GRADO EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS ENERGÉTICOS

ESCUELA POLITÉCNICA DE MINAS Y ENERGÍAS

TORRELAVEGA

TRABAJO FIN DE GRADO

ESTUDIO DE VIABILIDAD DE UNA PLANTA DE COGENERACIÓN ENERGÉTICA A PARTIR DE PURINES

A STUDY ON THE FEASIBILITY OF A COGENERATION PLANT TO PRODUCE ENERGY FROM PIG MANURE

AUTOR: MÓNICA TRIGUERO ARAGÓN

TUTOR: BEATRIZ MALAGÓN PICÓN

RESUMEN

Actualmente, en la provincia de Segovia hay establecidas un número muy elevado de explotaciones porcinas. Dicho tipo de explotación ganadera lleva consigo una serie de repercusiones medioambientales entre las que destacan la producción de purines y su posterior gestión. La super producción de estos residuos en estas zonas está repercutiendo en la contaminación de aguas y en una elevada emisión de gases de efecto invernadero.

En este contexto se enmarca el presente trabajo Fin de Grado, en concreto en estudiar el aprovechamiento de dichos residuos (purines) como fuente combustible en una planta de cogeneración energética y con ello proponer una solución medioambiental al exceso de producción de purines en dicha zona geográfica.

Se comenzará definiendo las diferentes tecnologías actuales de cogeneración energía (eléctrica y térmica), sus tipos, características, ventajas e inconvenientes, para posteriormente elegir el que más se adapte a nuestra situación de partida, basada principalmente en el volumen de residuos a tratar anualmente para lo que se definirá con antelación la zona de influencia. También, se hará un estudio de idoneidad para elegir la ubicación de la planta en función de su distancia a los centros productores, vías de comunicación, etc. Todo ello, con el objetivo de determinar si es viable la instalación de este tipo de planta en la zona geográfica referida.

ABSTRACT

Currently, there is a huge number of pig farms in the province of Segovia which are having an impact on the environment in several ways, the most significant of these being the production and then the disposal of manure. Overproduction of pig manure in this area is well-acknowledged to be related to water pollution and to huge greenhouse gas emissions.

This end-of-degree project is set in this context and is aimed at examining how to use the said waste – pig manure – as a source of energy in a cogeneration plant and thus, put forward an environmental solution to the excess of manure in the aforementioned region.

To begin with, we will define the current diverse technologies for electric and thermal energy cogeneration; specifically, their types, characteristics, advantages and disadvantages. Next, we will select the technology which best adapts to our starting point and which will be based on waste volume to be dealt with yearly; thus, the field of influence will be determined beforehand. Additionally, a suitability study will be carried out in order to choose the plant location according to how far it is from pig farms, what road networks are like, etc. with the purpose of assessing whether it is feasible to set up this type of plant in the aforementioned area.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1 INTRODUCCIÓN. 6
2 MARCO LEGAL. 8
2.1 SECTOR EXPLOTACION GANADERIA PORCINA 8
2.2 ENERGÍA RENOVABLE 10
3 ESTADO DEL ARTE: COGENERACIÓN. 13
3.1 TECNOLOGÍAS DE COGENERACIÓN. 14
3.1.1. GASIFICACIÓN 14
3.1.2. COMBUSTIÓN. 20
3.1.3. PIRÓLISIS 25
3.2 COGENERACIÓN DIRECTA: LA TURBINA DE VAPOR. 27
3.2.1. DESCRIPCIÓN DE LA TECNOLOGÍA. 28
3.2.2. TIPOS DE TURBINAS DE VAPOR. 29
3.2.3. CARACTERÍSTICAS. 30
3.3 COGENERACIÓN MEDIANTE GASIFICACIÓN 30
3.3.1. TURBINA DE GAS. 31
3.3.2. COGENERACIÓN CON UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA ALTERNATIVO. 34
4 ELECCIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE COGENERACIÓN. 37
4.1 ELECCIÓN DE EMPLAZAMIENTO 37
4.1.1 LOCALIZACIÓN GEOGRAFICA 37
4.1.2 DISPONIBILIDAD DE RESIDUOS EN EL AREA ELEGIDA 39
4.2 ELECCIÓN DE TECNOLOGÍA DE COGENERACIÓN. 41
5 APLICACIÓN DEL CASO PRÁCTICO 43
5.1 SISTEMAS DE PRETRATAMIENTO. 43
5.1.1 PRETRATAMIENTO DEL BIOGÁS. 43
5.1.2 PLANTA DE TRATAMIENTO DEL AGUA. 46
5.2 ELECCIÓN DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA DE COGENERACIÓN. 48
5.2.1 MOTOGENERADOR 48
5.2.2 EL INTERCAMBIADOR DE CALOR. 51
5.2.3 LA CALDERA. 53
5.3 ENERGÍA TÉRMICA Y ENERGÍA ELÉCTRICA OBTENIDAS MEDIANTE COGENERACIÓN. 55
6 CONCLUSIONES. 57
7 REFERENCIAS. 59
8 ANEXOS 60

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1.Consumo de energía primaria [3] 12
Ilustración 2: Sistema convencional y sistema cogeneración. [4] 13
Ilustración 3: Gasificador Downdraft. [5] 17
Ilustración 4- Gasificadores Updraft [5] 18
Ilustración 5- Gasificador Crossdraft.[5] 19
Ilustración 6- Gasificador lecho fluidizado [5] 19
Ilustración 7- Gasificador lecho arrastrado [5] 20
Ilustración 8- Ciclo básico de una turbina de vapor. [9] 28
Ilustración 9. Esquema Ciclo abierto Turbina de gas[10] 32
Ilustración 10. Esquema Ciclo cerrado Turbina de gas [10] 32
Ilustración 11. Localización de Cuellar y Mapa de Zonas vulnerables por contaminación por nitratos Fuente: Red Oficial del Control Químico de las Aguas [11]. 37
Ilustración 12- Emplazamiento de la instalación dentro de Cuellar. D1 (distancia a la autovía)=800m. D2 (distancia al rio)=1.7Km. S1 (superficie de la instalación).[12] 38
Ilustración 13- Radio de 15km de obtención de los combustibles.[12] 39
Ilustración 14- Esquema desulfuración.[17] 46
Ilustración 15-Ciclo Otto. Diagramas P-V y T-S. [19] 49
Ilustración 16- Motor Jenbacher [20] 50
Ilustración 17-Intercambiador. [21] 52
Ilustración 18- Esquema Caldera [22] 53
Ilustración 19- Caldera vertical y horizontal [23] 54
Ilustración 20- Esquema [17] 55

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-Tipos de pirolisis y productos mayoritarios. [8] 26
Tabla 2 Cantidad de cabezas de ganado. Fuente: censo de la junta Castilla y León enero 2017 [13] 40
Tabla 3. Volumen de purín producido en las granjas [14] 40
Tabla 4 Caracterización *química del biogás [16]* 41
Tabla 5- Comparativa de puntos fuertes Vs. debilidades. [17] 41
Tabla 6- Resumen de propiedades. [17] 42
Tabla 7-Datos técnicos del motor. [20] 50
Tabla 8- Dimensione del motor. [20] 50
Tabla 9- Potencias y eficiencias. [20] 50

1 INTRODUCCIÓN.

Actualmente, a nivel mundial el incremento del consumo de energía primaria es enorme, y la previsión de crecimiento también es muy alta, debido a la incorporación en el mercado globalizado de países emergentes, como es el caso de China, India o Brasil. En este escenario, es necesario asegurar una producción de energía tal que cubra dicha creciente demanda, y, además, que contribuya a la mejora medioambiental del planeta, y también que limite las posibles incidencias del mercado de combustibles fósiles que se dan en la actualidad y que generan conflictos, mejorando, por tanto, también el ámbito social y político globalmente.

A nivel de la Unión Europea, desde hace muchas décadas, se viene potenciando el desarrollo y uso de nuevas tecnologías en la producción de energía fomentando el uso de las energías alternativas, con el objetivo de depender cada vez en menor medida de las energías fósiles, evitar las desventajas medioambientales que llevan consigo los combustibles fósiles y mejorar el entorno social, creando potenciales puestos de trabajo locales.

En España se ha establecido el Plan de Energías Renovables (PER) 2011-2020, relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables, con la misión de que estas tecnologías reduzcan sus costes en los próximos años. Iniciativas como los Programas de Desarrollo Agroenergético, buscan reforzar el liderazgo tecnológico de nuestro país en el ámbito de la innovación que es la auténtica clave para entender el futuro de este sector y solucionar problemas que actualmente están surgiendo en nuestra sociedad.

En los últimos años, ha cobrado especial interés las zonas rurales como proveedores de energías renovables, debido a la necesidad de ampliar la diversidad de combustibles alternativos renovables útiles. La bioenergía, aquella energía que se obtiene por transformación química de la biomasa, puede ayudar a contribuir al desarrollo de las áreas rurales mediante la creación de empleo y diversificación entre las actividades económicas vinculadas con el sector forestal, agrario e industrial, lo que provocaría reducir la despoblación o incluso aumentar la población de las zonas rurales [1].

Los terrenos empleados para el cultivo han sido tradicionalmente el soporte receptor las deyecciones ganaderas. Aunque en la actualidad, están surgiendo problemas medioambientales relacionados con la ganadería, especialmente la contaminación de efluentes líquidos, consecuencia de la alta concentración ganadera que se produce en determinadas regiones, como por ejemplo la comarca de Cuéllar (Segovia) muy intensiva en la explotación de ganadería porcina y que se encuentra entre las cinco zonas vulnerables por la contaminación de acuíferos de Castilla y León [2]. Además, el metano (CH_4) asociado con este tipo de ganadería, es un gas de efecto invernadero que contribuye al calentamiento global del planeta con un potencial 21 veces mayor que el CO_2 [3].

La problemática medioambiental de la producción ganadera en general, y del sector porcino en particular es debida a que:

- La explotación ganadera se ha desligado de la explotación agrícola, lo que dificulta la gestión correcta de los estiércoles generados en la base territorial disponible.

- El censo porcino ha ido aumentando considerablemente durante los últimos años mientras que la superficie agraria útil ha sido disminuyendo por distintos motivos (pérdida de subvenciones, crecimiento urbanístico y abandono de tierras).

- La dimensión media de las explotaciones ganaderas ha aumentado considerablemente en detrimento de las agrícolas.

Este presente trabajo fin de grado se basa en la necesidad de dar solución a una situación de desequilibrio generada por la superproducción de purines en la explotación intensiva porcina en una determinada zona de la provincia de Segovia, que, a día de hoy, no ha podido resolverse adecuadamente, ya que la única utilidad que se le da a este residuo es su uso como fertilizante para las tierras de cultivo, práctica muy implantada pero que no es suficiente.

Para ello se pretende estudiar la producción de energía eléctrica y térmica a partir de los purines.

El proceso consiste en una valorización energética de dichos residuos para su aprovechamiento en la generación de biogás, en una planta centralizada que se ubicará en la localidad de Cuellar y que por el proceso termodinámico de cogeneración producirá energía eléctrica y térmica para vender a la red eléctrica española.

2 MARCO LEGAL.

2.1 SECTOR EXPLOTACION GANADERIA PORCINA

La legislación relacionados con la ganadería porcina es muy extensa ya que, además de la importancia económico de este sector, tiene un impacto medioambiental muy alto.

