



Escola Universitària d'Enginyeria
Tècnica Industrial de Barcelona
Consorci Escola Industrial de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

**Volumen I:
Memoria**



**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN
DE UN SISTEMA DE
GENERACIÓN ELÉCTRICA
MEDIANTE GASIFICACIÓN
DE BIOMASA”**

TFG presentado para optar al título de GRADO en
INGENIERÍA DE LA ENERGÍA
por **Oriol Pujoldeval Sánchez de Toledo**

Barcelona, 13 de enero de 2015

Director: Antoni Sudrià i Andreu
Departament d'Enginyeria Elèctrica (DEE)
Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)

ÍNDICE MEMORIA

Índice memoria	1
Índice figuras	4
Índice tablas	6
Resumen	7
Abstract	7
AGRADECIMIENTOS	8
Capítulo 1: Introducción.....	11
1.1. Contextualización.....	11
1.2. Objetivos	13
1.3. Alcance.....	14
1.4. Agentes implicados	14
1.5. Cronología del proyecto	16
Capítulo 2: Estado del arte: la gasificación	18
2.1. La gasificación	18
2.1.1. Proceso de secado	19
2.1.2. La pirolisis	19
2.1.3. Oxidación	19
2.1.4. Reducción	20
2.1.5. Elementos principales de la gasificación	21
- Biomasa	21
- Agente gasificante	22
- Catalizadores	23
- Resultados de la gasificación	24
- Composición del gas	24
2.2. El gasificador.....	25
2.2.1. Gasificadores de lecho fijo	25
2.2.2. Gasificador de lecho fluidizado	29
2.2.3. Comparativa entre configuraciones de gasificador	29
2.3. Análisis de un modelo comercial	31
2.3.1. Contexto	31
2.3.2. Producto	31

Capítulo 3: Diseño y construcción de un gasificador	33
3.1. Configuración escogida	35
3.2. Diseño del reactor.....	36
3.2.1. Garganta.....	36
3.2.2. Reactor interior	37
3.2.3. Reactor exterior	38
3.2.4. Cubierta exterior	40
3.2.5. Parrilla	41
3.2.6. Sistema de alimentación de biomasa	42
3.3. Diseño del ciclón.....	46
3.3.1. Conducto de entrada	53
3.3.2. Cuerpo cilíndrico	54
3.3.3. Cuerpo cónico	55
3.3.4. Recipiente de recogida de partículas	56
3.3.5. Tapa superior	56
3.3.6. Conducto de salida	57
3.3.7. Ensamblaje del ciclón.....	57
3.4. Diseño del filtro de partículas	58
3.4.1. Cálculo de las dimensiones generales.....	60
3.4.2. Funcionamiento interno.....	62
3.5. Elección del grupo motor-generator.....	66
3.5.1. Mantenimiento del grupo motor-generator.....	68
3.6. Gestión del gas de mala calidad.....	69
3.7. Aspecto del gasificador manual.....	69
Capítulo 4: Diseño de un sistema de monitorización.....	71
4.1. Estudio de un sistema de monitorización.....	71
4.2. Diseño del sistema de monitorización	73
4.2.1. Monitorización de la temperatura	77
4.2.2. Monitorización de la presión.....	83
4.3. Instalación del sistema de monitorización	86
4.4. Elección de la placa de control	89
4.5. Acondicionamiento de las señales	93
Evaluación económica	95
Capítulo 5: Conclusiones	96
5.1. Conclusiones	96
5.2. Trabajos futuros	97

Capítulo 6: Bibliografía	98
6.1. Referencias bibliográficas.....	98
6.2. Bibliografía de Consulta	99

ÍNDICE FIGURAS

Figura 1: Situación geográfica de la República del Chad y Goundi. (Misión y Desarrollo para Goundi).....	12
Figura 2: Reacciones reductoras en la gasificación (All Power Labs)	20
Figura 3: Procesos de la gasificación (All Power Labs)	21
Figura 4: Configuración de tiro directo o updraft (All Power Labs).....	26
Figura 5: Configuración de tiro invertido o downdraft (All Power Labs)	27
Figura 6: Configuración de flujos cruzados o crossdraft (All Power Labs)	28
Figura 7: Power Pallet de 20kW. (All Power Labs)	32
Figura 8: Esquema proceso de gasificación. (Fuente propia)	34
Figura 9: Garganta del gasificador. (Fuente propia)	36
Figura 10: Reactor interior. (Fuente propia).....	37
Figura 11: Ensamblaje del reactor interior y la garganta. (Fuente propia).....	38
Figura 12: Reactor exterior. (Fuente propia).....	39
Figura 13: Ensamblaje del reactor exterior, interior y garganta. (Fuente propia)	39
Figura 14: Cubierta exterior. (Fuente propia).....	40
Figura 15: Ensamblaje de la cubierta exterior, reactores interior y exterior y garganta. (Fuente propia).....	41
Figura 16: Orificio del sistema de sacudimiento de la parrilla. (Fuente propia) 42	
Figura 17: Gasificador con tornillo sin fin incorporado (All Power Labs)	43
Figura 18: Sistema de canalización de la biomasa. (Fuente propia).....	44
Figura 19: Ensamblaje del reactor y el depósito. (David Martín, 2014)	45
Figura 20: Circulación del gas en el interior de un ciclón. (Fuente propia).....	46
Figura 21: Rendimiento de un ciclón según velocidad del gas. (Mujumdar, 2006)	49
Figura 22: Dimensiones de un ciclón. (Mujumdar, 2006)	50
Figura 23: Rendimiento para configuraciones Swift y Stairmand. (Fuente propia)	52
Figura 24: Adaptador de sección. (Fuente propia)	53
Figura 25: Conducto de entrada al ciclón. (Fuente propia).....	54
Figura 26: Parte cilíndrica del ciclón. (Fuente propia).....	54
Figura 27: Parte cónica del ciclón. (Fuente propia)	55
Figura 28: Tapa superior del ciclón. (Fuente propia)	56
Figura 29: Ciclón ensamblado. (Fuente propia)	58
Figura 30: Ciclón explosionado (Fuente propia).....	58
Figura 31: Métodos de captación del filtro (Woolcock & Brown, 2012)......	59

Figura 32: Esquema del filtro del Power Pallet (Mason, 2010)	60
Figura 33: Esquema circulación del gas en el interior del filtro. (Fuente propia)	63
Figura 34: Malla interior. (Fuente propia)	64
Figura 35: Vista seccionada del cuerpo del filtro. (Fuente propia)	64
Figura 36: Vista seccionada del filtro ensamblado. (Fuente propia)	65
Figura 37: Grupo motor-generator PERFORM 6500 GAZ (Datasheet SDMO) ...	66
Figura 38: Características del grupo escogido (Datasheet SDMO)	67
Figura 39: Nomenclatura estándar IEC 60529	67
Figura 40: Dimensiones y peso del grupo escogido. (Datasheet SDMO).....	68
Figura 41: Régimen de mantenimiento del grupo motor-generator. (Datasheet SDMO)	68
Figura 42: Posible aspecto del ensamblaje general del gasificador. (David Martín)	70
Figura 43: Localización de los puntos de medición en el gasificador. (Fuente propia)	76
Figura 44: Termopar tipo K con encamisado y enchufe. (CONATEC)	80
Figura 45: Termopar tipo K encamisado con salida a cable. (CONATEC, 2014)	81
Figura 46: Presupuesto termopares. (CONATEC, 2014)	82
Figura 47: Condiciones de operación del sensor de presión. (Freescale Semiconductor, 2005)	83
Figura 48: Sensor de presión Freescale MPXV7007. (Freescale Semiconductor, 2005).....	84
Figura 49: Función de transferencia del sensor de presión (Freescale Semiconductor, 2005)	84
Figura 50: Error de medición de presión según temperatura. (Freescale Semiconductor, 2005)	85
Figura 51: Presupuesto sensores de presión. (Digi-key Corporation)	85
Figura 52: Método de instalación de un punto de doble medición. (Fuente propia)	87
Figura 53: Instalación de los puntos de doble medición en el gasificador. (Fuente propia)	88
Figura 54: Placas de control Arduino. (Página web de Arduino)	90
Figura 55: Presupuesto placas de control. (RS Components).....	91
Figura 56: Placa Arduino Mega Atmel Atmega 2560. (Página web de Arduino)	91
Figura 57: Placa amplificadora MAX31855v2.0. (Digi-key Corporation).....	93
Figura 58: Presupuesto placas amplificadoras. (Digi-key Corporation).....	94

ÍNDICE TABLAS

Tabla 1: Comparativa entre gasificadores de lecho fijo y lecho fluidizado. (Fuente propia)	30
Tabla 2: Comparativa entre las configuraciones de lecho fijo. (Fuente propia) .	30
Tabla 3: Características del Power Pallet v3.0. (All Power Labs)	32
Tabla 4: Composición del gas y porcentaje de oxígeno necesario para combustión	47
Tabla 5: Parametros geométricos según configuración. (Mujumdar, 2006)	50
Tabla 6: Cálculo dimensiones para configuraciones Swift y Stairmand. (Fuente propia)	51
Tabla 7: Velocidad obtenida para configuraciones Swift y Stairmand. (Fuente propia)	52
Tabla 8: Dimensiones filtro y equivalencia en centímetros.....	61
Tabla 9: Equivalencia proporciones entre filtros.	61
Tabla 10: Características de la placa de control del Power Pallet.....	72
Tabla 11: Puntos de medición del gasificador.	75
Tabla 12: Características de los distintos tipos de termopares	79
Tabla 13: Costes detallados del proyecto.	95

RESUMEN

El presente proyecto se centra en el diseño y la construcción de un sistema de generación eléctrica que permita la obtención de energía mediante la quema de biomasa. El prototipo que resulte de los esfuerzos invertidos en este trabajo, se destinará a abastecer las necesidades eléctricas de Goundi, una pequeña aldea de la República del Chad, África.

Persiguiendo este objetivo, este proyecto comprende un estado del arte sobre la gasificación, en pos de optimizar y simplificar todos los procesos y reacciones que tienen lugar en el interior de los dispositivos que realizan dichas tareas: los gasificadores. Como parte complementaria aunque de vital importancia, gran parte de las horas de ingeniería invertidas en el proyecto se han destinado a tratar de reducir la electrónica al mínimo nivel, dotando el diseño de una robustez y autonomía que lo habilite para trabajar bajo las severas condiciones que se encuentran en un área rural africana.

Adicionalmente, este proyecto se centra en detallar las labores constructivas de un sistema de limpieza de gases que permita acondicionar el gas generado para un uso eléctrico. También se diseñará un sistema de monitorización que permita el seguimiento de las condiciones de trabajo a lo largo del gasificador. Con esto se asentarán las bases de lo que pretende ser un sistema de generación sostenible totalmente auto-gestionable por la población, y que además supondrá la implantación del primer sistema de estas características para la región.

ABSTRACT

This project is focused on the design and construction of an electric generation system which would allow obtaining energy through the burning of biomass. The resulting prototype of this work is meant to supply the electric needs of Goundi, a small village in Chad Republic, Africa.

Chasing this objective, my project contemplates a comprehensive state of art about gasification as a technology, in order to optimize and simplify all the processes and reactions that take place in the insides of the devices used for this purpose: the gasifiers. As a complementary part of this work, a fair good amount of the engineering hours invested in the project have been focused on reducing the electronics to its minimum potential, converting our gasifier in a reliable and autonomic unit capable of working under the hard conditions of an African rural area.

Additionally, this project focuses its efforts in designing the constructive process to build an efficient gas-cleaning system capable of making the produced gas be able to be used for electric purposes. It will also be designed a monitor system that will allow the user to keep the track of the working conditions all along the gasifier.

This will settle the basis of what pretends to be a completely sustainable generation system that is designed to be self-manageable by the villagers of Goundi. In addition, this one will be the first case of implantation of a system of these characteristics in the region.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas aquellas personas que en el transcurso de los últimos dos años han ofrecido su ayuda, sus conocimientos o simplemente su apoyo para tratar de llevar este proyecto a buen puerto. Su realización habría sido imposible sin la espectacular implicación del equipo del CITCEA-UPC, del que ha sido un privilegio poder formar parte y del que sigo aprendiendo día a día. Quiero agradecer a mis padres el haber estado siempre allí. A Toni Sudrià, el haberme permitido embarcarme en este proyecto, enriqueciendo y llenando de nuevos matices la concepción que tenía de mis estudios. Finalmente, a Ramon Ticó, por contagiarme hace ya muchos años de su entusiasmo, orientándome a tomar una dirección de la que estoy cada día más contento. Sin todos ellos, este proyecto difícilmente habría llegado a buen puerto.

Capítulo 1:

INTRODUCCIÓN

El presente proyecto nace de la colaboración con la ONG Misión y Desarrollo para Goundi (MyDpG), el principal organismo que actualmente ayuda de forma activa a Goundi, una pequeña población del suroeste de la República del Chad. Este trabajo, por ello, se realiza en el marco de un proyecto de cooperación para el desarrollo, buscando causar una revitalización en el ámbito social, económico y tecnológico de la zona beneficiaria.

1.1. Contextualización

Goundi es una población rural perteneciente a la República del Chad. Concretamente se encuentra entre el grupo de países comprendidos bajo el término de África subsahariana. Es limítrofe con Libia al norte y con la República Centroafricana al sur, con Nigeria y Camerún al sureste, al este con Sudán y al oeste con Níger.

El Chad cuenta con una superficie de 1.284.000 km², la mayoría impracticables para el cultivo debido a la naturaleza árida y desértica del terreno. Goundi se encuentra al sur del país, en un emplazamiento remoto a 500 km. de la capital, N'Djamena, ver Figura 1.

Según el informe presentado por las Naciones Unidas (Malik, 2013), el Chad es el cuarto país del mundo con un índice de desarrollo humano menor y el 80% de su población se encuentra por debajo del umbral de la pobreza (Central Intelligence Agency, 2014).

Goundi no es una excepción de lo anteriormente descrito. Se practica la agricultura de subsistencia como método de sustento, con lo que no se genera ninguna riqueza y todo cuanto se produce es consumido. Históricamente, las actividades agrícolas se realizan a modo tradicional sin contar con maquinaria de ningún tipo, y el suministro de agua de la población se reduce al uso de un pozo comunitario que carece de procesos de saneamiento del agua.



Figura 1: Situación geográfica de la República del Chad y Goundi.
(Misión y Desarrollo para Goundi)

El clima de la región es severo, alcanzándose temperaturas de hasta 50°, e imperando ciclos de 9 meses de sequía seguidos por 3 meses de lluvias (MyDpG, 2003).

La región esta azotada también por una larga lista de enfermedades y patologías, que reducen la esperanza de vida de sus habitantes entorno a los 50 años y sitúan el índice de mortalidad infantil entre los más altos del planeta.

En materia energética y según datos del 2010, la República del Chad tiene una potencia instalada de 31.000 kW, de los cuales el 100% se extraen de la quema de combustibles fósiles. Su infraestructura eléctrica se limita a tres redes no interconectadas que abastecen las principales ciudades del país. Sin embargo, únicamente el 2,2% de los hogares chadianos disponen de electricidad. Por si fuera poco, el precio de la electricidad es uno de los más elevados del mundo.

Un sector energético en tan precarias condiciones, unido a todos los factores que se han descrito, supone un enorme obstáculo para el desarrollo económico del país.

La implicación del CITCEA-UPC es una de las claves para cambiar esta situación. Su estrecha colaboración con MyDpG dio como resultado el proyecto Polê Goundi, que tiene como objetivo dotar a la población de Goundi de infraestructuras que incentiven su actividad tecnológica, económica y social. Entre las infraestructuras previstas, se encuentra la construcción de una instalación de producción eléctrica que combine distintas energías renovables y la implantación de una red de distribución que lleve dicha electricidad a los consumidores. El objetivo del proyecto Polê es, por lo tanto, la construcción modular de una planta de generación eléctrica hasta alcanzar los 200 kVA de potencia instalada en un plazo máximo de diez años. Esto va a permitir ir ampliando la potencia en función del financiamiento del proyecto, de los resultados obtenidos por las distintas tecnologías y de la aceptación de la

población. La fase inicial del proyecto consistió en un estudio de alternativas para determinar la vía óptima de generación eléctrica. Finalmente se optó por la gasificación de biomasa, y concretamente, la gasificación de los corazones de las mazorcas de maíz, un residuo abundante en la zona. Energías como la eólica y la solar han sido descartadas por las extremas condiciones del terreno (nula orografía, perfiles de viento irregulares) y otras por no encajar adecuadamente con los objetivos principales del proyecto. Estos objetivos persiguen estimular la participación de la población local, contribuyendo al desarrollo económico y social de la zona. Por un lado, la venta de los desechos agrícolas para generar electricidad incentivará la producción agrícola de la región, aumentando la disponibilidad de comida para la población. Por otro lado, el cultivo de biomasa y los procesos de acondicionamiento de la materia prima y de operación de la planta generarían puestos de trabajo que reducirían la alarmante tasa de desempleo de la zona. Además, se priorizará la participación en el proyecto a dos de los colectivos más desfavorecidos y segregados en Goundi: las mujeres y las personas discapacitadas. En este sentido, la *Association des Handicapés Physiques à Goundi* colaborará en la inversión económica, la selección de personal y en su formación.

1.2. Objetivos

El presente proyecto comprende distintos objetivos, orientados a mejorar y revolucionar la estancada sociedad de Goundi. Para ello se requiere un cambio drástico a nivel socioeconómico. Es por ello que se pueden definir tres objetivos principales:

- Revitalización de la economía mediante la instauración de un sistema de reaprovechamiento de los residuos que actualmente ya se producen. Se creará riqueza a partir de un recurso actualmente desaprovechado, alentando a la población a participar activamente y formar un eslabón de vital importancia en el proceso de generación eléctrica.
- Priorizar la participación en el proyecto de los colectivos más desfavorecidos de la zona: las mujeres y los discapacitados físicos. Destinando lugares de trabajo a miembros de estos colectivos se les ofrecerá oportunidades que a día de hoy son inexistentes para ellos, avanzando así en pos de la igualdad.
- Creación e implantación de un sistema sostenible de generación eléctrica mediante la construcción y posterior utilización de un gasificador de biomasa.

El objetivo último del proyecto y que será el paso decisivo a la realización de los otros dos, por lo tanto, es la construcción de un gasificador que sea capaz de abastecer las necesidades energéticas de la población de Goundi. Para ello se deberán ir cumpliendo los siguientes objetivos:

- Comprender los tecnicismos de la gasificación y ser capaz de idear un método de llevarla a cabo.
- Realizar el dimensionamiento de los componentes que constituyen un gasificador, y que a su vez representan las distintas reacciones que se busca producir.
- Modelar los componentes en tres dimensiones y realizar los planos pertinentes que permitan su construcción en un taller.
- Conocer y ser capaz de describir las instrucciones de montaje y ensamblaje de las distintas piezas.
- Diseñar un sistema de monitorización que permita al usuario realizar un seguimiento de las condiciones de trabajo en el interior del gasificador.

La correcta realización del estado del arte será fundamental para encarar los objetivos fijados, con un buen criterio en la toma de decisiones.

1.3. Alcance

Este proyecto ha fijado sus límites en la construcción de un gasificador capaz de generar energía eléctrica mediante la quema de biomasa. Si bien el documento tratará de cubrir todos los aspectos constructivos y de diseño que intervienen en la construcción de un gasificador, el trabajo realizado se centra especialmente en dos ámbitos:

- Diseño y construcción de un sistema de limpieza de gases eficiente

El acoplamiento de un sistema de limpieza de gases que permita acondicionar el gas para su uso en el motor es de vital importancia en todo proceso de gasificación.

- Diseño de un sistema de monitorización.

Durante la operación de un gasificador, es completamente necesario ejercer un control exhaustivo de la evolución de los parámetros y las condiciones de trabajo. Es por ello que deberá instalarse un sistema de monitorización que informe al usuario de las variaciones de presión y temperatura en el interior del dispositivo. En este trabajo se realizará un inventario de los componentes necesarios para configurar dicho sistema,

1.4. Agentes implicados

Puesto que existen distintos organismos involucrados en el desarrollo de este proyecto de cooperación, en esta sección se detallarán las funciones y participación de cada uno de ellos.

a) Misión y Desarrollo para Goundi

La ONG Misión y Desarrollo para Goundi, abreviada MyDpG, es la principal entidad de entre las que participan en el proyecto. Fue fundada en el año 2003 con el firme propósito de apoyar las necesidades del hospital de Goundi. Necesidades, que abarcan aspectos energéticos, económicos e incluso de suministro de material y medicamentos. Las principales actividades que realizaban antes de embarcarse en el proyecto Polê Goundi se centraban en conseguir financiación para costear el diésel que alimenta los generadores del hospital, recolectar y realizar envíos de medicamentos donados por hospitales catalanes y ocasionalmente enviar personas cualificadas al hospital para mantener el nivel de calidad de sus protocolos e intervenciones. A causa de los crecientes problemas para encontrar financiamiento para estas actividades, se descartó la compra de diésel como algo que pueda prolongarse indefinidamente, así que trataron de encontrar la forma de instalar un sistema de generación eléctrica que fuera sostenible económica y medioambientalmente.

b) CITCEA-UPC

El CITCEA, cuyas siglas son abreviatura para "Centre d'Investigació Tecnològica en Convertidors Estàtics i Accionaments" es un centro de investigación inscrito en la Universitat Politècnica de Catalunya. Centra sus actividades en el desarrollo y la investigación en los campos de la mecatrónica y la enertrónica, especializándose en la electrónica de potencia. El CITCEA-UPC respondió a la necesidad de MyDpG en 2012, haciéndose cargo de la vertiente técnica del proyecto, y asignando las distintas tareas y quehaceres entre propios trabajadores del centro y estudiantes de las facultades ETSEIB y EUETIB, muchos de los cuales centraron sus trabajos de fin de carrera y grado en dar forma a una parte específica del proyecto. El equipo del CITCEA-UPC también realizó entre finales de 2013 e inicios del 2014 una exitosa campaña de *Crowdfunding* a través de la plataforma online *Goteo.org*, que reunió la suficiente financiación para seguir con la siguiente fase del proyecto: la construcción de un gasificador.

c) Centre de Cooperació per al Desenvolupament (CCD)

El Centre de Cooperació per al Desenvolupament, abreviado como CCD, es un organismo inscrito en la UPC, con la misión de impulsar la implicación activa en cooperación al desarrollo y apoyar la realización de iniciativas en este ámbito por parte de todos los miembros de la UPC (Centre de Cooperació per al Desenvolupament de la UPC, 2015). Además, desarrolla una labor de formación y sensibilización sobre las distintas problemáticas de las zonas donde opera. El CCD ha colaborado activamente, destinando becas a los estudiantes que participaban activamente en el proyecto.

d) Ayuntamiento de Cabrils

La participación del Ayuntamiento de Cabrils en el proyecto ha sido más que notable. Cedió gratuitamente a la ONG MyDpG un terreno en el propio municipio de Cabrils, que se destinó para alojar un primer gasificador y permitir que el CITCEA-UPC lo estudiase y realizase las pruebas pertinentes previamente a su envío a Goundi. El Ayuntamiento de Cabrils se ha mostrado dispuesto a renovar la cesión del terreno en pos de seguir hospedando las distintas actividades del proyecto, como por ejemplo la puesta a punto y realización de las pruebas del futuro gasificador construido por el CITCEA-UPC.

1.5. Cronología del proyecto

Es interesante realizar una observación general del histórico del proyecto. Desde el CITCEA-UPC, la labor de investigación en lo referente al proyecto se inició a finales del año 2012. El primer hito se cumplió en enero de 2013, con la presentación de un estudio de viabilidad de las distintas formas de generación sostenible de energía eléctrica que se podrían implementar en Goundi para satisfacer las necesidades del hospital. Este estudio, que tuvo como conclusión que la mejor opción para Goundi era la gasificación de biomasa, también resolvió que la primera medida que se tomaría para empezar a incorporar esta tecnología en Goundi sería la compra de un modelo comercial de gasificador para su estudio y posterior envío a la zona.

Durante el período comprendido entre enero y julio de 2013, los estudiantes Víctor Depoorter y Àngel Lladó, realizaron su trabajo de fin de grado en colaboración con el CITCEA-UPC. El primero centró su trabajo en el diseño de un modelo informático que simulase el comportamiento de un gasificador, mientras que el segundo dedicó su proyecto al estudio teórico del gasificador que se había decidido comprar, y del que su llegada estaba programada para agosto de 2013. También se presentó un trabajo de fin de máster, realizado por Jordi Giral, en el que se hacía especial hincapié en la gasificación y los distintos procesos que la integran.

Con la llegada del gasificador, el equipo del CITCEA-UPC se volcó de lleno en el estudio práctico de la maquinaria y los distintos componentes que lo formaban. Se realizaron pruebas de funcionamiento en el espacio cedido por el Ayuntamiento de Cabrils, como se muestra en la Figura 2, durante las cuales se logró generar electricidad. Fue entre los meses de agosto y diciembre de 2013 que se obtuvo el máximo volumen de conocimientos, que posteriormente capacitaría al equipo para afrontar la construcción de un nuevo gasificador.



Figura 2: Gasificador de All Power Labs en Cabrils. (Fuente propia)

A finales de 2013 y con la marcha del primer gasificador a Goundi, se inició la segunda fase del proyecto. Ésta dio comienzo con la realización de una campaña de micromecenazgo o *crowdfunding* por parte del equipo del CITCEA-UPC, y hospedada por la plataforma online Goteo.org. La campaña fue un éxito, lográndose recaudar 11.221€ que se destinarían exclusivamente a la construcción de un nuevo gasificador, con la mínima presencia de electrónica y que fuese fácilmente operable por usuarios poco familiarizados con la tecnología.

Actualmente, el proyecto se encuentra en su punto de máxima ebullición, manteniendo el firme objetivo de disponer del gasificador terminado y en funcionamiento a principios de 2015. Entre los meses de enero y diciembre de 2014, varios estudiantes han continuado colaborando con el proyecto. El estudiante David Martín presentó en noviembre su trabajo de fin de máster, centrado especialmente en la construcción del reactor del gasificador. Ingrid Munné, estudiante de la facultad ETSEIB aún en fase previa a la realización de su trabajo de fin de carrera, ha colaborado activamente desde principios de 2014 para escoger el motor que se acoplará al gasificador. Los estudiantes Alejandro Xu y yo mismo, Oriol Pujoldevall, tienen prevista la presentación de su trabajo de fin de grado en enero de 2015.

El presente documento pretende ser otra pieza del engranaje que se unirá al esfuerzo de tantas otras personas.

Capítulo 2:

ESTADO DEL ARTE:

LA GASIFICACIÓN

2.1. La gasificación

La gasificación es un proceso termoquímico mediante el cual se transforma materia orgánica en una mezcla de gases. El gas resultante de esta mezcla, conocido como gas de síntesis o por el diminutivo *syngas*, puede ser usado en una caldera, una turbina o un motor de combustión (tras ser debidamente acondicionado) con fines de generación eléctrica. El gas de síntesis obtenido en el proceso está compuesto de monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), hidrógeno (H₂), metano (CH₄), agua (H₂O) y nitrógeno (N₂). La composición exacta y el poder calorífico del gas dependen de las condiciones de trabajo en las que se realiza el proceso, del tipo de biomasa y agente oxidante utilizados y de las características de la maquinaria utilizada para realizar el proceso de gasificación. Los dispositivos empleados para llevar a cabo el proceso de gasificación, reciben el nombre de gasificadores (IEA Energy Technology Essentials, 2007).

Independientemente del tipo de gasificador empleado, el proceso de gasificación se desarrolla en cuatro etapas diferenciadas: el secado, la pirolisis, la oxidación y la reducción. Cada etapa se realiza en una sección concreta del gasificador, y se suceden entre sí en el orden indicado, como se ve en la Figura 4. Ésta separación de zonas del gasificador permite explicar más fácilmente su

funcionamiento, pero hay que tener en cuenta que éste no es un enfoque del todo preciso, ya que las reacciones no empiezan cuando termina la anterior, sino que ocurren simultáneamente en las correspondientes partes del gasificador (Solar Energy Research Institute, 1988).

2.1.1. Proceso de secado

Típicamente, el contenido en agua de la biomasa oscila entre el 30 y el 60%, llegando al 90% en determinadas ocasiones. Cada kilogramo de agua presente en la biomasa representa una pérdida de energía de 2260 kJ, necesarios para evaporar dicho contenido de agua. Esta energía, por consiguiente, no puede ser recuperada. La mayoría de gasificadores desempeñan un correcto funcionamiento con biomásas con humedades inferiores al 30%, aunque por lo general se recomienda trabajar con valores aún más bajos. En procesos de gasificación se suele emplear biomasa con un contenido de agua entre el 10 y el 20%.

Por este motivo, es de vital importancia realizar tareas de pre-secado que eliminen la humedad superficial de la materia prima. Para ello, se requerirá alcanzar temperaturas superiores a 100°C y que empiece el proceso de evaporación. Finalizado este proceso, se obtiene una biomasa correctamente acondicionada para su uso inmediato (Solar Energy Research Institute, 1988).

2.1.2. La pirolisis

La siguiente etapa en la cadena de procesos que se suceden en la gasificación es la pirolisis. Es un proceso endotérmico, y por lo tanto requiere de un aporte de energía para llevarse a cabo. En él, las cadenas de moléculas que forman la biomasa se rompen en otras más cortas. Esto sucede únicamente por aporte térmico, sin que se añada ningún agente externo. Mediante la pirolisis, la biomasa se degrada a un residuo sólido consistente en carbón vegetal (*charcoal* en inglés) formado esencialmente por carbono (C). También aparecen alquitranes en estado gaseoso y líquido (*tars* en inglés), así como los principales gases combustibles (CO en su mayor parte) (Solar Energy Research Institute, 1988).

2.1.3. Oxidación

A continuación se produce una reacción de oxidación. Otra forma de decirlo sería que tiene lugar una combustión. En ella, la mezcla de gases y sólidos producto de la pirolisis entra en contacto con un agente que recibe el nombre de agente gasificante (comúnmente aire introducido del exterior), que propiciará las transformaciones pertinentes. Producto de esta etapa, se obtiene dióxido de carbono junto con pequeñas cantidades de monóxido de carbono. Es aquí también donde se producen el conjunto de reacciones exotérmicas que generarán el calor necesario para mantener el proceso de gasificación. Las

reacciones que se producen para la formación de CO₂ y CO se detallan a continuación:



2.1.4. Reducción

Como último estadio de la cadena de procesos, tiene lugar una reducción, en el que el carbón vegetal producido en la pirolisis se convierte en gas de síntesis. Los procesos que se desarrollan en esta etapa en particular reciben el nombre de gasificación, aunque comúnmente se usa el término para definir todo el conjunto de procesos. En función del agente gasificante utilizado en la fase de oxidación, existen distintas reacciones que permiten gasificar el carbón vegetal. En este estadio, el carbono presente reacciona con la mezcla gaseosa y el vapor de agua para dar lugar a la formación de monóxido de carbono e hidrogeno. Las transformaciones están representadas en la Figura 3.

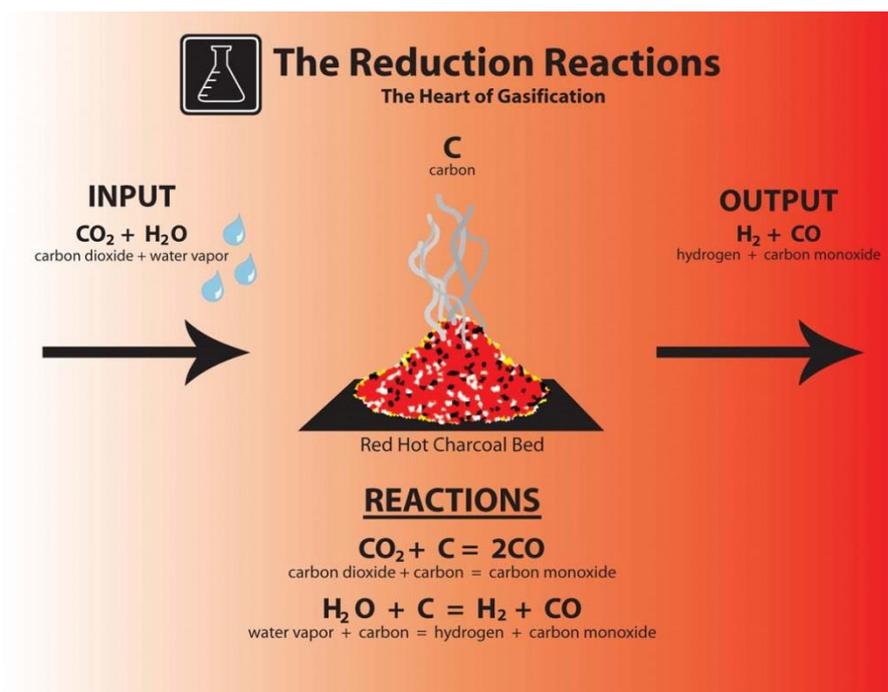
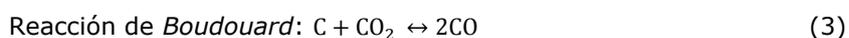
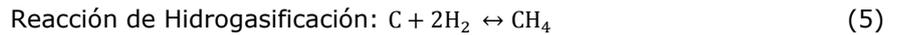


Figura 3: Reacciones reductoras en la gasificación (All Power Labs)

De igual manera, la formación de CO y de algunos hidrocarburos, continúa. A continuación se resumen las principales reacciones en las ecuaciones (3), (4) y (5).





La velocidad de las anteriores reacciones depende básicamente del potencial reactivo del agente gasificante que intervenga en cada caso. El oxígeno puro, por ejemplo, posee el mayor potencial, seguido por el vapor de agua y el dióxido de carbono. A sabiendas de esto, la reacción más rápida de las presentadas es la oxidación parcial, que consume muy rápidamente el oxígeno, privando a las otras reacciones de disponer de él. La reacción de gasificación es por lo tanto, la más lenta de todas, reduciendo en gran medida la cantidad de metano que se genera en ella.

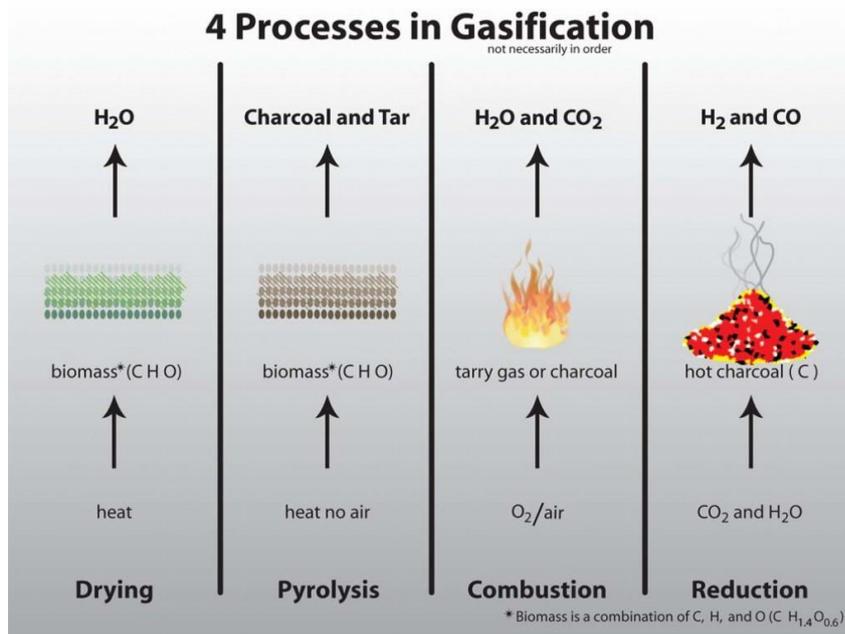


Figura 4: Procesos de la gasificación (All Power Labs)

2.1.5. Elementos principales de la gasificación

Existe un gran abanico de factores que pueden influir e influyen en las características del gas resultante de una gasificación. Todos ellos deben estar correctamente proporcionados para lograr el objetivo de generar un gas eficiente en términos energéticos.

