modificadas.

Como puede verse hay diversas ecuaciones que han ajustado de una manera aceptable los datos experimentales con errores comprendidos entre el 5.51 – 14.91%. A pesar de que este primer ajuste ha mostrado una buena descripción del sistema algunas de las

Tabla 4.1. Reducción del error en el primer ajuste.

Sin Draft Tube		
Ecuacion	Error Original %	Error Ajustada %
(1)	89.69	8.34
(2)	34.33	10.68
(3)	19.46	14.91
(4)	51.35	8.34
(5)	20.72	10.68
(6)	28.76	12.41
(7)	97.04	5.51
Draft Tube Sólido		
(8)	13.75	11.29
(9)	23.51	10.59
(10)	96.07	8.09
(11)	9.94	8.12
Draft Tube Abierto		
(12)	10.02	7.87

ecuaciones sin draft tube han sido descartadas. Los tres motivos por los que se han descartado algunas ecuaciones han sido: la posesión de los mismos bloques adimensionales, la estratificación de los datos y la complejidad injustificada. En el primer caso dos de las ecuaciones contienen los mismos bloques adimensionales, distinguiéndose solo en los coeficientes asociados a ellos. Esto significa que sus autores originalmente les dieron diferente importancia a los bloques adimensionales, pero al hacer el ajuste estos coeficientes tienden en ambos casos a los mismos valores. Por este motivo la Ecuación 2 se ha eliminado del análisis.

El segundo criterio de descarte ha sido el de la estratificación de los datos. Este efecto se da cuando al comparar el Re_{ms} predicho por las ecuaciones con el experimental, los datos se ordenan en niveles en torno a la línea de máximo ajuste en vez de ser una nube relativamente homogénea en torno a esta. Este efecto evidencia una covarianza entre alguno de los factores no descritos en las ecuaciones y la variable independiente. En la Figura 4.7 se muestra el ajuste antes y después de tratar la Ecuación 6 y pese a que los datos se acercan mucho a la línea de regresión perfecta, los datos quedan en niveles dependiendo del ángulo del contactor que se utilice, agrupándose los datos en líneas (estratos). Este efecto evidencia que pese a que la Re_{ms} es predicha con cierta precisión, la ecuación tiene un problema de base y no describe el sistema en su totalidad, habiendo alguna variable que no se tiene en cuenta pero que en cambio tiene un peso importante en la descripción del sistema.

En la experimentación sin draft tube, la aparición del ángulo de forma directa o de un modo indirecto mediante un bloque adimensional (función del ángulo como D_b/H_0) es

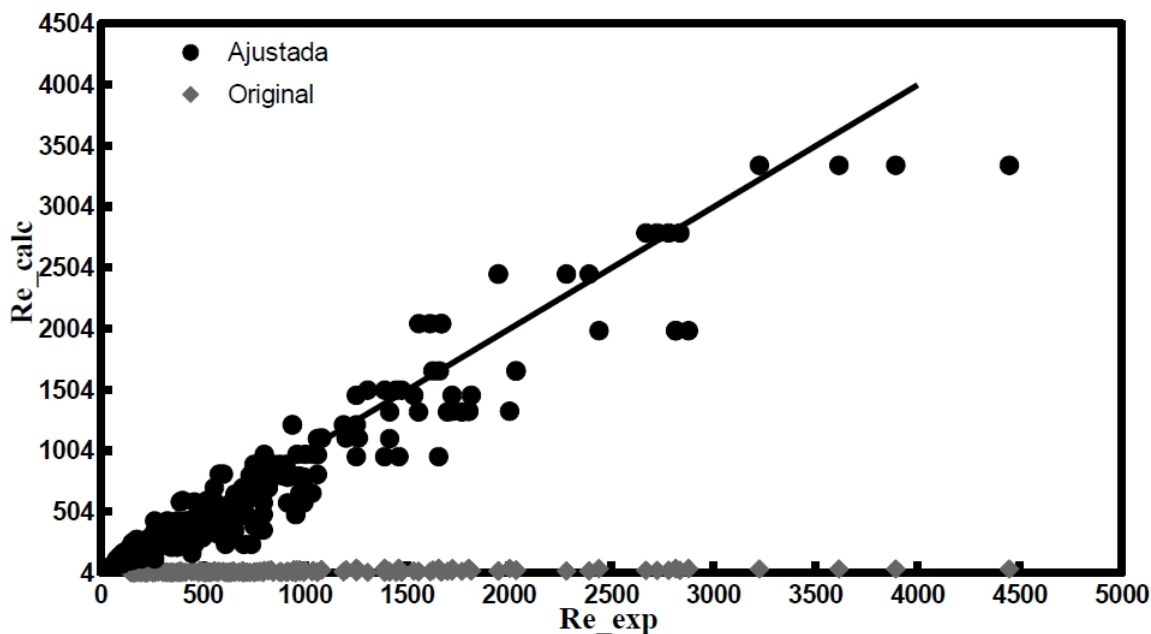


Figura 4.7. Representación de Re_{ms} de la Ecuación 6 antes y después de ser ajustada.

necesario para la correcta descripción del sistema. En consecuencia las Ecuaciones 1 y 6 han sido eliminadas del análisis.

El último criterio de eliminación de ecuaciones es el de la injustificada complejidad. La Ecuación 7 contiene más módulos que ninguna otra, lo que se resume en un mayor ajuste de los datos experimentales, pero si se compara con las Ecuaciones 3, 4 y 5 que describen de un modo adecuado el sistema como se observa en la Figura 4.8, su complejidad no está justificada. Por este motivo, junto con el hecho de que no contiene el ángulo del contactor entre sus factores adimensionales la Ecuación 7 se ha eliminado del análisis.

En cuanto a las ecuaciones con draft tube sólidos, ninguna de las ecuaciones ha sido descartada pese a que la Ecuación 8 no contenga el ángulo y por tanto, estratifique los datos. La razón de no descartarla es que su fecha de publicación es posterior a la Ecuación 9 que si contiene el ángulo por lo que se han evaluado las cuatro ecuaciones.

En cuanto a la Ecuación 12, además de que como se ve en la Tabla 4.1 el ajuste es bueno, es la única ecuación específica para la operación con draft tube abierto.

4.2.1. Análisis estadístico

Para dar una continuidad a los estudios fluidodinámicos previos en spouted bed solo se han modificado aquellos coeficientes cuyo cambio sea estadísticamente representativo. Este tipo de análisis previamente explicado requiere del calculo de los cuadrados residuales (SSR) para cada cambio y de la posterior comparación con el SSR de referencia del

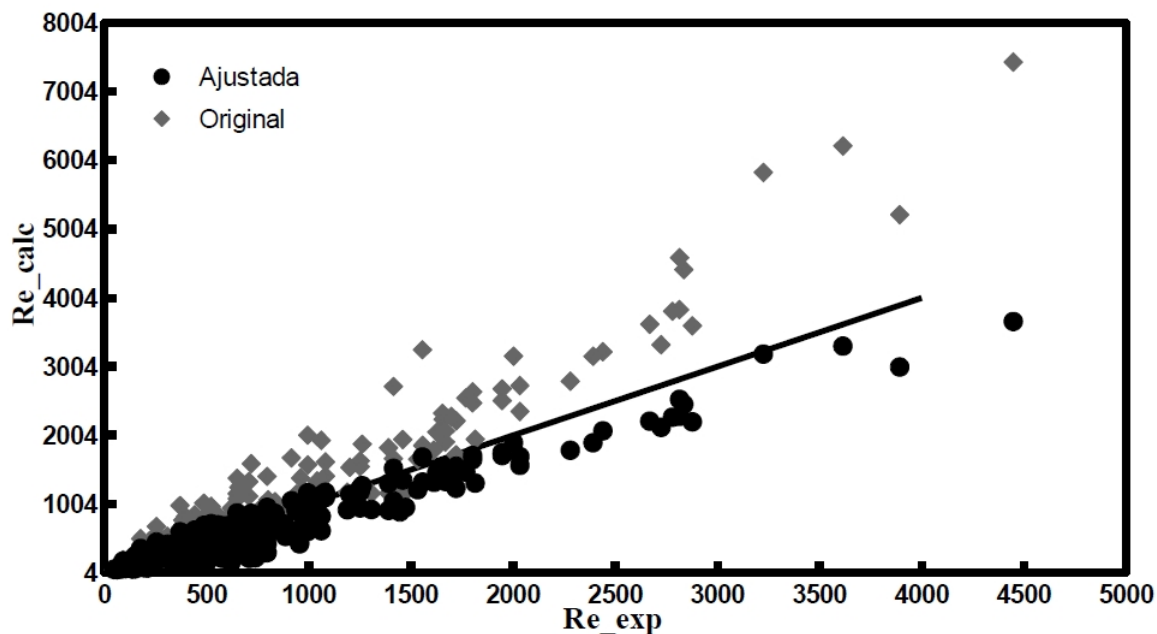


Figura 4.8. Ajuste de la Ecuación 5 sin optimizar y la optimizada respecto a Re_{ms} experimental

anterior cambio o de la ecuación de la bibliografía, dependiendo de en que momento del análisis se esté.

Los criterios que se han utilizado han sido, por un lado la minimización del *ASRE* y por otro, la comparación de los *SSR*, midiéndose de este modo la representatividad de un cambio para un 95% de confianza. En la sección previa se ha explicado como de cada ecuación evaluada se han obtenido cuatro ajustes posibles, cada uno con su cantidad de coeficientes modificados y su *ASRE* propia. El resultado de este análisis se muestra en las Tablas 4.2 y 4.3 con las dos técnicas de análisis (análisis libre y análisis forzado).

De entre las dos estrategias no se ha optado por una en concreto, ya que se ha considerado que el sistema está descrito de un modo incompleto pese a que los errores estén entre un 8 – 14%.

4.2.2. Adición de nuevos bloques dimensionales

Como se ha explicado con anterioridad los bloques dimensionales nuevos han sido dos; por un lado, la porosidad de partícula ϵ y por otro lado la esfericidad ϕ siendo la primera más fácil de medir experimentalmente.

Al utilizar el ϵ como nuevo bloque dimensional la regresión no fue satisfactoria debido a que se obtienen *ASRE*-s superiores a aquellos de las Tablas 4.2 y 4.3. Por ello y pese a su dificultad de medida, se ha efectuado el análisis estadístico para la esfericidad como

Tabla 4.2. Resultado del ajuste de las ecuaciones originales con la segunda estrategia.

Ecuación	Proceso de ajuste						ASRE, %
Sin Draft Tube							
(3)	Parámetros	K	D_b/D_0	$Stop$	–	–	14.70
(4)	Parámetros	D_b/D_0	Ar	$Stop$	–	–	11.23
(5)	Parámetros	$tg\gamma/2$	$Stop$	–	–	–	19.19
Draft Tube Sólido							
(8)	Parámetros	L_H/D_0	H_0/D_0	K	$Stop$	–	8.92
(9)	Parámetros	Ar	$Stop$	–	–	–	12.54
(10)	Parámetros	K	$V_r\psi/V_0$	γ	Ar	D_b/D_0	8.09
(11)	Parámetros	$Stop$	–	–	–	–	9.94
Draft Tube Abierto							
(12)	Parámetros	$Stop$	–	–	–	–	10.02

Tabla 4.3. Resultado del ajuste de las ecuaciones originales con la segunda estrategia.