La normativa estatal más importante es la siguiente:

- **Ley 16/2002, de 2 de julio, de Prevención y Control Integrado de la Contaminación (transposición de la Directiva 96/61/CE23), de 2 de julio.**
  Tiene por objeto de esta Ley es evitar o reducir y controlar la contaminación de la atmósfera, del agua y del suelo, mediante un sistema de prevención y control integrados de la contaminación, con el fin de proteger el medio ambiente en su conjunto.
  Se crea la Autorización Ambiental Integrada, una licencia global para asegurar el control integrado de la contaminación para aquellas instalaciones sobre las que tiene efecto, entre ellas, la ganadería porcina de cría intensiva igual o superior a 2.000 plazas para cerdos de cebo de más de 30 kg o 750 plazas para cerdas reproductoras.

- **Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados (transposición de la Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, sobre los residuos).**
  Deroga a la anteriormente vigente, Ley 10/1998. Esta Ley no considera como residuos el estiércol si su destino es el abono, pero sí, si el destino del estiércol es la incineración, depósito en vertederos o fueran utilizados en una planta de biogás o de compostaje, aunque también se dice que cuando este residuo se utiliza en la producción de energía, como es el caso de este TFG, quedan excluidos de su ámbito de aplicación, pero siempre que se garantice que se protege la salud humana y el medio ambiente.
  Por tano, la Ley de Residuos únicamente es de aplicación a los subproductos de origen animal cuando van a ser procesados en una planta de biogás y también es de aplicación al digestato resultante del proceso de metanización. Se desprende también que a un subproducto de origen animal, como el estiércol, no le son de aplicación dichas normativas cuando es valorizado directamente en la agricultura, pero si le serían de aplicación al digestato procedente de la metanización del estiércol.

- **Real Decreto 324/2000, de 3 de marzo, por el que se establecen las normas básicas de ordenación de las explotaciones porcinas**.

  Tiene, entre otros objetivos: **“**proteger al medio ambiente previniendo los posibles efectos negativos que, al efecto, pudiera generar la ganadería intensiva”.

Este Real Decreto regula la gestión de los estiércoles, que se llevará a cabo mediante la utilización de los siguientes procedimientos:

- Valorización agrícola como abono organomineral: como vía prioritaria para gestión de las deyecciones porcinas bajo determinados requisitos.
- El tratamiento de estiércoles mediante compostaje, secado artificial y otros, regulado por la Ley 10/1998, de 21 de abril, de Residuos (derogada por la Ley 22/2011).
- Eliminación de estiércoles mediante vertido: sometida a la autorización regulada en diversas leyes (Ley 29/1985, de 2 de agosto, de Aguas)
- Entrega a centros de gestión de estiércoles.

Como puede verse se fomenta antes la valorización frente a la eliminación siguiendo la jerarquía de gestión de los residuos establecida por la Unión Europea, según el siguiente orden de prioridad:

1º) Prevención.
2º) Preparación para la reutilización.
3º) Reciclado.
4º) Otro tipo de valorización, incluida la valorización energética.
5º) Eliminación.

- **Real Decreto 261/1996, de 16 de febrero, relativa a la protección de las aguas contra la contaminación producida por nitratos procedentes de fuentes agrarias** (trasposición de la Directiva 91/676/CEE).
  Principalmente, obliga a identificar las aguas que se hallen afectadas por la contaminación por nitratos de fuentes agrarias, su vigilancia por medio de estaciones de muestreo y obliga también a identificar y vigilar las zonas vulnerables, que son aquellas superficies territoriales cuyo drenaje da lugar a la contaminación por nitratos) para poder eliminar o minimizar los efectos de los nitratos en el agua.

  En función de este Real Decreto, se establece la cantidad máxima de aplicación de nutrientes (purines, deyecciones de otros animales, fertilizantes, etc.) en 170kg/ha de suelo de cultivo en zonas vulnerables y en 210 kg/ha en zonas no vulnerables. Esto hace que, en las áreas donde existe explotaciones ganaderas intensas, los campos de cultivo ya estén saturados de nutrientes.

- **Real Decreto 949/2009 por el que se establecen las bases reguladoras de las subvenciones para fomentar la aplicación de los procesos técnicos del Plan de Biodigestión de Purines (no vigente).**
  Se hace referencia a este Plan, ya que debido a la gran emisión de gases de efecto invernadero de la actividad ganadera y ante el límite de cumplimiento de Kyoto, se aprobó un Plan de Medidas Urgentes para reducir las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en el período 2008-2012.

Las plantas de biogás que usaban residuos ganaderos se vieron más favorecidas por este plan de ayudas (hasta el 40% de la inversión), pero fue derogada de forma definitiva por motivos presupuestarios.

Además, existe un Plan específico que engloba la gestión de purines:

- **Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (PEMAR) 2016-2022, aprobado 6 de noviembre de 2015.**
  Establece la política de residuos estatal y contiene las medidas necesarias para mejorar las deficiencias detectadas además de promover las actuaciones que proporcionan una mejora medioambiental. Respecto a los residuos agrícolas y ganaderos se impulsa un análisis conjunto de este flujo, de su situación y de sus posibles orientaciones estratégicas.

2.2 ENERGÍA RENOVABLE

La utilización de energías renovables en España para la producción de energía eléctrica dio su gran salto a partir del Plan de Energía Renovables del año 2005. Después, en el 2007, gracias al Real Decreto 661/07 (Real Decreto 661/2007, de 25 de mayo, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial), las energías renovables se estimularon sensiblemente mediante ayudas al desarrollo en forma de retribuciones económicas por la energía eléctrica generada.

Durante los últimos años, los retos del contexto energético español se han centrado en impulsar la liberalización energética, la promoción del ahorro y la eficiencia energética, así como el uso las energías renovables.

En este apartado, se trata la legislación regulatoria de las energías renovables, desde la aparición del ya derogado Real Decreto 661/07:

- **Real Decreto 413/2014 por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica a partir de fuentes de energía renovables, cogeneración y residuos.**
  Determina el precio de venta de la energía que se basa en que la retribución es la suma de dos términos distintos: según el precio de venta en el "pool eléctrico" y según el "Régimen Retributivo Específico (RRE)", que a su vez está compuesto por dos términos de retribución: por la inversión, calculado en función de la potencia instalada y por la operación, que se estimará en función de la energía entregada a la red.

  Para el caso de las instalaciones de tratamiento de estiércol mediante digestión anaerobia (con fecha de inicio de explotación en 2016), existen dos tipos de retribución en función de que sean instalaciones con potencia instalada menor o igual a 500 kW o instalaciones con potencia instalada superior a 500 kW.

- **El Plan de Energías Renovables (PER) 2011-2020**, incluye nuevos diseños de escenarios energéticos junto a la incorporación de objetivos acordes a la *Directiva*

2009/28/CE del Parlamento Europeo, relativa al fomento del uso de fuentes de energía renovables.
Concretamente, la Directiva establece como objetivo la consecución de una cuota mínima del 20% de energía procedente de fuentes renovables en el consumo final bruto de energía de la Unión Europea, siendo el mismo objetivo para España.

Este es el fin global que se recoge en el PER 2011-2020, que da respuesta a su vez, al artículo 78 de la Ley 2/2011 de Economía Sostenible, que fija los mismos objetivos de la *Directiva 2009/28/CE* como las metas nacionales mínimas de energías renovables en 2020, estableciendo además que el Gobierno aprobará planes de energías renovables que hagan posible el cumplimiento de los objetivos fijados y que permitan la posibilidad efectiva de desarrollo de las energías renovables en todas las Comunidades Autónomas.

La *Directiva 2009/28/CE*, es parte del denominado Paquete Europeo de Energía y Cambio Climático, que establece las bases para que la UE logre sus objetivos para 2020, una reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) del 20% respecto a los niveles del año 1990.

- **Ley 21/2013 de 9 de diciembre, de evaluación ambiental**
  Establece la necesidad de llevar a cabo una Evaluación Ambiental Estratégica, entendida ésta como un instrumento de prevención que permita la integración de los aspectos ambientales en la toma de decisiones de los planes y programas públicos. Así, de acuerdo con la ley, se ha elaborado un Informe de Sostenibilidad Ambiental (ISA) del PER 2011-2020 y una Memoria Ambiental.

  Este Informa de Sostenibilidad Ambiental contempla: el diagnóstico ambiental del ámbito territorial de aplicación del PER 2011-2020; la consideración de la normativa vinculante y de relevancia en el marco de la planificación de las energías renovables: la identificación de los aspectos ambientales relevantes para la planificación de las energías renovables con un horizonte a 2020; el planteamiento y el análisis de las alternativas del PER 2011-2020 con la selección de la alternativa final y de efectos negativos sobre el Medio Ambiente.

Por otro lado, dentro del contexto energético actual de las energías renovables, la seguridad de suministro, el respeto por el medio ambiente, y la competitividad económica, son los ejes fundamentales en los que se basa la política energética europea y española. Esta última, ha tenido que afrontar retos particulares: un consumo energético por unidad de producto interior bruto más elevado que la media europea, una elevada dependencia energética del exterior, y las elevadas emisiones de gases de efecto invernadero relacionadas con el crecimiento de los sectores de generación eléctrica y de transporte.

Como resultado de la política de apoyo a las energías renovables, el crecimiento de éstas durante los últimos años ha sido notable, y así, en término de consumo de energía primaria, han pasado de cubrir una cuota del 6,3% en 2004 a alcanzar el 14% en el 2016.

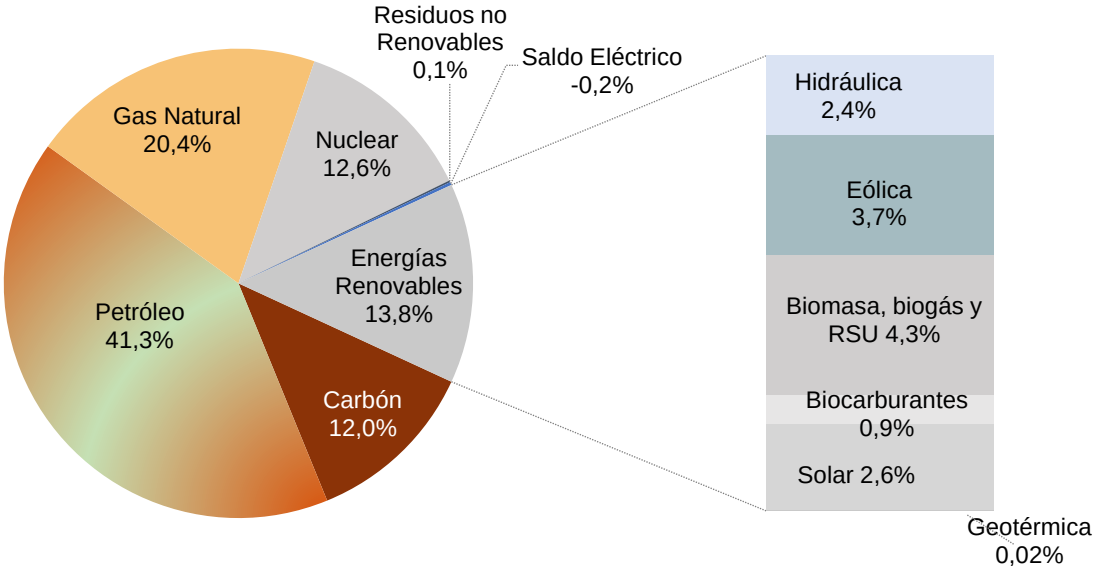


Ilustración 1.Consumo de energía primaria [3]

En cuanto al biogás, que es la fuente de energía renovable de interés en el presente Trabajo Fin de Grado, con un total de 59 Ktep de la energía consumida en 2015, en los últimos años el biogás ha sufrido una fuerte contracción experimentada por los consumos imputables a calor de este tipo de cogeneraciones. En los próximos años se prevé una recuperación e incluso un aumento en consumo de energía por biogás.