- Biomasa

Mediante la gasificación y las elevadas temperaturas que intervienen en ella, se puede procesar prácticamente cualquier tipo de biomasa como combustible. Los factores limitantes suelen ser puramente físicos, como su densidad y su tamaño.

Para densidades reducidas (inferiores a 200-250 kg/m³), la biomasa puede provocar problemas en conductos de circulación vertical, lo que limita su utilización. Por otra parte, es necesario que el tamaño de la biomasa sea homogéneo y ajustado a las dimensiones del reactor. Un tamaño de partícula pequeño aportará mayor calidad al gas y el tiempo de residencia necesario para el craqueo térmico de los alquitranes se verá disminuido. Aun así, en caso de que el tamaño de partícula fuera excesivamente reducido, podría provocar la formación de una obstrucción en los conductos a causa de un tapón, o incluso una conducción de las cenizas hacia el exterior del reactor, invadiendo zonas no preparadas para alojarlas.

La biomasa presenta una estructura compuesta fundamentalmente de celulosa, además de otros tipos de polímeros. Éstos componen la estructura de la biomasa, y su concentración varía según la especie, el tipo de tejido vegetal, el estado de crecimiento y las condiciones en que se ha desarrollado. A parte de estos componentes mayoritarios, la biomasa contiene otros de minoritarios como las cenizas, es decir, la fracción inorgánica del material compuesta principalmente por calcio, potasio, sodio, magnesio y sílice. Para una descripción química de la biomasa se dispone de dos tipos de análisis, los inmediatos y los de tipo elemental. El análisis inmediato mide los contenidos de humedad, elementos volátiles, cenizas y carbono fijo, expresados en porcentajes en peso. El análisis elemental permite establecer la composición del combustible (también en porcentajes en peso) de carbono (C), hidrógeno (H), nitrógeno (N), oxígeno (O) y azufre (S). Estos elementos definen el potencial calorífico del biocombustible. Adicionalmente, para predecir el riesgo que ciertos elementos pueden suponer en los procesos termoquímicos, se realizan análisis de la composición elemental de las cenizas (The Japan Institute of Energy, 2002).

- *Agente gasificante*

Como se ha visto con anterioridad, la etapa de combustión requiere de la intervención de un agente oxidante para llevarse a cabo. En el panorama actual, se están utilizando cuatro tipos de agentes para este propósito: aire, oxígeno, vapor de agua e hidrógeno. El uso de uno u otro influye en la composición y en el poder calorífico del gas de síntesis que se obtendrá. El aire es el agente gasificante de más práctica y fácil utilización. Naturalmente se obtiene de forma gratuita y su disponibilidad es infinita. Aun así, presenta inconvenientes, como su elevado contenido de nitrógeno (79%). La abundancia de este elemento provoca que el *syngas* obtenido mediante la utilización de aire como agente gasificante contenga un 50% de nitrógeno, limitando el poder calorífico del gas a valores aproximados de 5,5 kJ/Nm³. Este gas de síntesis es adecuado para el uso en

motores de combustión interna convencionales, pero no para otros fines que requieran de un resultado de mayor pureza.

El uso de oxígeno como agente gasificante mejora sustancialmente el rendimiento global de la gasificación y produce un gas de síntesis con un poder calorífico hasta tres veces mayor. El mayor inconveniente es que la obtención de oxígeno puro implica un aumento significativo del coste y de la complejidad del sistema. Además en procesos de gasificación con oxígeno puro se alcanzan a menudo temperaturas elevadísimas, llegándose a producir una escorificación (fusión de las cenizas). Para contrarrestar este efecto, que tendría consecuencias negativas y afectaría la calidad del gas, se usa a veces un moderador que limite la temperatura que se puede alcanzar en el interior del reactor.

El vapor de agua presenta dos ventajas importantes como agente gasificante: no introduce nitrógeno indeseado en el gas de síntesis y su contenido en hidrógeno es de dos átomos por cada átomo de oxígeno. De esta forma, el oxígeno cumple su función de oxidar el carbono, mientras que el excedente de hidrógeno permite aumentar el contenido de H₂ en el gas de síntesis, aumentado así también su poder calorífico.

Finalmente, en determinados procesos se usa hidrógeno como agente gasificante. De esta forma se obtiene un gas de síntesis con un elevado poder calorífico, comparable al del gas natural. Aun así, por norma general suele ser más interesante el uso directo del hidrógeno con fines de producción energética, por lo que únicamente se usa como agente gasificante cuando se trata de un excedente de baja pureza, no apto para otras aplicaciones como las pilas de combustible.

- Catalizadores

Dependiendo de la tecnología y de las condiciones de gasificación, es posible usar catalizadores que induzcan o aceleren ciertas reacciones, priorizando la formación de determinados compuestos. Para temperaturas de gasificación menores de 550°C, la utilización de catalizadores de níquel o cobalto facilita el craqueo de algunas sustancias indeseadas, reduciendo así la formación de alquitranes. Estos catalizadores también facilitan la formación de CO y H₂ para temperaturas de trabajo comprendidas entre 700 y 800°C. Por otro lado, otros materiales catalizadores como la zeolita y la dolomía permiten trabajar a menor temperatura en la zona de reducción. Esto permite desplazar la temperatura de craqueo de 1100°C hasta 800-900°C.

- *Resultados de la gasificación*

A la temperatura de gasificación (700°C - 1000°C), las únicas combinaciones estables que se pueden producir a partir de los principales elementos de la biomasa (carbono, hidrógeno y oxígeno) son C, CO, CO₂, CH₄, H₂ y H₂O. La concentración relativa de cada compuesto puede calcularse a partir de la presión, composición de la biomasa y del aire introducido en el proceso y de la constante de equilibrio determinada a partir de las propiedades termodinámicas y la temperatura.

Por estas razones, se suele presentar la composición del gas de síntesis en función de la cantidad de oxígeno añadido al proceso. Para expresar esta cantidad de oxígeno se usa el factor de equivalencia (ϕ), definido como la relación entre el oxígeno utilizado y el oxígeno necesario para una combustión completa:

$$\text{Factor de equivalencia } \phi = \frac{\text{Oxígeno utilizado}}{\text{Oxígeno necesario}} \quad (6)$$

Un factor de equivalencia comprendido entre $0 \leq \phi \leq 0,1$ corresponde a un proceso de pirólisis; si se encuentra entre $0,2 \leq \phi \leq 0,4$ corresponde a la gasificación; y si $\phi \geq 1$ indica una combustión completa. Además, el factor de equivalencia determina también la temperatura de reacción adiabática, que es la temperatura que se alcanzaría si se llegara al equilibrio para la cantidad de aire u oxígeno especificados.

- *Composición del gas*

En casos de aplicación reales, la composición del gas suele diferir de la que indicaría el equilibrio termodinámico. Los únicos gasificadores para los que la aproximación en el equilibrio se ajusta bastante bien a la realidad son los de lecho fijo de tiro invertido, cuyas características se comentarán más adelante.

La composición real del gas suele depender de factores como la distribución de temperaturas en el combustible, su tiempo de residencia promedio y la distribución de tiempos de residencia. Estos factores son a su vez dependientes del modo de inyección del agente oxidante, de las dimensiones del reactor y de las pérdidas de calor en el entorno. La composición del gas húmedo es la propiedad más importante, pero se suele utilizar la composición en base seca por

la dificultad que supone medir con exactitud la humedad. El poder calorífico se calcula a partir de la composición del gas (Couto Nuno et al., 2013).

2.2. El gasificador

Los dispositivos utilizados para llevar a cabo la conversión de materia sólida en gas (y en última instancia en energía) reciben el nombre de gasificadores. En su interior tienen lugar todas las reacciones termoquímicas que han sido descritas con anterioridad. Existe una gran variedad de diseños de gasificadores, cada uno adecuado para trabajar bajo unas condiciones determinadas, con distintos tipos de combustible y distintos grados de ambición en cuanto a la eficiencia que se desea lograr.

Existe una clasificación ampliamente aceptada de los distintos tipos de gasificadores. Ésta se rige según la distribución de las diferentes zonas donde tienen lugar las reacciones en el interior de los gasificadores (FAO Forestry Department, 1986).

Lo primero que se debe clarificar es que, al margen de los distintos tipos de gasificadores que a continuación se detallan, es posible englobarlos a todos en dos grandes categorías: los gasificadores de lecho fijo y los de lecho fluidizado. Esta diferenciación se establece según el comportamiento que presente la materia sólida en la parte inferior del reactor.

Siguiendo este criterio, se procede a comentar los distintos tipos que encontramos actualmente a nivel comercial.

2.2.1. Gasificadores de lecho fijo

A continuación se expondrán los distintos tipos de configuraciones existentes para gasificadores de lecho fijo.

- Gasificador de tiro directo (*updraft*):

En el interior de este gasificador, sólido y gas se desplazan en sentido contrario. La configuración más común corresponde al sólido moviéndose en sentido descendente y el gas en ascendente. Desde el momento de su entrada al gasificador, las partículas sólidas interactúan con la corriente gaseosa, que se encuentra a altas temperaturas. Progresivamente absorben el calor del gas, iniciándose así el proceso de secado. Llegado cierto punto, se produce la pirolisis que generará los gases que ascenderán hasta la salida del reactor. Juntamente con el gas, también se generarán en este punto alquitranes y vapores condensables que saldrán del gasificador sin ser quemados.

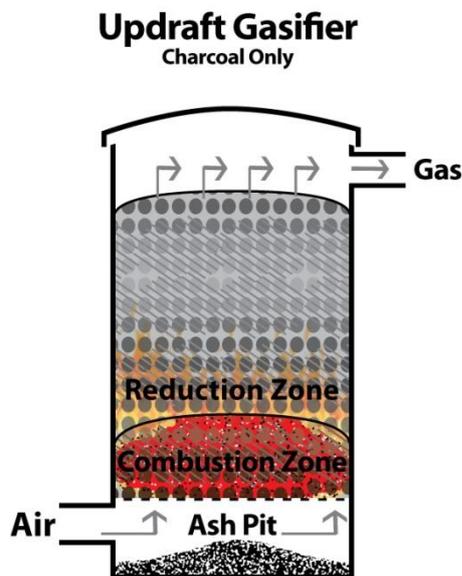


Figura 5: Configuración de tiro directo o updraft (All Power Labs)

Continuando con su trayectoria descendente, la mezcla (o *char*) en la que se han convertido las partículas, se topará con los gases de combustión y el oxígeno necesarios para mantener térmicamente el proceso de gasificación. Es también en este momento cuando se producirán las reacciones de reducción-oxidación entre el sólido y la mezcla gaseosa. El gas producido en esta zona se mezclará con el que se ha generado en la zona superior de pirolisis, formando el gas de síntesis final que se conducirá al exterior del gasificador. Cabe destacar que el perfil de temperaturas que encontramos en este tipo de gasificador es descendente, encontrándose la máxima temperatura en la base del reactor. Esto provoca directamente que a medida que la materia desciende por el gasificador, la porción de materia sólida que experimenta la conversión en gas aumenta, hasta el punto de alcanzar prácticamente el 100% en el extremo inferior. El recorrido descrito se aprecia en la Figura 5.

La construcción y operación de un gasificador de estas características es sencilla. Se logra una elevada eficiencia térmica. Aun así, la temperatura del gas de salida es baja, permitiendo realizar, en la mayoría de los casos, una combustión directa del gas de salida sin contar con estadios de refrigeración.

En los aspectos menos favorables, el gas que se obtiene de este proceso requiere de uno o varios estadios de limpieza, ya que contendrá alquitranes y condensables que dañarían seriamente el motor. Otro de los peligros que entraña es que se produzca una fusión de las cenizas producidas en la gasificación.

Por lo general se utiliza para aplicaciones de baja potencia (FAO Forestry Department, 1986).

- Gasificador de tiro invertido (downdraft):

Al contrario que el modelo visto anteriormente, en este tipo de gasificador, el sólido y el gas se desplazan en el mismo sentido (descendente). Desde su entrada al gasificador, las partículas experimentan sucesivamente los procesos de secado y pirolisis a causa de un progresivo aumento de la temperatura. El calor proviene de la parte inferior del reactor, donde se está produciendo una combustión parcial de los productos que allí se encuentran. Gases, *tar* y *char* descienden por igual hasta la zona de oxidación, donde el oxígeno inyectado del exterior proporciona la energía necesaria para mantener térmicamente el proceso. La sucesión de procesos indicada se puede ver en la Figura 6.

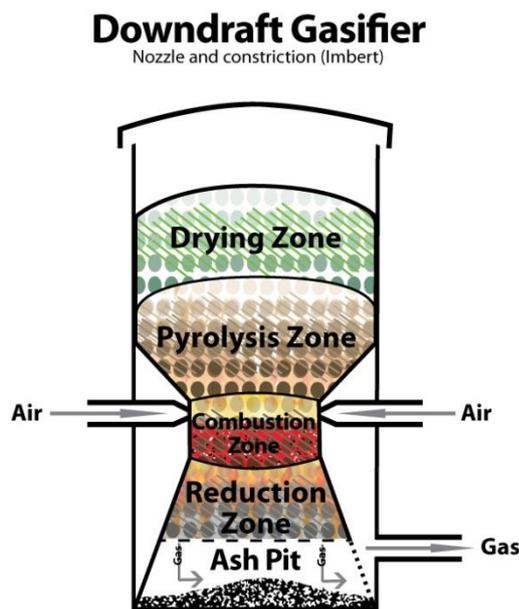


Figura 6: Configuración de tiro invertido o downdraft (All Power Labs)

Cuando el suministro de oxígeno se detiene, los productos continuarán reaccionando entre sí (a causa de la temperatura), lo que provocará una disminución de la temperatura del entorno (proceso endotérmico) y un incremento en la cantidad y la calidad del gas de síntesis final.

A causa del perfil de temperaturas experimentado por la mezcla, el contenido de tares y alquitranes se encuentran en muy baja proporción en el gas resultante (FAO Forestry Department, 1986).

Su condición de gasificador de lecho fijo aporta a los gasificadores Downdraft una sencillez que facilita su construcción y operación. El gas de síntesis resultante es limpio, y tiene un bajo contenido en tares. Aun así, la temperatura de salida del gas es elevada, y normalmente no se puede conducir directamente al motor sin realizar algún estadio de refrigeración. Esta tecnología tiene un escaso historial de aplicación en centrales de generación.

- Gasificador de flujos cruzados (*crossdraft*):

Los gasificadores de corrientes cruzadas son una adaptación para el uso de carbón con fines energéticos. La gasificación del carbón alcanza temperaturas muy elevadas (alrededor de los 1500°C y superiores) en la zona de oxidación, cosa que puede causar daños en los materiales. La estructura se puede apreciar en la Figura 7.

Las ventajas de este tipo de gasificador radican en su capacidad para operar a muy pequeña escala. Incluso instalaciones de generación con una potencia instalada inferior a los 10 kW pueden llegar a ser económicamente viables utilizando este tipo de gasificador.

Crossdraft Gasifier

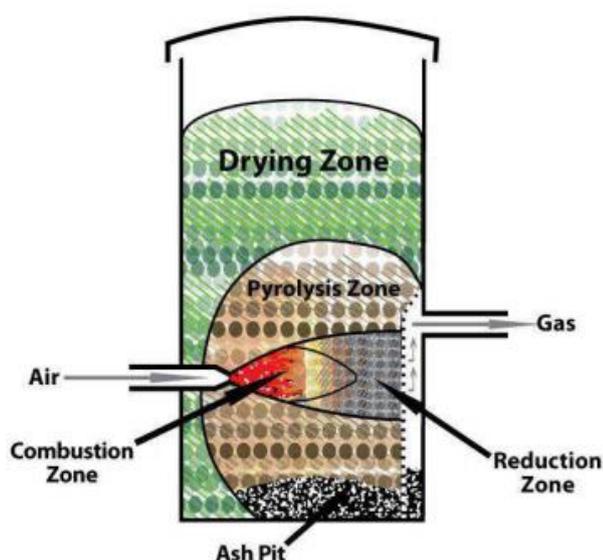


Figura 7: Configuración de flujos cruzados o *crossdraft* (All Power Labs)

Este sistema, al igual que los gasificadores *downdraft*, requiere de un simple sistema de limpieza de gases para condicionar el gas de síntesis. Aun así, es de vital importancia utilizar carbón de calidad para realizar la gasificación, ya que esta tecnología cuenta con un escaso potencial de eliminación de tares, por lo que conviene que la materia prima utilizada sea lo más pura posible para minimizar su contenido. Sin embargo, la calidad del carbón es un parámetro incierto y difícil de determinar. Es por ello que la mayoría de gasificadores que utilizan carbón como materia prima, suelen utilizar el principio de funcionamiento *downdraft*, que asegura una mayor eliminación de los tares (FAO Forestry Department, 1986).

2.2.2. Gasificador de lecho fluidizado

El diseño de los gasificadores de lecho fluidizado persigue eliminar las desventajas que presentan los gasificadores anteriormente descritos. Estas desventajas, comunes en los gasificadores de lecho fijo, son principalmente la aparición de escorias y las pérdidas de presión significativas a lo largo del gasificador.

En los gasificadores de lecho fluidizado el aire es inyectado y conducido a través de un lecho de partículas sólidas con una velocidad suficiente para mantenerlas en estado de suspensión. El lecho recibe del exterior el calor necesario para iniciar el proceso. La materia sólida es introducida cuando se ha logrado la temperatura necesaria, y se hace a la altura del lecho, donde se mezcla con las partículas en suspensión y rápidamente adopta su temperatura. Como resultado de esto, la materia sólida experimenta la pirolisis muy rápidamente, derivando en la producción de una mezcla con una cantidad relativamente grande de gases. En definitiva, las partículas se ven sometidas desde su entrada, y de forma simultánea, a todos los procesos que se llevan a cabo en el gasificador (secado, pirolisis y reacciones de oxidación y reducción). Algunos diseños incluso incorporan un ciclón en el interior (FAO Forestry Department, 1986).

Las principales ventajas de los gasificadores de lecho fluidizado son su capacidad para operar con una gran variedad de materias primas y a su vez controlar correctamente las variaciones de temperatura. Además, puede aprovechar combustibles que mediante otras tecnologías requerirían de tareas de pre-condicionamiento con tal de convertirlas en materia procesable.

Por otra parte, su utilización también presenta desventajas, tales como el alto contenido en *tar* del gas de síntesis resultante, o la mala respuesta ante variaciones de carga.

Sus características lo convierten en una opción económicamente viable para aplicaciones de altas potencias, por encima de los 500 kW.

2.2.3. Comparativa entre configuraciones de gasificador

Una vez detalladas las características de los distintos tipos de gasificadores, se exponen en la Tabla 1.

Tabla 1: Comparativa entre gasificadores de lecho fijo y lecho fluidizado. (Fuente propia)

Tipo de gasificador	Lecho fijo	Lecho fluidizado
Materia prima utilizada	Biomasa homogénea Dimensiones <100mm Tolera alto contenido de cenizas	Biomasa heterogénea Dimensiones <50mm
Inversión inicial	Alto coste por kW instalado Ideado para potencias <500kW	Coste por kW más nivelado Ideado para potencias >500kW
Tiempo de encendida	Entre 15 y 30 minutos	Encendido rápido
Emisiones	No controlables	Controlables
Formación de escorias	Presencia en estado líquido	Las cenizas no llegan a fundirse
Gas resultante	Gas de síntesis limpio	Gas de síntesis sucio

Y entre los distintos gasificadores de lecho fijo, se pueden establecer ciertas ventajas y desventajas según los factores anteriormente comentados. Ver Tabla 2.

Tabla 2: Comparativa entre las configuraciones de lecho fijo. (Fuente propia)

Diseño	Ventajas	Desventajas
Tiro invertido	Bajas pérdidas de presión Alta eficiencia térmica Baja formación de escorias Baja temperatura de salida	Sensible a cenizas y humedad excesiva Mala tolerancia a variaciones de carga Etapa de limpieza de gas necesaria
Tiro directo	Contenido irrelevante de cenizas Baja formación de contaminantes	No tolera biomasa de dimensiones reducidas
Flujos cruzados	Flexible frente a variaciones de carga. Capaz de alcanzar temperaturas de 1500°C	Elevada formación de escorias Elevadas pérdidas de presión Exigente con materiales por altas temperaturas

2.3. Análisis de un modelo comercial

Fruto de la colaboración con la ONG MyDpG, en el año 2013 surgió la oportunidad de trabajar, estudiar y operar un modelo comercial de gasificador. El dispositivo se obtuvo a fin de instalar una primera célula de generación en la región chadiana de Goundi, así como para ofrecer una oportunidad de aprendizaje a aquellos que deberían afrontar el diseño del futuro gasificador manual, objeto de este mismo trabajo.

El gasificador que se tuvo la oportunidad de estudiar recibe el nombre de *Gasifier Experimenter's Kit*, abreviado GEK, y es un producto registrado por la empresa norteamericana *All Power Labs* (abreviada como APL). Se puede observar el aspecto del conjunto en la Figura 8.

2.3.1. Contexto

All Power Labs (o APL) es una empresa americana con sede en Berkeley, Estados Unidos. Se autodenomina como la líder mundial en gasificación de baja potencia. Su inserción en el mercado tuvo lugar en 2008, con una iniciativa *opensource* que recibió el nombre de *Gasifier Experimenter's Kit* o GEK. Su trabajo en el campo de la gasificación y los progresos técnicos, que lograron en la gestión de las pérdidas de calor, les condujo a la creación de su principal producto: el *Power Pallet*. Se trata de un pack que incluye un gasificador, un grupo motor generador y un sistema de monitorización y control que simplifica en gran medida las tareas del operario. El resultado es un conjunto relativamente compacto que cumple eficientemente las funciones de célula aislada de generación.

A lo largo de los últimos años han sido presentados varios modelos de la serie *Power Pallet*, siendo el último de ellos el *Power Pallet v5.0*, para la realización de este proyecto se tuvo la oportunidad de estudiar de primera mano el *Power Pallet v3.0*.

2.3.2. Producto

El *Power Pallet v3.0* es un gasificador de tiro invertido. El sistema de gasificación, por lo tanto, sigue las directrices habituales explicadas con anterioridad en este tipo de dispositivos. El sistema incorpora dos intercambios de calor que aumentan drásticamente su eficiencia térmica. También incorpora dos puntos de recogida de condensados para prevenir cualquier acceso de contenido de agua en el motor (All Power Labs, 2013).

Este modelo incorpora también un sistema automatizado de recogida de cenizas, simplificando al máximo el mantenimiento periódico del gasificador.

La monitorización de los procesos se realiza mediante una placa de control que incorpora una pantalla LCD, en la que el usuario puede comprobar en todo momento los valores de temperatura y presión registrados en los distintos

puntos de medición. Asimismo también permite la activación instantánea de funciones programadas para suceder de forma periódica, tales como la recogida de cenizas o la activación del tornillo sin fin. A continuación se detallarán las principales características del sistema en la Tabla 3.

Tabla 3: Características del Power Pallet v3.0. (All Power Labs)

Características del Power Pallet v3.0	Potencia instalada de 20 kW
Máxima extracción de potencia continuada	15 kW
Consumo de biomasa	22 kg/h a 15kW
Tolerancia a humedad	Hasta 30%
Dimensiones	1,4m x 1,4m x 2,2m
Peso	1065 kg
Capacidad del depósito de biomasa	330 litros



Figura 8: Power Pallet de 20kW. (All Power Labs)

Capítulo 3: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN GASIFICADOR

El diseño de un dispositivo de estas características debe su dimensionamiento a la potencia eléctrica que se desea alcanzar en cuanto a generación. Dicha potencia va estrictamente relacionada con el caudal volumétrico de gas de síntesis que se suministrará al motor, que a su vez depende de las dimensiones de los conductos y espacios en los que se desarrollan las diferentes etapas de la gasificación.

Es por este motivo que al abordar el dimensionamiento se debe adoptar una visión de conjunto, ya que cada componente del sistema definirá las características del elemento sucesivo. Características tales como el diámetro de los conductos de comunicación, la temperatura que deberá resistir cada componente, la naturaleza de las juntas y ensamblajes o los orificios y perforaciones que deberán realizarse a fin de acomodar el material de monitorización.

La elaboración de las piezas diseñadas en este trabajo irá a cargo de la empresa Tallers d'Aspiració S.L., especialistas en corte y modelado de distintos tipos de acero, que se servirán de los planos realizados por el equipo del CITCEA-UPC y adjuntados en el Anexo A adjunto a este trabajo para producir todos los componentes que formarán el gasificador.

Llegados a este punto, a continuación se expondrá el esquema de los distintos componentes que formarán el gasificador en la Figura 9.

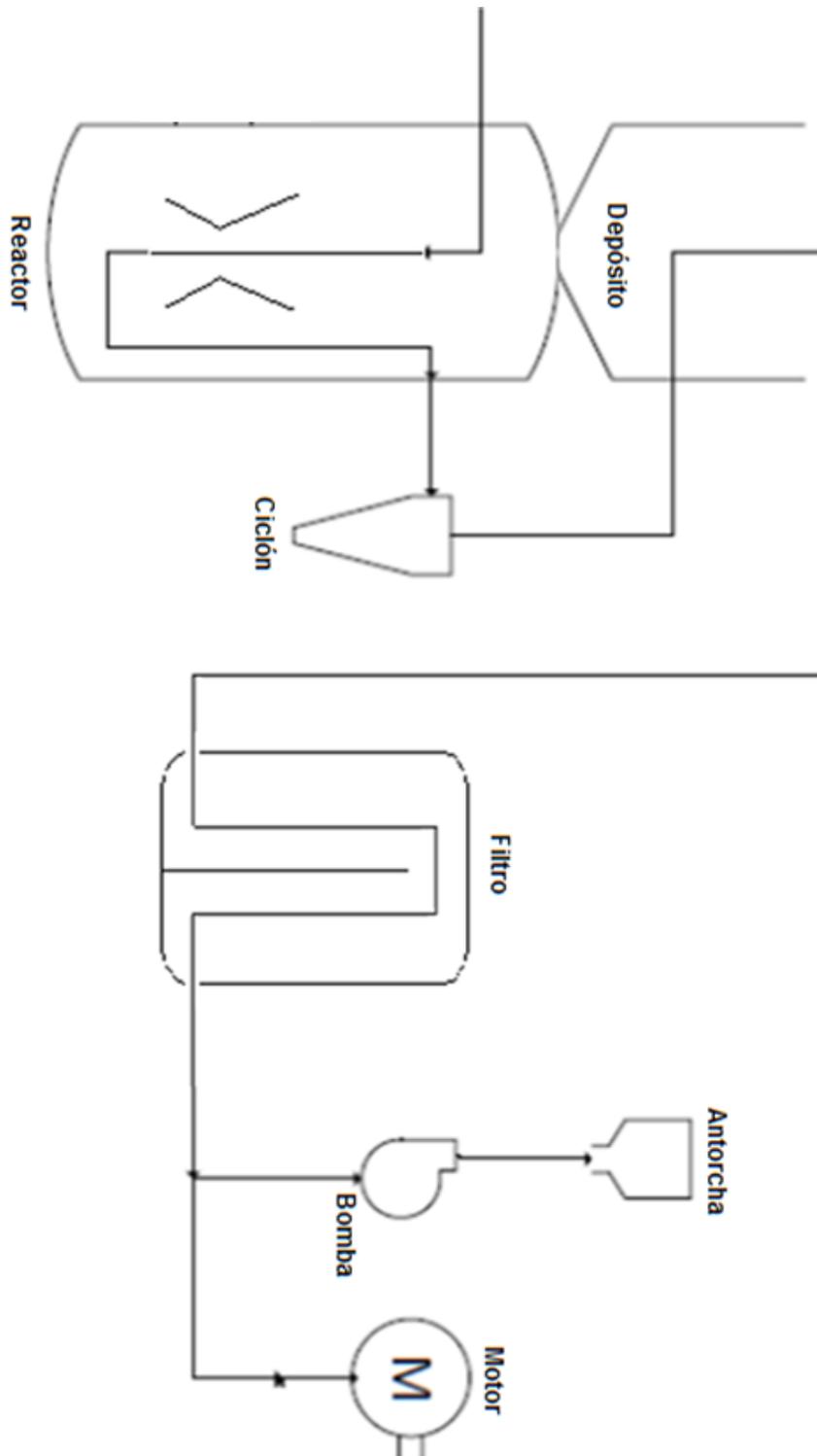


Figura 9: Esquema proceso de gasificación. (Fuente propia)

3.1. Configuración escogida

Para el desarrollo del proyecto se ha escogido construir un gasificador de tiro invertido o *downdraft*. De todas las configuraciones, es la que más se ajusta a las necesidades planteadas, y su efectividad en aplicaciones de baja potencia y la simplicidad de su mantenimiento la convierte en la opción óptima. (Ana Lisbeth Galindo et al., 2013)

A continuación se detallarán los procesos químicos y transformaciones que tendrán lugar en el interior de cada componente que integra el gasificador, explicando los criterios seguidos en su dimensionamiento y explicando los pasos a seguir durante las labores de construcción. Este capítulo se estructurará estableciendo el orden acorde a la trayectoria que realiza el gas en el interior del gasificador, de principio a fin.

Las reacciones químicas en el interior del gasificador se iniciarán a causa de la entrada de aire en el interior del reactor a través de los inyectores. Esto sucederá a causa de la succión creada en un primer lugar por una bomba, y posteriormente por el motor. Con la entrada del aire, se iniciará el proceso de gasificación, y las partículas sólidas de biomasa experimentarán los procesos detallados en el Capítulo 2. La generación de gas de síntesis se iniciará, y el caudal producido recirculará ascendentemente por la cubierta exterior del reactor, cediendo parte del calor que contiene a la parte superior del reactor, donde la temperatura es inferior.

Seguidamente, el gas llegará al primer estadio de limpieza de gases, el ciclón. Allí la mayor parte de las partículas en suspensión serán arrastradas, dejando el gas parcialmente libre de impurezas.

Superado el ciclón, se conducirá el caudal de nuevo hacia el depósito de biomasa, por donde circulará por el interior de un tubo flexible enroscado en la pared interior del depósito. En este punto el gas continuará cediendo calor, esta vez a la biomasa del interior del depósito, previo paso a entrar en el reactor. En este punto se encuentra pues, el segundo intercambio de calor.

Al abandonar el depósito, el gas será conducido hasta el filtro, en donde será forzado a circular a través de un agente filtrador que se encargará de atrapar las partículas en suspensión restantes.

Finalmente, al salir del filtro, el gas debería ser conducido hasta el motor para su aprovechamiento energético. Sin embargo, antes de ser introducido en el motor, se requerirá garantías de que la calidad del gas es la correcta. No se considerará apto para entrar en el motor hasta que el reactor no alcance su temperatura de operación, cose que no ocurrirá inmediatamente tras su arranque. Es por esa misma razón que, mientras no se alcancen las temperaturas necesarias, el gas será derivado mediante una bomba hasta una antorcha, donde será quemado ininterrumpidamente hasta que su calidad cumpla con los requerimientos del motor.

3.2. Diseño del reactor

El dimensionamiento del reactor no se incluye entre los objetivos de este proyecto, y ha sido realizado por David Martín, miembro del equipo del CITCEA-UPC, como parte de su proyecto de fin de máster, de modo que no se adjuntarán planos que justifiquen su diseño. Sin embargo, sí se incluye una explicación general del sistema empleado y los criterios de diseño seguidos, ya que suponen una parte vital en el proceso de gasificación.

3.2.1. Garganta

La garganta o estrechamiento es el punto crítico en el proceso de gasificación. En ella tienen lugar las reacciones de oxidación y reducción que darán lugar a la generación del gas de síntesis (Venselaar, 1982). En esa zona se alcanzan temperaturas de hasta 1300°C, lo que obliga a la utilización de aceros muy resistentes. Por recomendación expresa del taller, se empleó el acero AISI 310, un tipo de acero inoxidable que llega a soportar temperaturas de hasta 1400°C. El grosor de la chapa se estableció en 1,5 mm., aprovechando la experiencia de APL en la construcción del Power Pallet, que validaron la eficacia de dicho grosor. El modelado de la garganta se puede ver en la Figura 10.

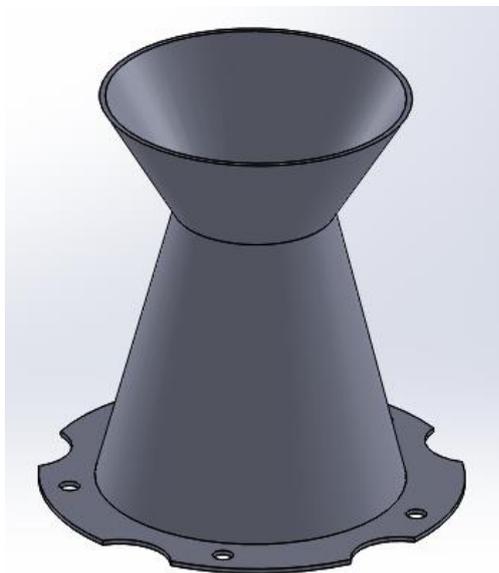


Figura 10: Garganta del gasificador. (Fuente propia)

3.2.2. Reactor interior

El reactor interior realiza una función de contención. Alberga en su interior toda la biomasa que ha descendido del depósito, y que irá siendo canalizada a través de la garganta. Si bien la temperatura a soportar por esta pieza no es tan elevada como la que se encuentra en la garganta, si estará en contacto con zonas de temperaturas próximas a los 1200°C. Es por ello que también se deberá utilizar el AISI 310. Morfológicamente, el reactor interior se compone de un cilindro con base en forma de plato, donde una serie de perforaciones para tornillo permitirán el acoplamiento con la garganta. Se puede observar en la Figura 11.

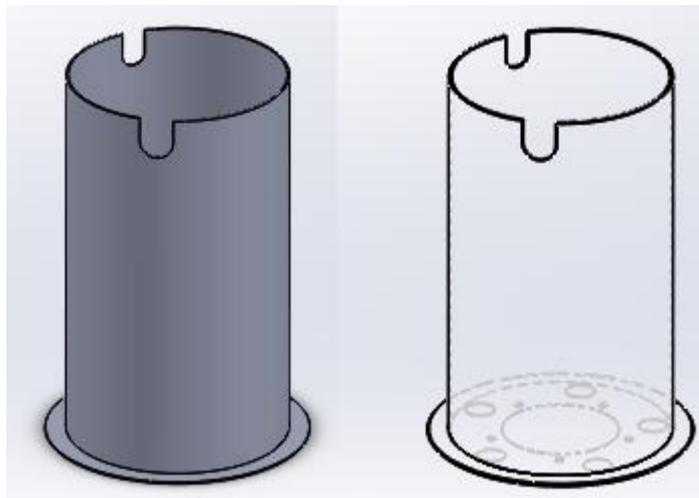


Figura 11: Reactor interior. (Fuente propia)

Tras la adición de la garganta, atornillada por la base, el ensamblaje empezará a tomar forma, según lo mostrado en Figura 12.

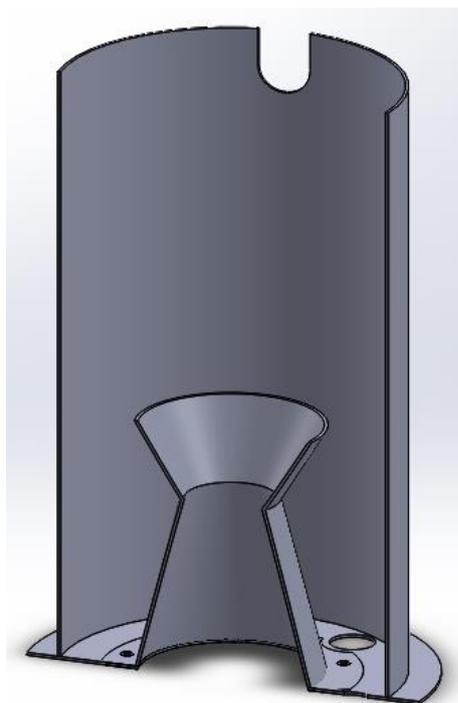


Figura 12: Ensamblaje del reactor interior y la garganta.
(Fuente propia)

3.2.3. Reactor exterior

El reactor exterior cumple las funciones de recubrimiento para el reactor interior. Su complejidad es significativamente mayor que la de los componentes hasta ahora comentados, pues incorpora muchos elementos clave para la formación del ensamblaje general del gasificador. Cuenta con un disco en la parte superior, cuya función es crear una superficie que sirva para ensamblar el reactor con el depósito de biomasa, y otro a media altura que cuenta con cinco perforaciones donde irán soldados los acoplamientos para instalar el serpentín que canalizará el aire del exterior. Adicionalmente este segundo disco también cuenta con diez agujeros para tornillo que permitirán el acoplamiento del reactor exterior a la cubierta exterior.