Ecuación	Proceso de ajuste						ASRE, %
Sin Draft Tube							
(3)	Parámetros	Ar	K	H_0/D_0	$Stop$	–	11.57
(4)	Parámetros	K	D_b/D_0	$Stop$	–	–	10.89
(5)	Parámetros	Ar	H_0/D_0	$Stop$	–	–	19.19
Draft Tube Sólido							
(8)	Parámetros	K	L_H/D_0	H_0/D_0	$Stop$	–	8.92
(9)	Parámetros	K	$Stop$	–	–	–	12.33
(10)	Parámetros	Ar	$V_r\psi/V_0$	K	γ	D_b/D_0	8.09
(11)	Parámetros	K	$tg\gamma/2$	$Stop$	–	–	8.94
Draft Tube Abierto							
(12)	Parámetros	K	D_b/D_0	$Stop$	–	–	8.98

nuevo bloque adimensional. Estos resultados que se muestran en las Tablas 4.4 y 4.5 han sido diferentes para cada modo de operación como en el análisis de las tablas anteriores, pero en todo caso mejoran considerablemente los resultados de las tablas previas.

En estos datos se observa que los resultados son variados dependiendo del método de análisis utilizado o el modo de operación utilizado. En la Tabla 4.4 por ejemplo, la esfericidad no tiene ninguna representatividad al operar sin draft tube y en algunas ecuaciones de la operación con draft tube sólido tampoco, dado que el cambio por sí solo de este factor no reduce la *SSR* de manera significativa. En la Tabla 4.5 en cambio, al empezar a modificar las ecuaciones con parejas o tríos de cambios la esfericidad en la mayoría de los casos cobra una importancia fomentando a la *K* o al *Ar* a reducir el residual del ajuste.

Tabla 4.4. Ajuste de la primera estrategia y adición de la esfericidad junto a la *F* de cada cambio.

Ecuación	Proceso de ajuste							ASRE, %
Sin Draft Tube								
(3)	Parámetros	<i>K</i>	H_0/D_0	<i>Stop</i>	—	—	—	14.71
	<i>F</i>	335.24	786.57	—	—	—	—	
(4)	Parámetros	D_b/D_0	<i>Ar</i>	<i>Stop</i>	—	—	—	11.23
	<i>F</i>	1233.41	40.17	—	—	—	—	
(5)	Parámetros	$tg\gamma/2$	<i>Stop</i>	—	—	—	—	19.19
	<i>F</i>	10.62	—	—	—	—	—	
Draft Tube Sólido								
(8)	Parámetros	L_H/D_T	H_0/D_0	<i>K</i>	ϕ	<i>Stop</i>	—	8.67
	<i>F</i>	170.42	23.12	7.77	5.14	—	—	
(9)	Parámetros	<i>Ar</i>	<i>Stop</i>	—	—	—	—	12.34
	<i>F</i>	36.63	—	—	—	—	—	
(10)	Parámetros	<i>Stop</i>	—	—	—	—	—	9.94
	<i>F</i>	—	—	—	—	—	—	
(11)	Parámetros	<i>K</i>	$V_r\psi/V_0$	γ	<i>Ar</i>	D_b/D_0	ϕ	7.93
	<i>F</i>	160.27	61.53	23.64	18.53	59.36	10.22	
Draft Tube Abierto								
(12)	Parámetros	ϕ	$tg\gamma/2$	D_b/D_0	<i>K</i>	ω_T	<i>Stop</i>	
	<i>F</i>	5.05	44.00	13.42	15.40	6.50	—	6.59

Dado que los resultados de estas últimas tablas pueden llegar a ser un poco confusos e incluso parecer aleatorios la elección del ajuste óptimo entre estas dos estrategias se debe hacer utilizando la estadística como mediadora. En este caso se ha efectuado el análisis de la *F*, pero en vez de hacerlo paso a paso, se ha hecho la comparación de una sola vez. Como se ha explicado con anterioridad este análisis le da prioridad al menor cambio de coeficientes y solo si la adición de coeficientes modificados esta estadísticamente justifica-

Tabla 4.5. Resultado de la segunda estrategia y adición de la esfericidad junto con la F de cada cambio.

Ecuación	Proceso de ajuste							ASRE, %
Sin Draft Tube								
(3)	Parámetros	Ar	H_0/D_0	ϕ	$Stop$	—	—	16.67
	F	<i>Forzada</i>	45.00	6.36	—	—	—	
(4)	Parámetros	Ar	K	H_0/D_0	ϕ	—	—	10.71
	F	<i>Forzada</i>	786.57	178.54	94.02	—	—	
(5)	Parámetros	D_b/D_0	ϕ	$Stop$	—	—	—	10.37
	F	<i>Forzada</i>	194.32	21.24	—	—	—	
Draft Tube Sólido								
(8)	Parámetros	K	ϕ	$Stop$	—	—	—	12.04
	F	<i>Forzada</i>	10.92	—	—	—	—	
(9)	Parámetros	K	D_0/D_0	L_H/D_0	ϕ	$Stop$	—	8.67
	F	<i>Forzada</i>	10.60	28.30	5.14	—	—	
(10)	Parámetros	K	$tg\gamma/2$	ϕ	$Stop$	—	—	8.77
	F	<i>Forzada</i>	7.60	4.67	—	—	—	
(11)	Parámetros	K	$V_r\psi/V_0$	γ	Ar	D_b/D_0	ϕ	7.93
	F	<i>Forzada</i>	61.53	23.64	18.53	59.36	10.22	
Draft Tube Abierto								
(12)	Parámetros	K	ϕ	D_b/D_0	ω_T	$Stop$	—	6.81
	F	<i>Forzada</i>	52.86	70.34	4.66	—	—	

da el algoritmo lo devuelve como resultado óptimo. El resultado de este análisis final se muestra en la Tabla 4.6

Tabla 4.6. Ecuaciones de predicción de u_{ms} para los tres modos de operación.

Ecuación	ASRE %
(13) $Re_{ms} = 0.126Ar^{0.515} \frac{D_b}{D_i}^{1.37} tg\frac{\gamma}{2}^{-0.57}$	11.23
(14) $Re_{ms} = 0.0956Ar^{0.5} \frac{D_b}{D_0}^{1.68} tg\frac{\gamma}{2}^{-0.802} \frac{H_0 - h_r}{H_0}^{0.45} \frac{D_i}{D_i - D_T}^{0.17} \phi^{0.081}$	8.77
(15) $Re_{ms} = 0.272Ar^{0.5} \frac{D_b}{D_0}^{1.25} tg\frac{\gamma}{2}^{-0.57} \omega_T^{-0.109} \phi^{0.274}$	6.81

Como puede verse en la Tabla 4.6 la esfericidad cobra un papel fundamental en la predicción de u_{ms} teniendo un efecto positivo en la velocidad necesaria para abrir el lecho. Estos coeficientes concuerdan con la tendencia observada en la Figura 4.5. Este coeficiente puede modificar dependiendo de la técnica utilizada para medir la esfericidad pero es más recomendable agrupar el error de medida o la desviación provocada por no utilizar la esfericidad de Brown en la constante de proporcionalidad. Por tanto en caso de utilizar las Ecuaciones 14 y 15 midiendo la esfericidad de otra manera se recomienda reajustar la constante de proporcionalidad, K .

De los coeficientes mostrados en la Tabla 4.6 se puede deducir que más que aumentar u_{ms} al aumentar la esfericidad la importancia de esta en la predicción cambia dependiendo del modo de operación. El sistema en el que mayor importancia tiene de los estudiados es el del draft tube abierto dado que la esfericidad determina en gran medida el movimiento zona anular-spout y viceversa. Aparte de esto una esfericidad mayor de las partículas implica una densificación del lecho por la forma ordenada de empacarse. Esta densificación del flujo de sólidos es también importante al utilizar un draft tube sólido debido a que entran más partículas por la abertura del dispositivo, y en consecuencia, es el segundo sistema en el que es más importante la esfericidad. Por último, con un coeficiente muy bajo e incluso en ocasiones siendo estadísticamente no representativo esta la esfericidad en operación sin dispositivo interno.

4.3. Mapas de operación

El objetivo de esta sección es determinar a que caudales de biomasa y aire es recomendable o posible alimentar el reactor, para que en un futuro estudio se pueda modelar el combustor.

El primer dato que hay que obtener es u_{ms} de la arena a diferentes temperaturas y alturas iniciales. Pese a que en este trabajo solo se vaya a utilizar u_{ms} a 400°C , se ha considerado interesante efectuar el análisis a otras dos temperaturas para posibles futuras temperaturas iniciales. Los resultados obtenidos a diferentes alturas y temperaturas de lecho se encuentran expuestos en la Figura 4.9. En ella se observan los resultados que cabría esperar, aumentando el aire necesario al aumentar la altura, H_0 y reduciéndose el aire necesario a medida que la temperatura aumenta. Estos resultados son interesantes desde el punto de vista del inicio de la combustión, ya que puede ser interesante comenzar la reacción con una temperatura de lecho superior a los 400°C para que el gas de entrada se expanda más y así evitar problemas de tener un lecho fijo cuando el reactor está aun frío y el aporte de calor de la biomasa todavía no se ha dado.

Otro límite de operación inicial considerado ha sido la línea estequiométrica teórica, la que se ha calculado mediante la Ecuación 3.8. En la Figura 4.10 se encuentran los límites de operación para el serrín con un lecho inicial inerte de 3 cm y una T_{ini} de 400°C junto con los puntos en los que se ha registrado el perfil de temperatura a las diferentes alturas.

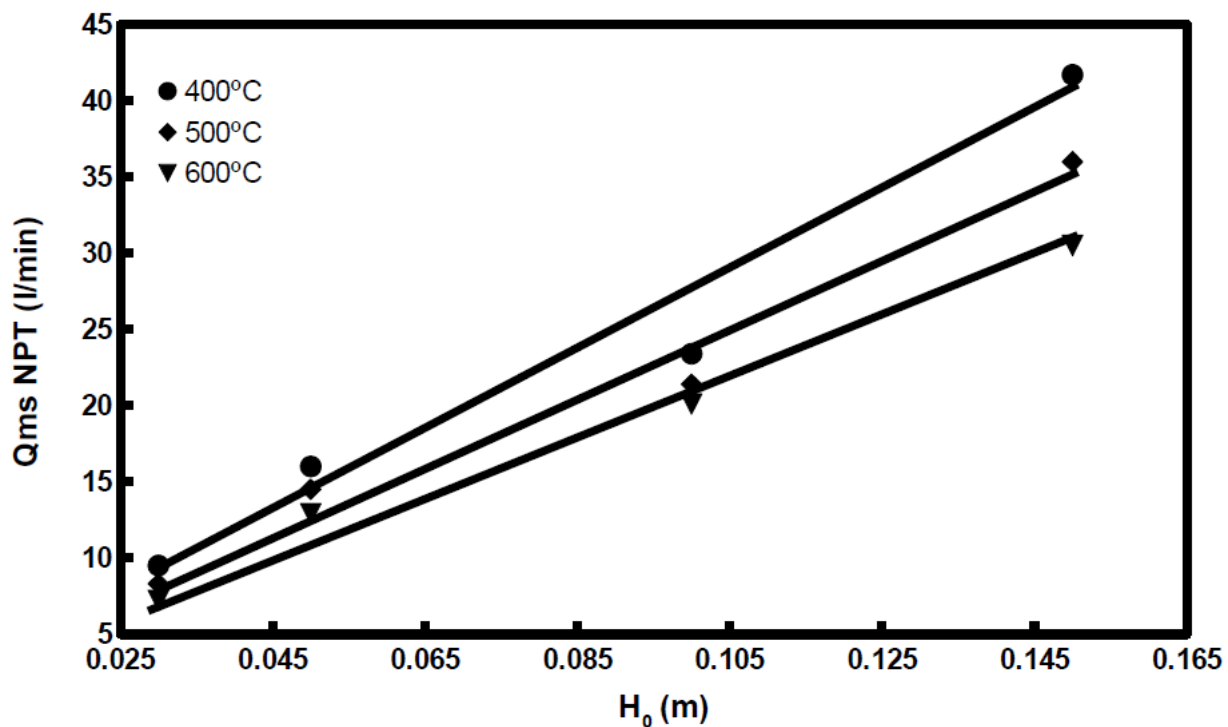


Figura 4.9. Representación del caudal de aire necesario para fluidizar un lecho de arena.