3 ESTADO DEL ARTE: COGENERACIÓN.

El término cogeneración significa producción simultánea de dos o más tipos energía en único proceso tecnológico. Normalmente las energías generadas son electricidad y calor, aunque puede ser también energía mecánica y calor (y/o frío). La producción simultánea supone que puede ser utilizada simultáneamente, lo que implica proximidad de la planta generadora a los consumos, en contraposición al sistema convencional de producción de electricidad en

La cogeneración no se trata de un nuevo concepto, sino que se empezó a utilizar en 1880 cuando el vapor era la principal fuente de energía en la industria y, la electricidad, se empleaba únicamente como un producto en forma de energía y luz. Debido a la crisis energética actual y el aumento del precio de los combustibles, ha habido un resurgimiento de interés en los últimos años. Este procedimiento tiene aplicaciones tanto industriales como en ciertos grandes edificios en los que el calor puede emplearse para calefacción, para refrigeración (mediante sistemas de absorción) y preparación de agua caliente sanitaria como por ejemplo grandes superficies de ventas, ciudades universitarias y hospitales.

En un proceso de cogeneración, el calor se da en forma de vapor de agua a alta presión o en forma de agua líquida con una alta temperatura, se puede aprovechar, por ejemplo, el vapor caliente que sale de una turbina de producción de energía eléctrica, para suministrar energía en otros usos. El aprovechamiento de este calor residual en los sistemas de cogeneración suele ofrecer rendimientos globales del orden de 80%, siendo este rendimiento mucho mayor que si se compara con sistemas tradicionales donde se obtienen valores de entorno al 30-35%. En la siguiente figura se puede observar como la energía interna de un combustible es convertida en energía y eléctrica con un generador convencional, comparada con tecnología de cogeneración.

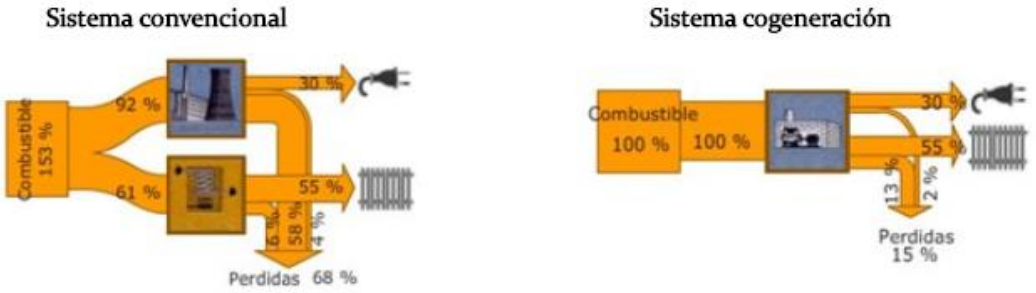


Ilustración 2: Sistema convencional y sistema cogeneración. [4]

Algunas ventajas y beneficios de los sistemas de cogeneración con respecto a los sistemas convencionales se basan en los siguientes principios:

- El ahorro energético: ya que la cogeneración posee mayor rendimiento, por lo tanto, es necesaria menor cantidad de combustible para generar la misma energía.

- Aumenta la seguridad energética nacional, especialmente si se utiliza, de forma sustentable, por ejemplo, con fuentes renovables como son los residuos.

- La preservación del medio ambiente: debido a la mayor eficiencia energética que poseen las instalaciones de cogeneración frente a las plantas convencionales, se produce un ahorro de combustible, lo que genera en una reducción de las emisiones contaminantes.

- El aumento de la competencia entre los productores de energía: un incremento en el número de productores de energía, un aumento en la competencia entre los distintos ofertantes, lo que redunda en un mejor servicio.

3.1 TECNOLOGÍAS DE COGENERACIÓN.

Las plantas de cogeneración son sistemas que qué poseen una única entrada de combustible y varios tipos de energías salientes. Con el fin de realizar su función es necesario una serie de equipos principales y auxiliares.

El tipo de ciclo, los productos generados, el rendimiento y todas las características principales, vienen definidos por el equipo principal empleado, en otras palabras, se trata de un punto clave a la hora de definir el sistema de cogeneración. Por otra parte, los equipos auxiliares seleccionados sirven para asegurar el correcto funcionamiento de los equipos principales.

Los tipos de tecnología que se van a estudiar en el presente Trabajo Fin de Grado son: la turbina de vapor, la turbina de gas, y los motores de combustión interna alternativos. Si el sistema escogido para cogenerar es la turbina de vapor, únicamente será necesario llevar a cabo una reacción de combustión de la biomasa, después de centrifugar el estiércol. Por el contrario, si se elige la turbina de gas, o, los motores de combustión interna alternativos, la obtención de energía pasará primero por la gasificación del combustible.

La elección del tipo de tecnología de cogeneración para una aplicación específica dependerá de muchos factores como: la cantidad de energía necesaria, la duración del ciclo, las necesidades térmicas, las limitaciones en cuanto emisiones a la atmosfera, el tipo de combustible, el precio, la rentabilidad, etc.

3.1.1. GASIFICACIÓN.

La gasificación de la biomasa puede denominarse, el conjunto de reacciones termoquímicas que se producen en un ambiente pobre en oxígeno, dando como resultado la transformación de un sólido, em una serie de gases combustibles y no combustibles que incluyen: monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono, ($CO_{2)}$,

hidrogeno (H_2), metano (CH_4), trazas de hidrocarburos, agua y nitrógeno (este último, en el caso de que se utilice aire como agente de gasificación). Lo gases combustibles producidos en este proceso son adecuados para ser utilizados en una caldera, en una turbina o en un motor, tras ser debidamente acondicionados.

Se trata por tanto de un proceso de conversión termoquímica en el que la biomasa se convierte en un gas combustible. El producto de gasificación es diferente poder calorífico, dependiendo del proceso empleado y de la biomasa origen. El gas combustible retiene alrededor del 70%-80% de la energía de la biomasa original. El resto de la energía que contenía la biomasa se invierta en las reacciones endotérmicas, las pérdidas de calor en los reactores, el enfriamiento del syngas (gas obtenido en la gasificación, pero enriquecido para obtener una mezcla de gases de mayor calidad, el secado (para eliminar el vapor de agua), el filtrado, y, el lavado (proceso que puede que sea necesario con el fin de eliminar los alquitranes).

3.1.1.1. FASES DE LA GASIFICACIÓN.

El proceso de gasificación de la biomasa se lleva a cabo en seis etapas, con independencia del tipo de gasificador empleado:

- El pretratamiento de la biomasa: la primera parte del proceso de gasificación consiste en adecuar la materia prima a ciertos valores de humedad y tamaño óptimo. La biomasa recién recibida en planta se encuentra con cantidades de humedad variadas, teniendo en cuenta su origen. Para emplear esta biomasa como combustible se necesita reducir la humedad. Esta reducción se puede realizar por medio d un secado natural o forzado. El secado natural se basa en aprovechar las condiciones ambientales favorables, como son alta temperaturas y una baja humedad relativa para quitar humedad a la biomasa. Por el otro lado, el secado forzado consiste en aportar una corriente térmica alrededor de la biomasa. El secado forzado puede ser de dos clases, directo, si existe contacto entre los gases calientes y la biomasa, o indirecto, que por el contrario no existe contacto entre los gases y la biomasa.
  Por otra parte, la biomasa debe tener unos tamaños estándares, en la mayoría de las ocasiones más pequeños que los que llegan a planta. Con la reducción a partículas más pequeñas se consigue optimizar el proceso de producción de energía y el transporte. Sin embargo, la reducción de tamaño plantea un problema durante el almacenamiento, ya que favorece el inicio de ciertos procesos de descomposición, provocando que el combustible pierda calidad.

- Secado: es una etapa que no se da ninguna reacción química, simplemente es un proceso endotérmico. En el cual, el agua líquida de la biomasa es retirada por evaporación gracias al calor desprendido por la combustión parcial de la propia biomasa en la zona de oxidación. La temperatura en esta etapa puede alcanzar los 120ºC.

  Biomasa húmeda + Calor Biomasa seca+H2

- Pirólisis: la biomasa original se descompone debido a la aportación de calor, generando una mezcla de sólido (principalmente carbono) y gas. La temperatura en esta varía entre 200 y 600 ^{0}C. El gas que libera de la biomasa está compuesto principalmente por hidrocarburos de diferentes longitudes de cadena que pueden llegar a condensar si la temperatura no es lo suficientemente alta.

  $C_6H_{10}O_5 + Calor \longrightarrow C_xH_Y + CO$

  $CHO + Calor \longrightarrow C_nH_mO_y$

- Oxidación: cuando el agente gasificante es aire u oxígeno puro dan lugar a reacciones de oxidación. Se trata de reacciones exotérmica que generan la energía necesaria para la gasificaión del combustible.

  $H + O_2 \longrightarrow H_2O + Calor$

  $C + O_2 \longrightarrow CO + Calor$

- Reducción: conjunto de reacciones, mayoritariamente endotérmicas, que emplean el calor desprendido durante la oxidación para obtener CO Y H_2 como subproductos de la oxidación parcial del carbono fijo.

  $H_2O + C + Calor \longrightarrow H_2 + CO$

  $C + O_2 \longrightarrow CO_2 Calor$

- Acondicionamiento del gas síntesis: El gas que proviene de la gasificación tiene alta cantidad de impurezas como: cenizas, compuestos de sodio y potasio, amoniaco, ácido clorhídrico, sulfhídrico y cianhídrico, compuestos aromáticos, etc., que deben ser eliminados para evitar erosión, la corrosión y la suciedad en todo el circuito. La limpieza de este gas permite obtener rendimientos mayores de combustión posterior en la caldera.

  Los sistemas de acondicionamiento del gas son muy variados, se caracterizan por la clase y la cantidad de contaminante que son capaces de separar y limpiar. Por un lado, se utilizan separadores ciclónicos para retirar las partículas del gas sin emplear un filtro de aire, donde los elementos se separan por la acción centrífuga y de la gravedad. Además, también pueden emplearse filtros de manga. Estos filtros consisten en diferentes mangas tejidas con distintos tamaños de poros, dispuestas sobre cestas metálicas. Por otra parte, los ``scrubbers´´ o torres lavadoras, son equipos especializados en eliminar gotas, partículas, de componentes gaseosos ácidos y alcalinos. Para ello, se emplea un líquido lavador que mediante absorción retire los elementos no deseados que arrastra el gas. Además, se pueden emplearse filtros electrostáticos que captan las partículas por medio de una precipitación electrostática.

3.1.1.2. TIPOS DE GASIFICADORES

Los gasificadores pueden clasificarse por la manera en que el aire, el oxígeno y el vapor entran al sistema. Para hacer una buena elección del gasificador se deben tener en cuenta las siguientes características: tipo de materia prima, el contenido de humedad, el tipo de cenizas y la forma del combustible.

LECHO FIJO

Este tipo de gasificador tiene una zona de reacción estacionaria típicamente soportada por una rejilla y se alimenta por la parte superior del reactor. Pueden ser diseñados de dos formas updraft o downdraft.

Son los más adecuados para aplicaciones a pequeña y mediana escala con requerimientos térmicos de hasta pocos MW, además son los más sencillos de operar y diseñar. A grandes escalas, los gasificadores de lecho fijo pueden encontrar problemas con la alimentación de la biomasa. Esto conlleva un flujo irregular de gas, por lo que conseguir temperaturas uniformes a lo largo del gasificador puede ser complicado debido a la ausencia de homogeneidad en la zona de la reacción. La mayoría de los gasificadores de lecho fijo son soplados por aire y producen gases de baja energía, aunque los diseños soplados por oxígeno han sido probados como más eficientes.