Además, el reactor exterior cuenta con una pieza adicional, de forma cónica, cuya función es crear un espacio estanco entre los dos discos.

El material del reactor exterior no estará expuesto a temperaturas tan elevadas como las capas interiores, de modo que se debe bajar la exigencia en cuanto a resistencia a la temperatura. Por recomendación del taller, el acero utilizado será del tipo AISI 304, un tipo de acero muy utilizado en aplicaciones industriales debido a su excelente resistencia a la corrosión, su facilidad a la hora de realizar soldaduras y su capacidad de aguantar temperaturas de hasta 900°C (American Iron and Steel Institute, 1977). Ver Figura 13.

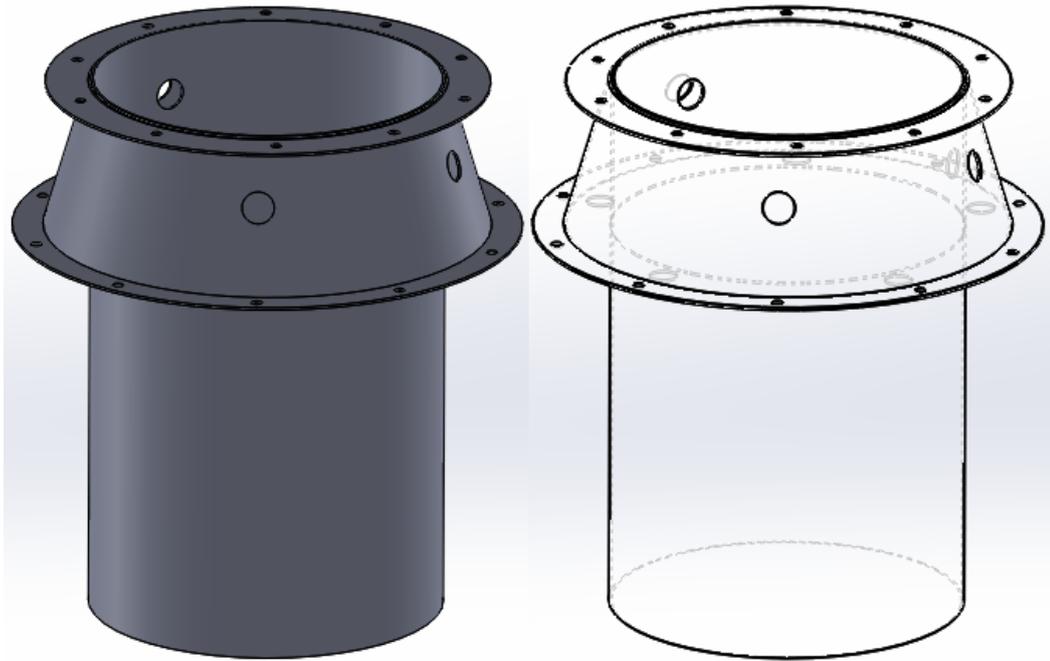


Figura 13: Reactor exterior. (Fuente propia)

La posición relativa del reactor exterior respecto al reactor interior se puede apreciar en la Figura 14.

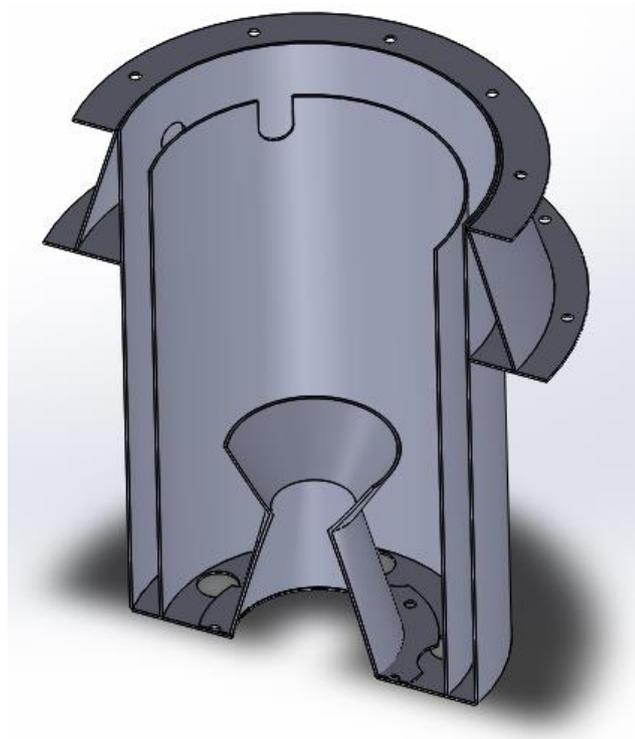


Figura 14: Ensamblaje del reactor exterior, interior y garganta. (Fuente propia)

3.2.4. Cubierta exterior

La cubierta externa es la parte más externa del gasificador, en contacto con el exterior. Está compuesta por un tubo cilíndrico de mayor diámetro que el del reactor exterior, ya que su función es rodearlo y crear un espacio hermético entre ambos por donde el gas recirculará en sentido ascendente desde la base del gasificador. La cubierta también cuenta con un conducto de salida por donde el gas será conducido hasta el ciclón después de la recirculación. Cerca de la base, una apertura rectangular permitirá acceder a la parrilla para realizar tareas de mantenimiento y retirada de las cenizas producidas por la combustión continuada de la madera. El cilindro está soldado a un plato en su extremo inferior, y a un disco en la superior que cuenta con los agujeros para tornillo pertinentes para el acoplamiento con el reactor interior. Nuevamente es posible la utilización del acero AISI 304, debido a la baja exigencia térmica. El modelado de la cubierta se puede ver en la Figura 15.

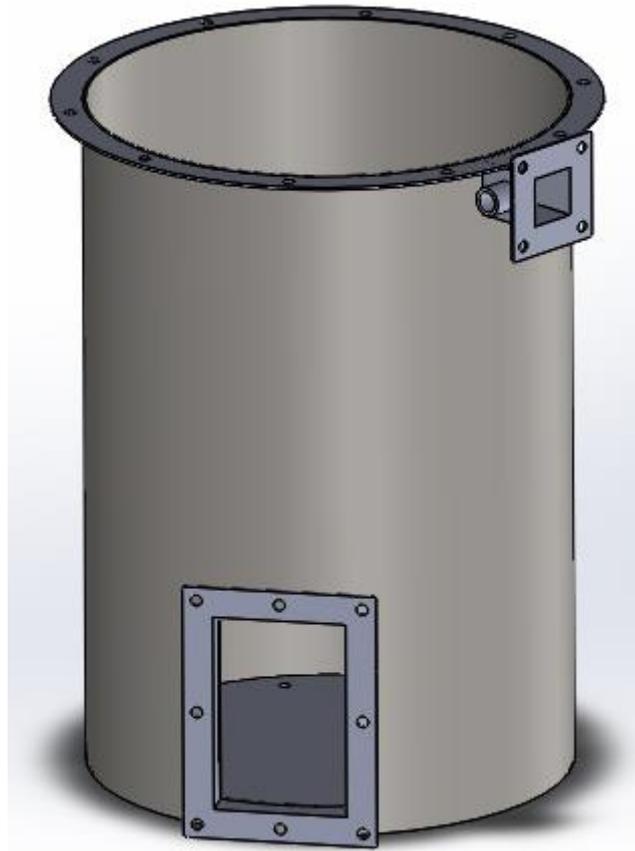


Figura 15: *Cubierta exterior. (Fuente propia)*

Tras el acoplamiento con el reactor interior y el reactor exterior, el aspecto del ensamblaje tomará la forma mostrada en la Figura 16.

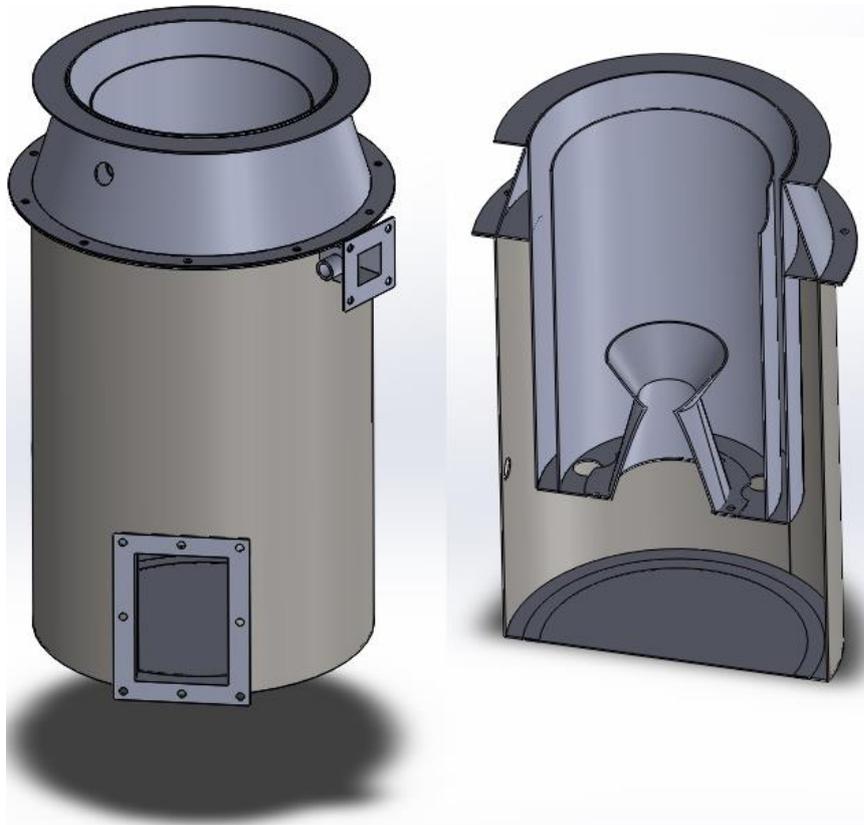


Figura 16: Ensamblaje de la cubierta exterior, reactores interior y exterior y garganta. (Fuente propia)

3.2.5. Parrilla

La parrilla es una de los elementos del interior del reactor que entraña más dificultades. Aunque en sí, se trata de una pieza sencilla, un mal diseño puede causar frecuentes obstrucciones que resultarían fatales para la producción de gas. Está compuesta por un disco perforado con una matriz circular por donde se pretende filtrar las cenizas hasta la base del reactor. Debido a que estará en contacto con restos sólidos a alta temperatura, nuevamente se requerirá de la utilización del acero AISI 310.

La mayor dificultad se encuentra en la necesidad de implementar algún sistema de sacudimiento que permita eliminar de forma periódica las pequeñas obstrucciones que inevitablemente se formarán a causa de la sedimentación de las cenizas que vayan cayendo.

Tras considerar varias opciones, el sistema por el que se ha optado consiste en unir la parrilla a una vara de metal cilíndrica que atraviese el compartimento de recogida de cenizas. Al extremo de esta vara se soldará un mango que permita al

usuario articular cierto movimiento radial mediante el cual la parrilla será capaz de inclinarse ligeramente hacia ambos lados. Con este movimiento se logrará el desplazamiento suficiente como para lograr que las cenizas acumuladas con riesgo de causar una obstrucción problemática sean filtradas por la parrilla y de depositen, inocuas, en la base del gasificador. El orificio para efectuar el sacudimiento se puede ver en la Figura 17.

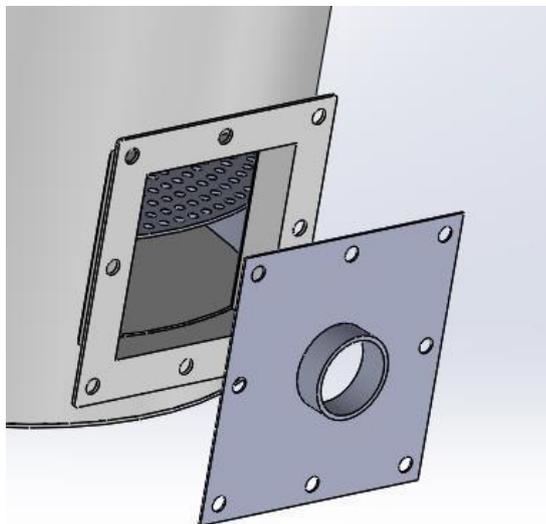


Figura 17: Orificio del sistema de sacudimiento de la parrilla. (Fuente propia)

3.2.6. Sistema de alimentación de biomasa

El sistema de alimentación del gasificador es una parte clave que debe estar correctamente diseñada para evitar cualquier interrupción en la entrada de combustible al reactor.

Existen dos sistemas de alimentación cuyo uso está extendido. Ambos ofrecen ventajas y desventajas, y se ha tenido que escoger con cuidado en función de cuál de los dos se adapta más a las necesidades del presente proyecto.

- Alimentación mediante tornillo sin fin

La alimentación mediante tornillo sin fin requiere una estructura específica en cuanto a posición del depósito y del reactor. Ambas partes ya no están situadas sobre un mismo eje vertical, sino que deben experimentar un desplazamiento horizontal. Esa nueva distancia se cubrirá mediante un conducto horizontal de acero que albergará en su interior un tornillo helicoidal. Comúnmente, este montaje incorpora un motor encargado de girar el tornillo periódicamente o según petición expresa del usuario en función de qué nivel de electrónica se haya incorporado. Lógicamente, la frecuencia de giro del tornillo sin fin debe estar acordemente proporcionada al consumo de combustible del gasificador. De esta manera se logra una alimentación ininterrumpida del reactor, y un diseño

correcto del conducto y el tornillo convierten en prácticamente imposible la aparición de una obstrucción en esa zona del gasificador. Dado que en el depósito tiene lugar el segundo intercambio de calor del proceso, el tornillo sin fin realizaría la función de transporte de la biomasa entre las zonas de secado y pirolisis (BESEL, S.A., 2007). Un ejemplo de alimentación mediante tornillo sin fin se puede ver en la Figura 18.



Figura 18: Gasificador con tornillo sin fin incorporado (All Power Labs)

Este método, sin embargo, requiere de un grado de participación electrónica considerable, y uno de los objetivos principales del proyecto es reducirla a su mínima expresión. Se trató de esbozar un diseño mediante el cual el tornillo sin fin pudiera ser accionado mediante una manivela por el usuario, pero todos los fabricantes con quien se contactó advirtieron que un montaje de estas características era irrealizable. La primera razón es la incapacidad de una persona de accionar por su cuenta una manivela que haga girar un tornillo helicoidal de acero de esa longitud, y aun en caso de poder hacerlo cuando la circulación de la biomasa fuera fluida, en caso de formación de un pequeño tapón no se podría aplicar la fuerza necesaria para disolverlo. La segunda de las razones, y que descartó la inclusión de esta opción en el proyecto, fue la inexistencia de tornillos sin fin comercializados de la longitud requerida (no superior a un metro de longitud).

- Alimentación mediante gravedad

La alimentación mediante gravedad apuesta por una estructura vertical, en la que el reactor y el depósito de biomasa permanecen alineados entorno al mismo eje. No existe, por consiguiente, ningún mecanismo que regule el paso del combustible hasta el interior del reactor más que los factores puramente geométricos. Es ahí donde intervienen las labores de diseño, ya que se debe evitar a toda costa que el peso de la totalidad de la columna de biomasa recaiga sobre la zona en que se están produciendo las reacciones químicas.

Para ello, se trabajó en añadir algún tipo de barrera que impidiese que el combustible cayera directamente sobre la zona central del gasificador. Se

esbozaron unos cuantos modelos y se discutieron los detalles hasta dar con la opción óptima. Finalmente se resolvió añadir un simple travesaño que cruzase el diámetro de la sección que comunica el interior del reactor con el depósito que carga encima. A ese travesaño, se le soldaría en el centro una pletina metálica circular que protegería el área central del impacto directo del combustible en descenso. Se puede ver el diseño en la Figura 19.

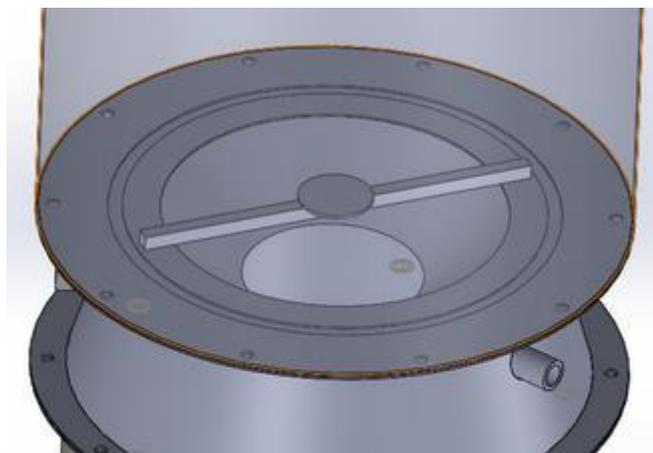


Figura 19: Sistema de canalización de la biomasa. (Fuente propia)

El depósito es también el lugar en el que se realizará el segundo intercambio de calor. Este se llevará a cabo haciendo circular el gas proveniente del ciclón a través de un tubo metálico que se enroscará alrededor de la pared interior del depósito. Mediante este sistema se consigue que las tareas de pre-secado de la biomasa se inicien justo inmediatamente después de su entrada en el sistema. Una vez realizado el intercambio, el conducto saldrá nuevamente del depósito para conducir el gas hasta la siguiente etapa de limpieza de gases, el filtro de partículas.

A pesar de contar con la presencia del intercambiador de calor, la exigencia térmica en la zona del depósito será baja, así que se recomienda la utilización de acero AISI 304.

3.2.7. Ensamblaje del reactor con el depósito

Después de modelar todos los componentes del reactor y el depósito, se puede apreciar el aspecto del ensamblaje en la Figura 20.

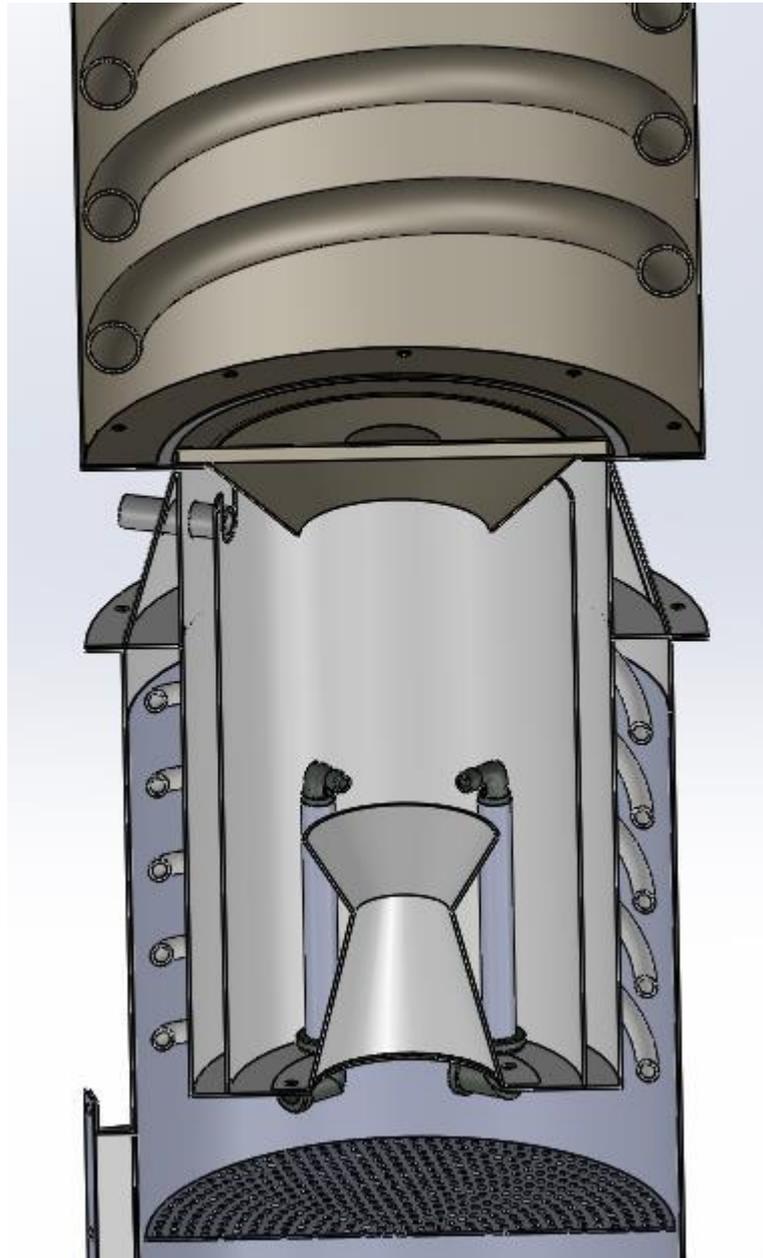


Figura 20: *Ensamblaje del reactor y el depósito. (David Martín, 2014)*

3.3. Diseño del ciclón

Los ciclones pertenecen al conjunto de dispositivos que desempeñan su función mediante el sistema de separación inercial. Este sistema utiliza una aceleración en la masa de gas para separar los sólidos pesados contenidos en gases ligeros. Los ciclones utilizan la geometría del dispositivo para aprovechar la fuerza centrípeta y acelerar el largo proceso que necesitarían las partículas para separarse del gas si únicamente actuase la fuerza gravitatoria. Una primera parte cilíndrica seguida de un cuerpo cónico fuerza el gas a realizar una trayectoria descendente en espiral hasta alcanzar el extremo inferior del ciclón. Llegado este punto, el gas adopta una nueva trayectoria en espiral, de menor diámetro y esta vez, ascendente, que le conducirá directamente a la salida del dispositivo. Es también en este punto donde las partículas que han sido separadas del gas caen a través de la apertura inferior del ciclón, acumulándose en un recipiente convenientemente instalado (Woolcock, y otros, 2012). La trayectoria recién descrita se puede ver en la Figura 21.

Comúnmente, los ciclones adaptan su diseño según las características del gas, y por ende, de las partículas, que deberán limpiar. Factores como las dimensiones de las partículas o el caudal volumétrico de gas que circulará por su interior deben estar perfectamente definidos para afrontar la construcción de un ciclón eficiente.

En la utilización de ciclones, las fuerzas centrípetas pueden llegar a ser cinco veces mayores a la fuerza gravitatoria en dispositivos grandes, y hasta 2500 veces mayores en dispositivos de tamaño reducido. (Wang, 2004)

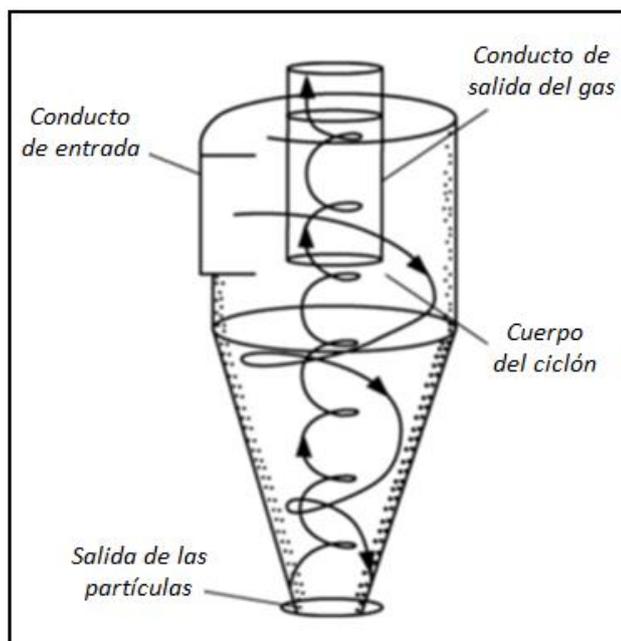


Figura 21: Circulación del gas en el interior de un ciclón. (Fuente propia)

Existe un concepto llamado "tamaño de corte", asociado al uso de todo ciclón, que determina el tamaño concreto de partícula para un ciclón determinado que marca el punto de equilibrio entre la fuerza centrípeta y las fuerzas de arrastre generadas por el movimiento. Para toda partícula de iguales dimensiones a las correspondientes al tamaño de corte, se asumirá que tienen una probabilidad del 50% de ser separadas exitosamente del gas. Cualquier partícula de tamaño superior, será separada del gas con mayor facilidad.

Otra de las propiedades que convierten al ciclón en un dispositivo fiable para la limpieza de gases es su capacidad de trabajar a elevadas temperaturas, pudiendo éstas llegar hasta sobrepasar los 1000°C. De esta manera se evita que se produzcan fenómenos no deseados en su interior, tales como la condensación de agua, la acumulación de tares u otros contaminantes que podrían llegar a corroer las paredes interiores del ciclón.

Su naturaleza robusta y su contrastada eficacia en la eliminación de partículas de hasta 55 μm , convierten al ciclón en el recurso típicamente utilizado como primer estadio de un sistema de limpieza de gases.

El primer paso para dimensionar un ciclón se basa en el cálculo de las características del gas que circulará a través de él. Asumiendo que la composición del gas de síntesis producido en unas condiciones de trabajo aceptables es constante, se procede a detallar las características del gas en la Tabla 4 (Couto Nuno et al., 2013).

Tabla 4: *Composición del gas y porcentaje de oxígeno necesario para combustión*

Agentes	kmol/100kg	% volumen	% volumen O₂ para combustionar
CO	0,975	22	11
CO ₂	1,676	8	0
CH ₄	0,396	1	2
H ₂	1,554	17	8,5
N ₂	4,171	45	0
H ₂ S	0	0	0
H ₂ O	1,23	7	0
Total	10,002	100	21,5

Si tenemos en cuenta que para el aire presente en nuestra atmosfera, se acepta una presencia del 21% en contenido de oxígeno puro, se procede a calcular cual será el volumen de aire necesario para satisfacer las necesidades termodinámicas de la gasificación mediante la Ecuación 7.

$$\text{Aire necesario} = \frac{\text{Oxígeno necesario}}{\text{Oxígeno presente en el aire}} \quad (7)$$

$$\text{Aire necesario} = \frac{21,5}{21} = 102,3809524\%$$

A continuación se deberá calcular cual es la entrada máxima de gas de síntesis que permitirá el motor escogido. Si bien la elección del grupo motor generador y los criterios utilizados para ello, se presentan en un capítulo posterior de este mismo trabajo, extraemos algunas de las características para poder detallar este dimensionamiento según el orden de cálculos utilizados.

La expresión que relaciona las características del motor con la aceptación del caudal de una mezcla gaseosa adopta la forma mostrada en la Ecuación 8.

$$\text{Aceptación máxima (mezcla)} = \frac{0,5 \cdot \text{Régimen del motor} \cdot \text{Cilindrada}}{60 \cdot 1000} \quad (8)$$

Para el caso de estudio y como se verá más adelante, el motor tiene una cilindrada de 0,62 litros, y un régimen de trabajo de 3000 revoluciones por minuto. Aplicando estos valores, la expresión queda resuelta de la siguiente manera.

$$\text{Aceptación máxima (mezcla)} = \frac{0,5 \cdot 3000 \cdot 0,62}{60 \cdot 1000} = 0,0156 \text{ m}^3/\text{s}$$

Procedemos pues, a calcular el volumen de gas de síntesis contenido en la mezcla, aplicando el criterio de aceptación máxima recientemente calculado.

$$\text{Aceptación máxima (syngas)} = \% \text{ syngas en la mezcla} \cdot \text{Aceptación máx. (mezcla)} \quad (9)$$

Y se resuelve la ecuación aplicando el criterio de composición de la mezcla, según el cual el contenido aproximado de gas de síntesis en un entorno con presencia de aire es del 50%.

$$\text{Aceptación máxima (syngas)} = \frac{1,023809524}{2} \cdot 0,0156 \text{ m}^3/\text{s} = 0,00798571 \text{ m}^3/\text{s}$$

A este resultado se le debe aplicar el coeficiente correspondiente al rendimiento volumétrico. Este factor oscila siempre entre 0,7 y 0,85, y representa la relación entre la masa real de aire aspirada en cada ciclo y la que se podría llegar a aspirar en condiciones de presión y temperatura exteriores. Para este cálculo, se utilizará un valor de rendimiento de referencia del 80%.

$$\text{Entrada real (syngas)} = \text{Aceptación máxima (syngas)} \cdot \text{Rendimiento volumétrico} \quad (10)$$

Con lo que la ecuación resulta de la siguiente manera:

$$\text{Entrada real (syngas)} = 0,00798571 \cdot 0,8 = 0,0638857 \text{ m}^3/\text{s}$$

Se obtiene, por consiguiente, un caudal de gas de síntesis de $0,0638857 \text{ m}^3/\text{s}$, que expresado en litros correspondería a una cifra aproximada de 6,39 l/s.

A continuación se procede a trasladar este resultado nuevamente a los criterios de dimensionado del ciclón. Todo ciclón debe ser correctamente dimensionado para que la velocidad del gas durante su circulación por su interior se mantenga dentro del rango aceptable. ¿Cuál es ese rango? Aquél que asegure una correcta separación de las partículas del gas que las contiene.

Comúnmente, se acepta que el rango de velocidades que asegurará una correcta eliminación de las partículas está comprendido entre los 15m/s y los 30m/s, experimentando severas pérdidas de rendimiento al alcanzar valores considerablemente inferiores o superiores. Se puede observar la curva de rendimiento en la Figura 22.

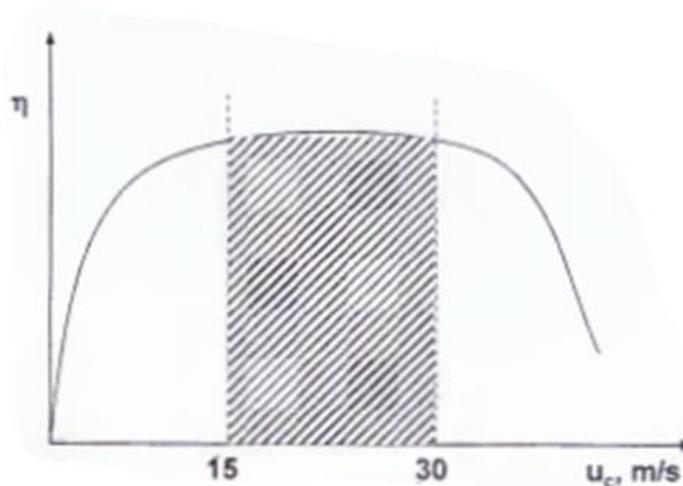


Figura 22: Rendimiento de un ciclón según velocidad del gas. (Mujumdar, 2006)

Existen diversas configuraciones establecidas que deben seguirse a la hora de dimensionar un ciclón (Amrein, 2000). Es importante que las medidas distintas partes guarden una correcta proporción entre ellas, a fin de asegurar la correcta circulación del gas. Para el caudal volumétrico obtenido del cálculo realizado en la anterior sección, se deberá escoger una configuración de ciclón de entre las catalogadas como configuraciones de alta eficiencia. Éstas se caracterizan por maximizar la velocidad del gas en casos en los que se dispone de caudales considerablemente bajos. Existen dos configuraciones de alta eficiencia, la configuración *Swift* y la configuración *Stairmand*. (Mujumdar, 2006)

Aunque parecidas, ambas configuraciones difieren en cuanto a la relación que guardan los distintos parámetros geométricos entre sí, por lo cual se expondrán a continuación. Todos los parámetros se expresan en función de la relación que guardan con el diámetro cilíndrico del ciclón (D), o diámetro máximo. Se puede ver en la Tabla 5.

Tabla 5: Parámetros geométricos según configuración. (Mujumdar, 2006)

Parámetros geométricos	Swift	Stairmand
D/D	1	1
a/D	0,44	0,5
b/D	0,21	0,2
De/D	0,4	0,5
S/D	0,5	0,5
h/D	1,4	1,5
H/D	3,9	4
B/D	0,4	0,375
Nh	9,24	6,4
N	3,2	3

Para una mejor visualización, la posición de cada parámetro geométrico puede ser consultada en la Figura 23.

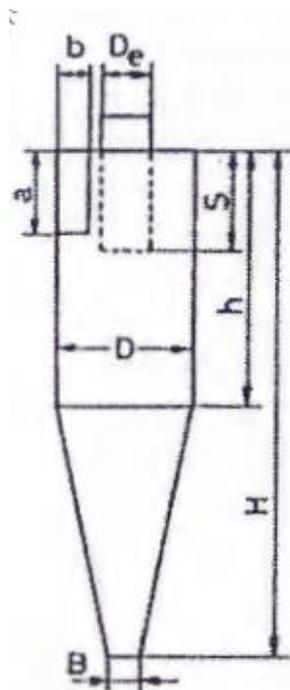


Figura 23: Dimensiones de un ciclón. (Mujumdar, 2006)

Llegados a este punto, se deberán calcular las dimensiones del ciclón mediante procesos iterativos, seleccionando como resultado definitivo aquél que asegure

una velocidad de gas aceptable con unas dimensiones factibles para modelar en el taller de corte de acero.

La principal limitación, por consiguiente, vendrá dada por la imposibilidad mecánica de construir un ciclón de diámetro máximo (D) muy pequeño. Según lo comunicado por Tallers d'Aspiració S.L., los costes asociados a la construcción de un ciclón de diámetro D inferior a 6,8 cm. se dispararían drásticamente, ya que se necesitaría una maquinaria de precisión muy superior a la convencional, por lo que se adoptó este valor como factor limitante. Se procede a aplicar este criterio en las dos configuraciones, tal y como se ve en la Tabla 6.

Tabla 6: Cálculo dimensiones para configuraciones Swift y Stairmand.
(Fuente propia)

Parámetros geométricos	Swift (m)	Stairmand (m)
D	0,0679	0,0679
a	0,029876	0,03395
b	0,014259	0,01358
De	0,03395	0,03395
S	0,02716	0,03395
h	0,09506	0,10185
H	0,26481	0,2716
B	0,02716	0,0254625
Nh	9,24	6,4
N	3,2	3

Obtenidas las dimensiones para cada parámetro geométrica, se puede proceder al cálculo teórico de la velocidad que adoptará el gas. Éste se realizara mediante la Ecuación 11.

$$Velocidad\ del\ gas\ (m/s) = \frac{Caudal\ volumétrico}{a \cdot b} \quad (11)$$

Sustituyendo las expresiones por los valores conocidos, se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 7.

Tabla 7: Velocidad obtenida para configuraciones Swift y Stairmand.
(Fuente propia)

Configuración	Velocidad del gas (m/s)
Swift	14,996
Stairmand	13,856

Si situamos los resultados en la curva de rendimiento para ciclones, se aprecia claramente en la Figura 24 qué configuración es más adecuada para el caudal de trabajo.