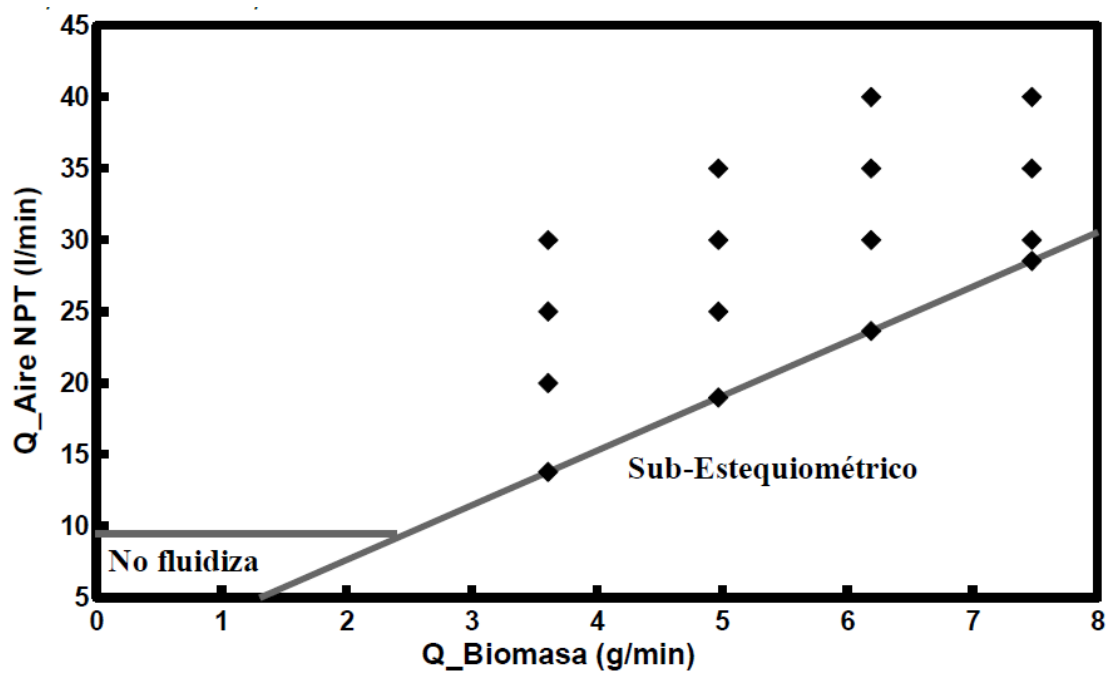


Figura 4.10. Límites de operación para el serrín junto a los puntos a los que se ha experimentado.

Como es evidente se ha formado una gráfica como la de la Figura 4.10 para las tres biomásas utilizadas. En el caso del serrín se puede operar en todo el rango marcado en la mencionada gráfica, ya que las cenizas que se forman son fácilmente arrastrables por el aire en ascensión, por lo que la acumulación de materia es casi nula. Dado que el lecho fluidiza en todo el rango de operación (por no haber acumulación de materia) se puede comenzar con una alimentación alta cuando el lecho aún tiene los 400°C iniciales. Sí es de apreciar que en el caso de comenzar la reacción de este modo la formación de brea es considerable, hasta que el lecho alcanza mayores temperaturas como consecuencia del aporte de calor de la biomasa.

En el caso del olivo debido a su densidad no se pueden alimentar pequeñas cantidades como en el caso anterior, por lo que el caudal estequiométrico en estas condiciones es más que suficiente para fluidizar el lecho a la temperatura inicial. Por consiguiente, el olivo no tiene ningún límite más que el estequiométrico a la hora de operar en el rango de condiciones utilizado

La cáscara de arroz por su parte ha planteado más problemas, por un lado por su alto contenido de cenizas y por la poca reducción de volumen de estas al quemarse. Esto ha llevado a tener que triturar la alimentación para que se dé la fluidización. Por otro lado este mismo motivo ha obligado a tener que seguir un orden fijo de alimentación empezando por alimentaciones pequeñas cuando el lecho está frío e ir aumentando paulatinamente la alimentación a medida que el lecho adquiere temperatura. También se ha observado que a la alimentación mínima (4.67 g min^{-1}) no se puede fluidizar el conjunto del lecho en su punto estequiométrico ($12.6^{NPT} \text{ l min}^{-1}$) dado que se acumulan muchas cenizas y el aire no tiene suficiente fuerza. Sus límites de operación aparecen representados en la Figura 4.11 donde se aprecia que a la mínima alimentación el reactor necesita un mínimo de $18^{NPT} \text{ l min}^{-1}$ para operar correctamente.

Cabe reseñar que pese a que se hayan obtenido los perfiles de temperatura en la línea estequiométrica, en ninguno de los casos se podrá operar de forma continuada en estas condiciones. Su motivo es la aparición de señales de una combustión incompleta como son: la condensación de brea en las tuberías y un color anormalmente oscuro en los gases de combustión. Para determinar el momento en el que la combustión pasa a ser completa hay que analizar los gases de salida, lo que está fuera de este proyecto pero si es deducible que está entre la línea estequiométrica y el primer punto experimental con exceso de aire por la desaparición en este punto de las señales antes mencionadas.

4.3.1. Perfiles de temperatura

En el análisis de las biomásas que se había efectuado previamente a este estudio se calculó el PCS (Poder Calorífico Superior) para cada tipo de biomasa. De ahí se extrae que de las tres biomásas la que mayor poder calorífico tiene es el hueso de oliva con 20.76 MJ kg^{-1} seguido por el serrín con 18.84 MJ kg^{-1} y finalizando con el arroz de 13.76 MJ kg^{-1} . Esta tendencia concuerda con los rangos de temperaturas obtenidos en el combustor, como puede verse en la Figura 4.12 las temperaturas siguen la misma tendencia a la de los PCS.

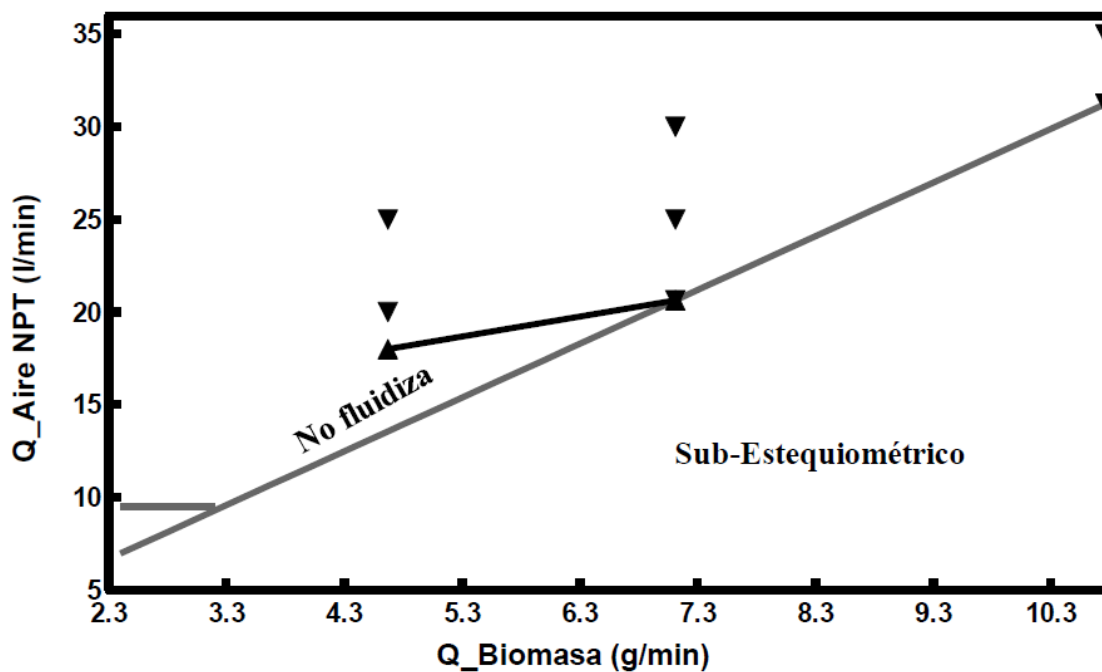


Figura 4.11. Límites de operación para el arroz junto a los puntos a los que se ha experimentado.

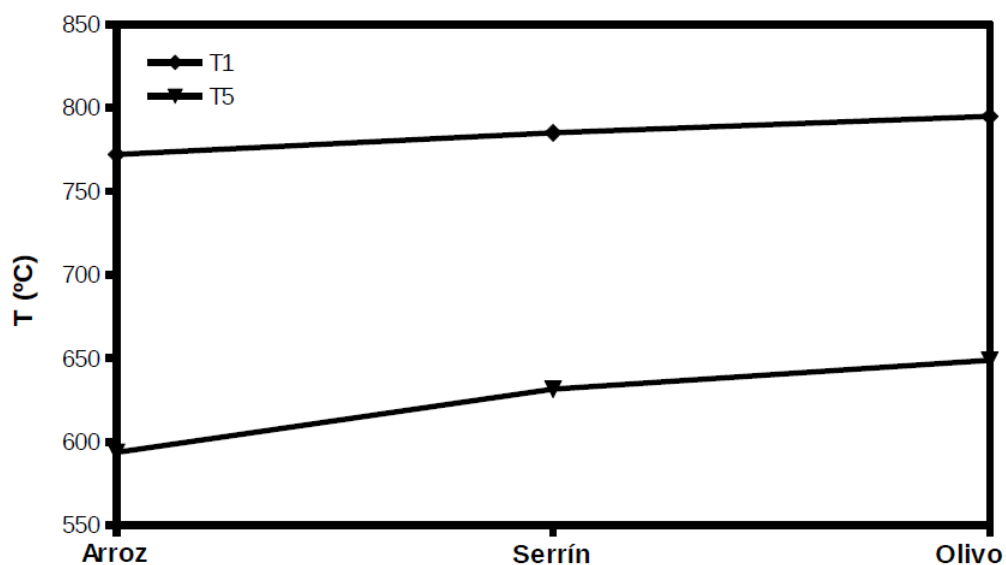


Figura 4.12. Temperaturas en el termopar n°1 y n°5 con las tres biomazas entorno a 7.5 g min^{-1} de alimentación y 30 l min^{-1} de aire.

La turbulencia del aire y su relación con la temperatura que se alcanza a cierta altura se ha observado claramente al medir los perfiles a condiciones diferentes. En la Figura 4.13 por ejemplo, se observan las temperaturas alcanzadas en cada condición impuesta al reactor.