- Downdraft: con gasificadores de lecho fijo downdraft, el agente gasificante (aire u oxígeno) desciende a través del gasificador, mediante un flujo en contracorriente. La gasificación ocurre cerca de la zona más inferior del gasificador,en una zona de reacción caliente poco profunda que consta de una capa de carbonilla. La oxidación de la biomasa genera calor para mantener el proceso de gasificación. La mayor parte del alquitrán en el syngas es destruido por el craqueo térmico mientras pasa a través de la zona de reacción. La principal desventaja de los gasificadores downdraft es el alto contenido en cenizas arrastradas junto con el gas producido. Este tipo de reactores necesitan combustible con un contenido en humedad bajo (<25%).

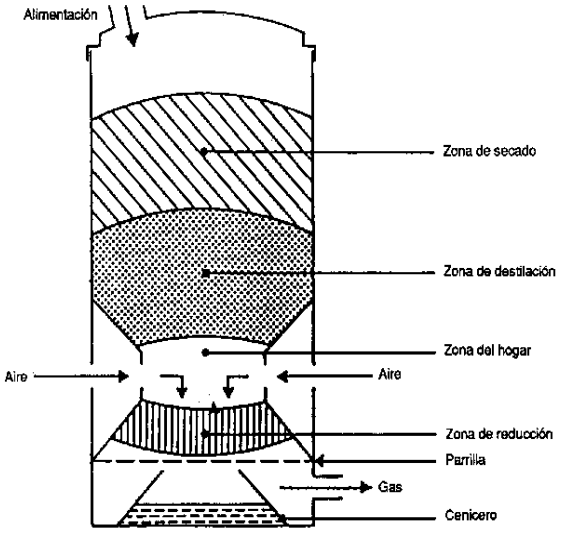


Ilustración 3: Gasificador Downdraft. [5]

- Updraft: El agente gasificante asciende a través de la zona caliente del reactor, cerca de la parte inferior del gasificador, en dirección contracorriente al flujo de material sólido. Reacciones exotérmicas entre aire/oxígeno y el char, teniendo lugar en el lecho conducen el proceso de gasificación. El calor en el gas sin tratar es transferido a la biomasa de origen, mientras los gases calientes ascienden, y la biomasa desciende a través del gasificador sufriendo secado, pirolisis y gasificación (reducción y oxidación) finalmente. El gas resultante sale a poca temperatura. El principal inconveniente es que las concentraciones de alquitrán en el gas resultante son altas. La ceniza es arrastrada junto con los sólidos en la dirección opuesta a la del flujo de gas y es retirada de la parte baja del gasificador. Con este tipo de gasificador se consigue un buen intercambio de calor, además de admitir combustible con alta humedad, puesto que en este tipo pasa por una zona de secado.

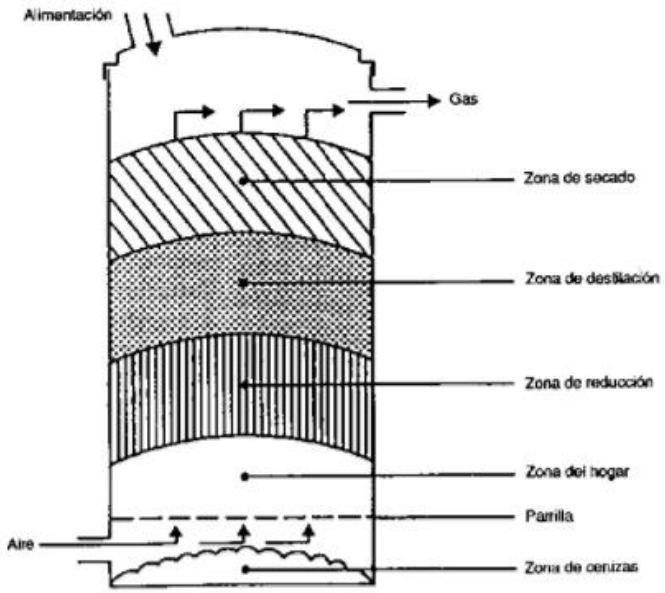


Ilustración 4- Gasificadores Updraft [5]

- Crossdraft: En este caso, el agente oxidante se introduce por un lateral del reactor, saliendo el gas de síntesis por el lado opuesto. Las distintas etapas de gasificación ocurren concéntricas a la zona de inyección del agente oxidante, característica que permite operar con reactores a pequeñas escalas. La principal desventaja es el alto contenido en alquitrán obtenido.

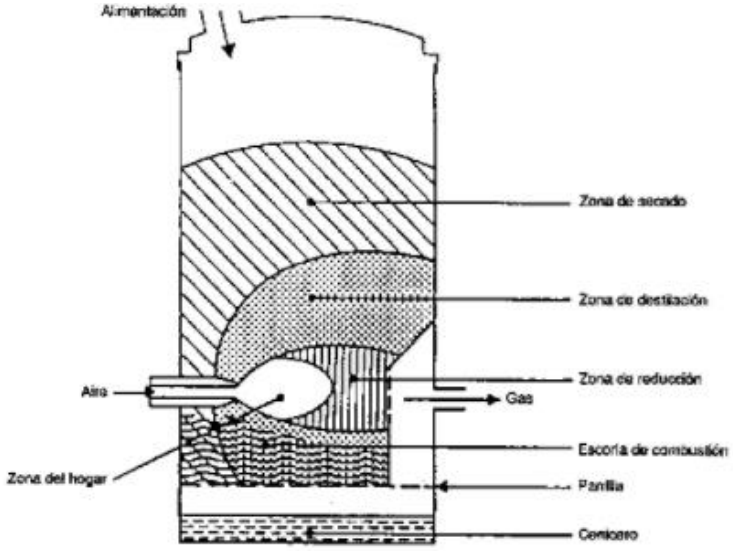
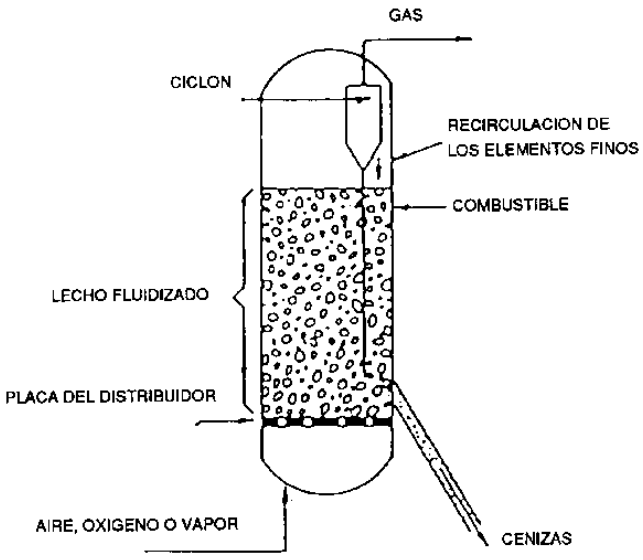


Ilustración 5- Gasificador Crossdraft.[5]

LECHO FLUIDIZADO

La principal ventaja de la gasificación en lecho fluidizado es la uniformidad conseguida en la distribución de temperatura en el lecho, puesto que el movimiento de las partículas favorece un mejor contacto gas-sólido, propiciando un mejor mezclado. El gas utilizado para fluidizar el material del lecho puede ser aire, oxígeno, vapor, gas reciclado, o una mezcla de los citados anteriormente. Aunque los gasificadores de lecho fluidizado pueden ser dimensionados para instalaciones de mediana y gran escala y son más adecuados para situaciones donde hay relativa demanda constante del gas resultante. Actualmente, las instalaciones gasificadoras de grandes dimensiones construidas y probadas usan diseños de lecho fluidizado. El gas resultante acostumbra a tener altos niveles de partículas como resultado de la turbulencia en el reactor. Las partículas consisten en cenizas originadas por la biomasa y partículas finas que escapan del lecho.



lustración 6- Gasificador lecho fluidizado [5]

LECHO ARRASTRADO

En este tipo de gasificadores los sólidos son arrastrados en el flujo de gas, fluyendo en paralelo a altas velocidades. Para obtener buenos resultados, se requieren temperaturas de reacción de 1200ºC, puesto que el tiempo de residencia de los sólidos es muy corto (del orden de segundos). Al operar con temperaturas tan altas, se suele operar en todo slagging (con cenizas fundidas) a elevadas presiones.

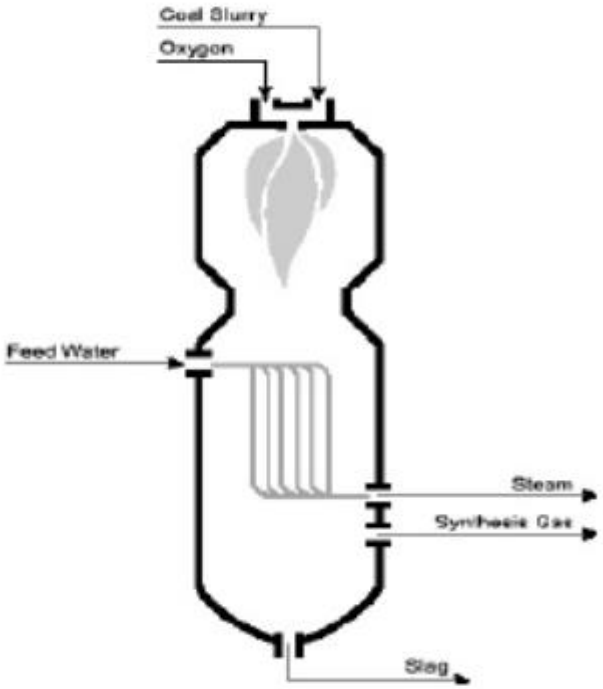


Ilustración 7- Gasificador lecho arrastrado [5]

3.1.2. COMBUSTIÓN.

La combustión es una reacción química relativamente rápida donde el oxígeno del aire se combina con los diferentes elementos del combustible para originar un desprendimiento de calor. Esta reacción exotérmica genera una llama, es una masa gaseosa incandescente que emite luz y calor. Si la combustión se lleva a cabo directamente con el oxígeno, se denomina oxicombustión.

La reacción del combustible con el oxígeno origina sustancias gaseosas. Las más abundantes son CO_2 y H_2O. Además de éstas, se generan otros productos en la combustión como:

- CO_2
- H_2O
- N_2
- Óxidos de nitrógeno (NO_X)

- O_1
- CO
- Partículas sólidas inquemadas.
- SO_2

$$CH + xO_2 \rightarrow n\,CO_2 + \tfrac{1}{2}\,m\,H_2O + \text{energía}$$

Para que se produzca esta reacción química, se deben dar ciertas circunstancias:

- Debe haber una cantidad suficiente de combustible.

- Se necesita una cantidad de aire suficiente, para que el oxígeno presente en el aire pueda oxidar o reaccionar con el combustible.

- La temperatura debe ser la necesaria para que se produzca y se mantenga la reacción. Si la temperatura no tiene un determinado valor, denominado temperatura de inflación. Si no se supera esta temperatura, el comburente y el combustible no reaccionan.

- Debe haber un iniciador de la combustión, normalmente una llama preexistente. Esto, significa que, durante el encendido del sistema, pueden participar otros elementos, incluso combustibles que solo sean utilizados para el encendido.

3.1.2.1. FASES DE LA COMBUSTION.

Toda la reacción química con gran desprendimiento de calor, donde la biomasa, es el combustible reacciona con aire liberando CO_2 y H_2O, se denomina proceso de combustión.

Cabe destacar, que la biomasa es un combustible rico en sustancias volátiles. Esta característica, especifica la manera en que suceden las distintas etapas de combustión de la biomasa:

- El proceso se inicia con el secado total de la biomasa mediante la evaporación de toda el agua que contenga la biomasa que llega a planta.

- Después, la temperatura comienza a aumentar. A partir de los 150ºC comienza la reacción de oxidación de forma lenta y gradual hasta los 250ºC.