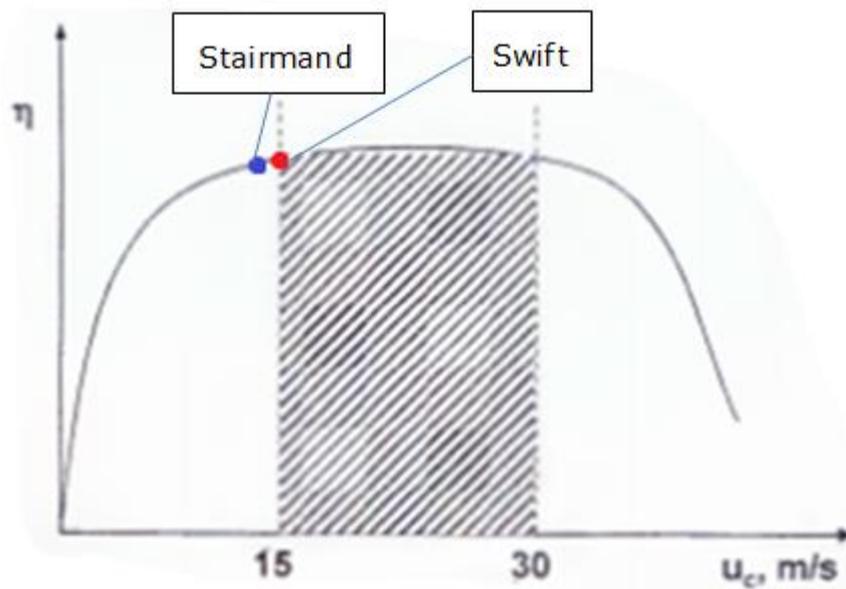


Figura 24: Rendimiento para configuraciones Swift y Stairmand.
(Fuente propia)

Si bien la diferencia de rendimientos es muy pequeña, es lo suficientemente significativa como para respaldar la elección de la configuración Swift como la óptima para el caudal obtenido.

Se procede pues a aplicar las distintas dimensiones calculadas para modelar el ciclón en tres dimensiones.

Lo primero que se debe tener en cuenta es que la sección calculada para el conducto de entrada del ciclón no tiene las mismas dimensiones que el conducto de salida del reactor. Este hecho impone la necesidad de incorporar un sistema de cambio de sección, lo cual en realidad se trata de un problema de fácil solución. En la Figura 25 se puede apreciar la pieza diseñada para tal fin.

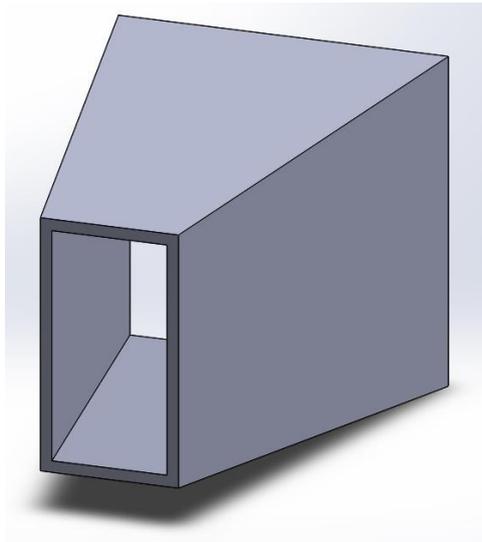


Figura 25: Adaptador de sección. (Fuente propia)

Mediante la incorporación de esta sencilla pieza, se logra un correcto acoplamiento del ciclón con el reactor. El extremo de mayor área tiene una sección cuadrada de 40x40mm., la misma que el conducto de salida del reactor. Las dimensiones del extremo de menor área corresponden a los parámetros calculados para el ciclón de configuración Swift, concretamente los parámetros a y b . Es por ello que la sección menor tendrá unas dimensiones de 3x1,5 mm. Esta pieza, si bien no pertenece al conjunto de elementos que convencionalmente forman un ciclón, será unida mediante soldadura al conducto de entrada del dispositivo (P. A. Funk, 2001).

3.3.1. Conducto de entrada

Se prosigue pues con el diseño del conducto de entrada. Aplicando las dimensiones obtenidas de la configuración *Swift*, se observa que se trata de un conducto de sección rectangular que intercepta de forma tangencial el perímetro del ciclón. El principal parámetro que se deberá considerar pues, es el diámetro máximo D , de 6,8 cm. El grosor del metal para el conducto de entrada será de 1mm. En la Figura 26 se puede apreciar el resultado del modelado en tres dimensiones.

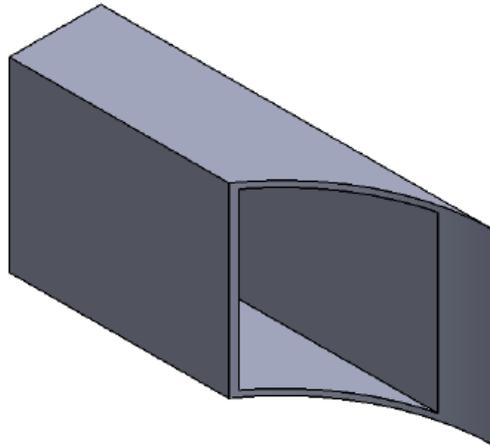


Figura 26: Conducto de entrada al ciclón. (Fuente propia)

Como ya se ha especificado con anterioridad, esta pieza estará unida mediante soldadura con la pieza de cambio de sección.

3.3.2. Cuerpo cilíndrico

Siguiendo el orden lógico (dictaminado por la trayectoria del gas) se prosigue a definir la primera parte del cuerpo del ciclón, o parte cilíndrica. Los parámetros que influyen en su dimensionamiento son el diámetro máximo D y la altura h . Parámetros que, por otra parte, ya han sido calculados según la configuración Swift, que les ha asignado unas dimensiones de $D = 6,8\text{cm.}$ y $h = 9,5\text{cm.}$ respectivamente. Adicionalmente, a esta pieza se le debe efectuar un corte que permita el acoplamiento del conducto de entrada. Se ve en la Figura 27.



Figura 27: Parte cilíndrica del ciclón. (Fuente propia)

El grosor del metal a lo largo de toda la pieza será de 1,5mm., e irá unida al conducto de entrada mediante soldadura.

3.3.3. Cuerpo cónico

Siguiendo con la trayectoria del gas, el siguiente elemento a modelar es la segunda parte del cuerpo del ciclón, o parte cónica. Esta pieza es de gran importancia, puesto que su geometría es esencial para que el gas realice el cambio de dirección (descendente/ascendente) y reduzca efectivamente el diámetro de su trayectoria en espiral. Adoptando los parámetros los valores calculados para la configuración Swift, se tiene el diámetro inferior B , de 2,71cm. y la altura total H , de 26,48cm. Mediante una sencilla resta, se obtiene la altura correspondiente a la parte cónica.

$$\text{Altura parte cónica (c)} = \text{Altura total (H)} - \text{Altura parte cilíndrica (h)} \quad (12)$$

Que se desarrolla de la siguiente forma.

$$\text{Altura parte cónica (c)} = 26,9 - 9,5 \text{ cm.} = 17,4 \text{ cm.}$$

Disponiendo de ambos parámetros definidos, se prosigue al modelado en tres dimensiones de la pieza, que se puede ver en la Figura 28.

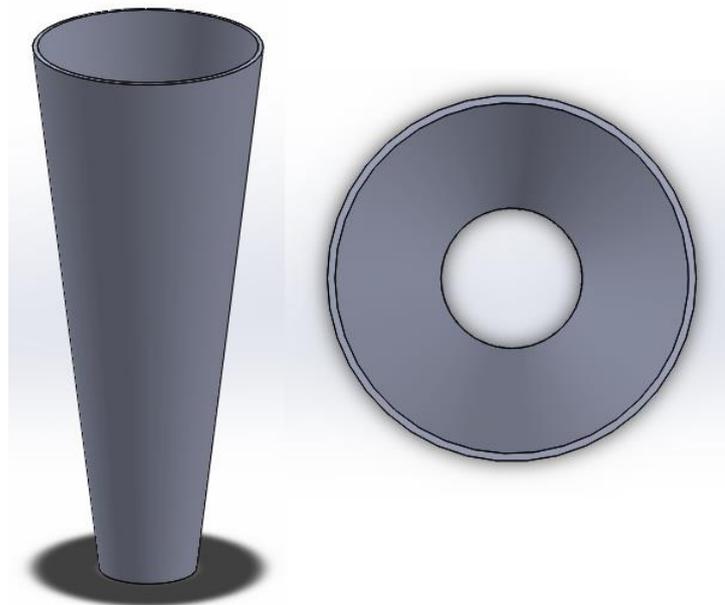


Figura 28: Parte cónica del ciclón. (Fuente propia)

El grosor del metal en la parte cónica del ciclón es de 1,5mm. La parte cónica se unirá a la parte cilíndrica mediante soldadura.

3.3.4. Recipiente de recogida de partículas

Un detalle constructivo al que debe hacerse frente en el diseño de todo ciclón es el método que se escogerá como sistema de almacenamiento de las partículas. Éste debe estar instalado en el extremo inferior del ciclón, unido a la base de la parte cónica. La única especificación técnica que debe cumplir es que asegure un correcto cerramiento hermético para prevenir escapes del gas (Mujumdar, 2006). Además, cuanto más fácil sea la retirada de partículas más se simplificará el mantenimiento periódico del gasificador, uno de los grandes objetivos del presente proyecto.

Para hacer frente a estos requerimientos, se ha decidido instalar un tramo cilíndrico adicional en la base de la parte cónica del ciclón. Este tramo, construido con el mismo material que el ciclón, contará con su superficie exterior revestida con una rosca, permitiendo así el acoplamiento y desacoplamiento de cualquier recipiente. Para el recipiente a utilizar, realmente no existe ninguna limitación en cuanto al material, ya que las condiciones de trabajo en ese extremo del ciclón no requieren de ninguna protección especial frente a temperatura o presión.

3.3.5. Tapa superior

Siguiendo con la trayectoria del gas, se alcanza el extremo superior del ciclón. La parte cilíndrica, hasta ahora abierta por la parte superior, deberá acondicionarse para funcionar correctamente. Se procederá a soldar una tapa circular con un diámetro exterior ligeramente superior al diámetro cilíndrico del ciclón. A esta tapa se le aplicará un orificio en el centro, con un diámetro especificado por el parámetro De , calculado según la configuración Swift. Para un diámetro $De = 3,39cm.$, se procede al modelado en tres dimensiones de la tapa superior, que se observa en la Figura 29.

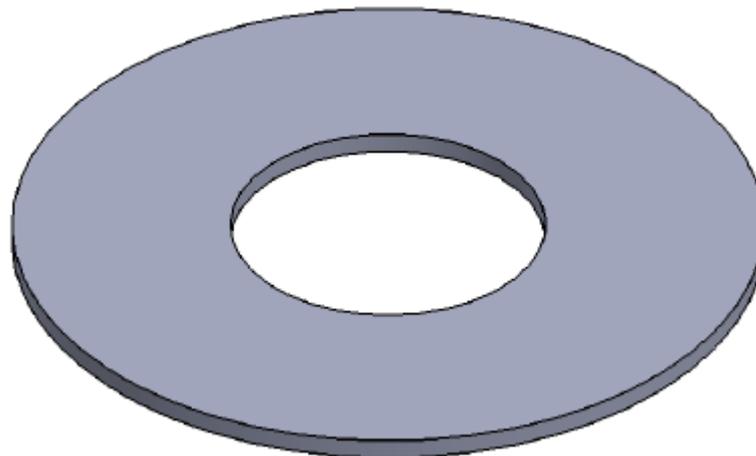


Figura 29: Tapa superior del ciclón. (Fuente propia)

El grosor de la tapa superior del ciclón es de 2mm., ligeramente superior al grosor general del ciclón. Esto permitirá que una pieza como ésta, de dimensiones reducidas, soporte dos soldaduras: una, en el extremo superior de la parte cilíndrica del ciclón, y la otra, con el conducto de salida, que a continuación se procederá a comentar.

3.3.6. Conducto de salida

Para completar el ciclón, se dimensionará un conducto de salida acorde con el parámetro De , ya utilizado para el dimensionamiento de la tapa superior. El conducto de salida pues, estará formado por un cilindro de diámetro De que se introduzca en el ciclón lo suficiente como para sobrepasar el conducto de entrada del gas. El grosor de este conducto será nuevamente de 1,5mm, e irá soldado en el centro de la tapa superior.

Puesto que esta pieza es un simple cilindro, en vez de mostrar su modelado en tres dimensiones, se procede a mostrar la realización de los ensamblajes.

3.3.7. Ensamblaje del ciclón

En la figura anterior se puede observar el posicionamiento de cada una de las piezas descritas, previamente a su soldadura. Siguiendo el orden numérico, se observa el Conducto de salida (1), el Conducto de entrada (2), el Conducto al recipiente (3), la Parte cilíndrica (4), la Parte cónica (5) y la Tapa superior (6).

Tras llevar a cabo las soldaduras pertinentes, el aspecto del ciclón que formará el primer estadio del sistema de limpieza de gases para el gasificador manual se puede apreciar en la Figura 30 y la Figura 31.

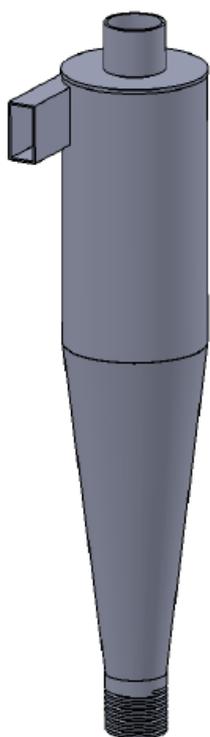


Figura 30: Ciclón ensamblado. (Fuente propia)

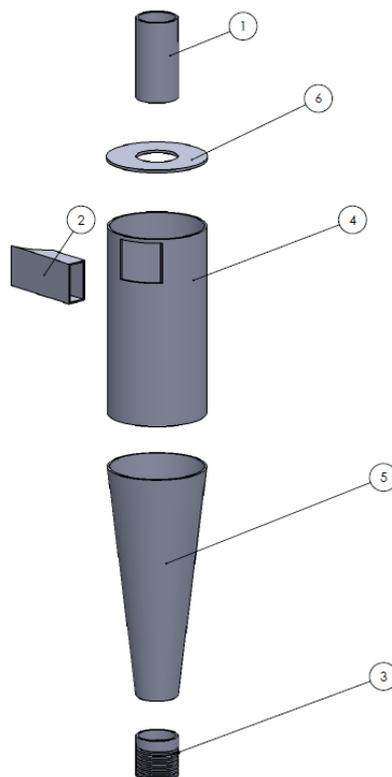


Figura 31: Ciclón explosionado (Fuente propia)

La temperatura del gas en el interior del ciclón debería rondar los 350°C, esto lo convierte en una zona de baja exigencia térmica, por lo que el material de construcción recomendado es nuevamente el acero AISI 304.

3.4. Diseño del filtro de partículas

Recibe el nombre de filtro aquél dispositivo destinado a la limpieza de un gas, y que realice su función imponiendo la circulación de éste por el interior del dispositivo, en donde un conjunto de fibras, gránulos o superficies porosas atraparán todo o parte de los residuos indeseados contenidos en el gas.

El filtrado es uno de los sistemas más utilizados para la eliminación de las partículas contenidas en un gas. El proceso empieza cuando un volumen de gas atraviesa un agente filtrador, momento en el que las partículas en suspensión son gradualmente separadas del gas. Si bien este proceso se puede explicar aduciendo a la capacidad de absorción del agente filtrador que se utilice, en realidad el proceso de separación de partículas se lleva a cabo combinando cuatro casos distintos. Cada caso corresponde a un método de captación de partículas por parte del sólido filtrador, y son los siguientes (Woolcock, y otros, 2012):

- a) Captación por difusión: corresponde a las partículas que son captadas debido a su ocasional desviación del flujo de gas.
- b) Impacto por inercia: corresponde a partículas que han sufrido una aceleración suficiente para abandonar momentáneamente la corriente de gas, impactando en el agente filtrador.
- c) Intercepción directa: corresponde a partículas cuya trayectoria colisiona directamente con uno de los sólidos filtrantes y consecuentemente quedando atrapada.
- d) Captación por gravedad: caso posible únicamente en corrientes de gas descendientes. La gravedad contribuye a la acumulación de partículas en el lecho (en este caso compuesto por agentes filtradores).

La representación gráfica de los cuatro métodos se aprecia en la Figura 32.

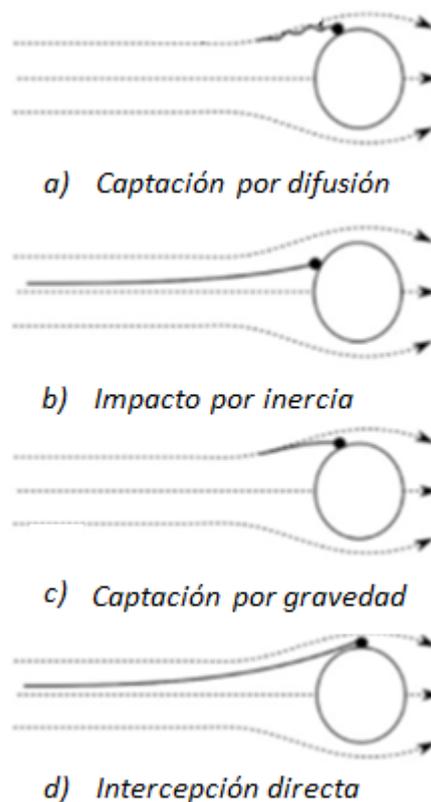


Figura 32: *Métodos de captación del filtro (Woolcock, y otros, 2012).*

En los casos a), b) y c) encontramos métodos de captación basados en colisiones aleatorias de las partículas debido a una irregularidad en su seguimiento de la trayectoria del gas. El caso d), por el contrario, se produce cuando la corriente de gas transcurre excesivamente cerca de uno de los sólidos filtradores, haciendo que las partículas que sigan correctamente la trayectoria del flujo sean atrapadas de todas formas.

Existen distintos tipos de filtro, y frecuentemente son clasificados según su material y/o el agente filtrador que utilizan. Entre los filtros metálicos, se aprecia que los modelos actuales logran eficiencias del 99,99% en eliminación de partículas de dimensiones incluso inferiores a $100 \mu m$.

La temperatura de operación máxima de la mayoría de filtros excede por poco los $400^{\circ}C$. Esto conlleva a menudo la necesidad de añadir un estadio de refrigeración para enfriar el gas antes de conducirlo al filtro.

3.4.1. Cálculo de las dimensiones generales

El dimensionamiento del filtro no está regido por restricciones matemáticas tan estrictas como en el caso de los ciclones. Se deberá dimensionar acorde a la suciedad residual que se estime contendrá el gas, teniendo en cuenta que éste ya habrá circulado por un primer estadio de limpieza. Maximizando el tramo de recorrido en que el gas estará en contacto con el agente filtrador, se logrará una mayor separación de las partículas en suspensión, por lo que ese será otro de los criterios a seguir.

Se procederá a analizar un modelo de filtro cuya eficacia ha sido testada. Entre los meses de setiembre y diciembre de 2013, los integrantes del equipo del CITCEA-UPC tuvieron la oportunidad de analizar los componentes del *Power Pallet V3*, entre los cuales constaba un filtro. Sus dimensiones pueden ser observadas en la Figura 33 (Mason, 2010).

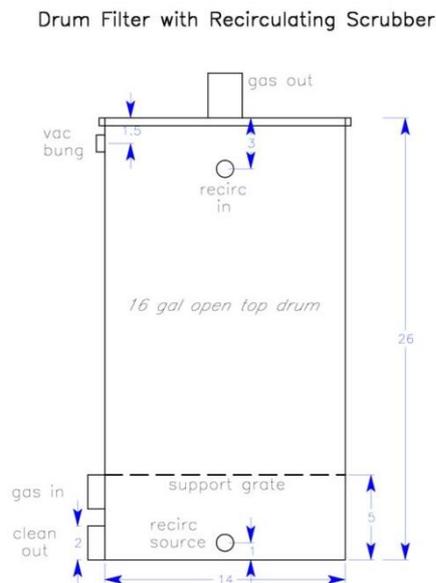


Figura 33: Esquema del filtro del Power Pallet (Mason, 2010)

Como se aprecia, se trata de un filtro cilíndrico, con un volumen interior de 16 galones. Realizando la conversión apropiada, se procede a obtener el volumen en litros.

$$\text{Volumen del filtro (l)} = \text{Volumen del filtro (galones)} \cdot \frac{3,7854 \text{ l}}{1 \text{ gal}} \quad (13)$$

$$\text{Volumen del filtro (l)} = 16 \cdot \frac{3,7854 \text{ l}}{1 \text{ gal}} = 60,56658 \text{ l}$$

Las medidas restantes, que en la imagen están expresadas en pulgadas, adoptan los valores tras la conversión a cm. Mostrados en la Tabla 8.

Tabla 8: Dimensiones filtro y equivalencia en centímetros

Dimensiones	Pulgadas	Centímetros
Diámetro de la base	14	35,56
Altura del filtro	26	66,04
Entrada del gas	2	5,08
Salida del gas	2	5,08

Como ya se ha visto anteriormente, el dimensionamiento de cada componente en el proceso de gasificación, depende y va estrechamente definido por el componente anterior en la sucesión de reacciones. En este caso, el elemento que fija la primera de las dimensiones del filtro, es el conducto de entrada del gas.

Se trata de un tubo circular de 4 cm. de diámetro, cuya sujeción al filtro se solucionará con una unión mediante juntas y posterior sellado.

Respetando pues las dimensiones del conducto de entrada, se obtiene en la Tabla 9 la primera diferencia respecto al dimensionado realizado por la empresa APL en su diseño.

Tabla 9: Equivalencia proporciones entre filtros.

Dimensiones	Power Pallet (cm)	Diseño propio (cm)
Entrada del cas	5,08	4
Salida del gas	5,08	4

Puesto a que se debe redimensionar todos los elementos, se empleará un factor correctivo que se calculará a partir de la diferencia de diámetros ya obtenida.

$$\text{Factor correctivo} = \frac{\text{Diámetro diseño propio (cm)}}{\text{Diámetro Power Pallet (cm)}} \quad (14)$$

Y sustituyendo los valores obtenidos:

$$\text{Factor correctivo (FC)} = \frac{4}{5,08} = 0,7874$$

Una vez obtenido el factor correctivo, puede emplearse para calcular el volumen equivalente que deberá tener el filtro a dimensionar.

$$\text{Volumen del filtro (propio)} = \text{Volumen del filtro (Power Pallet)} \cdot FC \quad (15)$$

$$\text{Volumen del filtro (propio)} = 60,56658 \cdot 0,7874 = 47,7 \text{ l}$$

Se obtiene un volumen equivalente teórico de 47,7 litros para la capacidad del filtro.

Se prosigue analizando otras medidas que influyen en los criterios constructivos. Como ya ha sido expuesto, la altura del filtro construido por APL es de 26 pulgadas, lo que se traduce a 66,04 cm. Para afrontar correctamente el mantenimiento del filtro y puesto que el propósito del presente proyecto es la construcción de un gasificador fácilmente operable, se ha considerado adecuado limitar la profundidad del filtro entorno a los 50 cm. Con esta altura, se facilitará en gran medida las labores de limpieza periódicas que deberán realizarse.

Aplicando esta nueva limitación, se procede a calcular el diámetro que debería tener el filtro.

$$\text{Volúmen teórico (l)} = \text{Altura filtro (m)} \frac{\pi \cdot \text{Diámetro teórico (mm)}^2}{4 \cdot 1000} \quad (16)$$

Y se desarrolla de la siguiente forma.

$$\text{Diámetro teórico (mm)} = \frac{\sqrt{4 \cdot 1000 \cdot \text{Volúmen teórico (l)}}}{\pi \cdot \text{Altura filtro (m)}}$$

Y sustituyendo numéricamente.

$$\text{Diámetro teórico (mm)} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1000 \cdot 47,7}{\pi \cdot 0,5}} = 348,52 \text{ mm}$$

Se obtiene un diámetro de 348,52 mm. Si se contempla este cálculo como método para obtener el volumen interior por el que el gas podrá circular, a este diámetro se le debe restar el grosor pertinente a las paredes del filtro. Por recomendación expresa del taller, se procede a considerar un diámetro interior de 346mm., asumiendo un grosor ligeramente superior al milímetro para las paredes del filtro. Llegado este punto, se calcula el volumen interior:

$$\text{Volúmen interior (l)} = 0,5 \cdot \frac{\pi \cdot 346^2}{4 \cdot 1000} = 47,2 \text{ l}$$

Se obtiene finalmente, un volumen interior de 47,2 l.

3.4.2. Funcionamiento interno

Asumiendo que el gas circulará a través del filtro a causa de la succión que ejercerá el motor en funcionamiento, el objetivo que se debe priorizar en la

construcción del filtro es el de maximizar el recorrido que el gas realizará en su interior. De este modo, también se incrementará el porcentaje de partículas residuales que serán atrapadas por el agente filtrador. Para este propósito se ideó un sistema para forzar el gas a circular en dos trayectorias diferentes durante un solo recorrido a través del filtro.

Mediante la adición de una pared interior, que seccione el filtro en dos compartimentos únicamente conectados por la parte superior, se consigue que el gas deba realizar una trayectoria ascendente desde la entrada, y una trayectoria descendente hasta la salida. En la Figura 34 se puede visualizar el sistema ideado.

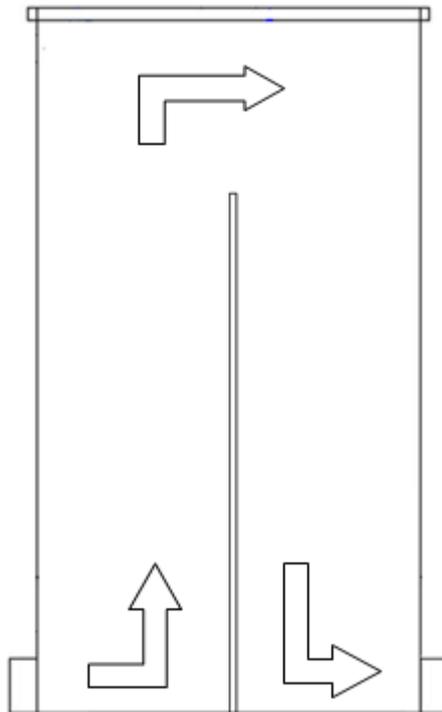


Figura 34: Esquema circulación del gas en el interior del filtro.
(Fuente propia)

Llegado este punto, el agente filtrador ya podría ser incorporado, y el filtro podría empezar a realizar su función. Sin embargo, no es prudente disponer de elementos móviles expuestos a una corriente de gas, pues parte de ellos podrían ser arrastrados a través de los conductos hasta más allá del filtro. Es por este motivo que se consideró necesaria la adición de un sistema de contención para los elementos que realizarían el filtrado.

La instalación de un falso suelo poroso, pocos milímetros por encima de los conductos de entrada y salida del gas, solucionará por completo el problema. Como criterio de diseño, únicamente se debe tener en cuenta que los orificios no deben permitir el paso a los elementos filtradores. Puesto que el filtro es un elemento cilíndrico, y tras la instalación de la pared interior ha quedado dividido en dos secciones, se deberán instalar dos suelos de contención en forma de media luna. En la Figura 35 se puede observar el aspecto de la pieza, diseñada mediante *SolidWorks*.

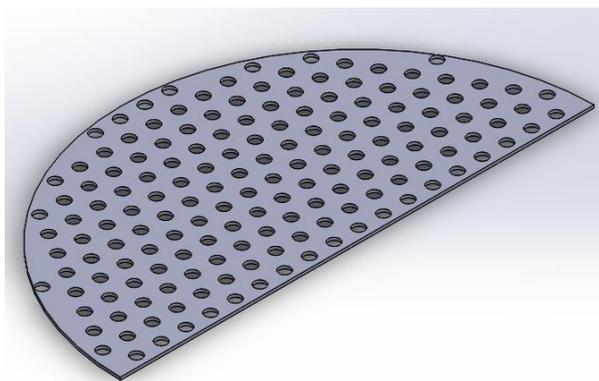


Figura 35: Malla interior. (Fuente propia)

El diámetro de las susodichas piezas ha sido diseñando siguiendo únicamente el criterio de asegurar su correcta adaptación en el interior del filtro, ocupando prácticamente la totalidad del área contenida entre las paredes del filtro y la pared interior. El diámetro escogido para tal fin es de 16,8 cm, y el grosor de la lámina es de 2mm.

Queda aún, sin embargo, una cuestión de diseño que requiere de solución. Se trata del método de sujeción del suelo poroso en el interior de la cavidad del filtro. La soldadura queda descartada, ya que imposibilitaría las tareas de mantenimiento en la parte más inferior del filtro. El método utilizado para su fijación a una altura determinada es la instalación de un pequeño saliente, a modo de cornisa, que recorra el interior de las paredes circulares del filtro a una altura determinada. De este modo el suelo poroso estará en reposo, apoyado y en contacto en todo momento con el saliente instalado. A fin de completar el sistema de la manera óptima, también se instalará un pequeño saliente a ambos lados de la pared interior del filtro y a la misma altura. De este modo se asegura que el suelo poroso reciba la sujeción pertinente en la totalidad de su perímetro. Tanto en el tramo circular como en el tramo recto, el saliente tendrá un grosor de 1,5 mm., y sobresaldrá 4 mm. En la Figura 36 se aprecia el sistema utilizado.

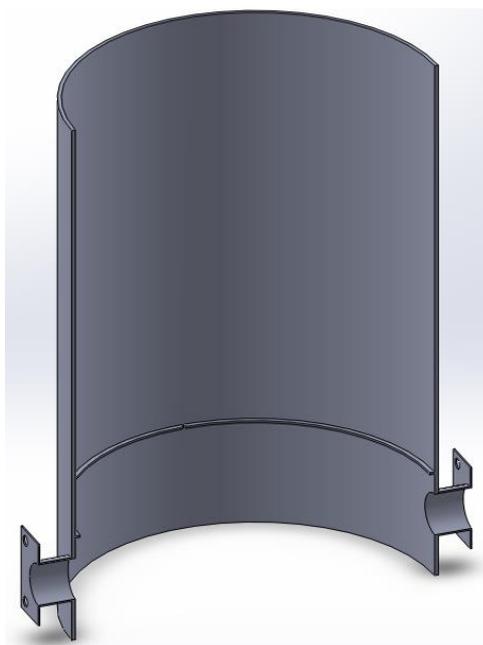


Figura 36: Vista seccionada del cuerpo del filtro. (Fuente propia)

Tras la realización del ensamblaje, la pared interior ofrecerá la sujeción complementaria, tal y como se observa en la Figura 37.

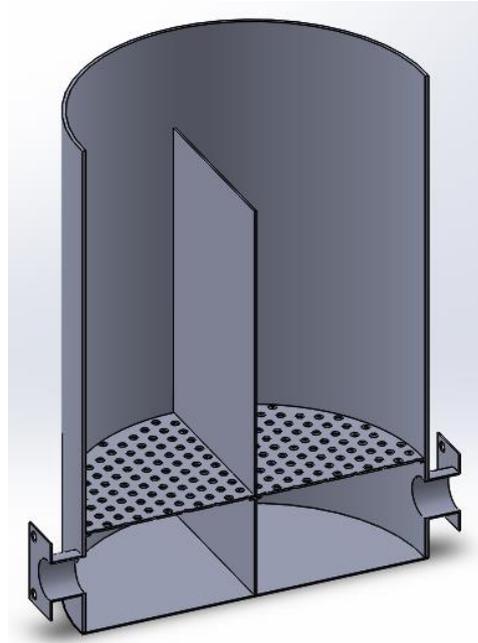


Figura 37: Vista seccionada del filtro ensamblado. (Fuente propia)

Entre las labores constructivas restantes, la fijación de la pared interior se solucionará mediante su soldadura a la base del filtro con la ayuda de unas láminas de metal adicionales, lo que asegurará la correcta separación de las dos estancias del filtro.

En lo pertinente a la tapa superior del filtro, las consideraciones a tener en cuenta y que se han seguido para las labores de diseño, son la necesidad de que el cerramiento sea hermético y la capacidad de ser retirada fácilmente para las labores de mantenimiento. Para satisfacer ambos requerimientos, se ha resuelto utilizar una tapa con cierre de tipo ballesta, lo que dota al filtro de un sistema de apertura y sellado sencillo y eficiente.

En el momento de la circulación del gas a través del filtro su temperatura debe haber decaído hasta rondar los 100°C. Nuevamente esto sugiere el acero AISI 304 como la mejor opción con los costes más bajos.

3.5. Elección del grupo motor-generator

Tras abandonar el filtro y al haber alcanzado una composición aceptable, el gas será conducido hasta el motor para su aprovechamiento energético. Des del inicio del proyecto, la elección del grupo motor-generator acarreó diversas dificultades. El uso de gas en motores de combustión no está lo suficientemente extendido como para disponer de un mercado real en el cual considerar varios productos, por lo que la labor de búsqueda se complicó en gran medida.

Otra de las dificultades añadidas era la necesidad de encontrar un sistema que no solo admitiese gas como combustible, sino que incorporase un generador acoplado que permitiese la generación directa de energía eléctrica (All Power Labs, 2014).

La importancia del motor en el sistema de gasificación va mucho más allá que la de únicamente formar el último estadio del proceso. Será el motor quien marque el ritmo del consumo de biomasa, y por consiguiente el ritmo al que deberá trabajar el gasificador. Este ritmo, lógicamente, vendrá dado por la potencia instantánea que se extraiga, que a su vez irá determinada por la carga conectada al generador (Gonzalez, 2003).

Tras el pertinente estudio, realizado por la miembro del equipo CITCEA-UPC Ingrid Munné, y después de analizar los escasos productos comercializados, se decidió adquirir el motor PERFORM 6500 GAZ, de la marca KOHLER. Se puede observar el aspecto del grupo adquirido en la Figura 38.



Figura 38: Grupo motor-generator PERFORM 6500 GAZ
(Datasheet SDMO)

Se trata de un grupo motor-generator, capaz de operar consumiendo gasolina o bien un gas combustible, lo que se ajusta de forma idónea a las necesidades del proyecto.

Sus principales características se pueden apreciar en la Figura 39, extraída del *datasheet* del motor:

CARACTERÍSTICAS GENERALES	
Gama	Perform
Frecuencia (Hz)	50
Potencia max. (LTP) (kW)	5.8
Potencia max. (LTP) (kVA)	7.25
Tensión nominal (V)	230
Número de fase	Monofásico - 230V
Potencia acústica garantida Lw(A)	97
Nivel sonoro dB(A) - 1m	83
Nivel sonoro dB(A) - 7m	69

Figura 39: Características del grupo escogido
(*Datasheet* SDMO)

Se aprecia que el motor tiene una limitación en cuanto a potencia máxima de 5,8kW, de modo que el límite de potencia que se podrá extraer del proceso de gasificación mediante la utilización del gasificador manual quedará fijado en esa cifra.

El grado de protección del grupo posee una calificación IP23 según la nomenclatura estándar IEC 60529. La nomenclatura se describe en la Figura 40.

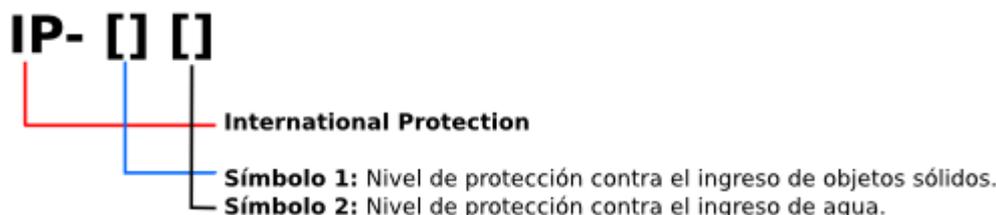


Figura 40: Nomenclatura estándar IEC 60529

Consultando lo establecido por el estándar IEC 60529, se encuentran las protecciones asociadas a ambos dígitos del código.

El primer dígito con un valor de 2 indica que cuenta con protección frente a la entrada de elementos sólidos de hasta 12,5 mm. de diámetro.

El segundo dígito con un valor de 3 indica que cuenta con protección frente a la entrada de agua siempre y cuando esta esta nebulizada en el entorno. Concretamente, para poder ser categorizado de esta forma el equipamiento debe resistir el contacto con un ambiente con presencia de agua nebulizada que circule a su alrededor con un caudal promedio de 11 litros por minuto, ejerciendo una presión de entre 80 y 100 kN/m².