Como se ve en esta Figura la temperatura en el primer punto de medida se ve favorecida por la cantidad de biomasa y por los caudales mínimos de aire. Si se compara con la Figura 4.14 en la que se muestra este mismo perfil pero para el punto más alejado del lecho la temperatura máxima se ve favorecida por el aumento del caudal de alimentación tanto de biomasa como de aire, ya que esta última aumenta la turbulencia en el reactor difundiendo el calor.

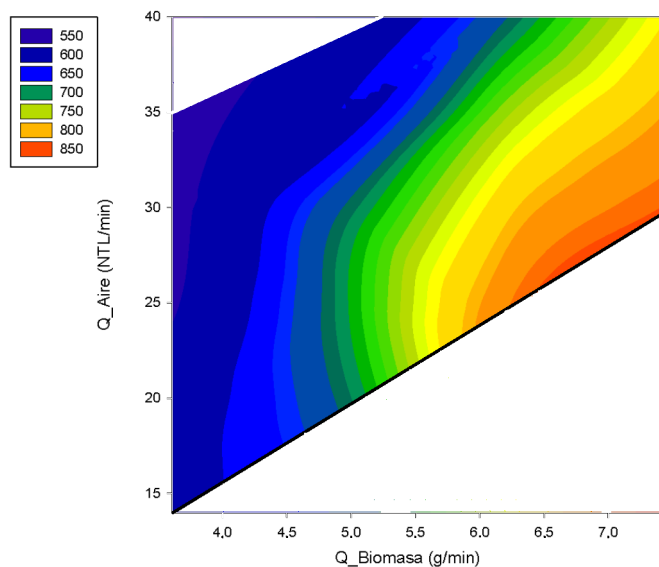


Figura 4.13. Representación de las temperaturas registradas con serrín en el termopar n⁰¹ en las diferentes condiciones.

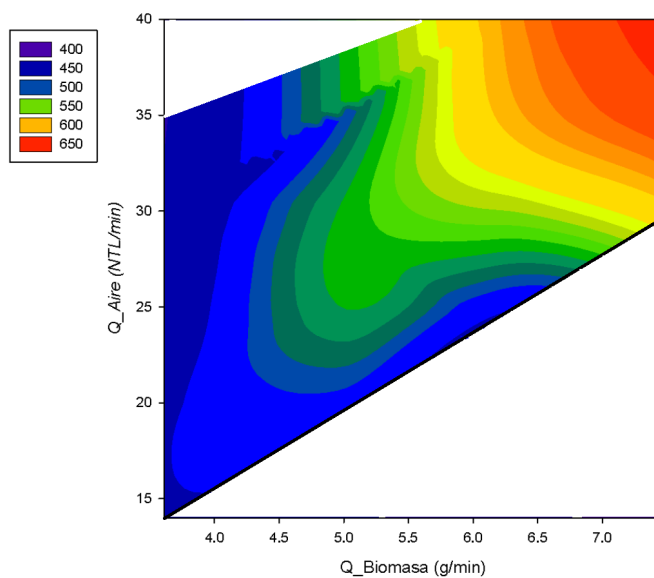


Figura 4.14. Representación de las temperaturas alcanzadas con serrín en el termopar n⁰⁵ en las diferentes condiciones.

5. CAPÍTULO

CONCLUSIONES

- La fluidización de partículas no uniformes en spouted bed sigue aquellas relaciones de las partículas uniformes y densas pero sus proporciones no son las mismas.
 - Con el aumento de D_0 u_{ms} no desciende linealmente dado al aumento del volumen del *spout*.
 - El ángulo del contactor provoca un mínimo u_{ms} local en torno a los 33° dada la relación antes explicada entre el aumento de la masa del lecho y del aporte de la fuerza normal de la pared.
 - La velocidad mínima siempre aumenta con la altura, H_0 por el peso del lecho.
 - Al aumentar el factor adimensional de Arquímedes u_{ms} aumenta casi linealmente dado que la masa del lecho para un volumen dado aumenta, o la viscosidad del aire se reduce lo que se traduce en un coeficiente de arrastre menor llegándose a la misma conclusión.
 - La velocidad mínima aumenta con la esfericidad, ya que un empaque más ordenado dificulta la apertura de un orificio en el lecho.
 - Los draft tubes reducen u_{ms} registrándose una mayor bajada en el sólido que en el abierto.
- La esfericidad de Brown es una muy buena aproximación de la esfericidad real, dado que la ecuación de Ergun esta en sus límites del 20% (solo para el serrín) y los valores obtenidos son coherentes con la forma de cada biomasa.
- La porosidad de partícula no puede aplicarse como factor significativo en la ecuaciones fluidodinámicas, siendo mucho más representativa la esfericidad.
- La esfericidad tiene distinta importancia según el modo de operación, siendo muy importante al utilizar un draft tube abierto (coeficiente de 0.274), importante en el sólido (coeficiente de 0.081) y siendo no representativo en la operación sin dispositivos internos. En las ecuaciones sin draft tube en las que se ha cambiado la esferici-

dad esta toma un exponente de 0.049 lo que va unido a la conclusión de que no es significativa comparándola con el resto de factores adimensionales.

- El ángulo del contactor debe estar siempre presente en las ecuaciones de u_{ms} (implícita o explícitamente) porque, aunque se pueda obtener un buen ajuste de los datos sin él, la ecuación resultante estratifica los datos según el ángulo, lo que no es una descripción completa del sistema.
- Pese a que en este estudio solo se ha cambiado la naturaleza del lecho no se puede hacer únicamente el ajuste de los parámetros relacionados con la materia, dado que es importante la interacción de los diferentes parámetros.
- Se han obtenido las ecuaciones adecuadas para el rango de operación de las biomásas en los tres modos de operación, mostradas en la Tabla 4.6.
- La alimentación en el combustor debe de estar libre de partículas finas, ya que de lo contrario se producen proyecciones de partículas incandescentes por la biomasa quemada a una altura mucho mayor que la del lecho. Estas proyecciones ponen en peligro la estabilidad del sistema y la estanquidad del reactor, dado que se produce una presión anormal en ciertos puntos, pudiendo entrar aire caliente en el alimentador, con los problemas que esto conlleva.
- La cáscara de arroz bruta no puede alimentarse sin ningún tipo de modificación ya que con un 24% de cenizas no fluidiza correctamente. Por ello, se recomienda triturar (2 mm de luz en el molino en este caso) y quitar los finos ($dp < 0.3 mm$).
- En la cáscara de arroz se debe seguir un orden específico al arrancar el combustor alimentando biomasa de pequeños caudales a mayores a medida que el lecho inerte adquiere temperatura.
- La dispersión del calor se ve favorecida por la turbulencia y el calor generado va acorde al PCS de cada biomasa.
- No es posible operar en la línea estequiométrica de ninguna biomasa por la formación de brea, con las pérdidas de eficiencia que esto supone.

6. CAPÍTULO

NOMENCLATURA

Acrónimos

Símbolo	Descripción	Dimensiones	Unidades
<i>CFD</i>	Computational fluid dynamics	–	–
<i>DEM</i>	Discrete element method	–	–
<i>HTGR</i>	High temperature gas cooled reactor	–	–
<i>SSR</i>	Suma de cuadrados residual	–	–
u_{ms}	Velocidad mínima de spouting	LT^{-1}	m/s
ASRE	Suma de cuadrados normalizados	–	–
PCS	Poder calorífico superior	L^2t^{-2}	MJ/kg
TIC	Indicador y controlador de algun lazo de temperatura	–	–
TIT	Indicador y transmisor de temperatura	–	–

Símbolos Romanos

Símbolo	Descripción	Dimensiones	Unidades
β	Coefficiente de análisis de regresión	–	–
χ_x	Fracción de compuesto x en base húmeda	–	–
Δ	Diferencia discreta	–	–
ϵ_b	Porosidad de partícula	–	–
ϵ_s	Porosidad de lecho	–	–

γ	Ángulo del contactor	–	o
μ	Viscosidad dinámica	$ML^{-2}t^{-1}$	Pas
ω_H	Longitud de cuerda en las patas del draft tube abierto	L	m
ω_T	Índice de apertura del draft tube abierto	–	–
ϕ	Esfericidad	–	–
ψ	Factor que determina la cantidad del lecho que es soportado por el draft tube	–	–
ρ_b	Densidad de partícula	ML^{-3}	kg/m^3
ρ_s	Densidad de lecho	ML^{-3}	kg/m^3

Símbolos Griegos

Símbolo	Descripción	Dimensiones	Unidades
\bar{d}_p	Diámetro medio de partícula	L	m
D_0	Diámetro de entrada al contactor	L	m
D_c	Diámetro de la sección cónica	L	m
D_i	Diámetro de la base del contactor	L	m
d_p	Diámetro de partícula	L	m
D_b	Diámetro superior del lecho	L	m
F	Estadístico de la distribución de <i>Fisher</i>	–	–
H_c	Altura de la sección cónica	L	m
h_r	Diferencia entre la altura inicial del lecho y la altura de entrada del draft tube	L	m
H_x	Hipótesis x de cierto contraste	–	–
i	Número de coeficientes cambiados por una ecuación	–	–
i, j	Número de coeficientes modificados para un modelo determinado	–	–
K	Constante de proporcionalidad	–	–
L	Longitud de tubería	L	m

L_H	Altura de entrada inicial del draft tube sólido	L	m
L_T	Longitud total del draft tube	L	m
m_x	Masa de una fracción x	M	kg
N	Número de datos experimentales	–	–
N_{O_2}	Relación de oxígeno	M^{-1}	mol/kg
Q_{ms}	Caudal mínimo de spouting	L^3T^{-1}	m^3/s
T_{ini}	Temperatura inicial del lecho del combustor	T	°C
V_0	Volumen no ocupado por el draft tube	L^3	m^3
V_r	Volumen ocupado por el draft tube	L^3	m^3

Superíndices

Símbolo	Descripción	Dimensiones	Unidades
NPT	Presión y temperatura a condiciones normales	–	–

Subíndices

Símbolo	Descripción	Dimensiones	Unidades
A	Cenizas	–	–
M	Humedad	–	–

Otros Símbolos

Símbolo	Descripción	Dimensiones	Unidades
ΔP	Pérdida de carga	ML^{-2}	Pa
$\forall x$	Algún x de un rango dado	–	–
Ar	Número adimensional de Arquímedes	–	–
Re	Número adimensional de Reynolds	–	–

7. CAPÍTULO

BIBLIOGRAFÍA

- [IEA, 2012] 2012. *International Energy Agency. Technology Roadmap: Bioenergy for Heat and Power.*
- [Abdullah *et al.* , 2003] Abdullah, M.Z., Husain, Z., & Pong, S.L. Yin. 2003. Analysis of cold flow fluidization test results for various biomass fuels. *Biomass and Bioenergy*, **24**(6), 487–494.
- [Altzibar *et al.* , 2008] Altzibar, H., Lopez, G., Alvarez, S., San Jose, M.J., Barona, A., & Olazar, M. 2008. A draft-tube conical spouted bed for drying fine particles. *Drying Technology*, **26**(3), 308–314. cited By (since 1996)26.
- [Altzibar *et al.* , 2009] Altzibar, H., Lopez, G., Aguado, R., Alvarez, S., San Jose, M.J., & Olazar, M. 2009. Hydrodynamics of conical spouted beds using different types of internal devices. *Chemical Engineering and Technology*, **32**(3), 463–469. cited By (since 1996)26.
- [Altzibar *et al.* , 2013] Altzibar, H., Lopez, G., Bilbao, J., & Olazar, M. 2013. Minimum spouting velocity of conical spouted beds equipped with draft tubes of different configuration. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, **52**(8), 2995–3006. cited By (since 1996)3.
- [Avinash *et al.* , 2014] Avinash, A., Subramaniam, D., & Murugesan, A. 2014. Bio-diesel? A global scenario. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **29**(0), 517–527.
- [Balat *et al.* , 2008] Balat, Mustafa, Balat, Havva, & Öz, Cahide. 2008. Progress in bioethanol processing. *Progress in Energy and Combustion Science*, **34**(5), 551–573.
- [Bernocco *et al.* , 2013] Bernocco, Daniele, Bosio, Barbara, & Arato, Elisabetta. 2013. Feasibility study of a spouted bed gasification plant. *Chemical Engineering Research and Design*, **91**(5), 843–855.
- [Brown, 1970] Brown, R. L. & Richards J. C. 1970. *Principles of powder mechanics.* Pergamon Press.