- A continuación, la temperatura continúa elevándose hasta llegar 275ºC. En este instante, comienza un proceso exotérmico en el que la biomasa libera una serie de componentes volátiles que arden, esto provoca que la temperatura aumenta hasta los 900ºC.

- En la etapa final solo queda el sólido carbonoso que arde lentamente. Durante la tarea de diseño, es importante saber el tiempo que necesita este sólido en complementar la combustión, ya que, en otro caso, puede quedar una parte del combustible inquemado.

La calidad del proceso de combustión puede darse fácilmente mediante la proporción de CO/CO_2 en los humos Si el valor de esta reacción es inferior al 0.07 es un indicativo de una buena combustión.

Asiduamente, el proceso de combustión se desarrolla con abundancia de aire que oscila entre un 5 y un 40% respecto al aire estequiométrico. De esta forma, todas las moléculas del combustible encuentran una molécula de oxígeno, evitando así, que parte del combustible escape con los humos.

3.1.2.2. TIPOS DE COMBUSTIÓN

Según la manera en que se lleve a cabo las reacciones de combustión, la combustión puede ser de hasta cuatro formas distintas

- Combustión completa

  Sucede cuando las sustancias combustibles reaccionan hasta su máximo grado posible de oxidación. En este caso no habrá presencia de componentes combustibles en los productos de la combustión.

- Combustión incompleta

  Esta clase de reacción se caracteriza por la presencia de los llamados inquemados en los humos o gases de combustión. Estas sustancias generan CO, H_2, y también pueden aparecer pequeñas cantidades de partículas sólidas que forman parte del combustible (hollín), confiriendo a los humos cierta opacidad. Se produce cuando no se consigue el nivel máximo de oxidación y hay presencia de componentes combustibles en los gases de combustión.

  En la práctica, se debe tener precaución en los espacios que alojan los equipos de combustión, puesto que el CO o monóxido de carbono, es un gas inodoro y de efectos perjudiciales para el ser humano, ya que bloquea el transporte de oxígeno en sangre: el CO y el O_2 compiten en la reacción con la hemoglobina (proteína que transporta el O_2 por el organismo). El resultado final, podría llegar a ser la muerte, si el tiempo es suficiente o la concentración.

- Combustión estequiométrica.

  Es la combustión que no hay presencia de oxígeno en los humos, ya que este se ha empleado íntegramente en la reacción de combustible. Esta combustión se lleva a cabo con la cantidad mínima de aire para que no existan sustancias combustibles en los gases de reacción.

- Combustión con exceso de aire.

En el caso en que se utilicen un exceso de aire para la combustión, quedan menos sustancias combustibles, existiendo oxígeno sobrante junto con los gases de combustión. Por tanto, el exceso de aire asegura la combustión completa del combustible disponible en el proceso.

3.1.2.3. TÉCNICAS PARA LA COMBUSTIÓN DE LA BIOMASA

En la actualidad, existen varias técnicas posibles para la combustión de la biomasa. El tipo de combustión depende de aspectos como: la humedad y la granulometría de la biomasa. Bajo estas características, las soluciones para la combustión de la biomasa pueden agruparse en:

- Combustión en masa: es el tipo de combustión que se origina en un hogar rotativo o en una parrilla de tipo vibrante. Este tipo de combustión permite que la biomasa sea de gran tamaño, depositándose en la parrilla o en el lecho, hasta completar su secado y combustión. Es un método adecuado cuando el combustible de biomasa tiene nivel alto de humedad, y una composición heterogénea. Su principal ventaja es que la biomasa no necesita muchos tratamientos previos. Sin embargo, aunque es una técnica versátil, posee la desventaja de ser un sistema caro.

- Combustión en suspensión: en esta forma de combustión, el combustible se quema en suspensión tras ser lanzado mediante un quemador. El combustible no toca las paredes ni se deposita en el fondo. Se trata el sistema más adecuado cuando el combustible tiene una humedad baja, y una granulometría pequeña.

- Combustión en semi-suspensión: en esta técnica, la biomasa se deposita sobre una parrilla y la combustión se realiza con una ligera suspensión en la parte pesada de la parrilla. Para llevar a cabo este proceso, la biomasa debe tener un tamaño medio de entre 3 y 50 mm, y no presentar problemas de aglomeración o auto pegamiento.

A continuación, se desarrollan varios tipos de sistemas para la combustión en calderas que pueden suministrar el calor requerido en las industrias.

<u>SISTEMAS DE PARRILLA</u>

La parrilla, es una estructura metálica construida mediante fundición, cuya fundición es la de mantener el combustible en el hogar y facilitar el paso del aire primario de combustión. Para facilitar el paso del aire, las parrillas poseen unas aberturas en el emparrillado que varían entre un 20 y un 40% de la superficie total de la parrilla, dependiendo del tipo de biomasa empleado.

Las parrillas, deben tener la posibilidad evacuar las escorias, para ello están un poco inclinados y poseen algún movimiento para que los residuos se localicen en el punto más bajo, desde donde son extraídos.

La parrilla constituye la solera constituye la solera del hogar, proporcionando la superficie necesaria para la combustión de las partículas de biomasa más grande. Esta zona puede estar refrigerada mediante aire o agua. En el último caso, suelen llevar soldados en su parte inferior una serie de tubos por los cuales circula el agua de refrigeración.

Hay varios modelos de parrillas, la elección de un tipo u otro depende de la biomasa sólida y, sobre todo, de la humedad que está contenga. Los cuatro tipos de sistema de parrillas son:

- Hogares de parrilla fija: indicado cuando el tamaño de la biomasa sea pequeño y con baja humedad. La combustión se desarrolla de forma heterogénea, ya que durante la quema, la biomasa se encuentra apilada sobre la parrilla, permitiendo que coexistan distintas fases de combustión.

- Hogares de parrilla inclinada: es recomendable cuando la biomasa tenga una granulometría y una humedad variables, lo que tenderá a formar una gran cantidad de cenizas. Debido a la inclinación, los residuos se desplazan a lo largo de la parrilla haciendo que la combustión resultante sea más homogénea, en comparación con el caso anterior. La retirada de cenizas suele realizarse fácilmente mediante métodos mecánicos, de forma que éstas se van depositando en el cenicero, a medida que se van produciendo.

- Hogares de parrilla móvil: se trata del sistema más adecuado cuando la biomasa posea una elevada fracción de inertes. Como consecuencia de lo anterior, se genera una gran cantidad de cenizas, por lo que es necesario un sistema tractor, que permita el movimiento de la parrilla y la descarga continua de las cenizas.

- Hogares de parrilla vibratoria: este tipo de parrilla permite una descarga automática e intermitente de las cenizas. Dependiendo de las características del combustible, se puede variar el tiempo de vibración y de reposo (entre 4 y 10 segundos).

HOGARES ROTATIVOS

Los hogares rotativos poseen una forma cilíndrica, presentando un mecanismo que genera un movimiento rotacional. En este tipo de hogar se puede variar la velocidad de rotación del horno, modificando con ello el tiempo que permanencia del combustible, haciendo de este, un método muy eficiente para el control de la combustión. Los hogares rotativos están indicados para diferentes tipos de biomasa y residuos muy heterogéneos con amplios márgenes operativos.

QUEMADORES TORNILLO

Se trata de uno de los sistemas más usados cuando las instalaciones son pequeñas (hasta 6 millones de kcal/h), utilizándose para quemar biomasa con una granulometría máxima de 30 mm, y, una humedad de hasta un 35%. Durante la combustión, el

espacio deber ser reducido, lo que provoca altas temperaturas de llama, y una gran cantidad de escorias

CÁMARAS TORSIONALES

Están formadas por quemador diseñado para la combustión solida pulverizada. Los tamaños de partícula deben estar comprendidos entre 10,1 y 30 mm, ya que el combustible debe ser transportado neumáticamente. Este quemador no es recomendable su uso cuando la biomasa tenga humedades superiores al 30%.

COMBUSTIÓN EN LECHO FLUIDO (CLF)

La tecnología de combustión de lecho fluido es una de las variantes que se viene usando cada vez con más abundancia de cara a resolver los problemas de eliminación de residuos, consiguiéndose a su vez, un mayor aprovechamiento energético.

3.1.2.4. VARIABLES DE OPERACIÓN.

Las variables del proceso que rigen el funcionamiento de la combustión son:

- La proporción de oxígeno de entrada: la escasez de oxígeno impide que la reacción se complete, produciéndose carbón perjudicial para el equipo y monóxido de carbono perjudicial para el ser humano. Por el contrario, cuando hay una cantidad sobrante de oxigeno se ralentiza el proceso de combustión.

- Temperatura de combustión: es la temperatura que alcanzan los productos de la combustión por el calor generado en la reacción. La temperatura es una variable muy importante si queremos que el combustible combustione completamente y de una manera adecuada. Aunque, alcanzar temperaturas demasiado altas puede producir problemas en los materiales de la caldera y grandes pérdidas de radiación que disminuirán la eficiencia del proceso. Una solución es conseguir que la temperatura de combustión se encuentre entre los 600 y 1300^{o}C.

- Características del combustible: dentro de las características físicas y químicas del combustible destacan la granulometría, el contenido de humedad y el poder calorifíco. Cuando más pequeño sea el tamaño de la partícula, la combustión se desarrollará de forma más rápida. Por otro lado, una humedad elevada supone una pérdida de energía térmica, ya que parte del calor generado se emplea en evaporar el agua. Y por último, un poder calorífico alto supone un derrumbe de energía mayor, influyendo, por lo tanto, en el dimensionamiento del sistema.

3.1.3. PIRÓLISIS.

La pirolisis es la descomposición termoquímica de materia orgánica mediante la cual el material orgánico de los subproductos sólidos se descompone por la acción del calor, en una atmosfera deficiente de oxígeno y se transforma en productos líquidos, gases y sólidos. También, se denomina pirólisis a las reacciones de inicio y acompañamiento de los procesos de combustión y gasificación.

Se trata de un proceso complejo desde un punto de vista químico, se lleva a cabo a partir de una serie de reacciones de muchos factores: estructurales, de composición de materia prima, de tecnología empleada, de la velocidad de calentamiento, del tiempo de residencia, de la velocidad de enfriamiento, y de la temperatura del proceso.

Un antiguo uso industrial de la pirólisis es la producción de carbón vegetal. Durante los últimos años ha despertado un renovado interés en la comunidad científica, ya que las últimas investigaciones han permitido y desarrollado tecnologías capaces de variar las proporciones de gas, líquido y sólido. Esto está permitiendo proporcionar una opción viable para transformar los residuos agrícolas y forestales en combustibles líquidos de manera rentable, y de forma descentralizada.

3.1.3.1. ETAPAS DE LA PIRÓLISIS.

Aunque la descomposición térmica de la materia orgánica es muy compleja, se pueden distinguir a lo largo del proceso varias etapas:

- Hasta los 200ºC se produce una pérdida de agua y de otros productos volátiles.
- Entre los 200 y los 250ºC los constituyentes menos estables de la biomasa se descomponen con desprendimientos de agua y óxidos de carbono, formándose hidrocarburos líquidos oxigenados (alcoholes y ácidos).
- Hacia los 275ºC se genera la mayor parte de los hidrocarburos líquidos, reacción que, al ser exotérmica, recaliente la masa hasta 300-350 ºC.
- Por encima de los 300ºC comienza la formación de productos carbonosos de alto peso molecular.

3.1.3.2. TIPOS DE PIRÓLISIS.

Una forma de clasificar los distintos tipos de pirólisis es precisamente en función de tres de las variables citadas anteriormente: la velocidad de calentamiento, el tiempo de residencia, y la temperatura final. Los tipos de pirólisis, junto a los valores típicos de estos factores, se detallan en la siguiente tabla.