Según la información encontrada en el *datasheet*, el motor incorpora un aislamiento de clase H, lo que corresponde a una protección frente a temperaturas de hasta 180°C.

En cuanto a las dimensiones, en la Figura 41 se puede apreciar el espacio que ocupará la instalación del grupo motor-generator.

DIMENSIONES Y PESO	
Longitud (cm)	81
Anchura (cm)	55.5
Altura (cm)	59
Peso neto (kgs)	97.5

Figura 41: Dimensiones y peso del grupo escogido.
(Datasheet SDMO)

Es importante tener en cuenta las dimensiones del grupo motor-generator, ya que una vez modelados y fabricados todos los componentes del conjunto del gasificador, deberán integrarse en una estructura metálica que los une, fijándolos. Eso aportará al conjunto una estabilidad por otra parte necesaria en aplicaciones de estas características. El espacio que deberá reservarse para el grupo motor-generator es, por consiguiente, el especificado en el *datasheet* y mostrado en la figura anterior.

Debido a lo inusual de la utilización de gas de síntesis en motores, la mayoría de instrucciones para un correcto funcionamiento y uso de grupos electrógenos de estas características están orientadas al uso de butano y/o propano. Sin embargo, muchas de las directrices y recomendaciones se pueden extrapolar a las condiciones de este proyecto. El fabricante expresa la imperiosa necesidad de, en caso de alimentar el grupo con gas, realizarlo en el exterior o en estancias amplias y correctamente ventiladas. Esto en sí no supone ninguna alteración de lo previsto, pues cualquier proceso de gasificación debería realizarse en estas condiciones.

3.5.1. Mantenimiento del grupo motor-generator

5.2. Tabla de mantenimiento

Elemento	Operaciones que hay que realizar cuando se alcance alguno de los términos	En cada uso	Cada vez que se desmonte o que se cambie la bombona de gas	Cada 1 año o 50 horas	Cada 1 año o 100 horas	Cada 1 año o 200 horas	Cada 3 años o 2.000 horas
Tornillería	Comprobar	•					
Aceite del motor	Compruebe el nivel	•					
	Renovación				•		
Junta de la conexión de gas	Sustitución		•				
Regulador de presión	Sustitución						•
Filtro de aire	Comprobar	•					
	Limpiar			•			
	Sustitución					•	
Apagachispas	Comprobar	•					
	Limpiar				•		
Bujía de encendido	Comprobar-limpiar				•		
Grupo electrógeno	Limpiar				•		
Válvulas *	Solicitar la revisión*					•*	
Cámara de combustión *	Solicitar la revisión*					•*	

Figura 42: Régimen de mantenimiento del grupo motor-generator.
(Datasheet SDMO)

La incorporación del grupo motor-generator en el conjunto del gasificador conlleva también un añadido en el programa de mantenimiento del equipo. En la Figura 42 se puede apreciar el programa indicado por el fabricante.

Como se observa, algunas de las actuaciones hacen referencia al uso de bombonas de butano o propano, por lo que se deben interpretar según el uso de gas de síntesis. Debido a la inexistencia de una bombona que se deba cambiar, la junta de la conexión de gas solo se deberá cambiar tras observar un claro deterioro o en caso de que una eventualidad exija la separación del grupo electrógeno del conducto de alimentación de gas.

3.6. Gestión del gas de mala calidad

Hasta que no se reúnan en el reactor las condiciones térmicas que aseguren una buena calidad del gas, no es prudente conducirlo hasta el motor. Para ello se creará un circuito adicional por donde el gas será derivado hasta que cumpla con dichas condiciones. El inicio de este circuito se encontrará inmediatamente después del filtro, preparado específicamente para impedir la llegada del gas al motor. El circuito añadido será totalmente lineal, y únicamente estará formado por una bomba y una chimenea (Solar Energy Research Institute, 1988).

La función de la bomba será generar la succión necesaria para iniciar el proceso de gasificación, cosa que posteriormente pasará a realizar el motor. Dicha succión servirá para conducir el gas en sentido ascendente hasta una chimenea instalada al final de este circuito.

En los primeros momentos de funcionamiento, el usuario deberá prender el gas saliente por la chimenea, de modo que no se libere al entorno un volumen de gas que es totalmente tóxico.

Con la implementación de este sencillo sistema se consigue gestionar los momentos de arranque de la gasificación, así como también los últimos.

Todas las piezas metálicas que integren este circuito, como la chimenea, podrán ser construidas con acero AISI 304.

3.7. Aspecto del gasificador manual

Como se ha visto a lo largo de este capítulo, los componentes que integrarán el conjunto de gasificación (siguiendo la trayectoria del gas) son el depósito de biomasa, el reactor y sus distintos ensamblajes, el ciclón, el filtro y el grupo motor generator paralelamente con el circuito secundario de la chimenea.

Tras su dimensionamiento y posterior fabricación, cada uno de los elementos deberá pasar a integrar una parte de un complejo aunque lineal sistema de generación eléctrica. Por razones de ergonomía y transporte, se buscará siempre

la ocupación del mínimo espacio, siempre sin dejar que esto interfiera en la calidad de los procesos que se realizarán. Es por ello que se ha realizado, y se adjunta a continuación en la Figura 43, un esbozo de cómo podría resultar el ensamblaje final, cuidando la posición relativa de todos los elementos anteriormente enumerados.

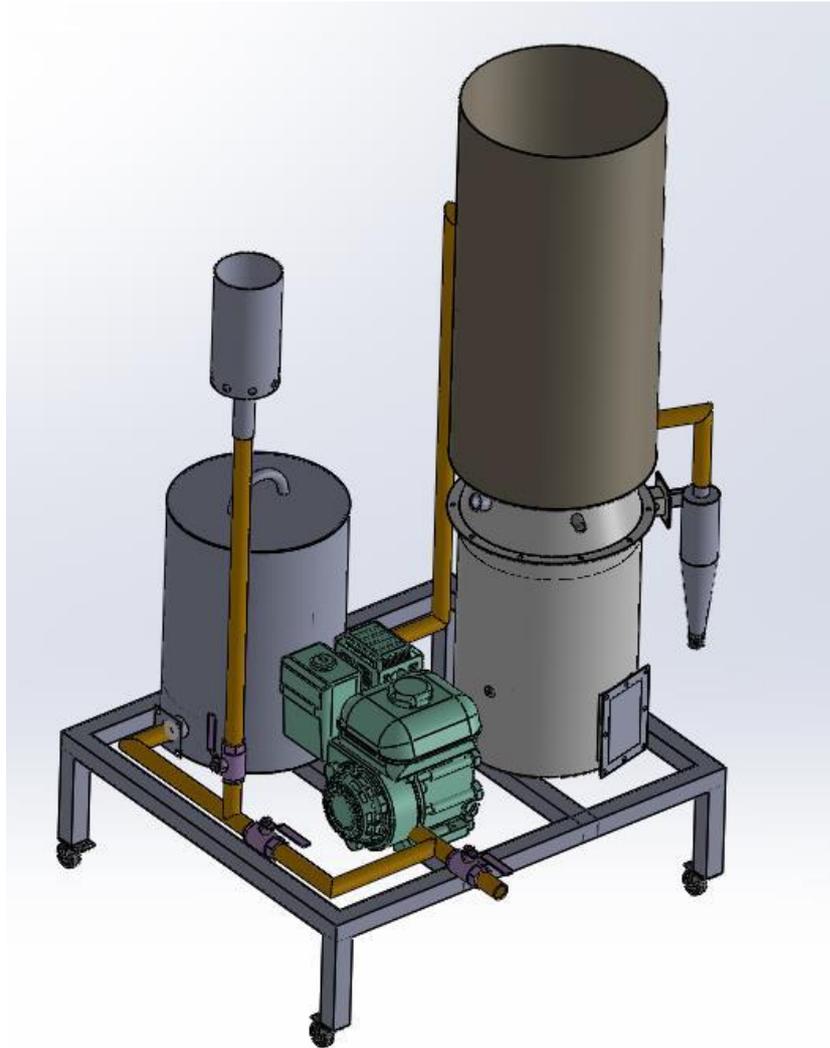


Figura 43: Posible aspecto del ensamblaje general del gasificador.
(David Martín)

Capítulo 4:

DISEÑO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN

Se entiende por sistema de monitorización todo aquel conjunto de sensores, programas informáticos o dispositivos físicos que ayuden al usuario a recibir información en tiempo real de un sistema en ejecución. Si se contextualiza esta definición en el objeto de estudio del presente proyecto, haría referencia a los siguientes elementos:

- Sensores de medición

Encargados de realizar lecturas instantáneas de los parámetros que se desea controlar. Mediante los sensores se obtiene la información, codificada en variaciones de corriente o de tensión, que se interpretarán mediante la utilización de equipos electrónicos.

- Unidad de control de procesos

Encargada de recibir, interpretar, y comunicar la información recibida por el conjunto de sensores, ofreciendo al usuario una visión general de lo que ocurre en el sistema, y en caso de estar programada para tal objetivo, de controlarlo.

Al igual que con el resto del gasificador, las soluciones adoptadas por APL en el diseño de su sistema de monitorización han sido minuciosamente consideradas para la realización de este capítulo. A continuación se procede a analizar el sistema de monitorización utilizado para la construcción del Power Pallet.

4.1. Estudio de un sistema de monitorización

La unidad de control o GCU (*Gasifier Control Unit*) es una placa electrónica de código abierto diseñada para la monitorización y el control de un amplio abanico de procesos industriales (Mason, Jim, 2014). APL ha realizado modificaciones que la adecuan especialmente para el control de los procesos de gasificación, y pone a disposición del usuario diferentes librerías y segmentos de código para configurar procesos y funciones tales como *datalogging*, control de la tensión, de

la humedad, del caudal del gas o de la temperatura y de la presión. Como toda unidad de control, el elemento más importante y que la caracteriza es el micro-controlador. En APL se decidieron por uno modelo Atmel ATmega 1280. Este componente, a su vez, tiene comunicaciones establecidas con los distintos puertos de entrada y salida, por donde se recibe y se envía la información recogida por los sensores.

El micro-controlador está preparado para funcionar mediante la interfaz Arduino. Arduino es una herramienta *open-source* basada en una placa que incorpora un micro-controlador (como el caso de estudio) acompañada de un entorno de desarrollo para crear distintos tipos de software para la propia placa.

El lenguaje Arduino puede utilizarse para una inmensa variedad de aplicaciones, creando aplicaciones interactivas, limitándose a observar la evolución de una variable leída por algún sensor o directamente para controlar algún proceso en función de unos criterios previamente establecidos.

Para el caso de la GCU, las principales características se pueden observar en la Tabla 10.

Tabla 10: Características de la placa de control del Power Pallet

Características de la GCU		
Procesador Atmel ATmega 1280		
Entradas	Entradas de temperatura	16 termopares
	Entradas de presión	6 sensores de presión
	Entradas analógicas auxiliares	4 entradas
Salidas	Comandos de navegación	4 comandos
	Salidas PWM	8 PWM-FET
	Salidas R/C servos	2 R/C servos

Además, la GCU configurada por APL también incorpora otras prestaciones que facilitan la operación por parte del usuario. El conexionado del sistema se puede realizar fácilmente vía USB, y los datos recogidos por los sensores y procesados por el controlador pueden ser automáticamente almacenados en una tarjeta SD.

Adicionalmente, los técnicos de APL incorporaron una pantalla LCD para mostrar en todo momento el valor de los parámetros que estaban registrando. La pantalla LCD también ofrece al usuario la posibilidad de navegar y controlar manualmente algunos de los procesos, como el sacudimiento de la parrilla o el accionamiento del tornillo sin fin (Mason, Jim, 2014).

A diferencia del gasificador manual que se está construyendo en este proyecto, el *Power Pallet* de APL incorpora un sistema de control electrónico que permite al usuario gestionar varias de las funciones del gasificador. El sacudimiento de la parrilla o el accionamiento del tornillo sin fin eran algunas de las funciones a

disposición del usuario. Por razones intrínsecas a los objetivos fijados, el gasificador en construcción no incorporará ninguna función de control, y la GCU se limitará a una mera función de monitorización.

4.2. Diseño del sistema de monitorización

Puesto que el propósito del presente proyecto es la construcción de un gasificador manual que incorpore la mínima electrónica posible, se ha renunciado a ejercer cualquier tipo de control electrónico sobre los procesos que se estarán llevando a cabo en su interior. Esto mismo, lejos de simplificar la tarea, eleva al máximo la necesidad de un correcto diseño de todos los componentes del sistema.

Aplicando este criterio, de entre todos los registros que efectúa la GCU configurada por APL, solo se conservarán los pertinentes a la monitorización de la temperatura y la presión a lo largo de los diferentes estadios de la gasificación. Se desestima, por el momento, el registro y la medición de parámetros como la humedad o el caudal.

Una vez definidos los parámetros a monitorizar, empieza una labor que también entraña cuestiones constructivas: la decisión de en qué puntos se efectuarán las mediciones de dichos parámetros. Básicamente, el criterio a seguir para definir un punto de medición es considerar la naturaleza de los procesos que se llevan a cabo en ese punto o se han llevado a cabo en un punto inmediatamente anterior. Si dichos procesos, debido a su naturaleza, se espera que hayan alterado la temperatura o la presión (ya sea para incrementarla o para hacerla descender), deberá instalarse un punto de medición.

Mediante este método se establecerá un correcto protocolo de control, ya que para cada segmento del recorrido que realiza el gas dentro del gasificador existe un rango de valores aceptables para la temperatura y la presión.

Siguiendo las directrices mencionadas, se procede a considerar el gasificador en su totalidad. La primera temperatura que interviene en el sistema es, lógicamente, la temperatura ambiente. Se puede incorporar, por consiguiente, un termómetro externo que realice esa medición. Sin embargo esta medición no requeriría de una unidad de control para ser procesada, y dada la magnitud de las otras temperaturas que se registrarán, puede ser considerada negligible.

Es por ello que el primer punto de medición para la temperatura debería realizarse en el primer sector en donde se requiere de una temperatura determinada para asegurar una buena calidad del gas de salida. Este punto se encuentra justo por encima de la zona de reducción. Continuando con la trayectoria natural del gas, el siguiente punto en el que se dispone de un criterio para dictaminar si la temperatura es la indicada es justo después de la zona de reducción. De este modo se logra cercar la zona de reducción, conociendo simultáneamente la temperatura de la zona superior y la inferior. A continuación, el gas asciende por la cubierta externa del reactor, realizando un primer intercambio de calor en el que aporta energía calorífica a la biomasa recién salida

del depósito. Seguidamente, el gas se dirige al ciclón. Es en ese preciso punto en el que se realizará la tercera medición de temperatura, justo después del punto de unión entre el reactor y el ciclón. A continuación, el gas abandonará el ciclón para dirigirse hacia el depósito, por donde recirculará a través de las paredes, realizando el segundo intercambio de calor. Es por ello que una vez el gas abandone el depósito, se realizará la cuarta medición, justo antes de entrar en el filtro. Cabe destacar que, en ese punto, ya se debería haber apreciado un significativo descenso de la temperatura. Finalmente, una vez el gas haya sido filtrado, se deberá realizar una medición más para asegurar que la temperatura del gas de síntesis que se conduzca hasta el motor no sea demasiado elevada. Es por ello que la última y quinta de las mediciones se realizará en ese punto.

Pasemos a definir los puntos de medición de la presión. Al contrario que con la temperatura, los sensores de presión no resisten las condiciones de trabajo que se reúnen en el interior de un gasificador. Por esta razón, los sensores irán unidos a la unidad de control, a una distancia prudencial del gasificador, y desde ahí se comunicarán con unos delgados tubos hasta los puntos del gasificador en donde se requiera realizar las mediciones. El sistema ideado para la instalación de estos sensores será explicado más adelante en este mismo capítulo

Puesto que en el exterior se registraría presión atmosférica, no tiene sentido realizar ninguna medición hasta que no intervenga el primer factor que la altere. La primera estancia dentro del gasificador en donde encontramos una presión distinta es, al igual que con la temperatura, la parte superior a la zona de reducción. En ese punto, la succión creada ya sea por el motor en funcionamiento o por la bomba en los primeros estadios del arranque del sistema, ya estará causando una depresión que se deberá registrar. Es en ese punto pues, que se situará el primer punto de medición de presión. Siguiendo adelante, el siguiente punto en el que se realizará una medición es, de igual forma, la parte inferior de la zona de reducción. Esto se debe a que, en esencia, la zona de reducción es el punto más crítico en el sistema, y en donde en caso de no contar con los parámetros adecuados, se echará a perder el combustible que se está utilizando, ya que el gas no tendrá la calidad necesaria. Tanto es así que el ratio de presiones entre la parte superior y la parte inferior deberá ser controlado constantemente. Si observásemos que la presión inferior aumenta considerablemente (en el sentido que la depresión sería más fuerte), podría significar que el reactor se ha obstruido creando un tapón. Por el contrario, una presión demasiado baja indicaría que ha sucedido un error humano y el reactor no ha sido provisto de suficiente combustible como para continuar completando las reacciones químicas. Continuando adelante, el siguiente punto el que se puede situar otro punto de medición de presión es justo antes del ciclón, en el mismo sitio que el tercer punto de medición de temperatura. Si se dispone de suficientes sensores de presión, no existe ningún impedimento para situar uno aquí. Sin embargo, no existe ningún factor que indique que la presión deba variar desde el punto de medición anterior, de modo que no es necesario. Prosiguiendo con el recorrido del gas, se deja atrás el ciclón y el segundo intercambio de calor y se lleva al filtro. El cuarto y quinto de los puntos de medición de presión deberían ir situados a ambos lados del filtro. Es otro de los lugares en que esporádicamente se puede causar alguna obstrucción, de modo que es interesante controlar la variación de la presión en ese punto. Además, de este modo obtenemos la lectura de presión justo antes de la entrada del gas al motor, que junto con la temperatura calculada en el punto de medición de

temperatura número cinco, nos dan las condiciones de trabajo del motor. Por todo lo explicado, dependiendo del número de sensores de que se disponga, el cuarto punto de medición también es opcional, ya que tampoco debería apreciarse mucha variación respecto al segundo punto de medición.

En la Tabla 11 se resumirá lo recientemente descrito.

Tabla 11: *Puntos de medición del gasificador.*

Puntos de medición	Temperatura	Presión
Zona de reducción superior	Sí	Sí
Zona de reducción inferior	Sí	Sí
Entrada del ciclón	Sí	Opcional
Entrada del filtro	Sí	Opcional
Entrada del motor	Sí	Sí

En el siguiente diagrama, que se puede observar en la Figura 44, los puntos de medición de temperatura están señalados mediante el color rojo, mientras que los puntos de medición de presión están identificados con el color azul.

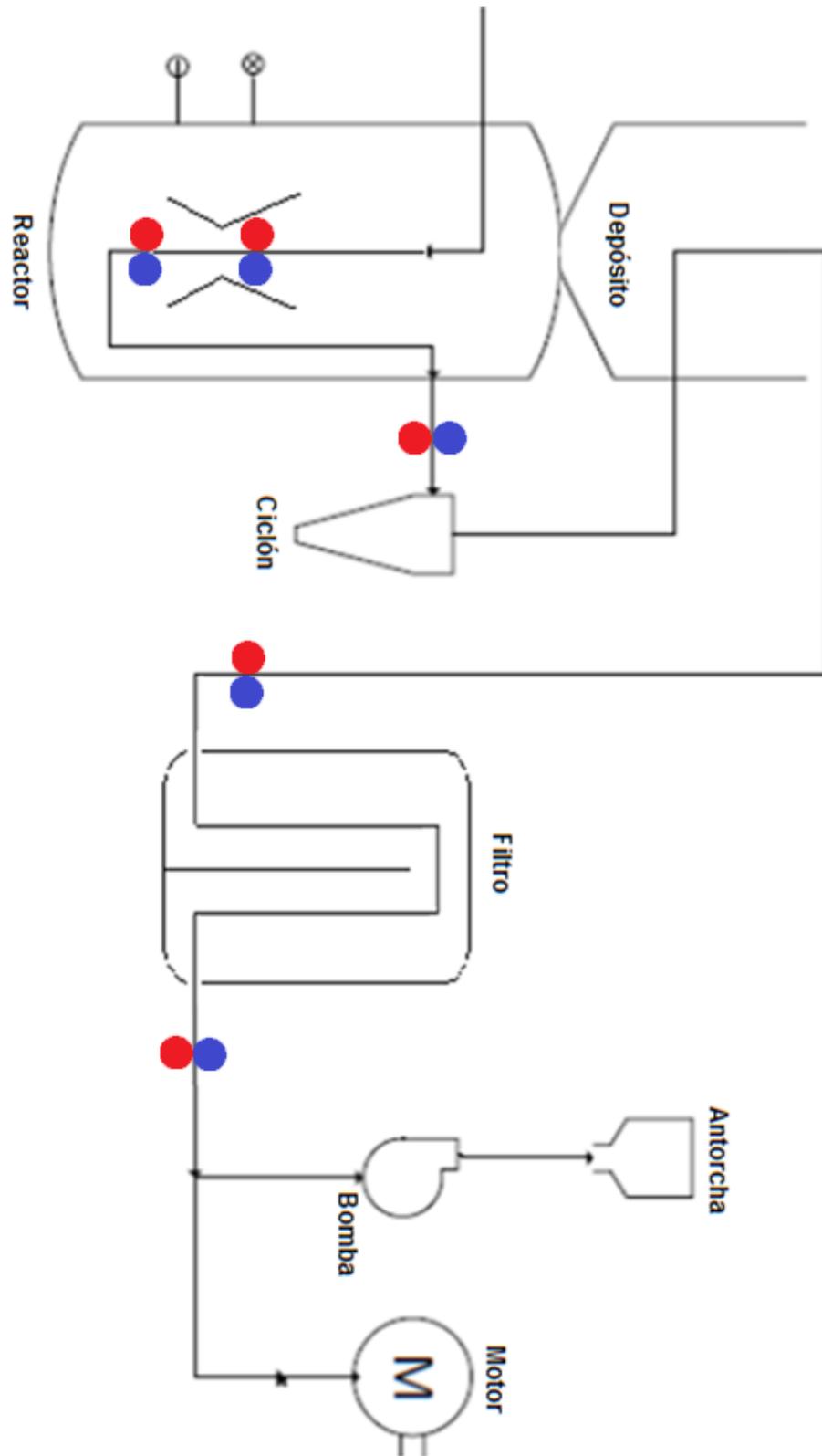


Figura 44: Localización de los puntos de medición en el gasificador.
(Fuente propia)

Una vez decididos los puntos de medición, es necesario escoger el tipo de sensor que se utilizará. Se empezará por los sensores de temperatura.

4.2.1. Monitorización de la temperatura

El principal factor que definirá que tipo de sensor de temperatura se necesita en cada caso es, lógicamente, la temperatura que se debe registrar. Según la temperatura, se podrá escoger entre un amplio abanico de sensores, que a partir de ahora serán llamados termopares.

En esencia, un termopar es la unión de dos metales distintos, que en función de la temperatura que experimentan, producen una diferencia de potencial muy pequeña (del orden de mV). Al experimentar una temperatura, envían una señal de tensión que, además, no varía linealmente con las variaciones de temperatura. Es por ello que comúnmente la señal debe ser aproximada por un polinomio cuyo grado puede variar de 5 a 9, y que viene indicado por el fabricante. Una vez se consigue una aproximación correcta, se consigue traducir la señal de tensión en una expresión de temperatura en grados Celsius.

Existe también una gran variedad de acabados en lo que refiere a los termopares. Pequeñas diferencias como el tipo de metales que utilice, el aislamiento que incorpore o las características del cableado cambian totalmente el propósito para el que debe utilizarse un termopar. Se han analizado los tipos de termopar cuyo uso está más extendido. Según el tipo de metales que utilice, se aplica la clasificación siguiente (Wang, 1990):

- Tipo K

Los termopares tipo K utilizan una unión metálica de cromel y alumel. El primero es una aleación de Ni-Cr, y el segundo de Ni-Al. Se trata de un termopar robusto, con buena resistencia a la oxidación y con un coste bajo. Esto le convierte en una buena opción para una gran variedad de aplicaciones. Su rango de temperatura de operación oscila entre los -200°C y los 1372°C , y su sensibilidad es de $41 \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ aproximadamente.

- Tipo E

Los termopares tipo E utilizan una unión metálica de cromel y constantán, que es una aleación de Cu-Ni. Su rango de trabajo es de -100 a 1260°C , y su sensibilidad de $68 \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$. Son comúnmente utilizados en aplicaciones a bajas temperaturas, en el ámbito criogénico.

- Tipo J

La unión metálica que utilizan es de hierro y constantán. Su rango de utilización es de $-270/+1200^{\circ}\text{C}$. Su principal inconveniente es la rápida oxidación que sufre el hierro por encima de 550°C ; y por debajo de 0°C es necesario tomar precauciones a causa de la condensación de vapor de agua sobre el hierro. Debido a ello se recomienda su uso en atmósferas inertes o en vacío.

- Tipo T

La unión metálica es de cobre y constantán. Su rango ideal de operación oscila entre los -200 y los 260 °C. Resisten atmósferas húmedas, y oxidantes y son aplicables en criogenia. Este tipo de termopar tiene una sensibilidad de 43 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ aproximadamente.

- Tipo N

Utilizan una unión de nicrosil (Ni-Cr-Si) y nisil (Ni-Si). Su rango de operación comprende el rango de -270°C a 1300°C, por lo que es adecuado para mediciones a altas temperatura. Además cuenta con una elevada estabilidad y resistencia a la oxidación a altas temperaturas, y no necesita del platino utilizado en los tipos B, R y S, que son más caros. Sin embargo su coste es superior al de otros termopares que operan a altas temperaturas, como los tipo K.

Los termopares tipo B, R y S son los más estables, pero debido a su baja sensibilidad (10 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ aprox.) generalmente son usados para medir altas temperaturas (superiores a 300 °C). Sin embargo su coste es notablemente superior.

- Tipo B

Utilizan una unión Pt-Rh. Su utilización se centra en la medición de elevadísimas temperaturas, incluso superiores a 1800 °C. Debido a su curva de temperatura/voltaje, los tipo B envían la misma señal para temperaturas de entre 0 °C y 42 °C limitando así su uso a temperaturas por encima de 50 °C.

- Tipo R

Utilizan una unión Pt-Rh, adecuados para la medición de temperaturas de hasta 1300 °C. Cuentan con una baja sensibilidad de 10 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ y su precio es elevado.

- Tipo S

Igual al tipo R en cuanto a temperatura de operación y sensibilidad. Debido a su elevada estabilidad, el tipo S es utilizado para la calibración universal del punto de fusión del oro (1064,43 °C). Su precio también es elevado.

A continuación se procede a representar la información anterior en forma de tabla para mayor claridad en la Tabla 12. Puesto que las temperaturas que se deberán registrar en el gasificador son elevadas, se ha obviado la capacidad de algunos termopares de registrar temperaturas por debajo de 0°C.

Tabla 12: Características de los distintos tipos de termopares

Tipo de termopar	Temperatura máxima	Resistente a oxidación	Precio
B	+1800°C	Sí	Elevado
E	1260°C	Sí	Medio
J	1200°C	No	Medio
K	1372°C	Sí	Bajo
N	1300°C	Sí	Medio
R	1300°C	Sí	Elevado
S	1300°C	Sí	Elevado
T	260°C	Sí	Bajo

La temperatura máxima que debería tener que resistir un termopar en el interior del gasificador está comprendida entre los 1200 y 1300°C. Considerando esto, se descarta irremediablemente la utilización de los termopares tipo E, J y T. En cuanto a la resistencia a la oxidación, uno de los factores más a tener en cuenta debido al entorno donde los queremos instalar, se aprecia que todos los termopares restantes (tipo B, K, N y R) ofrecen una correcta resistencia. El último factor a considerar es, pues, el precio. Disponiendo de una financiación limitada, la tendencia natural es escoger el termopar tipo K. Sin embargo, el número de termopares que se necesita para la monitorización del gasificador es suficientemente pequeño como para considerar que la elección de un tipo u otro de termopar no tendría un impacto significativo en el presupuesto.

Aun así, se debe considerar el hecho de que los otros tipos de termopar no ofrecen ninguna ventaja aprovechable en el proyecto, de modo que se concluye utilizar termopares de tipo K.

Es cierto que debido a que no en todos los puntos de medición se requiere de un termopar capaz de aguantar temperaturas de 1300°C, podría considerarse la opción de adquirir distintos tipos de termopar para cada punto de medición. Aún con todo, no se hará. Los envíos de los distribuidores se realizan normalmente en packs, de modo que es más práctico comprar el número deseado de unidades de un mismo artículo. Aunque no fuera así, como ya se ha dicho, no hay ningún otro tipo de termopar que presentase una clara ventaja frente al termopar de tipo K.

Otra razón para no diversificar el tipo de termopares utilizados es que hacerlo conllevaría adaptar el código para que el micro-controlador pudiera procesar señales con distintas sensibilidades, complicando en gran medida la interpretación de las lecturas.

Si bien es cierto que los termopares tipo K son capaces de resistir elevadas temperaturas, para hacerlo necesitan de cierta protección adicional. Después de contactar con varios distribuidores, se acordó encargar el pedido a la empresa CONATEC de Irún, España. Fruto de las conversaciones entre el equipo del

CITCEA-UPC y los técnicos de la empresa, se resolvió que para las características del gasificador se necesitaría una protección para los termopares de tipo encamisado. Un ejemplo de termopar encamisado se puede observar en la Figura 45.

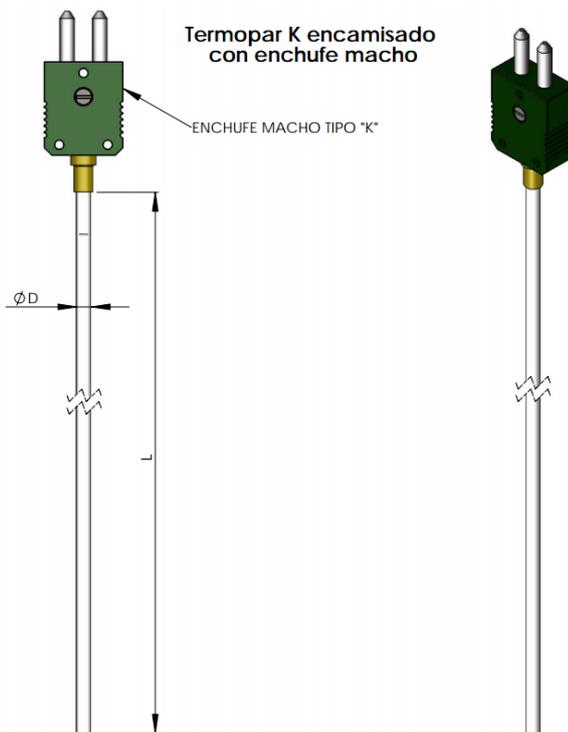


Figura 45: Termopar tipo K con encamisado y enchufe. (CONATEC)

En esencia, se trata de un recubrimiento que protege no solo el extremo, sino toda la longitud de termopar que necesite resistir la elevada temperatura. El aislamiento comúnmente se basa en polvo de óxido de magnesio, muy resistente a las elevadas temperaturas. De este modo, se recubrirá toda la longitud de cable de los termopares que esté expuesta al interior del reactor (CONATEC, 2014).

Adicionalmente, también se debió decidir la longitud del cableado que incorporaría cada termopar. Considerando que todos los cables deben ser capaces de converger en el mismo punto, lugar en el que estará instalada la unidad de control, se estima una longitud necesaria de 2m. Nuevamente, se podría entrar a discutir si es necesaria la misma longitud para todos los termopares, aunque por simple simplificación del pedido y debido a que el impacto en el presupuesto es insignificante para las longitudes a tratar, se decidió unificar la longitud de los cables. Concretamente, el metro de cable encamisado asciende a 8 euros el metro, mientras que el cable desprotegido tiene un coste de 2 euros el metro. Puesto que cada termopar cuenta con una longitud de cableado de 2m., estaríamos hablando de una diferencia de 12€ por termopar. Un ejemplo de modelo de termopar con protección de encamisado y cable se puede ver en la Figura 46.

Termopar K encamisado con salida directa a cable y enchufe macho

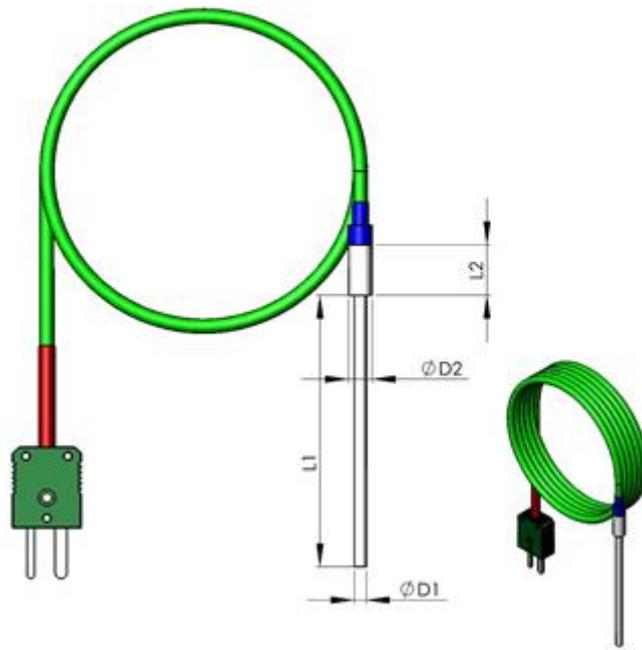


Figura 46: *Termopar tipo K encamisado con salida a cable.*
(CONATEC, 2014)

Tras terminar de definir todas las características que se necesitaban, se recibió de CONATEC el presupuesto del pedido. Dado que los termopares son unas herramientas sensibles y susceptibles a romperse, se decidió duplicar el pedido a fin de disponer de reservas en caso de fallo de alguno de ellos. El pedido se realizó, pues, para un conjunto de diez termopares encamisados y con cable de dos metros. En la Figura 47, mostrada a continuación, se puede observar el presupuesto recibido.

conatec S.A.L.
A-20155180
experts on control

C/GABIRIA Nº 112-114-146 INDUSTRIALDEA DE VENTAS
20305 IRUN - GUIPUZCOA - ESPAÑA
TF. 34 (9)43 633562 FAX. 34 (9)43 633285
http://www.conatec.com e-mail: conatec@conatec.com

Nº9002331 2012

CITCEA- UPC
Solicitante ORIOL PUJOLDEVALL
COMTE DE URGELL, 187
08036 BARCELONA
BARCELONA
Fax
Tfno. 934137432

19409
F-07.01/2
HOJA: 1

OFERTA Nº: 19409
Citar nº de oferta en caso de pedido.

Puede ampliar información sobre nuestros productos en la página de internet: www.conatec.com

FECHA	S/REFERENCIA	COMERCIAL	DIR.	CLIENTE	PROVEEDOR	PORTES	FORMA DE PAGO		
09-12-2014	MAIL 5.12.2014	IKER GONZÁLEZ	B43064			DEBIDOS	PAGO ANTICIPADO ES63 0128 0350 91 0502187462		
PLAZO ENTREGA DESDE CONFIRMACIÓN: 10 DIAS VALIDO PARA EL MES EN CURSO.				FORMA DE ENVIO: SUS MEDIOS		VALIDEZ OFERTA 31.12.2014			
POS	REF. CLI.	CODIGO	CONCEPTO			CT.	EUR	DTO	IMPORTE
1		77331142	ENCAMISADO 1xK TE-150 INCONEL SALIDA CABLE 1xK, AISLADO DE MASA, Ø3x60mm + CASQUILLO METALICO Ø6x40mm + 2m. CABLE KZAD + ENCHUFE MACHO TIPO K			10	19,64		196,40
							196,40 EURO IVA NO INCLUIDO IKER GONZÁLEZ		

En virtud de Ley de Protección de Datos Personales, le informamos que sus datos personales son confidenciales y que forman parte de un fichero de Gestión con la finalidad de gestionar la relación contractual, y remitirle información comercial, inclusive por medios electrónicos. Puede ejercer sus derechos de acceso, rectificación, cancelación y oposición dirigiéndose a Conatec, S.A.L c/Gabiria, 112-20305 Irún junto con su identificación a través del DNI

Figura 47: Presupuesto termopares. (CONATEC, 2014)

4.2.2. Monitorización de la presión

Se procede a comentar la elección de los sensores de presión. Los sensores de presión se utilizan en aplicaciones tanto para ambientes gaseosos como líquidos. Su principio de funcionamiento básico es el de generar una señal eléctrica en función de la presión a la que están expuestos, teniendo esa señal que ser interpretada posteriormente (mismo caso que los termopares).