- [Du *et al.* , 2014] Du, Shenglei, Yang, Haiping, Qian, Kezhen, Wang, Xianhua, & Chen, Hanping. 2014. Fusion and transformation properties of the inorganic components in biomass ash. *Fuel*, **117**, Part B(0), 1281–1287.
- [Epstein & Grace, 2010] Epstein, N., & Grace, J.R. 2010. *Spouted and Spout-Fluid Beds: Fundamentals and Applications*. Cambridge University Press.
- [Geldart, 1973] Geldart, D. 1973. Types of gas fluidization. *Powder Technology*, **7**(5), 285–292.
- [Haddou *et al.* , 2013] Haddou, J.V.H., Ellis, N., Bi, X., & Epstein, N. 2013. Spouting characteristics of spf wood pellets. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, **91**(5), 808–813. cited By (since 1996)0.
- [Kmiec *et al.* , 2009] Kmiec, A., Ludwig, W., & Szafran, R. 2009. Minimum circulation velocity in a spouted bed apparatus with draft tube. *Chemical Engineering and Technology*, **32**(3), 450–453. cited By (since 1996)3.
- [Kmiec, 1980] Kmiec, Andrzej. 1980. Hydrodynamics of Flows and Heat Transfer in Spouted Beds. *The Chemical Engineering Journal*, **19**(3), 189–200.
- [Locatelli *et al.* , 2013] Locatelli, Giorgio, Mancini, Mauro, & Todeschini, Nicola. 2013. Generation {IV} nuclear reactors: Current status and future prospects. *Energy Policy*, **61**(0), 1503–1520.
- [Natarajan *et al.* , 1998] Natarajan, E, Nordin, A, & Rao, A.N. 1998. Overview of combustion and gasification of rice husk in fluidized bed reactors. *Biomass and Bioenergy*, **14**(5â“6), 533–546.
- [Olazar *et al.* , 1992] Olazar, M., San José, M.J., Aguayo, A.T., Arandes, J.M., & Bilbao, J. 1992. Stable operation conditions for gas-solid contact regimes in conical spouted beds. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **31**(7), 1784–1792. cited By (since 1996)117.
- [Olazar *et al.* , 1993] Olazar, M., San José, M.J., Peñas, F.J., Aguayo, A.T., & Bilbao, J. 1993. Stability and hydrodynamics of conical spouted beds with binary mixtures. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, **32**(11), 2826–2834. cited By (since 1996)47.
- [Olazar *et al.* , 1994a] Olazar, M., San José, M.J., Llamosas, R., & Bilbao, J. 1994a. Hydrodynamics of sawdust and mixtures of wood residues in conical spouted beds. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **33**(4), 993–1000. cited By (since 1996)50.
- [Olazar *et al.* , 1994b] Olazar, M., San José, M.J., Zabala, G., & Bilbao, J. 1994b. New reactor in jet spouted bed regime for catalytic polymerizations. *Chemical Engineering Science*, **49**(24 PART A), 4579–4588. cited By (since 1996)44.
- [Ozahi *et al.* , 2008] Ozahi, E., Gundogdu, M.Y., & Carpinlioglu, M.Ö. 2008. A modification on Ergun’s correlation for use in cylindrical packed beds with non-spherical particles. *Advanced Powder Technology*, **19**(4), 369–381. cited By (since 1996)9.

- [Perry & Green, 1997] Perry, R., & Green, D. 1997. *Perry's chemical engineers' handbook*. New York: McGraw-Hill.
- [Rong & Zhang, 2010] Rong, Liang-wan, & Zhang, Jie-min. 2010. Improved DEM-CFD model and validation: A conical-base spouted bed simulation study. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, **22**(3), 351–359.
- [San José *et al.* , 2007] San José, M.J., Alvarez, S., De Salazar, A.O., Olazar, M., & Bilbao, J. 2007. Operating conditions of conical spouted beds with a draft tube. Effect of the diameter of the draft Tube and of the height of entrainment zone. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, **46**(9), 2877–2884. cited By (since 1996)12.
- [Sirisomboon *et al.* , 2010] Sirisomboon, K., Kuprianov, V.I., & Arromdee, P. 2010. Effects of design features on combustion efficiency and emission performance of a biomass-fuelled fluidized-bed combustor. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, **49**(3), 270–277. cited By (since 1996)6.
- [Sun *et al.* , 2008] Sun, Zhi-Ao, Jin, Bao-Sheng, Zhang, Ming-Yao, Liu, Ren-Ping, & Zhang, Yong. 2008. Experimental study on cotton stalk combustion in a circulating fluidized bed. *Applied Energy*, **85**(11), 1027–1040.
- [Sutkar *et al.* , 2013] Sutkar, Vinayak S., Deen, Niels G., & Kuipers, J.A.M. 2013. Spout fluidized beds: Recent advances in experimental and numerical studies. *Chemical Engineering Science*, **86**(0), 124–136. 5th International Granulation Workshop.
- [Uriel, 2013] Uriel, Ezequiel. 2013. *Introduccion a la Econometria*. Vol. Cap?ulo 4. Universidad de Valencia.
- [Vassilev *et al.* , 2012] Vassilev, S.V., Baxter, D., Andersen, L.K., Vassileva, C.G., & Morgan, T.J. 2012. An overview of the organic and inorganic phase composition of biomass. *Fuel*, **94**, 1–33. cited By (since 1996)42.
- [Wachiraphansakul & Devahastin, 2007] Wachiraphansakul, Sarat, & Devahastin, Sakamon. 2007. Drying kinetics and quality of okara dried in a jet spouted bed of sorbent particles. *{LWT} - Food Science and Technology*, **40**(2), 207–219.
- [Zhang *et al.* , 2010] Zhang, Linghong, Xu, Chunbao (Charles), & Champagne, Pascale. 2010. Overview of recent advances in thermo-chemical conversion of biomass. *Energy Conversion and Management*, **51**(5), 969–982.
- [Zhou, 2008] Zhou, Jiandong. 2008. *Characterizing and Modeling the Hydrodynamics of Shallow Spouted Beds*. Ph.D. thesis, The University of Tennessee, Knoxville.

8. CAPÍTULO

APÉNDICE

Tabla 8.1. Composición elemental de las biomásas utilizadas.

Compuesto	Serrín	Olivo	Cáscara de arroz
<i>Humedad, % p/pb.h.</i>	8.69	8.83	8.40
<i>Cenizas, % p/pb.s.</i>	1.35	0.58	24.63
<i>C, % p/pb.s.</i>	42.80	43.40	31.60
<i>H, % p/pb.s.</i>	6.42	6.46	5.20
<i>O, % p/pb.s.</i>	49.28	50.26	37.79

En las siguientes páginas se muestra el algoritmo utilizado para la adición de la esfericidad a las ecuaciones fluidodinámicas. El algoritmo tiene una GUI incorporada para facilitar la utilización del programa y es capaz de llevar a cabo cualquiera de las dos estrategias tanto por separado como conjuntamente. En el caso de querer utilizarlo, el programa requiere de un archivo con extensión .xls.

```

0001 // This GUI file is generated by guibuilder version 2.2

0002 clc,clear,xdel;clearglobal;
0003 close()
0004 ////////////

0005
0006
0007 f=figure('figure_position',[400,50],'figure_size',[658,614],'auto_resize','off','background',[33],'fi
de gráfico número %d');
0008 ////////////

0009 delmenu(f.figure_id,gettext('File'))
0010 delmenu(f.figure_id,gettext('?'))
0011 delmenu(f.figure_id,gettext('Tools'))
0012 toolbar(f.figure_id,'off')
0013
0014 handles.dummy = 0;
0015 //toda esta parte solo es la formación del interface gráfico no tiene demasiada
0016 //importancia aunque sin el hay que adaptar el programa

0017 handles.first=uicontrol(f,'unit','normalized','BackgroundColor',[0.8,0.8,0.8],...
0018 'Enable','on','FontAngle','normal','FontName','helvetica','FontSize',[12],...
0019 'FontUnits','points','FontWeight','normal','ForegroundColor',[0,0,0],...
0020 'HorizontalAlignment','center','ListboxTop',[],'Max',[1],'Min',[0],'Position',...
0021 [0.0958333,0.6997389,0.2,0.0939948],'Relief','ridge','SliderStep',[0.01,0.1],...
0022 'String','First','Style','frame','Value',[0],'VerticalAlignment','middle',...
0023 'Visible','on','Tag','first','Callback','')
0024 handles.second=uicontrol(f,'unit','normalized','BackgroundColor',[0.7,0.7,0.7],...
0025 'Enable','on','FontAngle','normal','FontName','helvetica','FontSize',[12],...
0026 'FontUnits','points','FontWeight','normal','ForegroundColor',[0,0,0],...
0027 'HorizontalAlignment','center','ListboxTop',[],'Max',[1],'Min',[0],...
0028 'Position',[0.4,0.4960836,0.1958333,0.2976501],'Relief','ridge','SliderStep',...
0029 [0.01,0.1],'String','Second','Style','frame','Value',[0],'VerticalAlignment',...
0030 'middle','Visible','on','Tag','second','Callback','')
0031 handles.third=uicontrol(f,'unit','normalized','BackgroundColor',...
0032 [0.8,0.8,0.8],'Enable','on','FontAngle','normal','FontName','helvetica',...
0033 'FontSize',[12],'FontUnits','points','FontWeight','normal','ForegroundColor',...
0034 [0,0,0],'HorizontalAlignment','center','ListboxTop',[],'Max',[1],'Min',[0],...
0035 'Position',[0.69375,0.4934726,0.23125,0.2976501],'Relief','ridge','SliderStep',...
0036 [0.01,0.1],'String','Third','Style','frame','Value',[0],'VerticalAlignment',...
0037 'middle','Visible','on','Tag','third','Callback','')
0038 handles.Exit=uicontrol(f,'unit','normalized','BackgroundColor',...
0039 [0.6,0.6,0.6],'Enable','on','FontAngle','normal','FontName','helvetica',...
0040 'FontSize',[12],'FontUnits','points','FontWeight','normal','ForegroundColor',...
0041 [0,0,0],'HorizontalAlignment','center','ListboxTop',[],'Max',[1],'Min',[0],...
0042 'Position',[0.9,0.8955614,0.0958333,0.0939948],'Relief','raised','SliderStep',...
0043 [0.01,0.1],'String','Exit','Style','pushbutton','Value',[0],'VerticalAlignment',...
0044 'middle','Visible','on','Tag','Exit','Callback','Exit_callback(handles)')
0045 handles.about=uicontrol(f,'unit','normalized','BackgroundColor',[0.6,0.6,0.6],...
0046 'Enable','on','FontAngle','normal','FontName','helvetica','FontSize',[12],...
0047 'FontUnits','points','FontWeight','normal','ForegroundColor',[0,0,0],...
0048 'HorizontalAlignment','center','ListboxTop',[],'Max',[1],'Min',[0],'Position',...
0049 [0,0.8955614,0.09375,0.0939948],'Relief','raised','SliderStep',[0.01,0.1],...
0050 'String','About','Style','pushbutton','Value',[0],'VerticalAlignment','middle',...
0051 'Visible','on','Tag','about','Callback','about_callback(handles)')
0052 handles.run=uicontrol(f,'unit','normalized','BackgroundColor',[0.6,0.6,0.6],...
0053 'Enable','on','FontAngle','normal','FontName','helvetica','FontSize',[12],...
0054 'FontUnits','points','FontWeight','normal','ForegroundColor',[0,0,0],...
0055 'HorizontalAlignment','center','ListboxTop',[],'Max',[1],'Min',[0],'Position',...