Proceso	**Tiempo de residencia**	**Velocidad de calentamiento**	**Presión**	**Temperatura máxima**	**Producto mayoritario**
Carbonización	Horas- Días	Muy baja	1 bar	400	Sólido
Ultrapirólisis	< 0,5s	Muy alta	1 bar	1000	Gas y químicos
Vacío	2-30s	Media	<0,1 bar	400	Líquidos
Flash	<1s	Alta	1bar	>650	Gas
Metanol - pirólisis	<10s	Alta	1bar	>700	Químicos
Convencional	5-30 min	Baja	1bar	600	Gas, líquido y sólido

Tabla 1-Tipos de pirolisis y productos mayoritarios. [8]

PARAMETROS DE LA PIRÓLISIS

La pirólisis es un proceso complejo con numerosas variables. Estos parámetros van desde las características del combustible, hasta los valores de las variables físicas y químicas presentes durante el proceso. A continuación, se desarrollan los parámetros que definen las características que debe tener la pirólisis de la biomasa:

- La composición: la cantidad de los distintos productos pirolíticos obtenidos depende de la medida de la composición de la biomasa original. Por ejemplo, un aumento en el porcentaje de polietileno en una mezcla con madera aumenta la fracción sólida, el valor calorífico y el porcentaje de hidrocarburos gaseosos frente a los óxidos de carbono.

- La densidad: la mayor o menor porcentaje de fracción gaseosa generada en la pirolisis viene dada por la densidad. Una mayor densidad provoca que los alquitranes queden retenidos en las partículas más tiempo, provocando que la fracción más alta de ellos se transforme en gas.

- La temperatura: es un parámetro muy importante, intervienen en la rapidez y extensión en que se presentan las reacciones químicas, la distribución, y la composición de los productos obtenidos.

- La humedad: si la biomasa tiene bastante cantidad de humedad genera que parte del calor suministrado para el proceso pirolítico se emplee em evaporar el calor de esta, favoreciendo la carbonización, y reduciendo la formación de aceites.

- La velocidad de calefacción: cuando hay tasas de calentamiento no demasiado altas sin la evacuación rápida dl volátil promueven la formación de carbonizado, ya que permiten un mayor tiempo de contacto entre la fase sólida y volátil. En el caso opuesto, tasas de calentamiento elevadas, inhiben la formación de carbonizado, generando gradientes térmicos u promoviendo la presencia de reacciones secundarias.

3.2 COGENERACIÓN DIRECTA: LA TURBINA DE VAPOR.

Las turbinas de vapor son máquinas térmicas motoras, cuyas aplicaciones comprenden desde centrales eléctricas hasta sistemas industriales de vapor y en un rango de potencias que abarca desde las pequeñas potencias KW hasta cientos de MW.

Durante las pasadas décadas, prácticamente cada uno de los componentes de la turbina ha sido estudiado de una manera exhaustiva, con el fin de mejorar su diseño y lograr así una mayor eficiencia. Todos los progresos que se han producido en áreas tales como materiales, aerodinámica, tecnologías de diagnóstico y monitorización, protección y regulación, etc, han sido aplicados a los nuevos diseños.

Una turbina de vapor, está compuesta por dos partes, el rotor, y el estator. El rotor está formado por una serie de álabes unidos al eje, constituyendo la parte móvil de la turbina. El estator por otro lado, también está formado por alabes, pero unidos a la carcasa de la turbina en lugar de al eje, siendo, por tanto, la parte fija de la turbina.

Las turbinas de vapor generan principalmente electricidad, teniendo como subproducto energía térmica (vapor).

3.2.1. DESCRIPCIÓN DE LA TECNOLOGÍA.

El ciclo termodinámico básico de una turbina de vapor se conoce como el ciclo Rankine. Este ciclo es la base de los generadores de energía convencionales estacionarios, donde mediante un foco de calor (caldera) se convierte el agua a alta presión. Al comienzo, el agua es bombeada para elevar su presión. Después, el agua llega a la caldera, se evapora aumentando su temperatura. A continuación, el vapor a alta presión se expande en la turbina mediante una conversión de presión en velocidad. Luego, el vapor se lleva a un condensador o un sistema de distribución de vapor de temperatura intermedia, este vapor es suministrado a otra aplicación industrial o comercial. Por último, el condensado del condensador o del sistema que utiliza el vapor industrial, se devuelve a la bomba agua para comenzar de nuevo el ciclo.

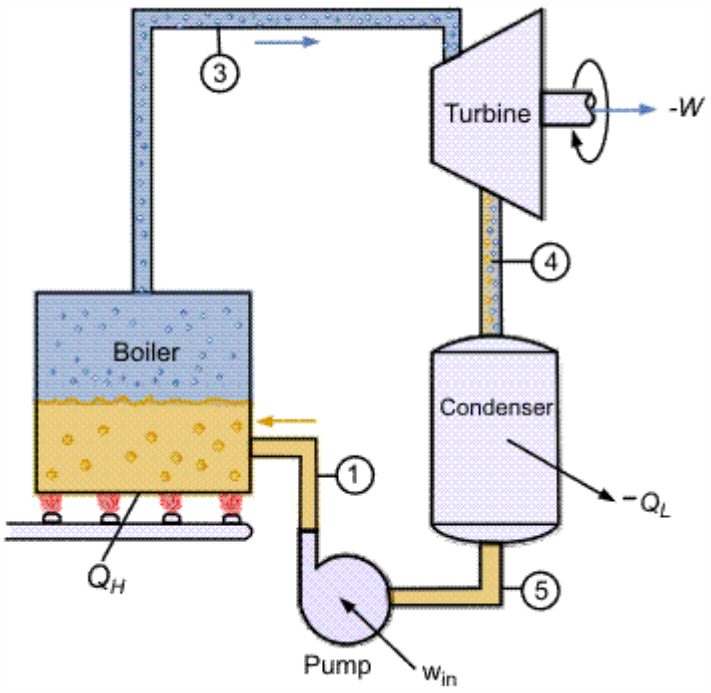


Ilustración 8- Ciclo básico de una turbina de vapor. [9]

CALDERA

En las turbinas de vapor, el combustible se quema en un equipo independiente, la caldera. La caldera se encuentra separada del equipo de generación de energía. La energía se transfiere de la caldera a las tuberías por dónde circula el agua, es un sistema de

combustión externa. Esto permite que las turbinas de vapor funcionen con una amplia gama de combustibles.

TURBINA DE VAPOR

La turbina de vapor es el elemento encargada de expandir el vapor que le llega a alta presión, hasta una presión más baja, proporcionando al eje la energía necesaria para accionar un generador o ejecutar un proceso mecánico. Se transforma la entalpía del vapor en energía mecánica en el eje.

Hay dos diseños distintos para las turbinas de vapor: las turbinas de acción y las turbinas de reacción. Las turbinas de acción transforman la energía de presión del vapor en velocidad en las toberas y el impulso del vapor a velocidad, que mueve el rotor. En las turbinas de reacción, hay diferente presión a ambos lados de las ruedas de los alabes y esto es lo que impulsa el rotor. En la mayoría de los casos, las turbinas de reacción tienen mejor rendimiento.

3.2.2. TIPOS DE TURBINAS DE VAPOR.

Existen numerosos tipos de turboalternadores, con una relación producción eléctrica/térmica que varía entre amplios. En cada situación concreta habrá que elegir el tipo de máquina que mejor se ajuste a las necesidades. Vamos a presentar un repaso a los tipos y combinaciones de máquinas que pueden darse.

TURBINA DE CONDENSACIÓN

Una turbina de condensación recibe el vapor a la presión y temperatura del generador de vapor y lo expansiona hasta una presión subatmosférica, a la que el vapor condensa para volver nuevamente a la caldera.

Aunque este sistema se caracteriza por su máxima flexibilidad, pudiéndose seguir con él cualquier fluctuación de las demandas eléctrica y térmica, es también el menos eficiente. Efectivamente, más del 50% de la energía del vapor que pasa por la turbina se disipa en el condensador en forma de calor latente; además, el vapor de proceso no se utiliza para producir trabajo en la turbina.

Por estas razones, normalmente no se suele elegir este tipo de sistema. Existen excepciones, como combustible un subproducto del proceso, o un calor residual.

TURBINA DE CONTRAPRESIÓN

El vapor procedente del generador de vapor entra en la turbina y se expansiona a través de sus escalonamientos, produciendo así trabajo hasta la sección de salida desde donde es enviado a proceso. Este sistema se caracteriza por ser la instalación más simple y la de máxima economía.

Para que una instalación de cogeneración como esta funcione la electricidad demandada se debe corresponder con el trabajo que se ha obtenido del vapor. En la práctica, esta situación no se presenta, ya que en un gran número de industrias la demanda eléctrica y

de vapor fluctúan ampliamente y no se corresponden esas variaciones. Por tanto, una disminución en la demanda de vapor originaría una disminución del trabajo producido y por consiguiente, un déficit de energía eléctrica, etc.

3.2.3. CARACTERÍSTICAS.

Las características principales que poseen las turbinas de vapor se basan en los siguientes factores:

TAMAÑO Y POTENCIA

Las turbinas de vapor poseen la característica de poder adaptarse a la presión y temperatura necesaria para maximizar la eficiencia eléctrica y térmica. Existe una amplia gama de turbinas en el mercado de distintos tamaños desde las denominadas microturbinas con una potencia inferior a los 100KW, hasta grandes turbinas con una capacidad 1300MW.

EFICIENCIA

La eficiencia de las turbinas de vapor es relativamente alta (60-85%). Sin embargo, la eficiencia eléctrica es baja. En conclusión, la alta temperatura requerida en el proceso térmico hace que la eficiencia eléctrica disminuya. Si lo que se quiere es aumentar el rendimiento eléctrico se debe incrementar la presión y la temperatura del vapor a la entrada de la turbina.

DISPONIBILIDAD

Una turbina de vapor tiene un índice de operatividad del 99% del tiempo, además, las paradas de inspección y mantenimiento se realizan generalmente cada periodo largo. El mayor inconveniente es que el tiempo de arranque es largo.

FLEXIBILIDAD DE COMBUSTIBLE

La amplia variedad de combustible que se pueden utilizar en turbinas de vapor varía desde: fuentes nucleares, carbón, gasóleo, gas natural, biomasa, energía solar, etc. Esto es posible gracias a que las turbinas de vapor tienen separada la fuente de calor, de manera que no se convierte directamente el calor en energía eléctrica, es decir, la energía es transferida desde la caldera hasta la turbina, a través del vapor a alta presión que acciona la turbina.

COSTE

La instalación con turbinas de vapor suele costar entre 800-1000 €/KW. Si la instalación se añade una turbina de vapor a una caldera existente o a un ciclo combinado, el coste se incrementaría en 400-800€/KW.

3.3 COGENERACIÓN MEDIANTE GASIFICACIÓN.

La gasificación de la biomasa consta de someter al combustible una serie de reacciones termoquímicas en ausencia de oxígeno, para transformar el combustible de un estado

sólido a un estado gaseoso, de forma que puedan ser utilizados para producir energía en una turbina de gas o en un motor de combustión interna alternativo.

3.3.1. TURBINA DE GAS.

En las últimas décadas, las turbinas de gas han sufrido una gran expansión en el mercado, siendo en este momento la tecnología más aplicada en los sistemas de cogeneración de media y alta potencia. Al comienzo, las turbinas de gas se empleaban en los picos de demanda. En cambio, ahora, al aumentar la eficiencia, la turbina de gas, se ha convertido en la tecnología más usual de las industrias energéticas, Con eficiencias que varían desde 40%-60% en el caso de los ciclos combinados.