Existen distintos tipos de sensores de presión. A fin de clarificar el criterio seguido en las decisiones tomadas, se exponen a continuación.

- Sensor de presión absoluta:

Efectúa lecturas de presión relativas al vacío perfecto.

- Medidor de presión:

Mide la presión relativa a la presión atmosférica del lugar de medición. Incorporan un indicador, frecuentemente de aguja. En caso de indicar 0, lo que realmente estará indicando es que el ratio de presiones es 1, y que por consiguiente la presión que se está leyendo es igual a la presión atmosférica.

- Sensor de presión con referencia:

Su principio de funcionamiento es el mismo que el medidor de presión. Sin embargo, este tipo de sensor mide la presión relativa a un valor de presión previamente fijado.

- Sensor de presión diferencial:

Este tipo de sensor mide la diferencia entre dos presiones, cada una registrada por uno de los terminales del sensor. Son especialmente útiles para calcular caídas de presión entre dos puntos del mismo sistema.

Siguiendo el mismo criterio utilizado hasta ahora, se analizarán los sensores utilizados para la unidad de control GCU utilizada por APL. El equipo de técnicos de APL se decidió por usar el sensor de presión *Freescale* MPXV7007. Se trata de un sensor de presión diferencial, lo cual significa que realiza dos lecturas de presión para posteriormente enviar una señal codificada que, al interpretarse, devolverá el ratio entre las dos presiones registradas (*Freescale Semiconductor*, 2005). En la Figura 48 se pueden observar las principales características.

Table 3. Maximum Ratings⁽¹⁾

Rating	Symbol	Value	Unit
Maximum Pressure	P_{max}	75	kPa
Storage Temperature	T_{stg}	-40 to +125	°C
Operating Temperature	T_A	-40 to +125	°C

1. Exposure beyond the specified limits may cause permanent damage or degradation to the device.

Figura 48: Condiciones de operación del sensor de presión. (*Freescale Semiconductor*, 2005)

Como se observa, la máxima temperatura a la que se puede exponer el sensor es de 125°C. Esto convierte en necesario que mientras el gasificador esté en funcionamiento, los sensores de presión se encuentren en todo momento a una distancia prudencial, realizando la medición a distancia. El método utilizado para lograrlo se detallará más adelante en este mismo capítulo. El aspecto del sensor se puede ver en la Figura 49.

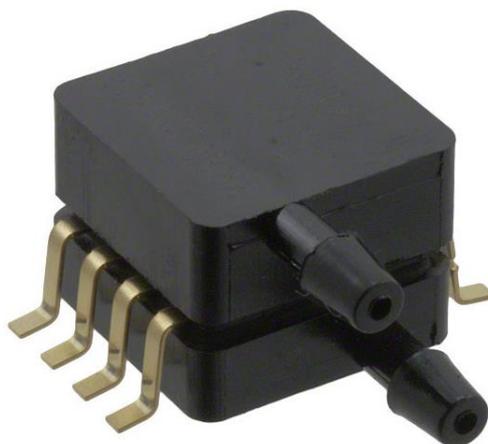


Figura 49: Sensor de presión Freescale MPXV7007.
(Freescale Semiconductor, 2005)

En la anterior figura se aprecia la forma del sensor MPXV-7007. Las dos protuberancias son los terminales de medición de presión, y deberán estar comunicados con los ambientes herméticos en donde se deseará efectuar los registros. En el *datasheet* del sensor también se encuentra más información a considerar. En la Figura 50 se puede apreciar la función de transferencia mediante la cual el sensor enviará la señal de tensión pertinente.

Transfer Function	
Nominal Transfer Value:	$V_{out} = V_S \times (0.057 \times P + 0.5)$ $\pm (\text{Pressure Error} \times \text{Temp. Factor} \times 0.057 \times V_S)$ $V_S = 5.0 \text{ V} \pm 0.25 \text{ Vdc}$

Figura 50: Función de transferencia del sensor de presión
(Freescale Semiconductor, 2005)

Se observa claramente como la tensión de salida que deberá interpretar el micro-controlador está calculada en función a la presión registrada y de un parámetro nombrado Factor de Temperatura. Este factor pretende considerar el grado de error de medición al que puede inducir una temperatura u otra.

Su cálculo también viene especificado en el *datasheet* y se presenta en la Figura 51.

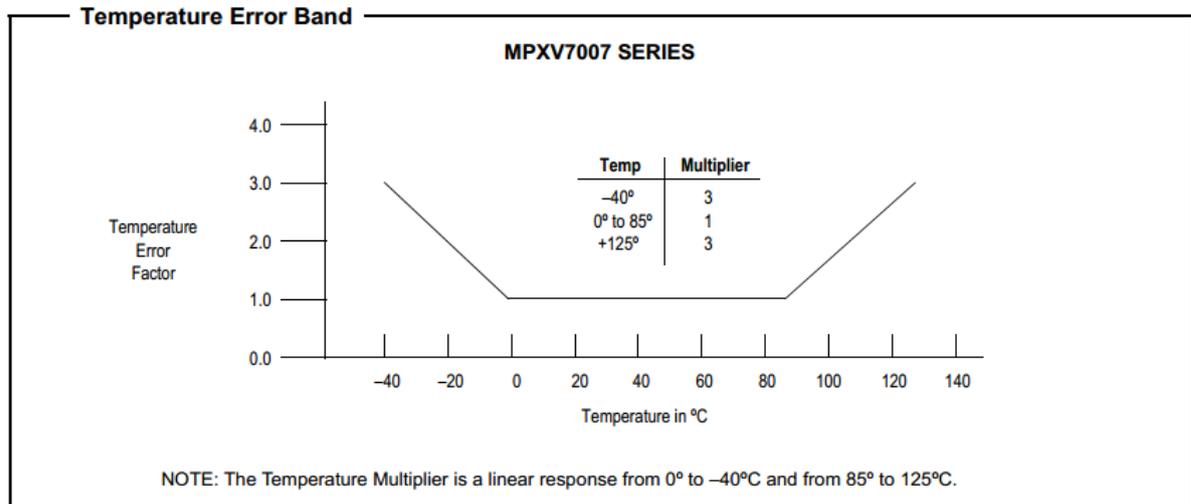


Figura 51: Error de medición de presión según temperatura. (Freescale Semiconductor, 2005)

Si bien en el caso de los termopares no existía ninguna razón para dejar que las decisiones tomadas por APL condicionasen la elección, en el caso de los sensores de presión es un gran privilegio poder contar con un modelo de sensor que ha testeado y probado con éxito su eficacia a la hora de operar con procesos de gasificación. Existe poca información sobre sistemas de monitorización en aplicaciones de gasificación, y la que se encuentra es frecuentemente escueta y poco explicativa. Es por ello que se ha considerado el sensor Freescale MPXV7007 como una opción viable para realizar las medidas de presión del sistema.

Concretamente, el sensor adquirido recibe el nombre de MPXV-7007DP. Las iniciales DP al final del nombre son un acrónimo para *differential pressure*, lo que lo identifica como un sensor de presión diferencial capaz de realizar dos mediciones.

Los sensores se han adquirido a la empresa distribuidora Digi-key Corporation, a través del CITCEA-UPC. Puesto que el estudio realizado ha dado como resultado la necesidad de 5 puntos de medición de presión, se duplicará el pedido a fin de prever cualquier eventualidad técnica que estropee alguno de los sensores.

En la Figura 52 se puede consultar el presupuesto relativo a los sensores.

Quantity	Image	Part Number	Description	Unit Price	Extended Price
10		MPXV7007DP-ND	PRESSURE SENSOR DUAL PORT 8-SOP	13.17500	\$131.75

Figura 52: Presupuesto sensores de presión. (Digi-key Corporation)

Seguidamente se procederá a explicar el método de instalación de los sensores de temperatura y presión en el interior del gasificador. Por razones de optimización, se aprovecharán las perforaciones de modo que cada punto de medición designado pueda alojar tanto una lectura de temperatura como una de presión, sin requerir de perforaciones específicas para cada uno de los tipos.

Puesto que el método empleado para hacer coexistir un termopar y un sensor de presión se ha aplicado en los cinco puntos de presión, primero se detallará minuciosamente. Posteriormente se proseguirá explicando las particularidades de cada punto.

4.3. Instalación del sistema de monitorización

Los sensores de presión pueden realizar una medición con tan solo estar conectados de alguna manera con el espacio que se quiera monitorizar. Basta con que dicho espacio sea estanco o no tenga fugas que distorsionen la medición. El caso de los termopares, por desgracia es distinto. Para que un termopar realice eficientemente la lectura de un punto, el extremo del termopar debe encontrarse justo en el epicentro del perfil de temperaturas que se quiere captar. Es por ello que se ha tenido que idear un sistema para que los termopares conserven su posición de forma continuada. Esto, en un entorno con un caudal de gas constantemente circulando y con partículas sólidas en proceso de desmembración, puede suponer una dificultad.

Para solventar este problema, se realizará una perforación en la pared exterior, y se introducirá un tubo metálico que permita encauzar el termopar y conducirlo hasta el punto que se desee realizar la medición. Dichos tubos deberían tener el diámetro estrictamente justo como para permitir el paso del termopar por ellos. Los termopares encamisados adquiridos de CONATEC tienen un diámetro de 3mm. (CONATEC, 2014), así que un diámetro de tubo de medio centímetro sería más que suficiente, y no interferiría negativamente con los procesos en ejecución en el interior del gasificador. Este tubo se hará sobresalir hacia el exterior, en donde se sellará herméticamente con masilla, permitiendo únicamente el paso del cable del termopar.

Llegados a este punto, se puede considerar solventado el sistema de medición de temperatura. Sin embargo, lo verdaderamente interesante es aprovechar este montaje para medir la presión. Esto mismo se realizará agregando una derivación al tramo de tubo que sobresaldrá en el exterior. Se tratará de un pequeño conducto de 3mm. de diámetro, y al que se conectará un tubo flexible de igual diámetro que conectará con los sensores de presión en la unidad de control. De este modo se ha creado un espacio hermético en donde una única perforación permite alojar dos sensores en cada punto de medición. Para mayor claridad, en la Figura 53 se representa gráficamente el método utilizado.

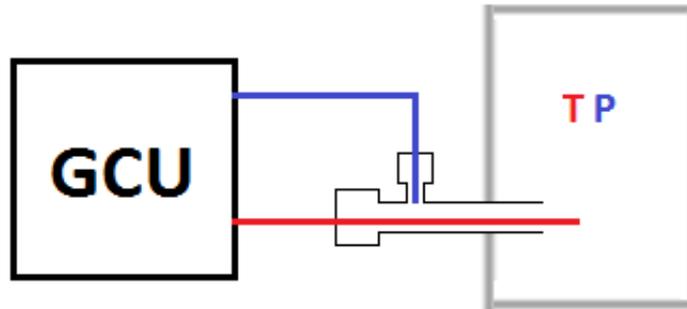


Figura 53: Método de instalación de un punto de doble medición.
(Fuente propia)

En el sistema representado en la Figura 53, se puede apreciar un sistema cerrado siendo monitorizado gracias al uso de sensores de temperatura y de presión. Como se puede observar, el tubo que comunica con el sensor de presión, representado por el color azul, no es introducido lo suficiente como para sufrir los efectos adversos de estar expuesta a demasiada temperatura, sino que únicamente conecta la derivación del tubo metálico con la unidad de control. El termopar, en cambio, sí que es introducido y encauzado por el propio tubo hasta alcanzar el punto de medición preciso que se desea.

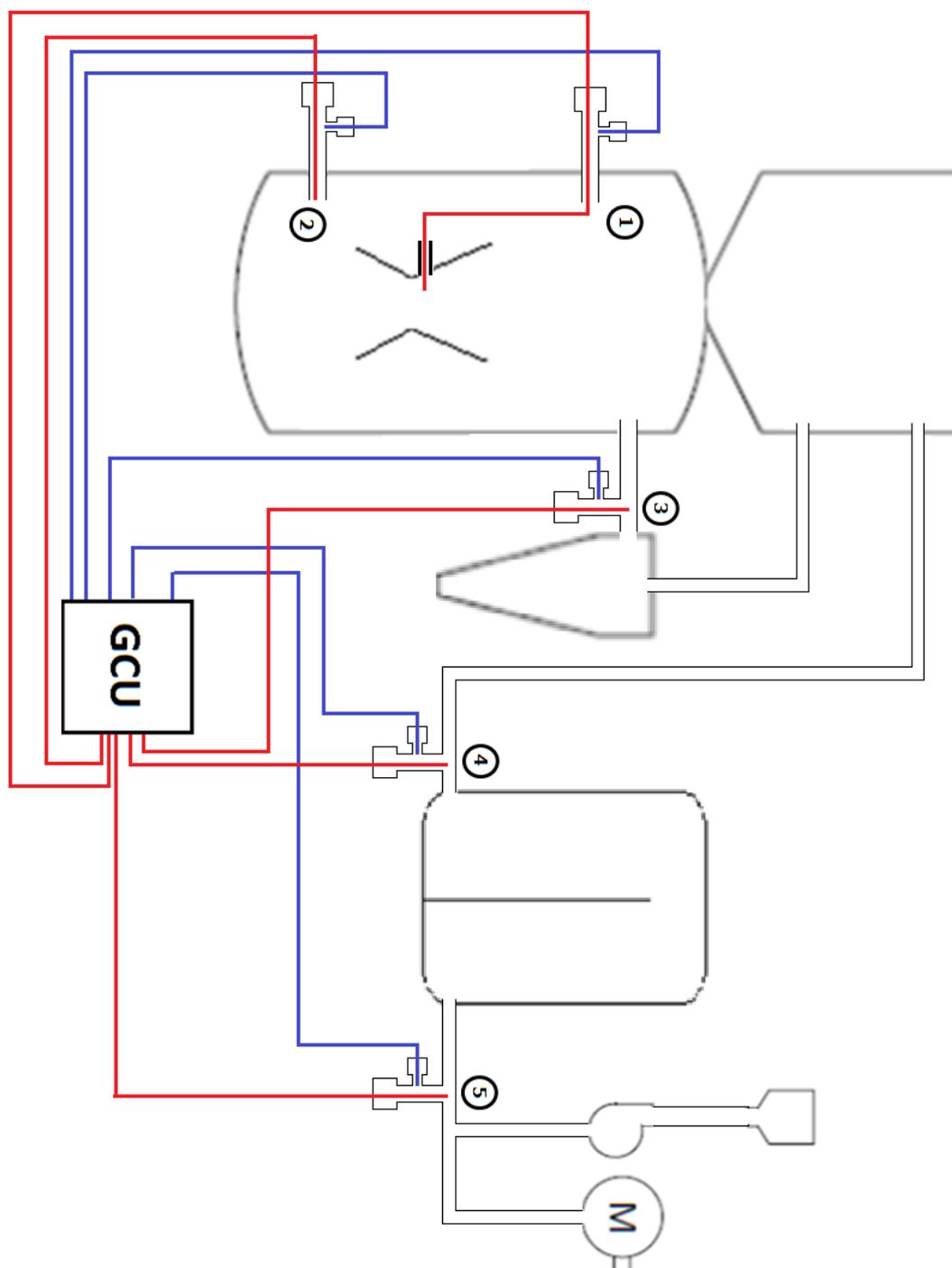


Figura 54: Instalación de los puntos de doble medición en el gasificador. (Fuente propia)

Tal y como se observa en el diagrama de la Figura 54, el único termopar cuya instalación se aleja del resto es el instalado en el punto de medición nº1. Para ese caso concreto, se necesitará instalar dos tubos metálicos. El primero, será el de entrada al reactor, y contará con una derivación para poder conectar el sensor de presión. El segundo tubo metálico se instalará en la garganta del reactor,

justo encima de la zona de reducción. Este tubo tendrá la función de encauzar y dirigir el termopar hasta el punto exacto de medición, justo en el centro del diámetro de la garganta. Para ello será necesario realizar una perforación en la garganta que permita la soldadura del tubo y el paso del termopar.

4.4. Elección de la placa de control

Una vez definido el conjunto de sensores que integrarán el sistema, es necesario escoger la placa que alojará el micro-controlador. El primer criterio a seguir para dicha elección, es contabilizar el número de entradas que se requerirá para alojar todos los sensores del sistema. Para este proyecto se ha definido que, en una primera instancia, el número de sensores a alojar será de diez, cinco de temperatura y cinco de presión. Sin embargo, no se puede descartar que en un futuro se necesite o se desee ampliar el número de sensores, ya sea para realizar lecturas adicionales de temperatura o presión, o bien para incorporar nuevos tipos de sensores al sistema. Es por eso que la placa deberá estar ligeramente sobredimensionada.

El segundo de los criterios a la hora de elegir el producto a adquirir es la simplicidad de su manejo. En otras palabras, el grado de dificultad que tendrá que hacer frente el usuario para programar la interpretación de todo sensor que se conecte al sistema. Tras la realización de un breve estado del arte (que no se incluye en este proyecto por alejarse demasiado de la temática principal), se apreció que las placas de la marca Arduino ofrecen una gran variedad de ventajas frente a otros productos. Entre su gama de productos se encuentran placas con el micro-controlador incorporado, conexión USB ya instalada y con la función de cada pin claramente especificada. Sin embargo, la principal ventaja es la vasta cantidad de documentos, archivos y segmentos de código que se encuentran a disposición de cualquiera. La comunidad de usuarios sigue una política *opensource*, según la cual la mayoría de los códigos de programación creados se cuelgan en la red con completa disponibilidad y acceso, y que actualmente ya forman una enorme biblioteca on-line.

De entre las placas que oferta Arduino, y que se pueden consultar en la Figura 55, por lo tanto, se consideró cual se ajustaba más a las necesidades del proyecto.

Name	Processor	Operating Voltage/Input Voltage	CPU Speed	Analog In/Out	Digital IO/PWM	EEPROM [KB]	SRAM [KB]	Flash [KB]	USB
Uno	ATmega328	5 V/7-12 V	16MHz	6/0	14/6	1	2	32	Regular
Due	AT91SAM3X8E	3.3 V/7-12 V	84 MHz	12/2	54/12	-	96	512	2 Micro
Leonardo	ATmega32u4	5 V/7-12 V	16MHz	12/0	20/7	1	2.5	32	Micro
Mega 2560	ATmega2560	5 V/7-12 V	16MHz	16/0	54/15	4	8	256	Regular
Mega ADK	ATmega2560	5 V/7-12 V	16MHz	16/0	54/15	4	8	256	Regular
Micro	ATmega32u4	5 V/7-12 V	16MHz	12/0	20/7	1	2.5	32	Micro
Mini	ATmega328	5 V/7-9 V	16MHz	8/0	14/6	1	2	32	-
Nano	ATmega168	5 V/7-9 V	16MHz	8/0	14/6	0.512	1	16	Mini-B
	ATmega328	5 V/7-9 V	16MHz	8/0	14/6	1	2	32	Mini-B
Ethernet	ATmega328	5 V/7-12 V	16MHz	6/0	14/4	1	2	32	Regular
Esplora	ATmega32u4	5 V/7-12 V	16MHz	-	-	1	2.5	32	Micro
ArduinoBT	ATmega328	5 V/2.5-12 V	16MHz	6/0	14/6	1	2	32	-
Flo	ATmega328P	3.3 V/3.7-7 V	8MHz	8/0	14/6	1	2	32	Mini
		3.3 V/3.35-12 V	8MHz	6/0	14/6	0.512	1	16	-
Pro (168)	ATmega168	3.3 V/3.35-12 V	8MHz	6/0	14/6	0.512	1	16	-
Pro (328)	ATmega328	5 V/5-12 V	16MHz	6/0	14/6	1	2	32	-
		3.3 V/3.35-12 V	8MHz	6/0	14/6	0.512	1	16	-
Pro Mini	ATmega168	5 V/5-12 V	16MHz	6/0	14/6	0.512	1	16	-
		2.7-5.5 V	8MHz	6/0	14/6	0.512	1	16	-
LilyPad	ATmega168V	2.7-5.5 V	8MHz	6/0	14/6	0.512	1	16	-
	ATmega328V	V/2.7-5.5 V	8MHz	6/0	14/6	0.512	1	16	-
LilyPad USB	ATmega32u4	3.3 V/3.8-5V	8MHz	4/0	9/4	1	2.5	32	Micro
LilyPad Simple	ATmega328	2.7-5.5 V	8MHz	4/0	9/4	1	2	32	-
		V/2.7-5.5 V	8MHz	4/0	9/4	1	2	32	-
LilyPad SimpleSnap	ATmega328	2.7-5.5 V	8MHz	4/0	9/4	1	2	32	-
Yun	ATmega32u4	5 V	16MHz	12/0	20/7	1	2.5	32	Micro

Figura 55: Placas de control Arduino. (Página web de Arduino)

Aplicando el criterio de sobredimensionamiento, se descartaron todos los productos que no tuvieran un mínimo de diez entradas analógicas. Habiendo reducido en gran medida las opciones, se evaluaron más concretamente los productos de manera individual. En lo referente a la conexión que debía ofrecer la placa, era interesante que incorporase un puerto USB convencional, ya que aumentaba en gran medida la adaptabilidad del sistema a posibles cambios de equipamiento.

Solo había dos productos que cumpliesen estas características entre la lista de ofertados, el modelo *Arduino Mega 2560* y el *Arduino Mega ADK*. Tras una breve investigación, se apreció que el modelo *ADK* es una versión posterior del *2560*, con la única variación en el aumento de la rapidez de realización de algunos procesos secundarios como el de reseteo.

El pedido se realizó a través de la empresa distribuidora *RS Components*, que disponía en stock del modelo *Mega 2560*.

Descripción	Cantidad	Precio unitario	Coste
 <p><u>Arduino Mega Atmel Atmega2560 MCU Board</u> Código RS 715-4084 Fabricante Arduino N° ref. fabric. A000067 Estado RoHS Conforme</p>	2	38,76 € Unidad	77,52 €

Figura 56: Presupuesto placas de control. (*RS Components*)

Como se observa en la Figura 56, se adquirieron dos unidades, en pos de prevenir cualquier interrupción en el proyecto a causa de un mal funcionamiento o avería de uno de los dispositivos. Se puede apreciar una vista detallada del producto en la Figura 57.

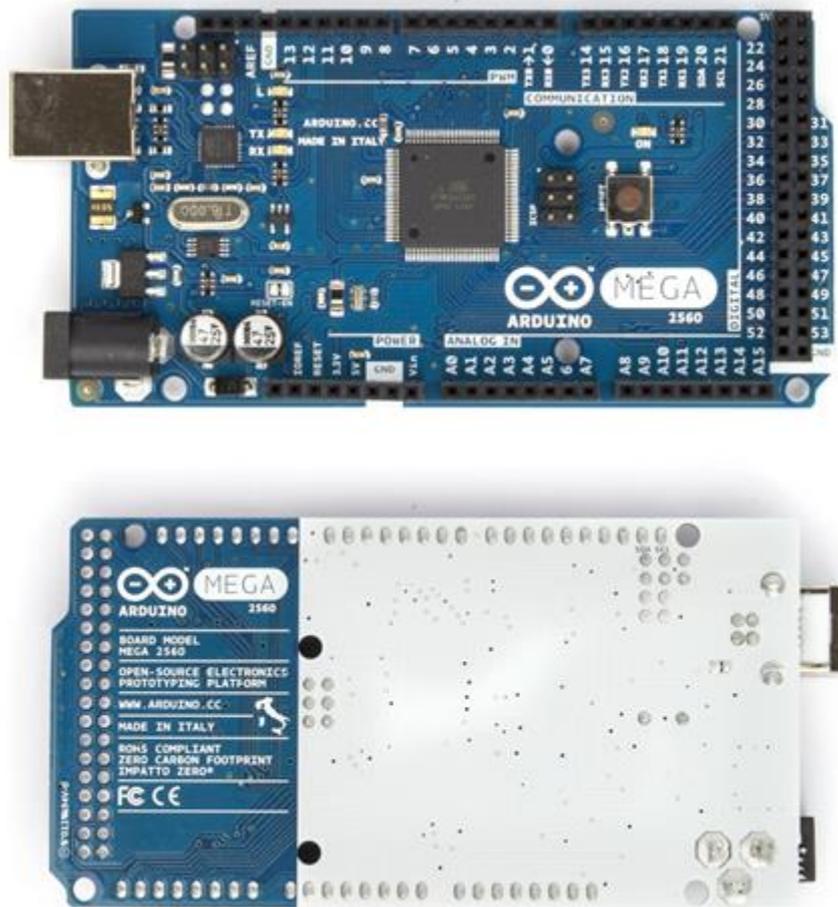


Figura 57: Placa Arduino Mega Atmel Atmega 2560. (*Página web de Arduino*)

Tal y como se aprecia en la anterior figura y de la misma forma que se ha observado en la comparativa de productos, el modelo Mega 2560 dispone de 16 entradas analógicas y 54 digitales. La principal diferencia entre estos dos tipos de entrada es el método de comunicación que adoptan para relacionarse con el micro-controlador.

Las entradas de tipo analógico comunican la información mediante el envío de un valor determinado de tensión, situado entre $-V_{cc}$ y $+V_{cc}$. Este valor concreto será el que recibirá el micro-controlador, que en función del segmento de código que se haya cargado, interpretará para obtener la información deseada. Las entradas de tipo analógico son más lentas y caras que las entradas digitales, y por ello, más escasas.

Las entradas de tipo digital, en cambio, no envían un determinado valor de tensión, sino que comunican el estado de la señal. Es decir, entre el intervalo $-V_{cc}$ y $+V_{cc}$, una entrada digital será capaz de enviar dos resultados distintos: *high* para el valor máximo de tensión y *low* para el valor mínimo. Se observa por lo tanto que el proceso que realizan es de discretización, reduciendo cualquier información a la clasificación entre los dos estados.

4.5. Acondicionamiento de las señales

Disponiendo ya de los sensores que realizarán las mediciones y de la placa que contiene el micro-controlador al que se cargará el software de lectura e interpretación, únicamente falta asegurarse de que las distintas señales llegarán a la unidad de control de forma limpia y clara. En el caso de los sensores de presión no hay ningún problema, puesto que se alojarán justo al lado del micro-controlador. Sin embargo, no es el caso de los sensores de temperatura.

Como ya se ha detallado previamente en este mismo capítulo, los termopares irán situados justo en los puntos en que se necesite efectuar las lecturas. Esto impone que toda señal de temperatura deberá viajar a través de dos metros de longitud de cable antes de llegar al micro-controlador. Por si fuera poco como ya se ha comentado, la señal de variación de tensión que envían los termopares es tremendamente pequeña, del orden de mV. Por todo ello, parece más que seguro poder afirmar que la señal de los termopares llegaría al micro-controlador de una forma dispersa y con gran cantidad de ruido, cosa que dificultaría en gran medida el procesamiento de la información, hecho que no se puede tolerar en un sistema de monitorización.

Por estas razones, se resolvió añadir al sistema de monitorización un componente adicional que garantizase el correcto procesamiento de las señales de temperatura: una placa de amplificación de señales para termopares. En esencia, esta placa sirve de nexo entre el enchufe del termopar y la placa de control, depurando la señal entrante.

Tras una búsqueda de productos, se escogió un modelo de eficacia comprobada que además asegura buena comunicación con el micro-controlador ATmega2560 que incorpora la placa de control adquirida. El modelo escogido fue la placa amplificadora MAX31855v2.0, mostrada en la Figura 58.

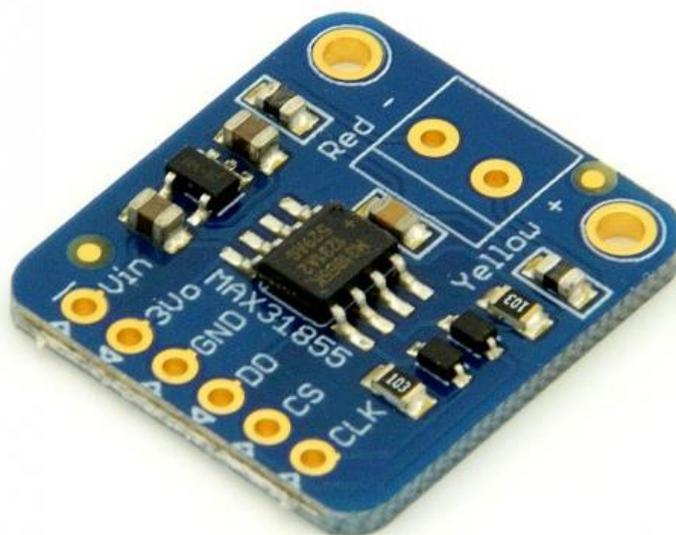


Figura 58: Placa amplificadora MAX31855v2.0. (Digi-key Corporation)

Aprovechando el contacto establecido con la empresa Digi-Key Corporation para la compra de los sensores de presión, se incluyó en el pedido un set de amplificadores que permitiesen procesar las señales de cuantos termopares tuviéramos. Nuevamente, se adoptó una política de previsión de averías, por lo que se dobló el tamaño del pedido, igualando el número de termopares encargados, como se aprecia en la Figura 59.

Quantity	Image	Part Number	Description	Unit Price	Extended Price
10		1528-1000-ND	EVAL BOARD FOR MAX31855	13.45500	\$134.55
Subtotal					\$134.55

Figura 59: Presupuesto placas amplificadoras. (Digi-key Corporation)

El principio de funcionamiento del MAX31855v2.0 es sencillo. El dispositivo está ideado para funcionar en compañía de un micro-controlador externo, como es el caso del que incorpora la placa de control de Arduino. Antes de procesar las tensiones termoeléctricas enviadas por los termopares, es necesario compensar la diferencia entre la lectura realizada por la parte fría del termopar (la temperatura ambiente) y la temperatura de referencia fijada en 0°C. En este proyecto se utilizarán termopares tipo K, que tienen una sensibilidad aproximada de 41 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$. Es por ello que se deberá ajustar la función de transferencia hasta que la señal fría recibida del termopar se asemeje lo máximo posible a la temperatura ambiente. Cuando se logre, se podrá considerar que la lectura se está realizando de un modo óptimo.

EVALUACIÓN ECONÓMICA

A lo largo de la realización de este trabajo se ha comentado en diversas ocasiones los distintos costes asociados a la adquisición y fabricación de ciertos componentes. En esta sección se intentará detallar dichos costes con tal de obtener una visión general del impacto económico del proyecto a partir de la Tabla 13.

Tabla 13: Costes detallados del proyecto.

Concepto	Unidades	Coste	Subtotal (€)
Costes de personal			0 €
Aprendizaje teórico	200 h	0 €/h	-
Aprendizaje SolidWorks	80 h	0 €/h	-
Elaboración de las piezas y planos	100 h	0 €/h	-
Elaboración de la memoria escrita	200 h	0 €/h	-
Costes de fabricación y montaje			6779,78 €
Fabricación y ensamblaje del gasificador	-	4639,56 €	4639,56 €
Grupo motor-generator	1	1600 €/u	1600 €
Placa de control	2	38,76 €/u	77,52 €
Termopares	10	19,64 €/u	196,40 €
Sensores de presión	10	13,175 €/u	131,75 €
Amplificadores de señal	10	13,455 €/u	134,55 €
Desplazamientos			570 €
Desplazamiento a Tallers d'Aspiració	4	40 €/viaje	160 €
Desplazamiento a Lleida (furgoneta)	1	390 €/viaje	390 €
Desplazamiento a Cabriels	2	10 €/viaje	20 €
Total	-	-	7349,78 €

Para la realización de este análisis se ha decidido no contabilizar las fuentes de financiación económica recibidas, como las becas de las que han sido beneficiarios parte del equipo del proyecto o el dinero recogido mediante la campaña de *crowdfunding*. De este modo, el resultado de 7349,78 € pretende reflejar el coste asociado del proyecto si un usuario desvinculado del CITCEA-UPC decidiera fabricar y ensamblar un gasificador siguiendo las pautas presentes en este trabajo. Por las mismas razones, también se ha apartado del cálculo la ingente cantidad de horas de ingeniería invertidas en el desarrollo del proyecto, que al no recibir remuneración, no tienen un impacto económico real.

Hay, sin embargo, una gran cantidad de costes imposibles de calcular de antemano, como los derivados de la adquisición de piezas de repuesto, los transportes adicionales, o dependiendo de qué distribuidor se contacte, incluso impuestos y aranceles.

Capítulo 5:

CONCLUSIONES

5.1. Conclusiones

Si bien la gasificación es una tecnología cuyos inicios se remonta siglos atrás, constituye una de las formas de generación eléctrica del panorama energético actual cuyo potencial está más desaprovechado. Por consiguiente, la información disponible en lo referente a construcción de gasificadores es escasa y en muchos casos, poco precisa. Las pocas empresas que han realizado una idea de negocio se han adueñado de prácticamente la totalidad del mercado, y la evolución paulatina de sus modelos va acorde al método de ensayo y error, corrigiendo siempre los errores y puntos flacos de la versión inmediatamente anterior.

Fruto de los conocimientos adquiridos durante la realización del estado del arte, se puede afirmar que la opción constructiva que mejor respondía a las necesidades del proyecto era la construcción de un gasificador de tiro invertido o *downdraft*.

En cuanto a los objetivos planteados de forma general, se ha llevado efectivamente a cabo el diseño, modelado en tres dimensiones y construcción de un completo sistema de gasificación, el cual permite la conversión de biomasa en energía eléctrica.

Respondiendo a los objetivos específicos de este proyecto, se ha ideado un sistema de limpieza de gases mediante el cual se puede acondicionar el gas de síntesis generado en el gasificador. Este sistema de limpieza estará integrado por un ciclón y un filtro de partículas, que permitirán al gas ser introducido en el motor de combustión. También se ha llevado a cabo el diseño de un sistema de monitorización que permita realizar un seguimiento de las condiciones de trabajo a lo largo del sistema de gasificación. Este sistema estará integrado por una GCU formada por una placa de control unida a un conjunto de sensores. Para la monitorización de la temperatura se utilizarán termopares tipo K en combinación con amplificadores que permitan refinar la señal. Para la monitorización de la presión, se utilizarán sensores diferenciales de presión. Para su instalación física se realizarán modificaciones constructivas que permitan a cada sensor operar en un entorno aceptable para su resistencia térmica.

Resultado de este proyecto se obtendrá un gasificador operativo perfectamente capaz de satisfacer parte de las necesidades energéticas de la población de Goundi. Su integración en la vida cotidiana de Goundi, promete una revitalización social, económica y energética de la zona, permitiendo que sus habitantes

proyecten su agricultura hasta un crecimiento estimulado por la reutilización de sus residuos agrarios en forma de combustible para el gasificador.

Como ya se ha comentado al inicio de las conclusiones, la principal dificultad que se ha tenido que afrontar en la realización de este proyecto es la arraigada desinformación que se encuentra entorno a la gasificación. El presente trabajo supone un peldaño más en la escalera que permita a gente de todo el planeta plantearse seriamente la construcción de su propio gasificador, sea para satisfacer el consumo energético de zonas aisladas, o simplemente como método de aprovechamiento de residuos.

5.2. Trabajos futuros

Tras la finalización del proyecto se abre un completo abanico de temáticas en las que centrar futuros trabajos.

En primer lugar, se deberá coordinar el ensamblaje final de todos los elementos fabricados en el taller. Será a partir de ese momento cuando se dará por finalizada la construcción del gasificador, y se podrán iniciar las pruebas de funcionamiento y los tests de extracción de potencia.