```

```
0056 [0.8,0.0966057,0.0958333,0.0966057], 'Relief', 'raised', 'SliderStep', [0.01,0.1],...
0057 'String', 'Browse...', 'Style', 'pushbutton', 'Value', [0], 'VerticalAlignment', ...
0058 'middle', 'Visible', 'off', 'Tag', 'run', 'Callback', 'run_callback(handles)')
0059
0060 handles.result=uicontrol(f,'unit','normalized','BackgroundColor',[0.8,0.8,0.8],...
0061 'Enable','on','FontAngle','normal','FontName','helvetica','FontSize',[12],...
0062 'FontUnits','points','FontWeight','normal','ForegroundColor',[0,0,0],...
0063 'HorizontalAlignment','center','ListboxTop',[],'Max',[1],'Min',[0],'Position',...
0064 [0.0958333,0.0966057,0.825,0.2976501], 'Relief', 'ridge', 'SliderStep', [0.01,0.1],...
0065 'String', 'Result', 'Style', 'text', 'Value', [0], 'VerticalAlignment', 'middle', ...
0066 'Visible', 'off', 'Tag', 'resut', 'Callback', '')
0067 handles.Temper=uicontrol(f,'unit','normalized','BackgroundColor',[0.8,0.8,0.8],...
0068 'Enable','on','FontAngle','normal','FontName','helvetica','FontSize',[12],...
0069 'FontUnits','points','FontWeight','normal','ForegroundColor',[0,0,0],...
0070 'HorizontalAlignment','center','ListboxTop',[],'Max',[1],'Min',[0],'Position',...
0071 [0.10625,0.7206266,0.16875,0.0548303], 'Relief', 'sunken', 'SliderStep', [0.01,0.1],...
0072 'String', '298', 'Style', 'edit', 'Value', [0], 'VerticalAlignment', 'middle', 'Visible', ...
0073 'on', 'Tag', 'Temper', 'Callback', '')
0074 handles.Conditi=uicontrol(f,'unit','normalized','BackgroundColor',[0.8,0.8,0.8],...
0075 'Enable','on','FontAngle','normal','FontName','helvetica','FontSize',[12],...
0076 'FontUnits','points','FontWeight','normal','ForegroundColor',[0,0,0],...
0077 'HorizontalAlignment','center','ListboxTop',[],'Max',[4],'Min',[0],'Position',...
0078 [0.40625,0.7049608,0.18125,0.0704961], 'Relief', 'flat', 'SliderStep', [0.01,0.1],...
0079 'String', 'Choose One|Without Draft Tube|Solid Draft Tube|Open Sided Draft Tube', ...
0080 'Style', 'popupmenu', 'Value', [0], 'VerticalAlignment', 'middle', 'Visible', 'on', ...
0081 'Tag', 'Condiiti', 'Callback', 'Condiiti_callback(handles)')
0082 handles.opt1=uicontrol(f,'unit','normalized','BackgroundColor',[0.8,0.8,0.8],...
0083 'Enable','on','FontAngle','normal','FontName','helvetica','FontSize',[12],...
0084 'FontUnits','points','FontWeight','normal','ForegroundColor',[0,0,0],...
0085 'HorizontalAlignment','left','ListboxTop',[],'Max',[1],'Min',[0],'Position',...
0086 [0.70625,0.7049608,0.1375,0.0548303], 'Relief', 'flat', 'SliderStep', [0.01,0.1],...
0087 'String', 'Free', 'Style', 'radiobutton', 'Value', [0], 'VerticalAlignment', 'middle', ...
0088 'Visible', 'on', 'Tag', 'opt1', 'Callback', 'opt1_callback(handles)')
0089 handles.opt2=uicontrol(f,'unit','normalized','BackgroundColor',[0.8,0.8,0.8],...
0090 'Enable','on','FontAngle','normal','FontName','helvetica','FontSize',[12],...
0091 'FontUnits','points','FontWeight','normal','ForegroundColor',[0,0,0],...
0092 'HorizontalAlignment','left','ListboxTop',[],'Max',[1],'Min',[0],'Position',...
0093 [0.70625,0.6031332,0.2,0.0783290], 'Relief', 'flat', 'SliderStep', [0.01,0.1],...
0094 'String', 'One constant driven', 'Style', 'radiobutton', 'Value', [0], ...
0095 'VerticalAlignment', 'middle', 'Visible', 'on', 'Tag', 'opt2', 'Callback', ...
0096 'opt2_callback(handles)')
0097 handles.opt3=uicontrol(f,'unit','normalized','BackgroundColor',[0.8,0.8,0.8],...
0098 'Enable','on','FontAngle','normal','FontName','helvetica','FontSize',[12],...
0099 'FontUnits','points','FontWeight','normal','ForegroundColor',[0,0,0],...
0100 'HorizontalAlignment','left','ListboxTop',[],'Max',[1],'Min',[0],'Position',...
0101 [0.70625,0.5091384,0.2125,0.0783290], 'Relief', 'flat', 'SliderStep', [0.01,0.1],...
0102 'String', 'Two constants driven', 'Style', 'radiobutton', 'Value', [0], ...
0103 'VerticalAlignment', 'middle', 'Visible', 'on', 'Tag', 'opt3', 'Callback', ...
0104 'opt3_callback(handles)')
0105 handles.Temperature=uicontrol(f,'unit','normalized','BackgroundColor',...
0106 [0.8,0.8,0.8], 'Enable', 'on', 'FontAngle', 'normal', 'FontName', 'helvetica', ...
0107 'FontSize', [12], 'FontUnits', 'points', 'FontWeight', 'normal', 'ForegroundColor', ...
0108 [0,0,0], 'HorizontalAlignment', 'center', 'ListboxTop', [],'Max', [1], 'Min', [0], ...
0109 'Position', [0.09375,0.7989556,0.2,0.0939948], 'Relief', 'flat', 'SliderStep', ...
0110 [0.01,0.1], 'String', 'Temperature K', 'Style', 'text', 'Value', [0], ...
0111 'VerticalAlignment', 'middle', 'Visible', 'on', 'Tag', 'Temperature', 'Callback', '')
0112 handles.secondtxt=uicontrol(f,'unit','normalized','BackgroundColor',...
0113 [0.8,0.8,0.8], 'Enable', 'on', 'FontAngle', 'normal', 'FontName', 'helvetica', ...
0114 'FontSize', [12], 'FontUnits', 'points', 'FontWeight', 'normal', 'ForegroundColor', ...
0115 [0,0,0], 'HorizontalAlignment', 'center', 'ListboxTop', [],'Max', [1], 'Min', [0], ...
0116 'Position', [0.4,0.8015666,0.2,0.0939948], 'Relief', 'flat', 'SliderStep', ...
0117 [0.01,0.1], 'String', 'Operation mode', 'Style', 'text', 'Value', [0], ...
```

```

0118 'VerticalAlignment','middle','Visible','on','Tag','second txt','Callback','')
0119 handles.fourth=uicontrol(f,'unit','normalized','BackgroundColor',[0.8,0.8,0.8],...
0120 'Enable','on','FontAngle','normal','FontName','helvetica','FontSize',[12],...
0121 'FontUnits','points','FontWeight','normal','ForegroudColor',[0,0,0],...
0122 'HorizontalAlignment','center','ListboxTop',[],'Max',[1],'Min',[0],'Position',...
0123 [0.7,0.7989556,0.2,0.0939948],'Relief','flat','SliderStep',[0.01,0.1],...
0124 'String','Analysing mode','Style','text','Value',[0],'VerticalAlignment',...
0125 'middle','Visible','on','Tag','third','Callback','')
0126
0127

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

0128 // Callbacks are defined as below. Please do not delete the comments as it will be
    used in coming version

```

```

0129

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

0130
0131 function Exit_callback(handles)
0132 //Write your callback for Exit here

```

```

0133 close();
0134 endfunction

```

```

0135
0136 function about_callback(handles)
0137 //Write your callback for about here

```

```

0138 //Dar la chapa un poco como y que se ha hecho.

```

```

0139
0140 endfunction

```

```

0141
0142 function Condit_i_callback(handles)
0143 //Este bloque hasta el "set{run.callback} solo hace el cambio de colores y el

```

```

0144 // juego de botones nada importante"

```

```

0145 Conditions=get(handles.Condit_i,'Value')

```

```

0146 T=get(handles.Temper,'String');

```

```

0147 T=strtod(T)

```

```

0148 if Conditions>1 & T>0 then

```

```

0149     set(handles.second,'BackgroundColor',[0.8,0.8,0.8]);

```

```

0150     set(handles.third,'BackgroundColor',[0.7,0.7,0.7]);set(handles.opt1,...

```

```

0151     'BackgroundColor',[0.7,0.7,0.7]);set(handles.opt2,'BackgroundColor',...

```

```

0152     [0.7,0.7,0.7]);set(handles.opt3,'BackgroundColor',[0.7,0.7,0.7])

```

```

0153     options=[]

```

```

0154     while find(options,1)==[]

```

```

0155         options(1,1)=get(handles.opt1,'Value');

```

```

0156         options(1,2)=get(handles.opt2,'Value');

```

```

0157         options(1,3)=get(handles.opt3,'Value');

```

```

0158     end

```

```

0159     Conditions=get(handles.Condit_i,'Value')

```

```

0160     set(handles.run,'Visible','on');

```

```

0161 end

```

```

0162

```

```

0163 endfunction

```

```

0164

```

```

0165 function opt1_callback(handles)

```

```

0166 //Write your callback for opt1 here

```

```

0167

```

```

0168 endfunction

```

```

0169
0170 function opt2_callback(handles)
0171 //Write your callback for opt2 here

0172
0173 endfunction
0174
0175 function opt3_callback(handles)
0176 //Write your callback for opt3 here

0177
0178 endfunction
0179
0180 //function nonsense(ecuaciones,opt)

0181 // fac=opt*ecuaciones-(opt-1)*(opt-2)*ecuaciones

0182 //endfunction

0183
0184 function run_callback(handles)
0185 //Write your callback for run here

0186 options(1,1)=get(handles.opt1,'Value');//Obtiene los tipos de análisis
0187 options(1,2)=get(handles.opt2,'Value');//pueden hacerse independientemente

0188 options(1,3)=get(handles.opt3,'Value');
0189 if find(options,1)==[] then
0190     messagebox("Well played but it won't work my friend",'uups')
0191     abort
0192 end
0193 global numEcu
0194 numEcu=get(handles.Conditi,'Value')-1;
0195 global operador
0196 operador=0
0197 global ctes3;
0198
0199 function Reoms_calc=Funcion(ctes)//Tiene las ecuaciones

0200
0201     global ctes3
0202     ctes3=ctes1;
0203     if exception ==1 then
0204         ctes3=ctes;
0205     else
0206         ctes3(i)=ctes(1);
0207         if operador ~= 0 then
0208             for H=1:(size(Punto,2)-quitar)
0209                 ctes3(Punto(1,H))=ctes(H+1);
0210             end
0211         end
0212     end
0213 end

0214
0215
0216 //disp(ctes3)

0217 if numEcu==1 then
0218     if (l==1|l==4|l==5|l==10)
0219         Reoms_calc=ctes3(1)*Ar^ctes3(2).*(Db./Do).^ctes3(3).*(Ho./Do)...
0220             .^ctes3(4).*esfe.^ctes3(5);