3.3.1.1. DESCRIPCIÓN DE LA TECNOLOGÍA.

El ciclo termodinámico de las turbinas de gas está basado en el ciclo Brayton. El aire ambiente es aspirado, calentado y comprimido en el compresor. Después, el aire se mezcla con el combustible en la cámara de combustión. A continuación, los gases de combustión generados se llevan a la turbina donde se produce la energía necesaria. La energía originada, se emplea en hacer funcionar el compresor y en obtener energía eléctrica. En la siguiente figura, se representa los principales componentes de una turbina de gas: compresor, cámara de combustión y turbina.

Uno de los aspectos más importante a la hora de dimensionar la turbina de gas, es la presión y sobre todo la temperatura ambiental, afectan de forma directa al rendimiento y potencia de estas máquinas. En efecto, al aumentar la temperatura de admisión, aumenta el trabajo específico absorbido por el compresor y en consecuencia se reduce la potencia y el rendimiento.

3.3.1.2. TIPOS DE TURBINAS.

Los distintos tipos de gas pueden operar en ciclos abiertos o cerrados.

TURBINA DE GAS DE CICLO ABIERTO EN SISTEMAS DE COGENERACIÓN.

La mayoría de las turbinas de gas operan con el ciclo Brayton abierto. El funcionamiento es el siguiente: un compresor toma aire del ambiente incrementa su presión, este aire es enviado a la caldera con una temperatura superior al ambiente debido al aumento de la presión (los sistemas antiguos y pequeños trabajan con una relación de compresión 15:1, en cambio los sistemas novedosos y grandes operan con relaciones de compresión 30:1.Una vez alcanzada la caldera, se inyecta el combustible dando lugar al comienzo de la combustión, normalmente aire en exceso (la caída de presión en la caldera es de un 1-2%). Después, los gases abandonan la caldera con una temperatura alta, y con una concentración de oxígeno que varía entre un 15 y un 16 %.

De forma general, si la temperatura es mayor de los gases, mayor será la eficiencia del ciclo. Los materiales que forman el sistema limitan la temperatura (los materiales usados en este tipo de tecnología actualmente no permiten superar los 1300ºC). Los gases que se encuentran en este punto entran a la turbina produciendo el trabajo mecánico suficiente para el funcionamiento del compresor y la generación de la electricidad.

Los gases que abandonan la turbina mantienen temperaturas altas (450-600ºC), por lo que suelen emplearse para generar vapor de alta calidad en un intercambiador de vapor. Por otro lado, los gases que salen de la turbina pueden emplearse directamente en procesos que necesiten una temperatura alta y una humedad baja.

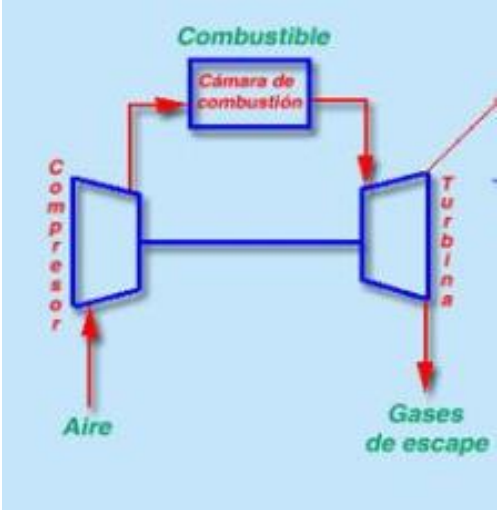


Ilustración 9. Esquema Ciclo abierto Turbina de gas[10]

TURBINA DE GAS CICLO CERRADO EN SISEMAS DE COGENERACIÓN.

Los sistemas de cogeneración en ciclo cerrado se basan en que el fluido de trabajo (habitualmente helio o aire), circule por un circuito cerrado. El funcionamiento es similar al de ciclo abierto, con la excepción de que el gas a la salida de la turbina se dirige hacia el compresor en lugar de expulsarlo. A veces se instalan intercambiadores de calor entre el compresor y la turbina para aumentar la eficiencia.

Con el empleo de este sistema, el fluido de trabajo puede mantenerse limpio en el caso de que exista un intercambiador de calor en la caldera, de forma que evitamos los problemas que causan la erosión y la corrosión.

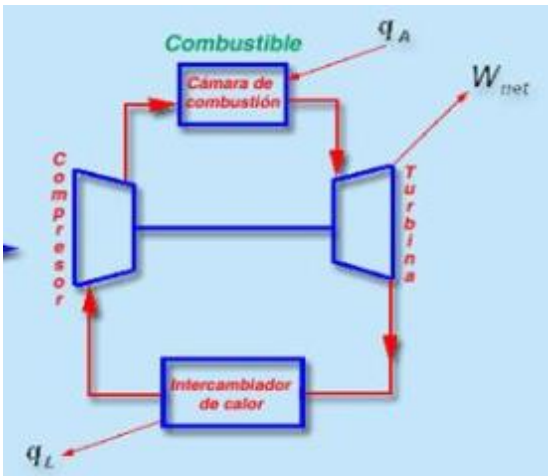


Ilustración 10. Esquema Ciclo cerrado Turbina de gas [10]

3.3.1.3. CARACTERISTICAS.

Las turbinas de gas presentan las siguientes características:

POTENCIA

Las turbinas pueden utilizarse en ciclo simple o ciclo combinado, siendo las turbinas de ciclo simple las más usadas cuando la potencia es menor que 25 MW.

CALIDAD TÉRMICA

La salida térmica de las turbinas de gas es de alta calidad, por lo tanto, permite emplear este tipo de turbinas en cualquier aplicación de cogeneración.

EFICIENCIA

La eficiencia térmica de la turbina de gas, es decir, del ciclo de Brayton, es en función de la relación de presiones entre la entrada de la turbina y la del ambiente. Las turbinas grandes y actuales llegan a conseguir eficiencias del 40-43% por permitir una temperatura de los gases a la entrada más alta (1200-1400^{o}C).

Una manera de aumentar la eficiencia es instalar un intercooler para refrigerar el aire en un punto intermedio del compresor, ya que una gran parte de la potencia nominal se consume en el compresor, lo que provoque que la eficiencia disminuya. Con el intercooler se consigue reducir el trabajo de compresión y se aumenta por lo tanto la eficiencia.

DISPONIBILIDAD

Su tiempo de arranque es menor que el de una turbina de vapor. El funcionamiento de la turbina de gas es de 90-98%. Su vida útil depende principalmente de la calidad del combustible y del mantenimiento.

MANTENIMIENTO

Las turbinas que funcionen por ciclos requerirán tres veces más de revisiones que las turbinas que funcionen continuamente. Además, si el funcionamiento de la turbina se encuentra por encima de la capacidad nominal durante periodos de tiempo significativos, se aumentará drásticamente el número de inspecciones y revisiones.

FLEXIBILIDAD DE COMBUSTIBLE.

Habitualmente, las turbinas de gas operan con gas natural, gas de síntesis, o fuelóleo. Sin embargo, si se realiza un tratamiento previo a los gases que entran en la turbina se puede ampliar el abanico de combustibles.

RECUPERACIÓN DE CALOR.

La turbina de gas abierto es el sistema menos eficiente porque no se aprovecha la recuperación de calor de los gases que salen de la turbina. Estos gases calientes, pueden transporte a un intercambiador de calor para generar vapor o agua caliente, mejorando la eficiencia del sistema. Una vez que se obtiene el vapor, este puede emplearse en algún

proceso que necesite un aporte térmico, o bien, utilizarse como alimentación de una turbina de vapor, creando un ciclo combinado. Si las turbinas de gas alcanzan grandes dimensiones, los ciclos combinados son viables, se alcanzan eficiencias eléctricas de hasta el 60%.

COSTE

Las turbinas de gas es el sistema más barato por potencia generada. Además, puede disminuir si se usa ciclo combinado.

3.3.2. COGENERACIÓN CON UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA ALTERNATIVO.

Los motores de combustión interna alternativos (MCI) son el tipo de motor térmico más utilizado para la transformación de energía química de un combustible en trabajo. En estas aplicaciones convencionales, el objetivo es producir el máximo trabajo con el rendimiento más alto posible.

Los motores alternativos son máquinas volumétricas, consistentes basadas en un dispositivo cilindro-émbolo, en el que se introduce a través de unas válvulas o lumbreras el aire y el combustible. Una vez efectuada la combustión, los gases resultantes de la misma son expulsados al exterior a través de las válvulas de escape. Mediante las reacciones químicas de combustión se libera la energía química del combustible y parte de esa energía es transformada en el efecto útil del motor, que en una aplicación convencional es el trabajo mecánico que se transmite el mecanismo biela-manivela.

Los adelantos de estos últimos años en la recuperación del calor eliminado, además con la coyuntura de los precios de la energía, ha permitido la utilización cada vez más frecuente de motores alternativos en instalaciones de cogeneración.

En un motor alternativo, aproximadamente el 30-35% de la energía que hay en el combustible es convertida en trabajo en el eje. La energía restante es eliminada en forma de calor o energía térmica de los gases de escape.

3.3.2.1. DESCRIPCIÓN DE LA TECNOLOGÍA.

Los dos tipos principales de motores alternativos son: de encendido provocado por chispa (MEP) y de encendido por compresión (MEC). Al primer tipo también se le ha denominado motor Otto o de gasolina por el tipo de combustible utilizado, mientras que el segundo es el motor diésel o de gasoil. Los dos tipos de motor usan una cámara de combustión cilíndrica, donde hay un pistón que se desplaza longitudinalmente por todo el cilindro. El pistón se encuentra conectado a un cigüeñal que transforma el movimiento lineal en un movimiento rotacional, y, mediante un eje, acciona el generador.

La principal diferencia entre los ciclos de MEC y MEP, se debe al método con el que empieza la combustión. Los motores de encendido por chispa utilizan una bujía para encender la mezcla de combustible con aire existente en el cilindro. Por el contrario, los motores de encendido por compresión comprimen el aire introducido en el cilindro con el fin de alcanzar una presión alta, lo que provoca un aumento de la temperatura hasta

alcanzar el punto de auto ignición del combustible. Una vez que se ha conseguido esta condición, se inyecta el combustible para que comience la combustión.

Según el ciclo de funcionamiento del motor se puede hablar de motores de 2 o de 4 tiempos. Habitualmente, los motores de 2 tiempos se emplean en aplicaciones de energía estacionaria, concretamente en servicio en espera. Sin embargo, la mayoría de los motores de ignición por chispa, y, de los motores diésel utilizados en aplicaciones estacionarias de generación de energía, se basan en los motores de 4 tiempos.

3.3.2.2. TIPOS DE MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA ALTERNATIVOS.

Una forma de clasificar los sistemas basados en los motores alternativos se basa en el tipo de ciclo, pudiendo ser el ciclo de MEP o el ciclo MEC. Los MEP, pueden operar con una amplia gama de combustibles tales como: gasolina, gas natural, propano, biogás, etc. Por otro lado, los MEC operan con una presión y una temperatura mayor, de forma que los combustibles que se emplean son: gasóleo, fuel, biodiesel etc.

Otra forma de clasificar los motores se basa en: el movimiento que realizan (alternativos o rotativos), su ciclo de funcionamiento (2 o 4 tiempos) y el tamaño de estos. Atendiendo al tamaño los motores pueden ser:

- Sistemas pequeños: poseen una potencia de 15-1000 KW en motores basados en el ciclo de MEP, y, de 75-100KW en MEC.

- Sistemas de media potencia: en los casos en que la potencia sea de 1-6MW, en MEC y MEP

- Sistemas de alta potencia: cuando los sistemas tengan potencia superior a los 6MW.