Se deberá comprobar la eficacia del sistema de monitorización, y programar la placa de control para poder interpretar la señal entrante del conjunto de sensores. Así mismo, el sistema se debería complementar con algún tipo de interfaz gráfica, en la que el usuario pudiera observar a tiempo real la evolución de los parámetros monitorizados.

Con la obtención de resultados tangibles, se abrirá un área completamente nueva, en la que se podrá comprobar si es posible crear un modelo de simulación que permita predecir el comportamiento del gasificador según distintos tipos de combustible o distintas cargas de potencia. Este modelo, que se podría realizar en *Matlab* o mediante algún otro software de simulación, en caso de ser eficaz, supondría una herramienta nueva e innovadora sin ningún tipo de precedente publicado.

Tras la finalización de las pruebas y el envío del gasificador a la África subsahariana, el equipo del CITCEA-UPC dispondrá de unos conocimientos y experiencia que pocos grupos de investigación han tenido el privilegio de poder adquirir. Conocimientos y experiencia que, emulando las actuaciones de APL, podrían perfectamente servir para desarrollar un nuevo modelo de gasificador corrigiendo todo los puntos conflictivos que se observen en el funcionamiento del primero, colocando en este caso un nuevo peldaño en el progreso de esta prometedora tecnología.

Fecha: Barcelona, enero de 2015.

Firma: Oriol Pujoldevall Sánchez de Toledo

Capítulo 6:

BIBLIOGRAFIA

6.1. Referencias bibliográficas

- All Power Labs. 2013. *Personal Scale Power*.
- All Power Labs. 2014. *Run an Engine with the GEK*.
- American Iron and Steel Institute. 1977. *High-temperature characteristics of stainless steel*.
- Amrein, David L. 2000. *How to select and mantain a cyclone for maximum efficiency*.
- Ana Lisbeth Galindo, Electo Silva Lora , Rubenildo Viera Andrade, Sandra Yamile Giraldo, Rene Lesme Jaén, Vladimir Melian Cobas. 2013. *Biomass gasification in a downdraft gasifier with a two-stage air supply: Effect of operating conditions on gas quality*.
- BESEL, S.A. 2007. *Biomasa: Gasificación*.
- Central Intelligence Agency. 2014. *The World Factbook*.
- Centre de Cooperació per al Desenvolupament de la UPC. 2015. *Página Web www.upc.edu/ccd/* (accessed January 2015).
- CONATEC. 2014. *Captadores de temperatura*.
- Couto Nuno et al., Rouboa Abel, Silva Valter, Monteiro Eliseu, Bouziane Khalid. 2013. *Influence of the biomass gasification processes on the final composition of syngas*.
- FAO Forestry Department. 1986. *Wood gas as engine fuel*.
- Freescale Semiconductor, Inc. 2005. *Integrated Silicon Pressure Sensor On-Chip Signal Conditioned, Temperature Compensated and Calibrated*.
- Gonzalez, Natalia Elizabeth Fonseca. 2003. *Estado del arte del uso del gas de gasificación termoquímica de Biomasa en motores de combustión interna alternativos*.
- IEA Energy Technology Essentials. 2007. *Biomass for Power Generation and CHP*.
- Malik, Khalid. 2013. *Informe sobre Desarrollo Humano 2013*.
- Mason, Jim. 2010. *GEK Wiki: Drum Filter and Scrubber*.
- Mason, Jim. 2014. *The Gasifier Control Unit*.

- Mujumdar, Arun S. 2006. *Handbook of industrial drying*.
- MyDpG. 2003. *Página Web* www.misionydesarrolloparagoundi.com. (accessed September 2014)
- P. A. Funk, S.E Hughs, G.A. Holt. 2001. *Dust cyclone design*.
- Solar Energy Research Institute. 1988. *Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine Systems*.
- The Japan Institute of Energy. 2002. *The Asian Biomass Handbook*.
- Venselaar, Jan. 1982. *Design Rules for Downdraft Wood Gasifiers: A Short Review*.
- Wang, Lingjuan. 2004. *Theoretical study of cyclone design*.
- Wang, T. P. 1990. *Thermocouple Materials*.
- Woolcock, Patrick J. y Brown, Robert C. 2012. *A review of cleaning technologies for biomass-derived syngas*.

6.2. Bibliografía de Consulta

- All Power Labs. 2014. <http://wiki.gekgasifier.com/> (accessed October 2014)
- Arduino. 2014. <http://arduino.cc/> (accessed November 2014)
- ScienceDirect. 2014. <http://www.sciencedirect.com/> (accessed 2014)



Escola Universitària d'Enginyeria
Tècnica Industrial de Barcelona
Consorci Escola Industrial de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

**Volumen II:
Anexos**



**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN
DE UN SISTEMA DE
GENERACIÓN ELÉCTRICA
MEDIANTE GASIFICACIÓN
DE BIOMASA”**

TFG presentado para optar al título de GRADO en
INGENIERÍA DE LA ENERGÍA
por **Oriol Pujoldeval Sánchez de Toledo**

Barcelona, 13 de enero de 2015

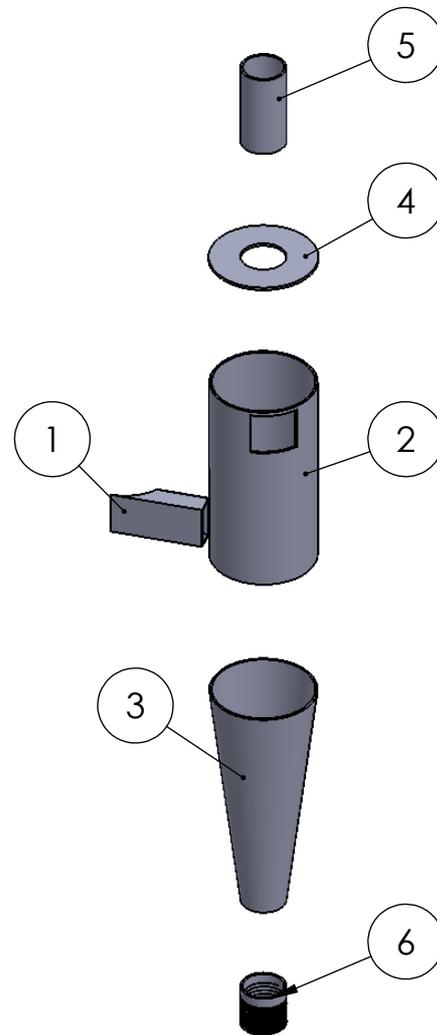
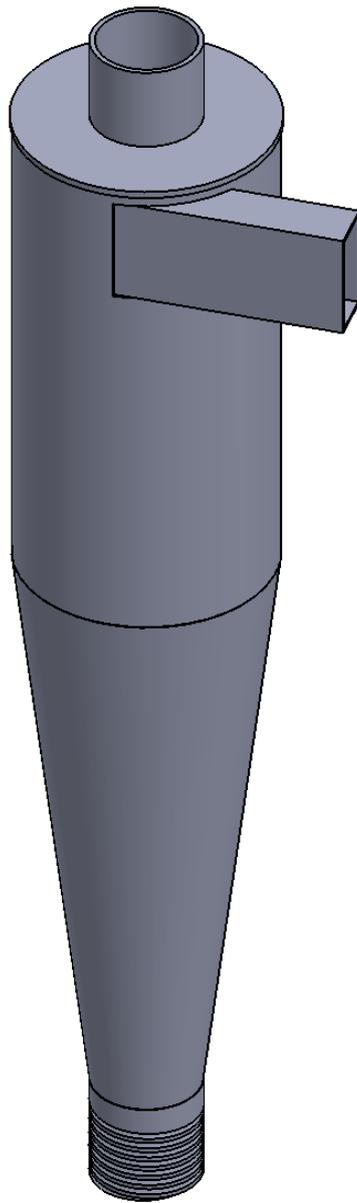
Director: Antoni Sudrià i Andreu
Departament d'Enginyeria Elèctrica (DEE)
Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A. Planos.....	3
Ciclón	4
Vista general ciclón	4
Conducto de entrada	5
Cuerpo cilíndrico	6
Cuerpo cónico.....	7
Tapa superior	8
Conducto de salida	9
Conducto a recipiente	10
Filtro de partículas.....	11
Vista general filtro de partículas	11
Cuerpo del filtro	12
Pared interior	13
Tapa inferior y fijación	14
Malla interior	15
Tapa superior	16
ANEXO B. Documentación gráfica de las piezas fabricadas	17
1. Base de la garganta	18
2. Garganta (imagen 1).....	19
3. Garganta (imagen 2).....	19
4. Reactor interior (imagen 1)	20
5. Reactor interior (imagen 2)	21
6. Cubierta exterior (imagen 1)	22
7. Cubierta exterior (imagen 2)	23
8. Orificio 1: sacudimiento de la parrilla.....	23
9. Orificio 2: retirada de las cenizas	24
10. Tapa para Orificio 1	25
11. Tapa para Orificio 2.....	25
12. Partes del reactor (Garganta, Reactor interior, Cubierta exterior).....	26

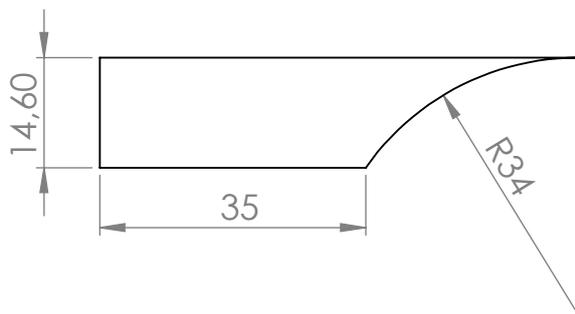
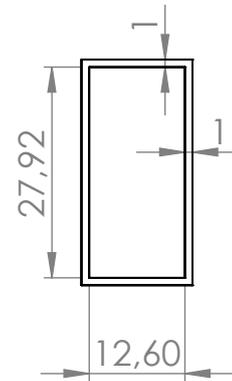
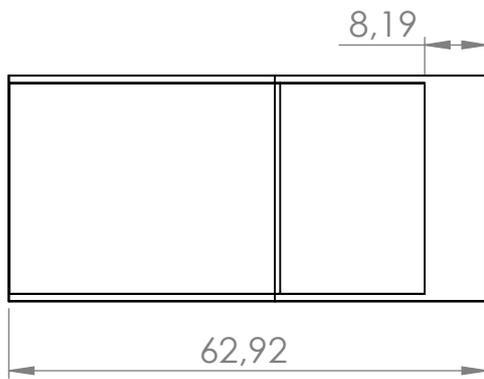
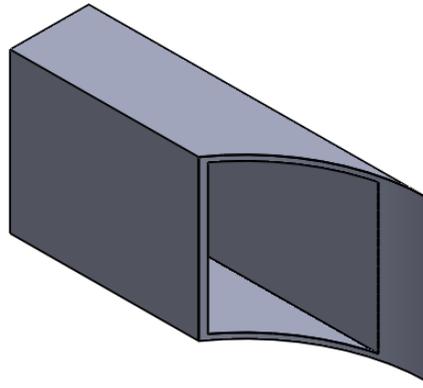
13. Salida de la cubierta al ciclón	27
14. Placa conectora	27
15. Dosificador de biomasa (imagen 1)	28
16. Dosificador de biomasa (imagen 2)	28
17. Parte superior de la cubierta exterior (capa 1)	29
18. Parte superior de la cubierta exterior (capa 2)	29
19. Disco superior del reactor	30
20. Ensamblaje del Reactor y el Dosificador (imagen 1)	30
21. Ensamblaje del Reactor y el Dosificador (imagen 2)	31
22. Interior del Reactor	32
23. Depósito de biomasa y cubierta exterior a escala	32
24. Ensamblaje del Reactor y el Depósito	33
25. Ensamblaje del Ciclón y el Reactor (imagen 1).....	34
26. Ensamblaje del Ciclón y el Reactor (imagen 2).....	35
27. Filtro de partículas (imagen 1).....	36
28. Filtro de partículas (imagen 2).....	37
29. Conjunto de componentes.....	37

ANEXO A: PLANOS

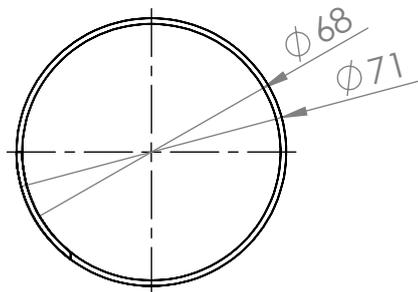
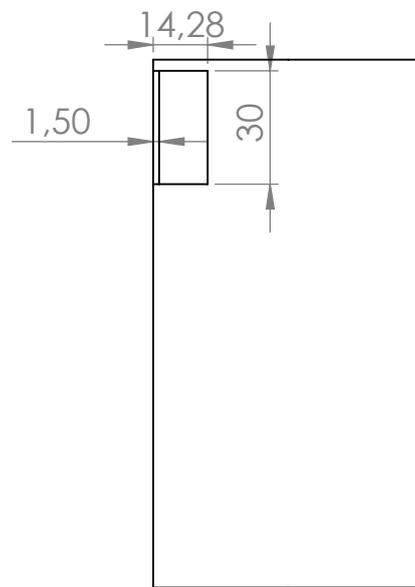
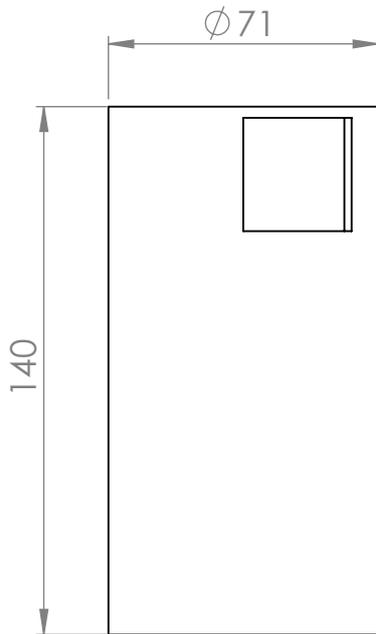
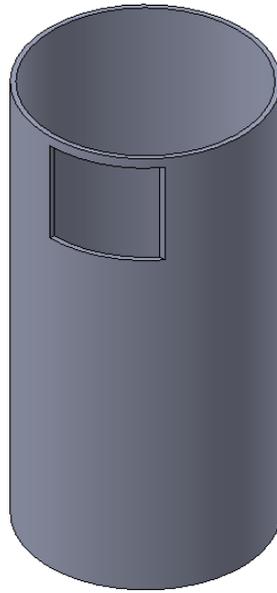


1. Conducto de entrada
2. Cuerpo cilíndrico
3. Cuerpo cónico
4. Tapa superior
5. Conducto de salida
6. Conducto a recipiente

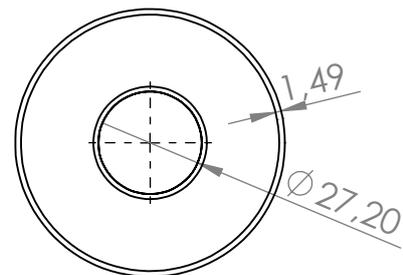
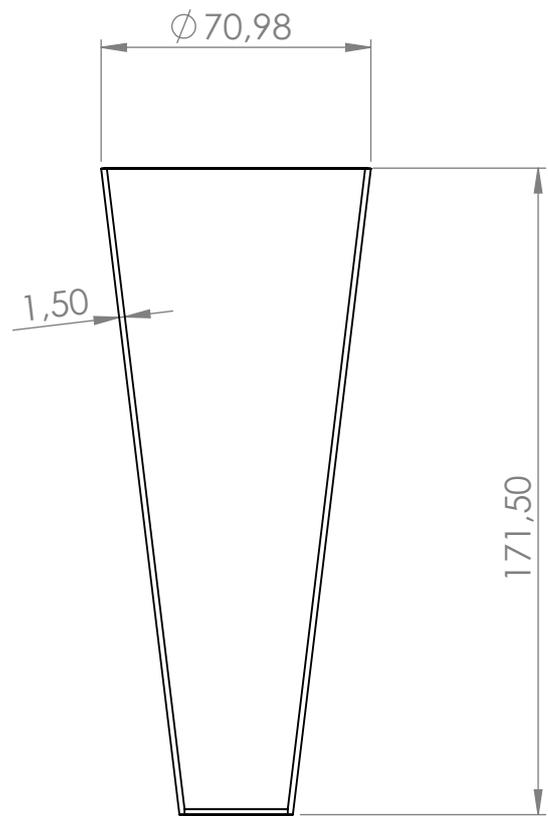
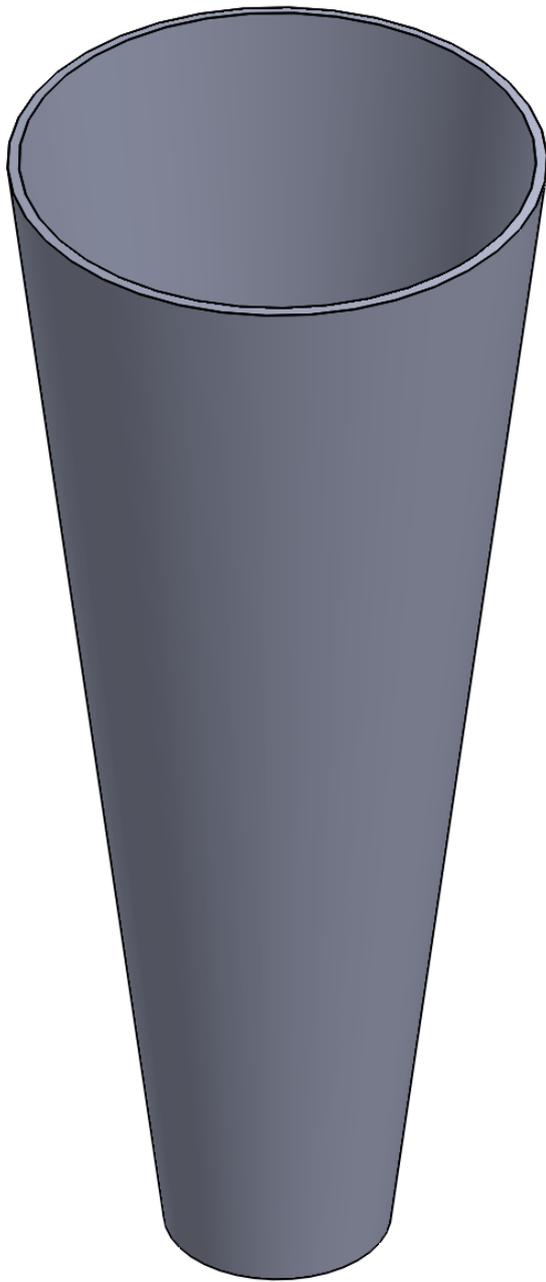
Logotipo:  Escola Universitaria d'Enginyeria Tècnica Industrial de Barcelona Universitat Politècnica de Catalunya	N.º de plano: 1	Título del plano: Vista general ciclón. (Ciclón)	Autor: Oriol Pujoldevall Sánchez de Toledo
Título del proyecto: Diseño y construcción de un sistema de generación eléctrica mediante gasificación de biomasa		Revisión: CITCEA-UPC	Fecha: 13 de enero de 2015
Escala: 1:2	Material: Distintos componentes	Observaciones: La escala de la vista explosionada es de 1:5	A4 4



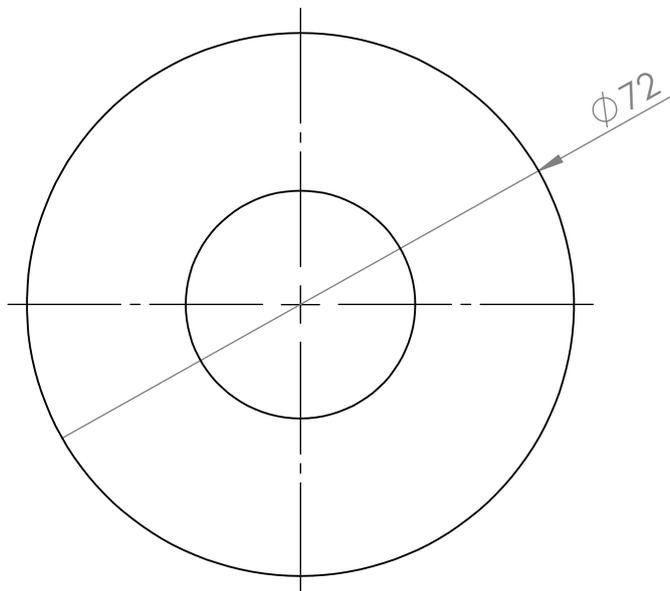
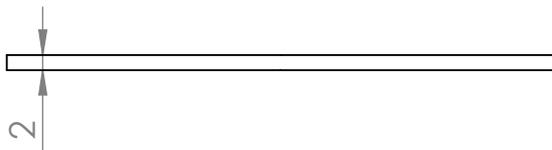
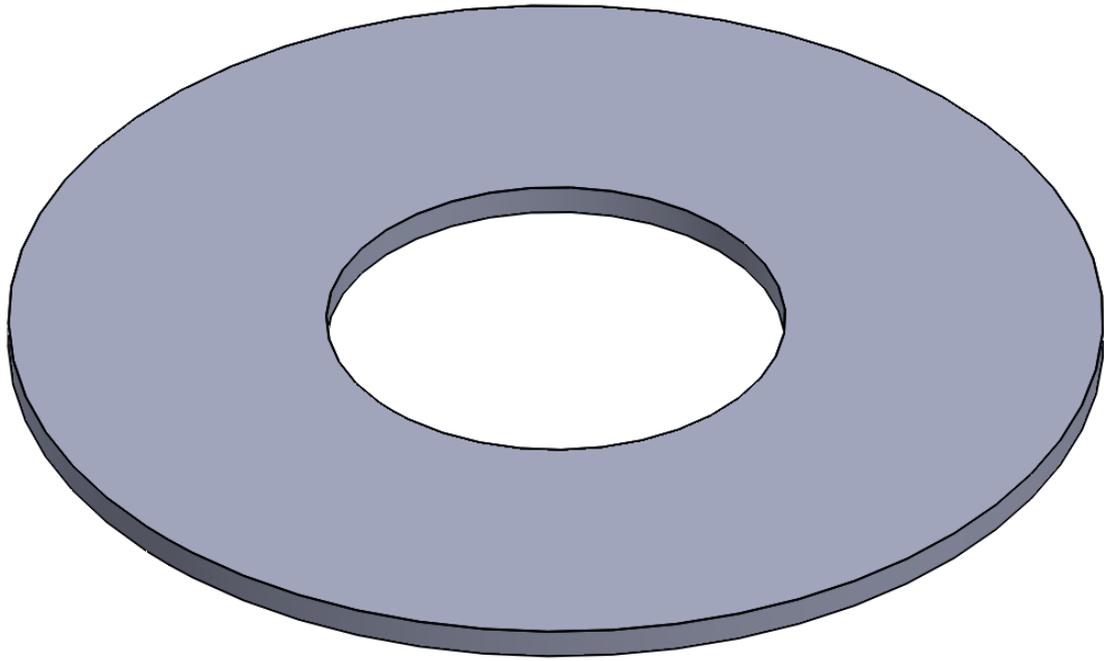
Logotipo:  Escola Universitària d'Enginyeria Tècnica Industrial de Barcelona Màgister: Escola Industrial de Barcelona UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA	N.º de plano: 2	Títol del plano: Conducto de entrada. (Ciclón)	Autor: Oriol Pujoldevall Sánchez de Toledo
Títol del projecte: Disseny i construcció d'un sistema de generació elèctrica mitjançant gasificació de biomassa		Revisió: CITCEA-UPC	Fecha: 13 de enero de 2015
Escala: 1:1	Material: AISI 304	Observaciones: -	A4 5



Logotipo: 	N.º de plano: 3	Título del plano: Cuerpo cilíndrico. (Ciclón)	Autor: Oriol Pujoldevall Sánchez de Toledo
Título del proyecto: Diseño y construcción de un sistema de generación eléctrica mediante gasificación de biomasa		Revisión: CITCEA-UPC	Fecha: 13 de enero de 2015
Escala: 1:2	Material: AISI 304	Observaciones: -	A4 6

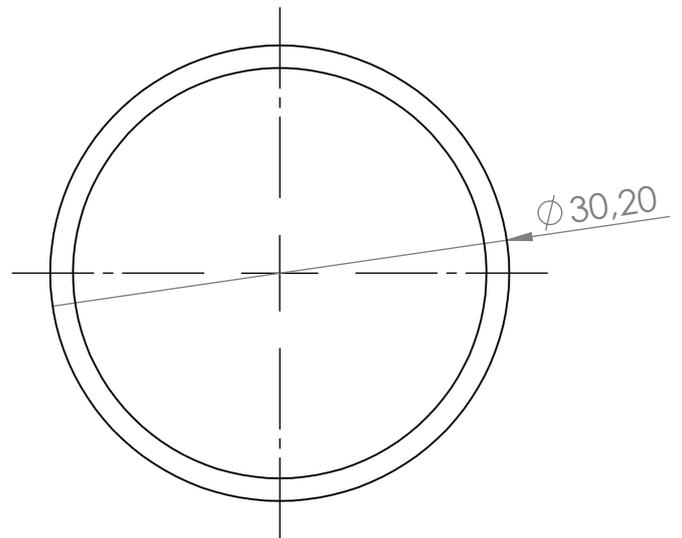
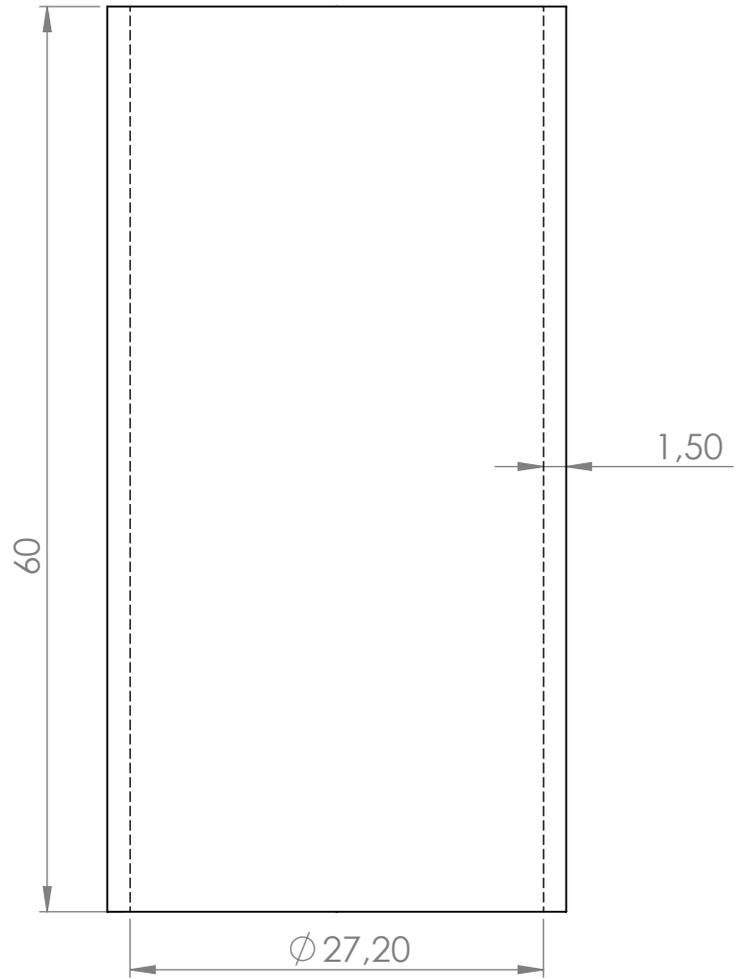
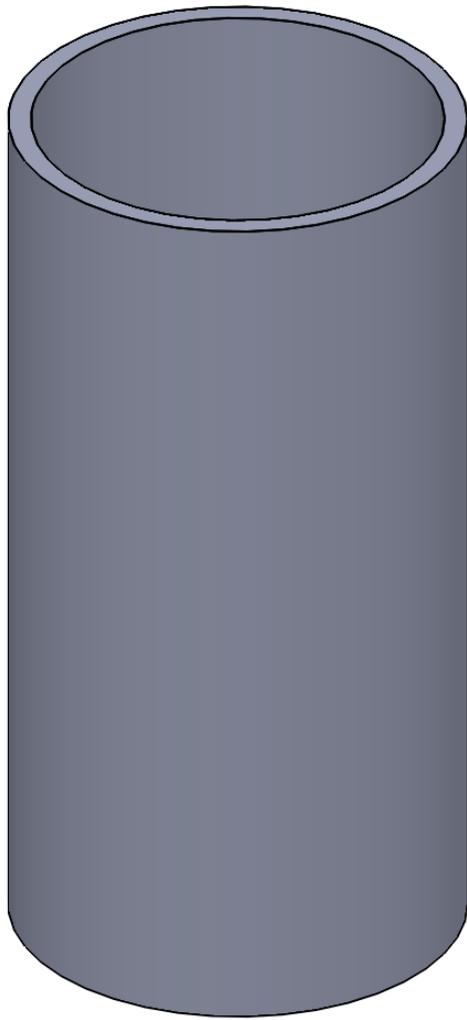


Logotipo:   Escola Universitaria d'Enginyeria Tècnica Industrial de Barcelona Consorci Escola Industrial de Barcelona UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA	N.º de plano: 4	Títol del plano: Cuerpo cónico. (Ciclón)	Autor: Oriol Pujoldevall Sánchez de Toledo
Títol del projecte: Diseño y construcción de un sistema de generación eléctrica mediante gasificación de biomasa		Revisión: CITCEA-UPC	Fecha: 13 de enero de 2015
Escala: 1:2	Material: AISI 304	Observaciones: La vista en tres dimensiones está a escala 1:1	A4 7

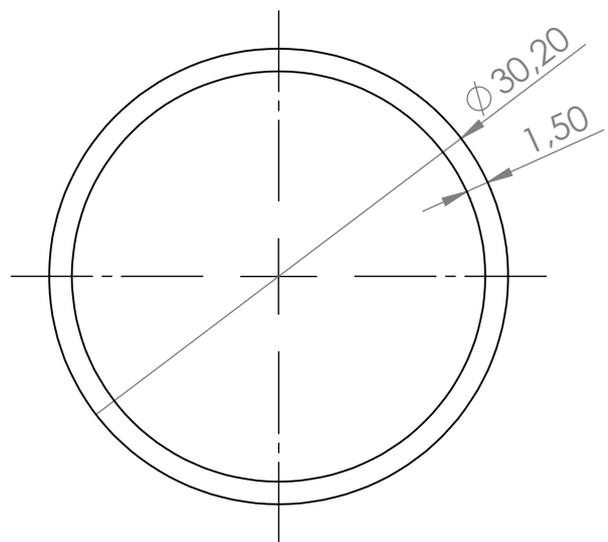
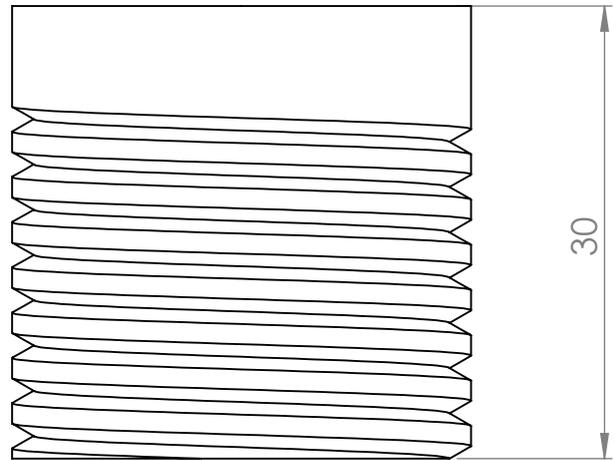
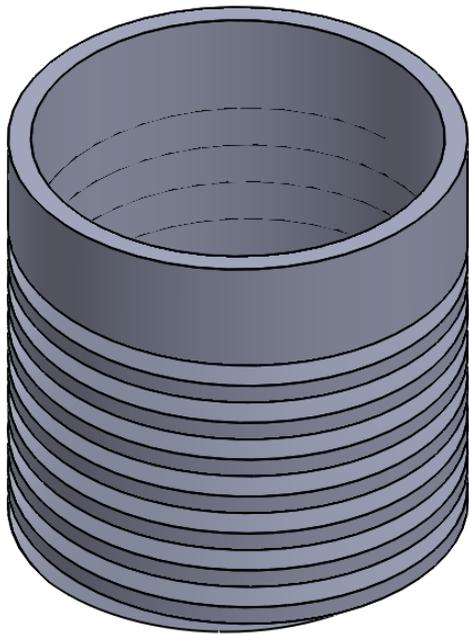


Logotipo:   Escola Universitaria d'Enginyeria Tècnica Industrial de Barcelona Superior, Escola Industrial de Barcelona UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA	N.º de plano: <p style="text-align: center;">5</p>	Títol del plano: <p style="text-align: center;">Tapa superior (Ciclón)</p>	Autor: <p style="text-align: center;">Oriol Pujoldevall Sánchez de Toledo</p>
Títol del projecte: Diseño y construcción de un sistema de generación eléctrica mediante gasificación de biomasa		Revisión: <p style="text-align: center;">CITCEA-UPC</p>	Fecha: <p style="text-align: center;">13 de enero de 2015</p>
Escala: <p style="text-align: center;">1:1</p>	Material: <p style="text-align: center;">AISI 304</p>	Observaciones: La escala de la vista en 3 dimensiones es de 2:1	

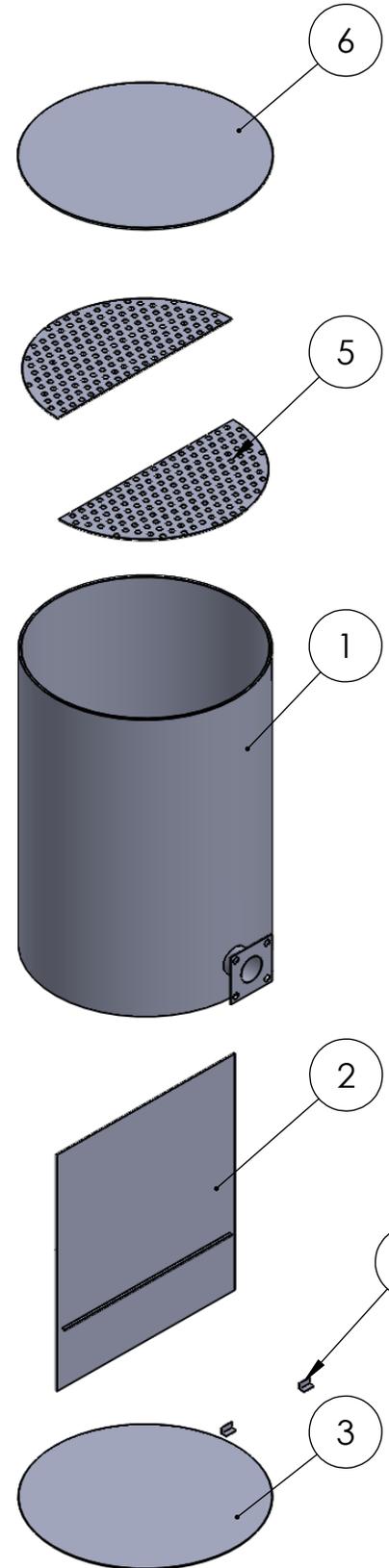
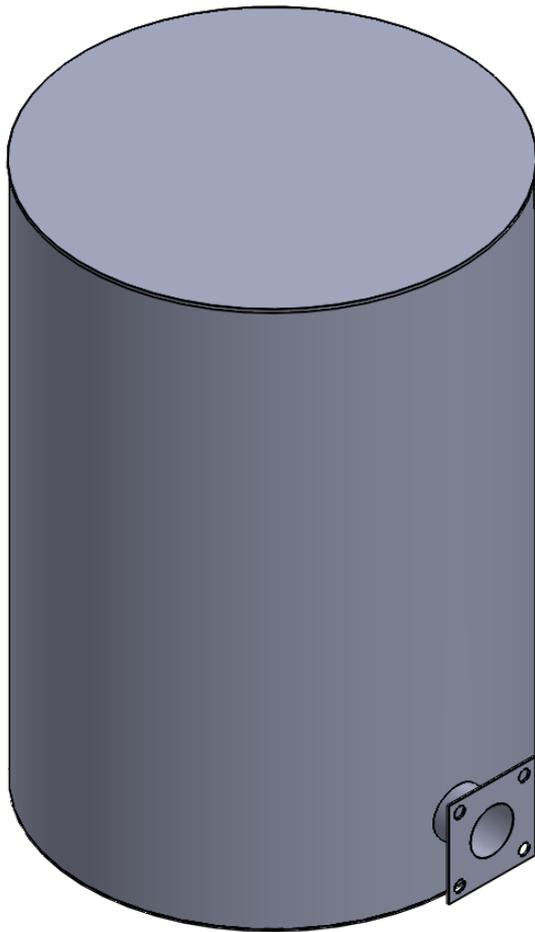
A4



Logotipo:   Escola Universitària d'Enginyeria Tècnica Industrial de Barcelona Consorci Escola Industrial de Barcelona UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA	N.º de plano: 6	Títol del plano: Conducto de salida. (Ciclón)	Autor: Oriol Pujoldevall Sánchez de Toledo
Título del proyecto: Diseño y construcción de un sistema de generación eléctrica mediante gasificación de biomasa		Revisión: CITCEA-UPC	Fecha: 13 de enero de 2015
Escala: 2:1	Material: AISI 304	Observaciones: -	A4 9



Logotipo:   Escuela Universitaria d'Enginyeria Tècnica Industrial de Barcelona Universitat Politècnica de Catalunya UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA	N.º de plano: 7	Título del plano: Conducto a recipiente. (Ciclón)	Autor: Oriol Pujoldevall Sánchez de Toledo
Título del proyecto: Diseño y construcción de un sistema de generación eléctrica mediante gasificación de biomasa	Revisión: CITCEA-UPC	Fecha: 13 de enero de 2015	
Escala: 2:1	Material: AISI 304	Observaciones: La rosca no ha sido acotada debido a que el único requisito de diseño es el de encajar con el recipiente escogido.	