```

```

0221     elseif (l==2|l==6|l==7|l==11)
0222         Reoms_calc=ctes3(1)*Ar^ctes3(2).*(Db./Do)^ctes3(3)...
0223             .*(tan(ang/2))^ctes3(4).*esfe.^ctes3(5);
0224     elseif (l==3|l==8|l==9|l==12)
0225         Reoms_calc=ctes3(1)*Ar^ctes3(2).*(Ho./Do)^ctes3(3)...
0226             .*(tan(ang./2))^ctes3(4).*esfe.^ctes3(5)
0227     elseif l==13
0228         Reoms_calc=0.028*Ar^.57.*(Db./Do).^1.27.*(Ho./Do).^48
0229     elseif l==14
0230         Reoms_calc=.126*Ar^.5.*(Db./Do)^1.68.*(tan(ang./2))^(-.57)
0231     elseif l==15
0232         Reoms_calc=.4*Ar^.52.*(Ho./Do)^1.24.*(tan(ang./2))^(.42)
0233     end
0234
0235     elseif numEcu==2 then
0236         if (l==1|l==5|l==6|l==13) //Altzibar y cols. 2013
0237
0238             Reoms_calc=ctes3(1)*Ar^ctes3(2).*(Ho./Do)^ctes3(3).*(LH./Do)...
0239                 ^ctes3(4).*esfe.^ctes3(5);
0240         elseif (l==2|l==7|l==8|l==14) //Altzibar y cols. 2009
0241
0242             Reoms_calc=ctes3(1)*Ar^ctes3(2).*(Ho./Do)^ctes3(3).*(LH./DT)...
0243                 ^ctes3(4).*(tan(ang/2))^ctes3(5).*esfe.^ctes3(6);
0244         elseif (l==3|l==9|l==10|l==15) //Kmieck y cols 2009
0245
0246             Reoms_calc=ctes3(1)*Ar^ctes3(2).*(Vr.*fi./Vo).^ctes3(3)...
0247                 .*(Db./Do)^ctes3(4).*ang^ctes3(5).*esfe.^ctes3(6)
0248         elseif (l==4|l==11| l==12 |l==16) //San José y cols 2007
0249
0250             Reoms_calc=ctes3(1)*Ar^ctes3(2).*(Db./Do).^ctes3(3)...
0251                 .*(tan(ang/2))^ctes3(4).*((Ho-hr)/Ho)^ctes3(5).*(Di./(Di-DT))...
0252                 ^ctes3(6).*esfe.^ctes3(7);
0253         elseif l==17 //Altzibar y cols. 2013
0254
0255             Reoms_calc=.25*Ar^.5.*(Ho./Do)^1.2.*(LH./Do)^.3
0256         elseif l==18 //Altzibar y cols. 2009
0257
0258             Reoms_calc=.204*Ar^.475.*(Ho./Do)^1.24.*(LH./DT)...
0259                 ^1.68.*(tan(ang/2))^(-.135)
0260         elseif l==19 //Kmieck y cols 2009
0261
0262             Reoms_calc=.0137*Ar^.714.*(Vr.*fi./Vo).^411.*(Db./Do)...
0263                 ^554.*ang^.8
0264         elseif l==20 //San José y cols 2007
0265
0266             Reoms_calc=.126*Ar^.5.*(Db./Do).^1.68.*(tan(ang/2))...
0267                 ^(-.57).*((Ho-hr)/Ho)^.45.*(Di./(Di-DT))^17
0268         end
0269     end
0270
0271     elseif numEcu==3 then
0272         if (l==1|l==2|l==3|l==4)
0273             Reoms_calc=(ctes3(1)*Ar^ctes3(2).*(Db./Do)^ctes3(3)...
0274                 .*(tan(ang./2))^ctes3(4).*Ao_AT^ctes3(5)).*esfe.^ctes3(6);
0275         elseif l==5
0276             Reoms_calc=(.126*Ar^.5.*(Db./Do)^1.68.*(tan(ang./2))^(-.57)...
0277                 .*Ao_AT^.3)
0278         end
0279     end
0280 endfunction

```

```

0275
0276 function M=constants(l, option)//Todas las constantes con valores 0.0 para
0277     //la esfericidad
0278
0279     if option==1 then
0280         if (l==1|l==4|l==5|l==10)
0281             M=[0.028 0.57 1.27 0.48 0.0]
0282         elseif (l==2|l==6|l==7|l==11)
0283             M=[0.126 0.5 1.68 -0.57 0.0]
0284         else
0285             M=[0.4 0.52 1.24 0.42 0.0]
0286         end
0287     elseif option==2 then
0288         if (l==1|l==5|l==6|l==13)
0289             M=[0.25 0.5 1.2 .3 0.0]
0290         elseif (l==2|l==7|l==8|l==14)
0291             M=[0.204 0.475 1.24 .168 -.135 0.0]
0292         elseif (l==3|l==9|l==10|l==15)
0293             M=[0.0137 0.714 0.411 .554 .8 0.0]
0294         elseif (l==4|l==11|l==12|l==16)
0295             M=[0.126 0.5 1.68 -.57 .45 .17 0.0]
0296         end
0297     elseif option==3 then
0298         M=[0.126 0.5 1.68 -0.57 0.3 0.0]
0299     end
0300
0301 endfunction
0302
0303 function SSR=SS(ctes)//Medida de residuales
0304
0305     global exception
0306     exception=1
0307
0308     Reoms_calc=Funcion(ctes)
0309     asre_ind=((Reoms_calc-Reoms_exp)).^2
0310     //asre_ind=((Reoms_calc-Reoms_exp)./Reoms_exp).^2
0311
0312     SSR=sum(asre_ind);
0313     exception=0
0314 endfunction
0315 function asre=helburu(ctes)//Medida de ASREs funciona con el SSR en paralelo
0316
0317     Reoms_calc=Funcion(ctes); //asre_ind=((Reoms_calc-Reoms_exp)./Reoms_exp).^2
0318     asre_ind=((Reoms_calc-Reoms_exp)./Reoms_exp).^2
0319     asre=sum(asre_ind)*100/length(Reoms_calc)
0320 endfunction
0321 format(15)//15 digitos representativos
0322
0323 R=0.082;
0324 M=28.9;
0325 P=1;
0326 grav=9.8;
0327 Dc=0.36
0328 Di=0.06
0329 Temper=get(handles.Temper,'String');
0330 T=strtod(Temper)
0331 visc=(5.3E-7)*(T)^0.634
0332 pg=(P*M)/(R*T)

```

```

0330 global exception
0331 exception=0
0332
0333
0334
0335 ///////////////////////////////////////////////////////////////////

0336 ////// SELECCION DE FICHERO Y ENTRADA DE DATOS

0337 ///////////////////////////////////////////////////////////////////

0338 [FichDatos,PathName,Filtro]=uigetfile(["*.x*"],"...",
0339     "Seleccione el fichero de datos",%f)
0340 chdir(PathName)
0341 Sheets=readxls(FichDatos)
0342 hojal=Sheets(1)//Cambio de página

0343
0344 Datos=hojal.value(2:$,:)
0345 dp=Datos(:,1)
0346 pp=Datos(:,2)
0347 pb=Datos(:,3)
0348 ang=Datos(:,4)
0349 Do=Datos(:,5)
0350 Ho=Datos(:,6)
0351 Qrot=Datos(:,7)
0352
0353 if numEcu==1 then//Características propias de cada modod de operacion

0354     esfe=Datos(:,8);
0355     maxnum=5
0356     NumEcu=3
0357
0358 elseif numEcu==2 then
0359     LH=Datos(:,8)
0360     DT=Datos(:,9)
0361     esfe=Datos(:,10);
0362     Db=0.06+(2*Ho.*tan(ang/2))
0363     LT=.37
0364     hr=Ho-LH
0365     Vo=(%pi/12)*Ho.*(Db^2+Di^2+(Db.*Di))
0366     Vr=(%pi*LH/4).*DT^2
0367     fi=(LT-Ho)./hr
0368     maxnum=7
0369     NumEcu=4
0370
0371 elseif numEcu==3 then
0372     Ao_AT=Datos(:,8);
0373     esfe=Datos(:,9);
0374     maxnum=6
0375     NumEcu=1
0376 end
0377
0378
0379 ///////////////////////////////////////////////////////////////////

0380 ////// CALCULOS PREVIOS

0381 ///////////////////////////////////////////////////////////////////

0382
0383 Ar=(grav*pg/visc^2)*(pp-pg).*dp^3

```



```

0384 Db=0.06+(2*Ho.*tan(ang/2))
0385 uoms_exp=4*Qrot./(%pi*Do^2)/3600
0386 Reoms_exp=(pg/visc)*dp.*uoms_exp;
0387
0388
0389
0390 ///////////////////////////////////////////////////////////////////
0391 // REGRESIÃ#N POR MÃ#NIMOS CUADRADOS
0392 ///////////////////////////////////////////////////////////////////
0393
0394 //Variables globales
0395 result=mopen(FichDatos+'stadistic'+ '_' +'.txt','w');
0396 global i
0397 global l
0398 global ctes1;global asres0;
0399 global quitar
0400 global lugar
0401 global Punto//Matriz con posiciones representativas
0402
0403
0404
0405
0406 for l=(NumEcu*4+1):(NumEcu*5)//calcula el asre y SSR de las originales
0407     ctes0=0
0408     optcond = optimset ( "MaxIter" , 1e6 , "MaxFunEvals" , 1e6 , "TolX" , 1E-10 );
0409     asre=helburu(ctes0);
0410     // [ctesopt,asre]=fminsearch(helburu,ctes0,optcond);
0411     asres0(l-NumEcu*4)=asre
0412     SSR0(l-NumEcu*4)=SS(ctes0);
0413     Re_calc_guarda(:,l-NumEcu*4)=Funcion(ctes0)
0414 end
0415
0416 //Prepara las matrices
0417 Punto=[]
0418 entrar=zeros(NumEcu*4,1);
0419 secure2=zeros(NumEcu,maxnum);
0420 asres=zeros(1,maxnum);
0421 U=1;Util=NumEcu+1
0422 MF=zeros(NumEcu*4,1)
0423 SSR=zeros(1,maxnum)
0424
0425
0426
0427 while operador<maxnum then
0428     if operador==0 then;ecuaciones=NumEcu*3;else;ecuaciones=NumEcu*4;end
0429     //numero de ecuaciones en cada iteraci3n
0430     asres=[];SSR=[]
0431     for l=1:ecuaciones
0432         secure=[];
0433         ctes0=constants(l,numEcu)//numEcu=modo de operaci3n;NumEcu=cuantas
0434         // ecuaciones

```

```

0435
0436     if (l>NumEcu & operador==0 ) then
0437         Punto(1,1)=U; asres0(1)=CTE(1-NumEcu);...
0438         SSR0(1)=CTE2(1-NumEcu); U=U+1; if U>2 then; U=1; end;
0439         continue; //guarda los primeros SSR

0440     elseif (l>NumEcu*3 & operador==1 & options(1,3)==1);
0441         //Fuerza que la K y Ar sean representativas a la vez

0442         Punto(1,1)=2;
0443         Punto(1,2)=1;
0444         ctes1=ctes0;
0445         i=1
0446         temporal=quitar//para el fminsearch

0447         global quitar
0448         quitar=1
0449         ctes0=ctes1(1:2)
0450         optcond =optimset( "MaxIter" , 1e6, "MaxFunEvals", ...
0451             1e6, "TolX", 1E-10);
0452
0453         [ctesopt, asre]=fminsearch(helburu, ctes0, optcond);
0454         quitar=temporal
0455         Punto(1,1)=1;
0456         Punto(1,2)=2;
0457         asres0(1)=asre
0458         ctes1(1:2)=ctesopt(1:2)
0459         SSR0(1)=SS(ctes1);
0460         ctes1=resize_matrix(ctes1,1,maxnum);
0461         secure2(1,:)=ctes1;
0462         continue; //Mejorable pero correcto

0463     end//??

0464
0465     for radar=1:3
0466         if (options(1,radar)==0) & operador==1 then
0467             definition=1+NumEcu*(radar-1)+((NumEcu/2)*(radar-1)*(radar-2))
0468             findeffinition=definition+(NumEcu-1)-(radar-1)*(radar-3)...
0469             *(NumEcu)
0470             for directory=definition:findeffinition
0471                 entrar(directory,1)=1
0472                 Punto(directory,:)=0
0473             end
0474         end
0475     end

0476
0477
0478
0479     if (entrar(1)==1) then; //Las ecuaciones que han terminado

0480         continue;
0481     end

0482
0483     ctes1=constants(1,numEcu)
0484     K=size(ctes0,2); Nochange(1)=K
0485     for i=1:K
0486
0487         if operador~=0 & find(i==Punto(1,:))~=[] then; //C

0488         continue;
0489     end

```

```

0490
0491     ctes0=constants(l,numEcu)
0492
0493     ctes0(1)=ctes1(i);
0494
0495     ctes0=resize_matrix(ctes0,1,1);
0496
0497
0498     //(Punto(1,operador+2)~=0)

0499     if size(Punto,2)>operador then;quitar=1;else;quitar=0;end
0500     if operador~=0 then
0501         cuant?=(size(Punto,2)-quitar);
0502         for T=1:cuant?
0503             ctes0(T+1)=ctes1(Punto(1,T));
0504         end
0505     end
0506
0507     optcond =optimset( "MaxIter" , 1e6, "MaxFunEvals" , 1e6,"TolX",1E-10);
0508     [ctesopt,asre]=fminsearch(helburu,ctes0,optcond);
0509
0510     secure(i,:)=ctes1;
0511
0512     secure(i,i)=ctesopt(1);
0513
0514     if operador~=0 then
0515         cuant?=(size(Punto,2)-quitar);
0516         for T=1:cuant?
0517             secure(i,Punto(1,T))=ctesopt(T+1);
0518         end
0519     end
0520     //Mirar si hay algun error en el <=NumEcu//

0521     if operador==0 & (i==1|i==2)& l<=NumEcu then
0522         secure2(Util,:)=resize_matrix(ctes1,1,maxnum);
0523         // secure2(Util,:)=ctes1;

0524         secure2(Util,i)=ctesopt;
0525         Util=Util+1
0526     end
0527     asres(l,i)=asre;
0528
0529
0530     SSR(l,i)=SS(secure(i,:));
0531
0532
0533
0534     //////////////////////////////////////

0535     ///                               Calcular el valor de la distribución F                               //////////////////////////////////

0536     //////////////////////////////////////

0537
0538
0539     Gralib=[50 60 70 80 90 100 200 500 1000];
0540     Fval=[4.034 4.001 3.978 3.960 3.947 3.936 3.888 3.860 3.851];
0541     C=splin(Gralib,Fval);Buscar=size(dp,1)-(operador+1);...
0542     Fcrit=interp(Buscar,Gralib,Fval,C);
0543
0544     F(l,i)=(SSR0(1)-SSR(l,i))/(SSR(l,i)/((size(dp,1)-(operador+1))))
0545     AF(l,i)=F(l,i)-Fcrit

```

```

0546
0547     if (operador==0 & (l==NumEcu & i==2)) then ;//guarda algunos
0548
0549         //valores de SSR para la segunda estrategia
0549         O=1;P=1
0550         for D=1:NumEcu*2
0551             CTE(D)=asres(P,O);CTE2(D)=SSR(P,O);MF(D+NumEcu)=F(P,O)...
0552             ;O=O+1;if O>2 then O=1;P=P+1;end;
0553             resize_matrix(secure,ecuaciones,maxnum);
0554         end
0555     end
0556 end
0557 if max(AF(l,:))<=0 then
0558     printf("El cambio de mas parametros en la ecuacion %d estadisti",...
0559     ,"camente ya no tiene sentido\n",l)
0560     entrar(l)=1
0561     Punto(l,operador+1)=0//Se sale de esta ecuacion y
0562
0563     //la marca para que no vuelva a entrar
0563     continue;
0564
0565 else
0566     Punto(l,operador+1)=find(max(AF(l,:))==AF(l,:),[1]);
0567     SSR0(l)=SSR(l,Punto(l,operador+1));
0568     asres0(l)=asres(l,Punto(l,operador+1))
0569     printf(" \n\nEl parametro que mejor ajusta de la ecuacion %d",...
0570     ," es el %d\n",l,Punto(l,operador+1));
0571     secure=resize_matrix(secure,K,maxnum);
0572     secure2(l,:)=secure(Punto(l,operador+1),:)
0573     MF(l)=F(l,Punto(l,operador+1))
0574     //guarda valores y sigue si quedan coeficientes
0575
0576     if K<=operador+1 then
0576         entrar(l)=1
0577         disp("se acabo lo que se daba");
0578     end
0579 end
0580 end
0581 global operador;
0582 operador=operador+1
0583 F=[]
0584 AF=[]
0585 end
0586
0587
0588 ////////////////////////////////////
0589 //
0590 ////////////////////////////////////
0591
0592 Para=["-";"a"; "b"; "c"; "d";"e";"f";"g"];
0593
0594 Punto=resize_matrix(Punto,4*NumEcu,maxnum);
0595 //asres0=resize_matrix(asres0,1,4*NumEcu)
0596
0597 asres0=resize_matrix(asres0,4*NumEcu,1)
0597 secure2=resize_matrix(secure2,4*NumEcu,maxnum)
0598

```

```

0599
0600 for H=1:(4*NumEcu);
0601     mfprintf(result,"ECUACIÓN %d-->",H);
0602     operador=0;
0603
0604     for A=1:maxnum
0605         printf('%10s',Para(1+Punto(H,A)))
0606         mfprintf(result,"%10.8f ",secure2(H,A));
0607     end
0608     mfprintf(result,"|%10.8f ",asres0(H))
0609     mfprintf(result,"%10.8f\n",MF(H))
0610     printf("\n");
0611 end
0612
0613 A=FichDatos+'stadistic'+ '_' +'.txt'
0614
0615 mclose(FichDatos+'stadistic'+ '_' +'.txt');
0616 T=mopen(A,'r')
0617
0618 B=mgetl(T,4*NumEcu)
0619 messagebox(B,'RESULTS')
0620
0621 // Add a text uicontrol in figure 3
0622
0623 //////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
0624 //                               Medir F de metodos                               ///
0625 //////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
0626 //AQUI
0627
0628 if min(options)==1 then
0629 for Cont=1:NumEcu ;
0630     puntero=string(Cont);
0631     Nombre="Final"+ "_" +puntero;
0632
0633     Final(1,1)=size(find(Punto(Cont, :)~=0),2);
0634
0635     Final(2,1)=size(find(Punto(NumEcu+Cont*1+(Cont-1), :)~=0),2);
0636
0637     Final(3,1)=size(find(Punto(NumEcu+Cont*1+(Cont), :)~=0),2);
0638
0639     Final(4,1)=size(find(Punto(3*NumEcu+Cont, :)~=0),2);
0640
0641     Final(1,2)=asres0(Cont); Final(2,2)=asres0(NumEcu+Cont*1+(Cont-1));...
0642     Final(3,2)=asres0(NumEcu+Cont*1+(Cont)); Final(4,2)=asres0(3*NumEcu+Cont);
0643     Final(1,3)=SSR0(Cont); Final(2,3)=SSR0(NumEcu+Cont*1+(Cont-1));...
0644     Final(3,3)=SSR0(NumEcu+Cont*1+(Cont)); Final(4,3)=SSR0(3*NumEcu+Cont);
0645     finish=0
0646
0647     Min=find(Final==min(Final(:,2)),[1])-4;NumerocamQ=Final(Min,1);...
0648     asreQ=Final(Min,2);SSRQ=Final(Min,3)//menos asre
0649
0649     ;cambios=find(Final==min(Final(:,1)),[1]);asreC=Final(cambios,2);...
0650     NumerocamC=Final(cambios,1);SSRC=Final(cambios,3)//menos cambios
0651
0651 while (Min)~=(cambios)&(NumerocamQ~=NumerocamC);
0652

```

```

0653     F_fin=((SSRC-SSRQ)/(NumerocamQ-NumerocamC))/(SSRQ/(size(dp,1)-NumerocamQ))
0654
0655     Fcrit2=[3.960 3.111 2.719 2.486 2.329 2.214;3.947 3.098 2.706 2.473...
0656         2.316 2.201;3.936 3.087 2.696 2.463 2.305 2.191;3.927 3.079 2.687 ...
0657         2.454 2.297 2.182;3.920 3.072 2.680 2.447 2.290 2.175;3.888 3.041 ...
0658         2.650 2.417 2.259 2.144;3.860 3.014 2.623 2.390 2.232 2.117;3.842...
0659         2.996 2.605 2.372 2.214 2.099]
0660     Grad=[80 90 100 110 120 200 500 100000]
0661     Comp_lib=NumerocamQ-NumerocamC;
0662     Fval=Fcrit2(:,Comp_lib)
0663     Fval=Fval'
0664
0665     C=splin(Grad,Fval);Buscar=size(dp,1)-NumerocamQ;...
0666         Fcrit=interp(Buscar,Grad,Fval,C);
0667     AF=F_fin-Fcrit
0668     if AF<=0 then
0669         Final(Min,1)=100000000;Final(Min,2)=100000000;Final(Min,3)=100000000
0670     else
0671         Final(cambios,1)=100000000;Final(cambios,2)=100000000;...
0672         Final(cambios,3)=100000000
0673     end
0674
0675     Min=find(Final==min(Final(:,2)),[1])-4;NumerocamQ=Final(Min,1);...
0676     asreQ=Final(Min,2);SSRQ=Final(Min,3)//menos asre
0677
0677     ;cambios=find(Final==min(Final(:,1)),[1]);asreC=Final(cambios,2);...
0678     NumerocamC=Final(cambios,1);SSRC=Final(cambios,3)//menos cambios
0679
0679     end
0680     printf("La mejor ecuación es la %d\n",cambios);
0681
0682 end
0683 else
0684     printf("No hay comparativa entre las dos estrategias")
0685 end
0686
0687 endfunction

```