1. Cuerpo del filtro
2. Pared interior
3. Tapa inferior
4. Fijación
5. Malla interior
6. Tapa superior

Logotipo:



N.º de plano:

8

Título del plano:

Vista general filtro de partículas

Autor:

Oriol Pujoldevall Sánchez de Toledo

Título del proyecto:

Diseño y construcción de un sistema de generación eléctrica mediante gasificación de biomasa

Revisión:

CITCEA-UPC

Fecha:

13 de enero de 2015

Escala:

1:10

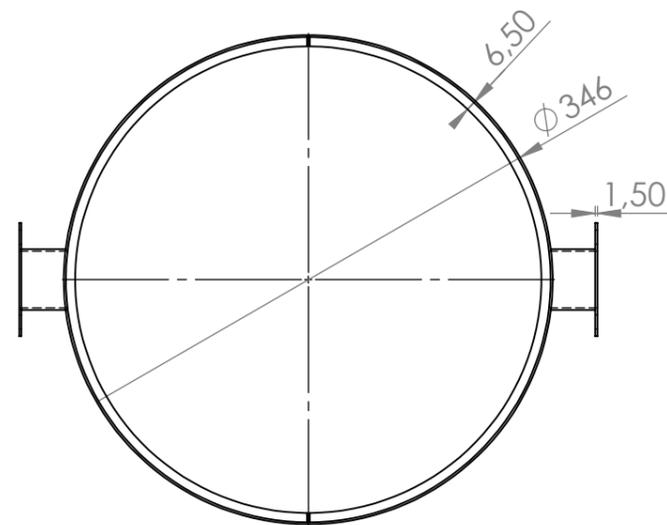
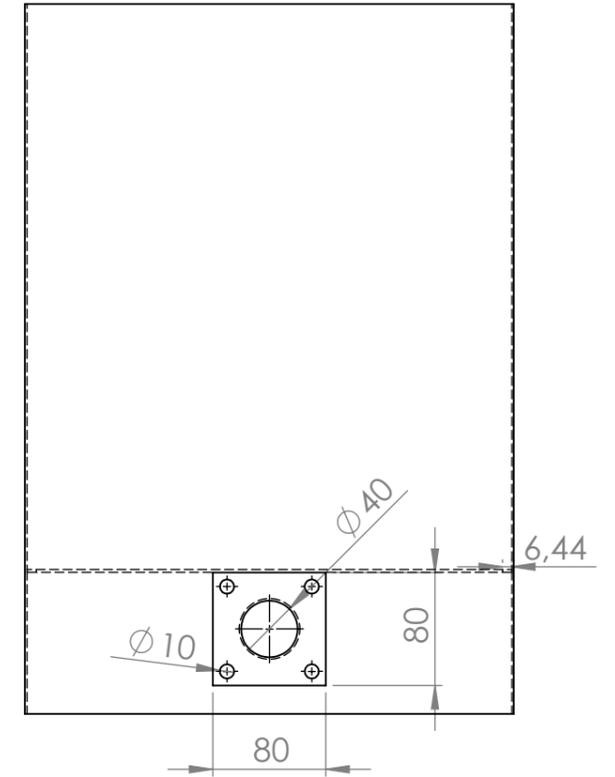
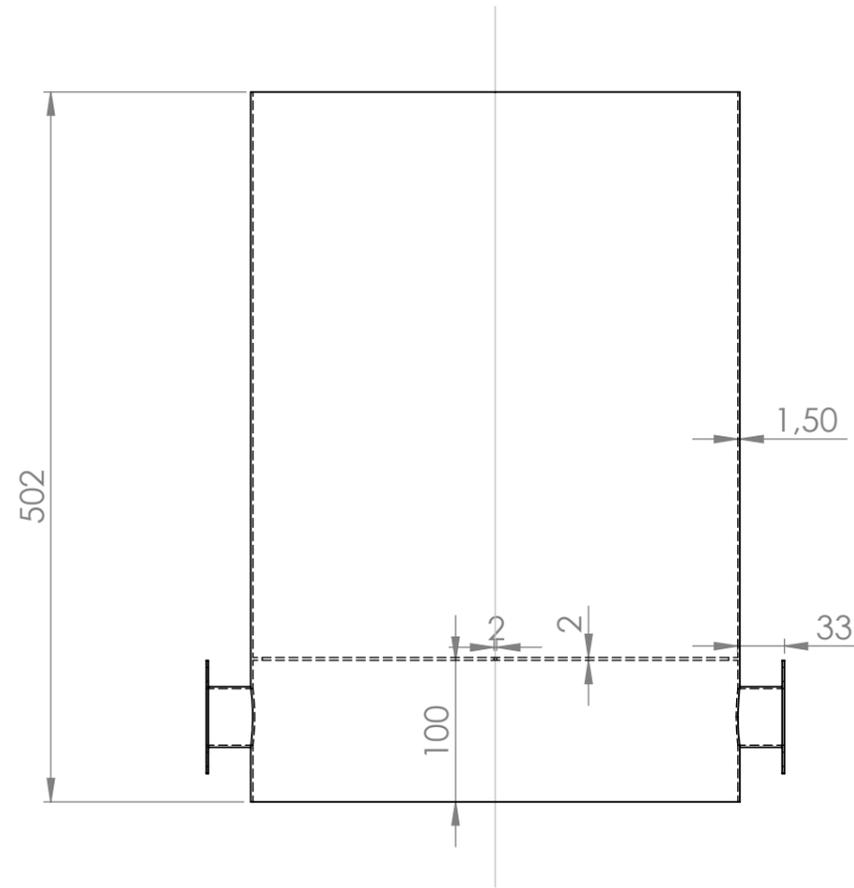
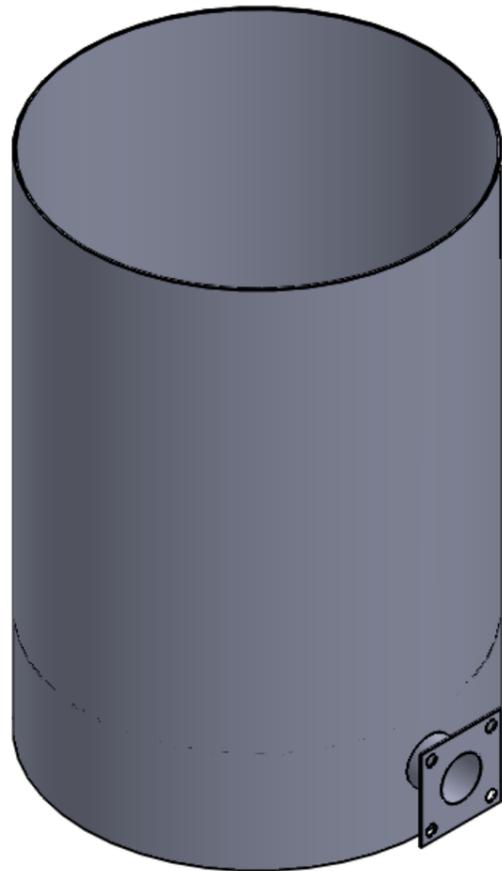
Material:

Distintos componentes

Observaciones:

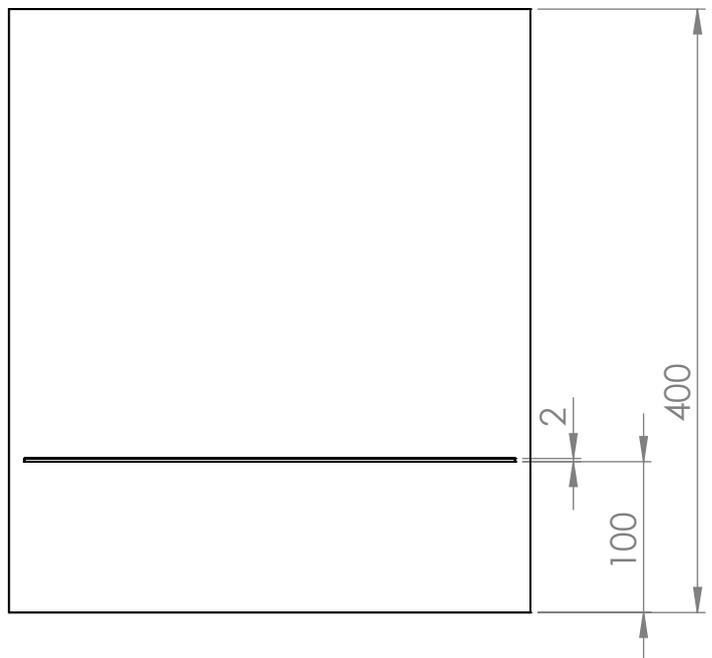
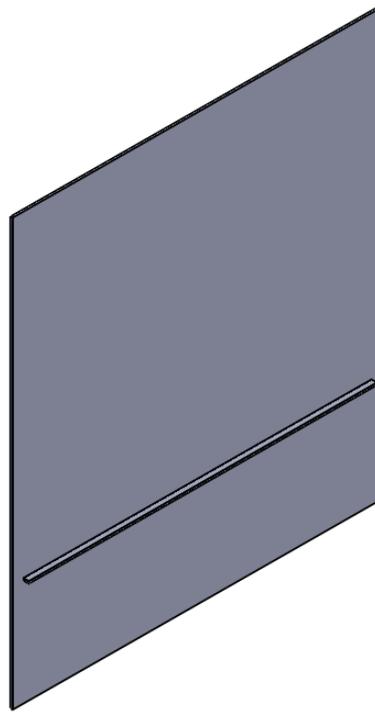
La escala de la vista no explosionada es de 1:5

A4



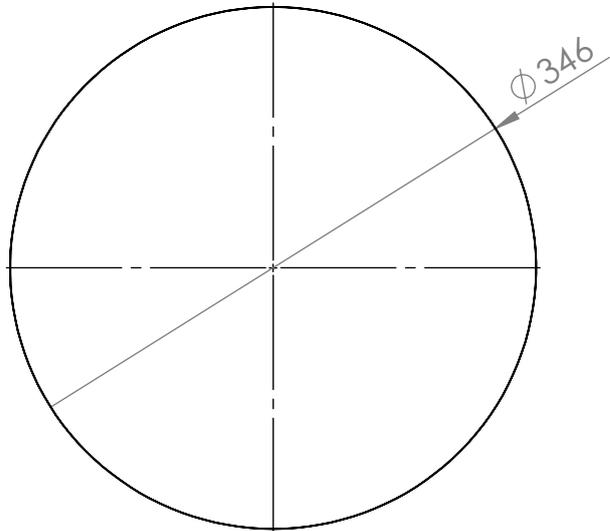
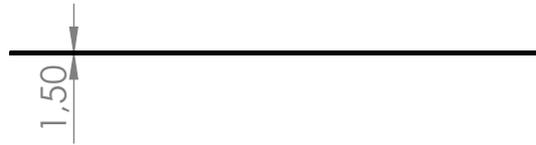
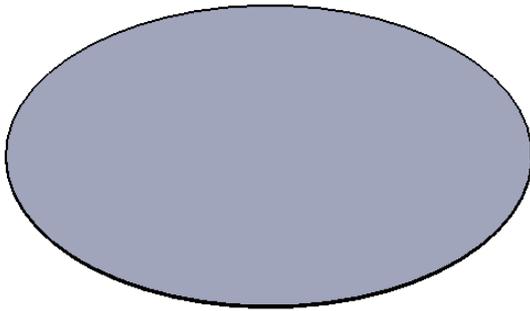
Nota de diseño:
 Pudiéndose considerar como un ensamblaje, se le da al Cuerpo del filtro un tratamiento de pieza, debido a la simplicidad de los elementos que lo forman. De este modo, sera tratado como un único cuerpo sólido y como tal se acota en el presente plano.

Logotipo: 	N.º de plano: 9	Título del plano: Cuerpo del filtro. (Filtro)	Autor: Oriol Pujoldevall Sánchez de Toledo
Título del proyecto: Diseño y construcción de un sistema de generación eléctrica mediante gasificación de biomasa		Revisión: CITCEA-UPC	Fecha: 13 de enero de 2015
Escala: 1:5	Material: AISI 304	Observaciones: -	A3

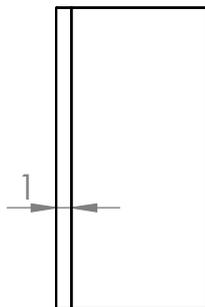
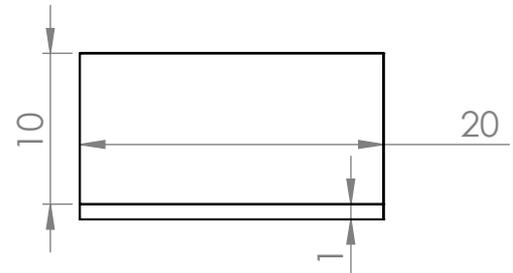
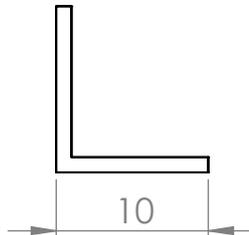
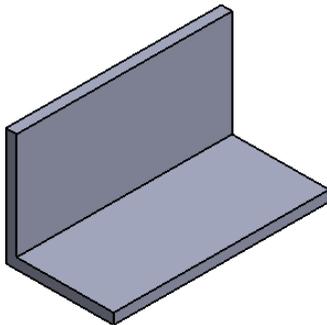


Logotipo:  Escola Universitària d'Enginyeria Tècnica Industrial de Barcelona Departament d'Enginyeria Industrial de Barcelona UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA	N.º de plano: 10	Títol del plano: Pared interior. (Filtro)	Autor: Oriol Pujoldevall Sánchez de Toledo
Títol del projecte: Disseny i construcció d'un sistema de generació elèctrica mitjançant gasificació de biomassa		Revisió: CITCEA-UPC	Fecha: 13 de enero de 2015
Escala: 1:5	Material: AISI 304	Observaciones: -	

Tapa inferior



Fijación



Logotipo:



N.º de plano:

11

Título del plano:

Tapa inferior y Fijación. (Filtro)

Autor:

Oriol Pujoldevall Sánchez de Toledo

Título del proyecto:

Diseño y construcción de un sistema de generación eléctrica mediante gasificación de biomasa

Revisión:

CITCEA-UPC

Fecha:

13 de enero de 2015

Escala:

1:5 Tapa inferior
2:1 Fijación

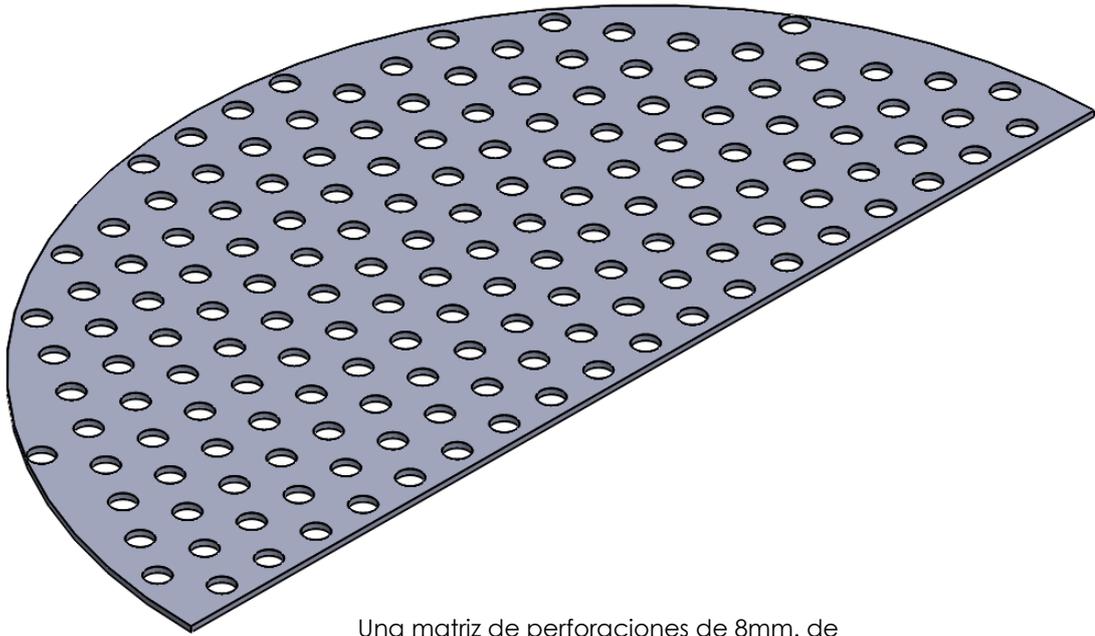
Material:

AISI 304

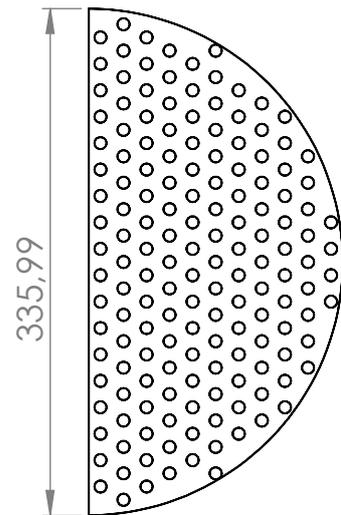
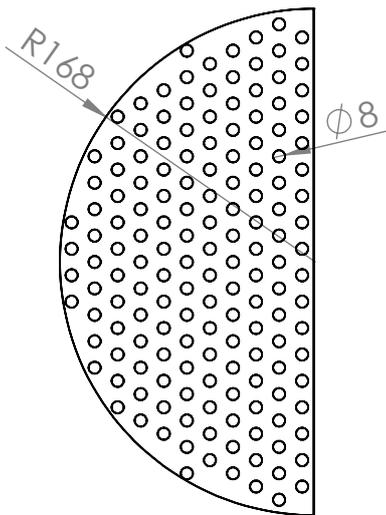
Observaciones:

Debido a su simplicidad este plano aloja dos piezas, la Tapa inferior y la Fijación

A4

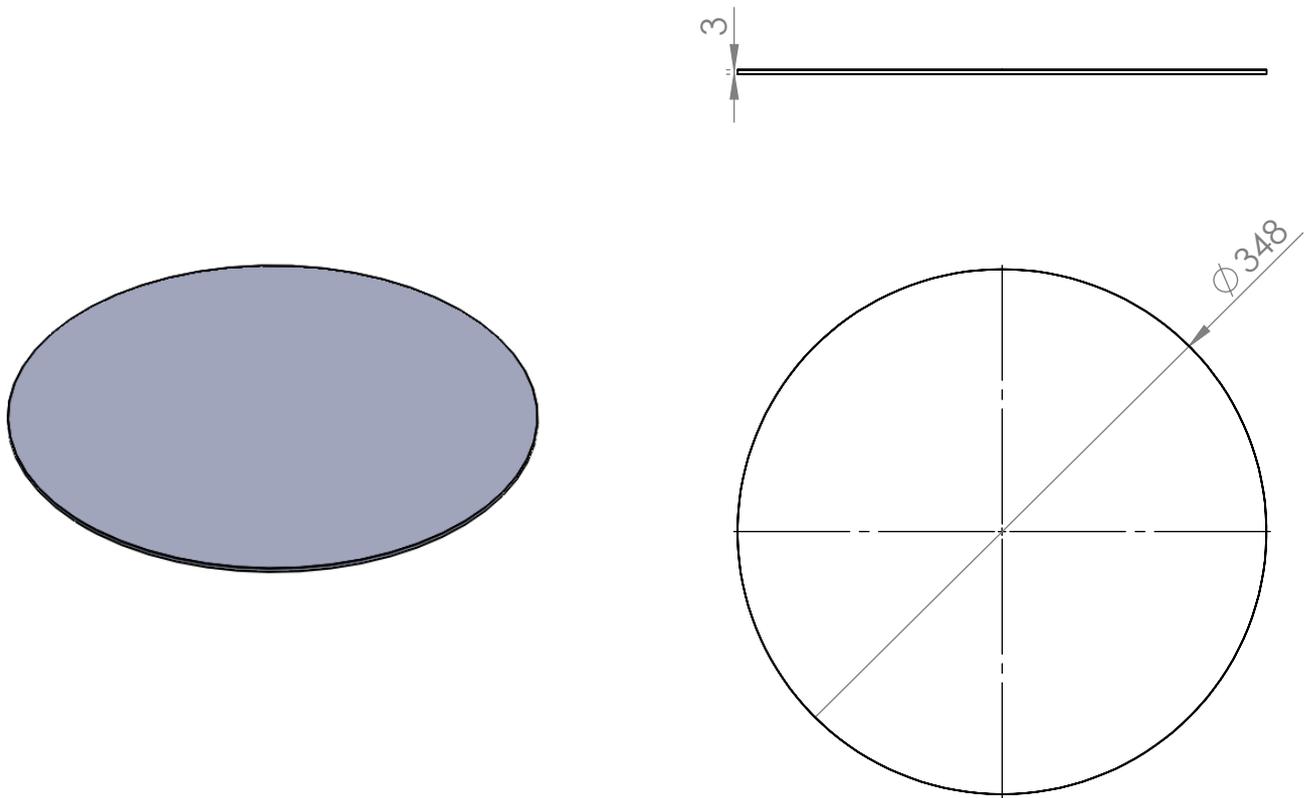


Una matriz de perforaciones de 8mm. de diámetro es aceptable. Sin embargo, el único criterio es que la malla retenga el agente filtrador.



El propósito de situar dos vistas de planta en este plano es recalcar la presencia de dos piezas de Malla interior en el ensamblaje del filtro.

Logotipo: 	N.º de plano: 12	Título del plano: Malla interior. (Filtro)	Autor: Oriol Pujoldevall Sánchez de Toledo
Título del proyecto: Diseño y construcción de un sistema de generación eléctrica mediante gasificación de biomasa		Revisión: CITCEA-UPC	Fecha: 13 de enero de 2015
Escala: 1:5	Material: AISI 304	Observaciones: La vista en tres dimensiones esta representada a escala 1:2	A4 15



Este plano sirve para representar las dimensiones que, como mínimo, debe tener la tapa superior del filtro.

- Ligero aumento del grosor
- Ligero aumento del diámetro

Aun así, la tapa del filtro incorpora un mecanismo de cierre que no se incluye en el plano, debido a que en lugar de fabricarlo, se adquirirá mediante compra.

Logotipo: 	N.º de plano: 13	Título del plano: Tapa superior. (Filtro)	Autor: Oriol Pujoldevall Sánchez de Toledo
Título del proyecto: Diseño y construcción de un sistema de generación eléctrica mediante gasificación de biomasa		Revisión: CITCEA-UPC	Fecha: 13 de enero de 2015
Escala: 1:5	Material: AISI 304	Observaciones: -	

ANEXO B: DOCUMENTACIÓN GRÁFICA DE LAS PIEZAS FABRICADAS

A continuación se muestran las fotografías tomadas de las piezas y ensamblajes que, a 13 de enero de 2015, han sido fabricados por Tallers d'Aspiració S.L., siguiendo las instrucciones de los planos adjuntos a este proyecto.

1. Base de la garganta



2. **Garganta (imagen 1)**



3. **Garganta (imagen 2)**



4. Reactor interior (imagen 1)



5. Reactor interior (imagen 2)



6. Cubierta exterior (imagen 1)



7. **Cubierta exterior (imagen 2)**



8. **Orificio 1: sacudimiento de la parrilla**



9. Orificio 2: retirada de las cenizas



10. Tapa para Orificio 1



11. Tapa para Orificio 2



12. Partes del reactor (Garganta, Reactor interior, Cubierta exterior)



13. Salida de la cubierta al ciclón



14. Placa conectora



15. Dosificador de biomasa (imagen 1)



16. Dosificador de biomasa (imagen 2)



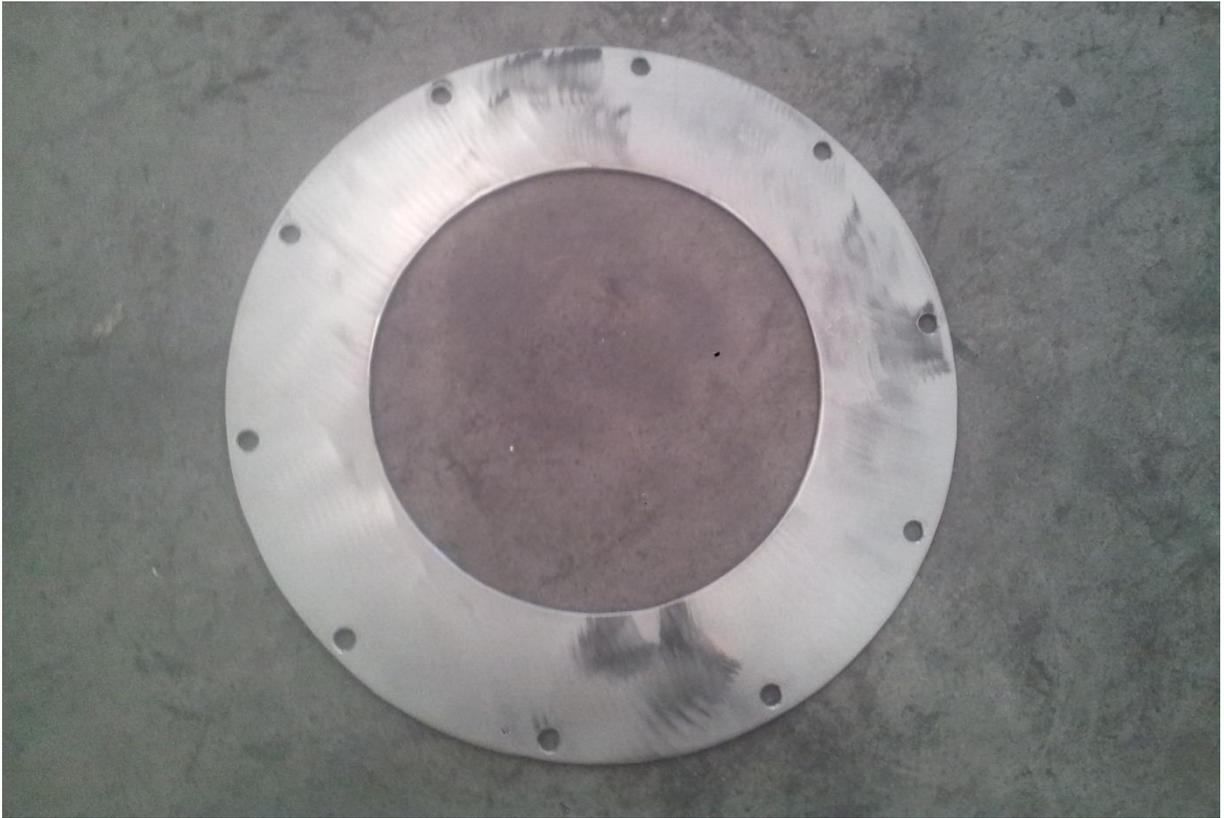
17. Parte superior de la cubierta exterior (capa 1)



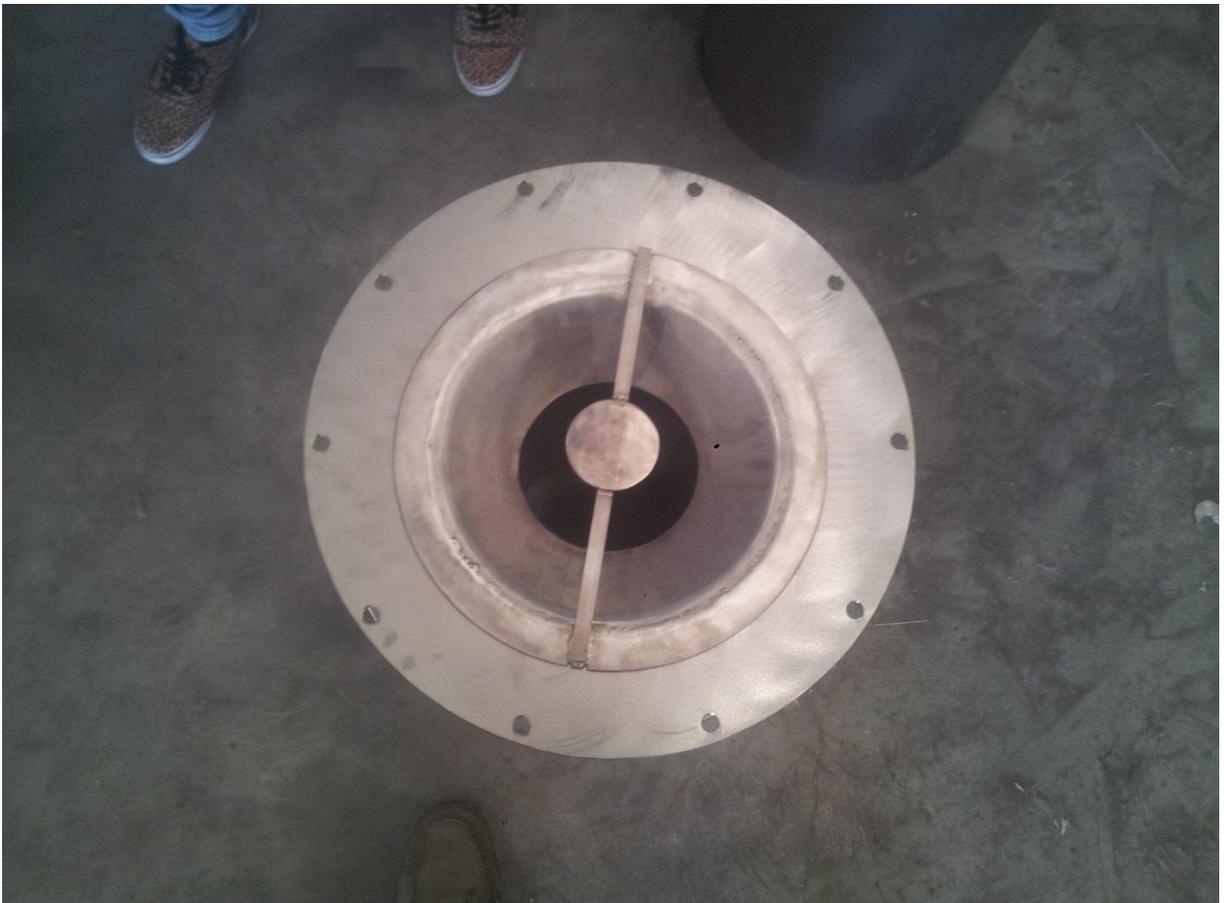
18. Parte superior de la cubierta exterior (capa 2)



19. Disco superior del reactor



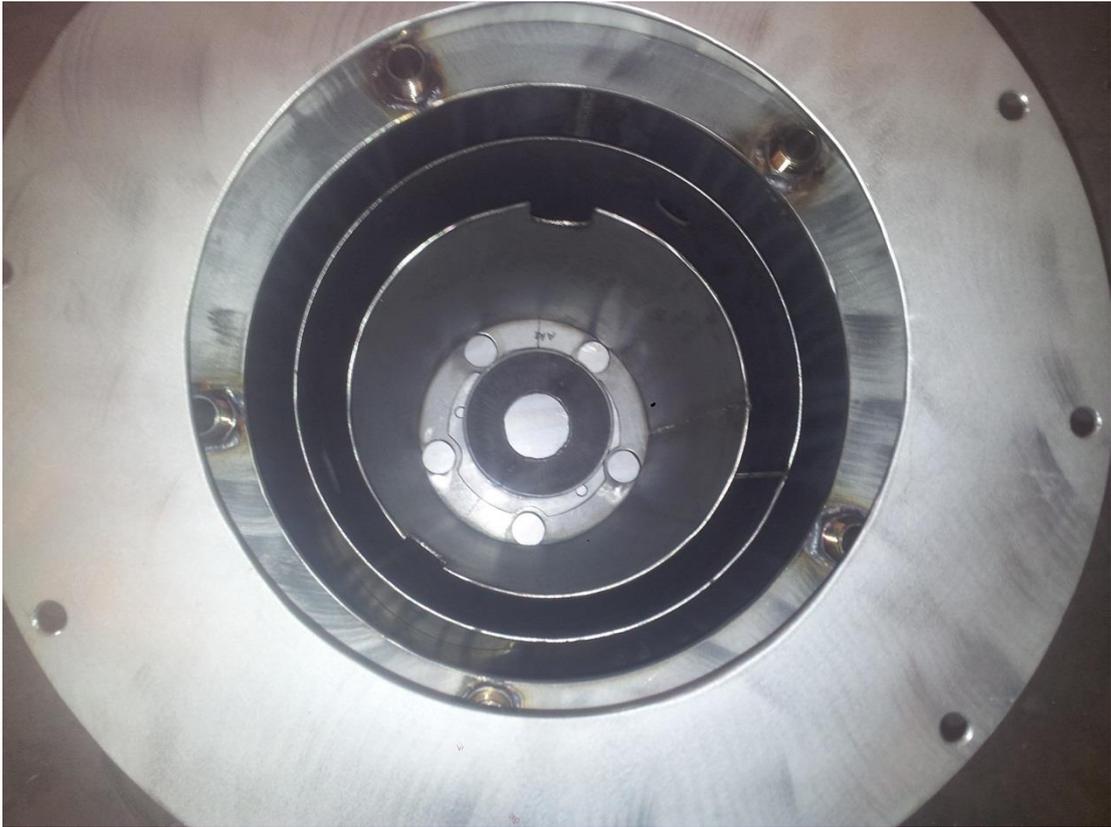
20. Ensamblaje del Reactor y el Dosificador (imagen 1)



21. **Ensamblaje del Reactor y el Dosificador (imagen 2)**



22. Interior del Reactor



23. Depósito de biomasa y cubierta exterior a escala



24. Ensamblaje del Reactor y el Depósito



25. Ensamblaje del Ciclón y el Reactor (imagen 1)



26. Ensamblaje del Ciclón y el Reactor (imagen 2)



27. Filtro de partículas (imagen 1)



28. Filtro de partículas (imagen 2)



29. Conjunto de componentes