3.3.2.3. CARACTERÍSTICAS.

TAMAÑO Y POTENCIA

Los motores alternativos están disponibles comercialmente en varios tamaños, desde los 10KW hasta los 18MW, pudiendo producir agua caliente, vapor a baja presión, e incluso agua de refrigeración.

ARRANQUE RÁPIDO

Los motores alternativos tienen una rápida capacidad de arranque lo que permite reanudar el sistema de forma apropiada en poco tiempo. Por lo tanto, en el caso de que se necesite energía de forma rápida, ya sea por una emergencia o por un pico de demanda, los motores alternativos pueden suministrar electricidad rápidamente.

EFICIENCIA.

Los motores alternativos poseen una buena eficiencia eléctrica, pueden superar incluso a las turbinas de gas con un tamaño semejante.

DISPONIBILIDAD.

Son equipos robustos, que presentan una disponibilidad del 95% del tiempo en aplicaciones estáticas de generación de energía.

MANTENIMIENTO.

El mantenimiento del motor se compone de inspecciones, ajustes, cambios de bujías, reemplazos de aceite del motor y refrigerante periódicos. El intervalo de tiempo entre revisiones debe ser el recomendado por el fabricante.

RECUPERACIÓN DE CALOR

La energía que se libera durante la combustión se convierte en un trabajo y calor. El trabajo se emplea en impulsar el generador a través del eje, mientras que el calor se libera del motor mediante el empleo de refrigerante a través de los gases de escape y de la radiación superficial.

Si se recupera el calor de la camisa del motor y de los gases de escape, el 75-80% de la energía del combustible se puede llegar a utilizar eficazmente.

EMISIONES

El método principal para reducir las emisiones en los MEP (NO_X, CO y hidrocarburos no metánicos), son la combustión por exceso de aire y la combustión con estequiométrico con el posterior empleo de un tratamiento catalítico que suele tener una eficiencia del 90-99%. En el caso de los MEC, se generan más partículas, por lo que se utilizan trampas de partículas y filtros recubiertos con un catalizador que debe ser regenerado si se desea una operación adecuada y una larga vida útil.

4 ELECCIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE COGENERACIÓN.

4.1 ELECCIÓN DE EMPLAZAMIENTO

4.1.1 LOCALIZACIÓN GEOGRAFICA

El elegir un emplazamiento adecuado es uno de los factores más importantes de cara a la viabilidad tecnológica y económica del sistema. La ubicación, la cantidad de los residuos disponibles, la distancia existente entre la central y los puntos de generación, la existencia de vías de transporte adecuadas, etc. son parámetros que tienen que estudiarse con detenimiento durante el proceso de elección del emplazamiento.

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, el lugar seleccionado para el emplazamiento de la planta de cogeneración ha sido la localidad de Cuéllar (Segovia), ya que este municipio se encuentra estratégicamente localizado por su cercanía a las zonas de la provincia de Segovia y Valladolid vulnerables a la contamainación de nitratos (Ver Ilustración siguiente) según *el Decreto de la junta de Castilla y León 40/2009, de 25 de junio, en el que se designan las zonas vulnerables a la contaminación de las aguas por nitratos procedentes de origen agrícola y ganadero, y se aprueba el Código de Buenas Prácticas Agrarias.*

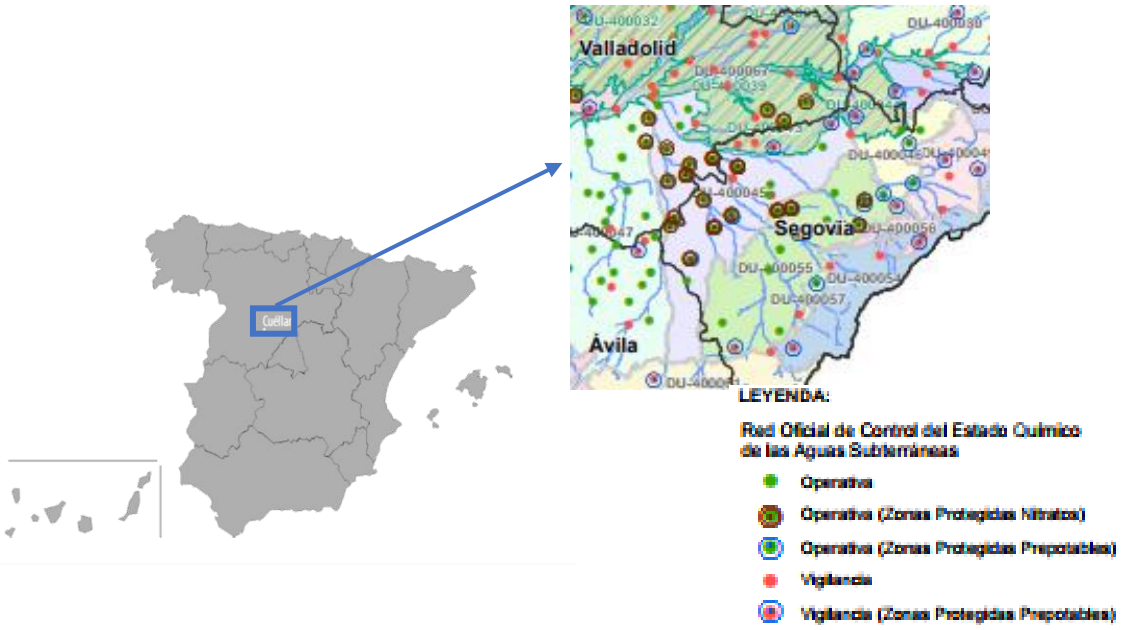


Ilustración 11. Localización de Cuellar y Mapa de Zonas vulnerables por contaminación por nitratos Fuente: Red Oficial del Control Químico de las Aguas [11].

Además de situarse en el punto medio de las zonas más vulnerables a la contaminación por nitratos de Castilla y León, la elección de Cuéllar como emplazamiento de la planta

se debe también a ser el municipio más grande de la zona (tiene mejores accesos que pueden resultar importantes para facilitar la construcción y la recogida de los combustibles).

Dentro de esta localidad, se elige la zona sur de Cuéllar (Ver Ilustración 3) para la ubicación concreta de la planta de tratamiento de purines motivado por:

- El paso cercano del río Cega (caudal medio anual de 1,25 m^3/s), que puede proporcionar agua para el proceso y la refrigeración del sistema.

- Cercanía a la autovía A-60: lo que facilita las comunicaciones y el transporte de los materiales para la construcción de la instalación, y, para su posterior explotación.

Ilustración 12- Emplazamiento de la instalación dentro de Cuellar. D1 (distancia a la autovía)=800m. D2 (distancia al rio)=1.7Km. S1 (superficie de la instalación).[12]

Cuéllar, es un municipio de 9500 habitantes, localizado a 150 km de Madrid, a 50 km de Valladolid, y a 60 km de Segovia. La elección de este municipio se basa principalmente en que esta zona tiene una alta densidad de granjas de ganado porcino, teniendo en cuenta que la provincia de Segovia es la segunda provincia por detrás de Lleida con el mayor número de cabezas de ganado porcino. Esto ha provocado que esta zona sea una de las cinco zonas vulnerables a la contaminación de las aguas por nitratos. Una zona

vulnerable es aquella agua cuyas aguas subterráneas superan una concentración de nitratos de 50 miligramos por litro y en cuyas aguas superficiales hay más de 50 miligramos por litro [10].

Además, los purines no sólo contaminan las aguas subterráneas, sino que terminan por dejar a la tierra en condiciones no aptas para el cultivo. Además, producen fuertes olores en el entorno de las explotaciones, lo que es incompatible con actividades residenciales y de ocio (gran parte de la economía cuellarana depende del turismo).

4.1.2 DISPONIBILIDAD DE RESIDUOS EN EL AREA ELEGIDA

Se parte de un estudio para determinar aproximadamente la cantidad de purines que se producen en un radio donde el punto central es precisamente la localidad de Cuéllar, para con esos datos dimensionar la planta objeto de este TFG.

Se analiza la cantidad de combustible a 15km de Cuéllar, municipio donde se realizará el emplazamiento.

Ilustración 13- Radio de 15km de obtención de los combustibles.[12]

En primer lugar, se comenzará contabilizando las cabezas de ganado que hay en las distintas poblaciones del radio que se han acotado:

	Número de piezas de ganado porcino		
Municipio	**Provincia**	**Nº Plazas Hembras**	**Nº de plazas Engorde**
Bahabón	Valladolid	850	0
Campaspero	Valladolid	967	0
Cogeces del Monte	Valladolid	0	6.084
Chañe	Segovia	2.304	6.948
Cuéllar	Segovia	12.801	66.299
Gomezsarracín	Segovia	1.600	3.589
Olombrada	Segovia	605	10.940
Sanchonuño	Segovia	190	4.815
Vallelado	Segovia	3.092	1.874
Viloria	Valladolid	1.600	0
Total		**24.009**	**10.0549**

Tabla 2 Cantidad de cabezas de ganado. Fuente: censo de la junta Castilla y León enero 2017 [13]

Después, se calcula la cantidad de estiércol producido por las piezas de ganado porcino:

Volumen de purín producidos en las granjas			
Categoría	**Nº plazas**	**m3/plaza y año**	**m3/año**
Hembras	24.009	5,25	126.047
Engorde	100.549	2,4	2413.17
Total			367.364

Tabla 3. Volumen de purín producido en las granjas [14]

Teniendo en cuenta que la densidad media del purín es de 998 kg/m^3 la producción de un año es de 365.895 toneladas en un año, por lo tanto, se generarían 1.002 toneladas ≈ 1000 toneladas diarias de purín, es decir 417,7 kg/hora.

Por cada kg de estiércol, se producen 0.055 m^3 de biogás [15]. Por lo tanto, se producirán 2.297 m^3 diarias de biogás, dato que sirve para concluir que en un radio de 15km desde Cuéllar se encuentra suficiente combustible para abastecer una planta de tamaño medio-grande. Estos datos se usarán más adelante para el dimensionamiento de la planta y de la generación de energía.

Fundamentalmente el biogás está compuesto por metano y dióxido de carbono, mezclado en menor proporción con distintos gases, la caracterización química es la siguiente:

Compuestos del biogás	**%**
Metano, CH_4	65
Dióxido de carbono, CO_2	30
Vapor de agua, H_2O	2
Monóxido de carbono CO	1
Nitrógeno, N_2	0,2
Hidrógeno, H_2	0,2

Sulfuro de hidrógeno, H_2S	0,2
Oxígeno, O_2	0,4

Tabla 4 Caracterización química del biogás [16]

4.2 ELECCIÓN DE TECNOLOGÍA DE COGENERACIÓN.

La elección de un tipo concreto de tecnología frente al resto de cara a una determinada aplicación depende de múltiples factores a estudiar como: el tipo de combustible, la disponibilidad del mismo, los requerimientos de espacio, el rendimiento, el tiempo de arranque, etc. La siguiente tabla resume las características de las tecnologías que se han estudiado en el apartado anterior:

	Puntos fuertes	**Debilidades**
Motores alternativos	REC elevado Alta eficiencia eléctrica Bajo coste Vida de trabajo alta Buena adaptación a variaciones de la demanda	Elevado coste de mantenimiento
Turbina de gas	Alta fiabilidad Gran abanico de aplicaciones Alta temperatura de la energía térmica Posibilidad de postcombustión para incrementar de calor útil	Combustibles limitados Vida de trabajo corta
Turbina de vapor	Alta eficiencia Alta seguridad Utiliza todo tipo de combustibles, pero con bajos contenidos de humedad Largo periodo de vida Amplio intervalo de potencias	Coste elevado Puesta en marcha lenta Obtención de potencia eléctrica baja

Tabla 5- Comparativa de puntos fuertes Vs. debilidades. [17]

Dado que el objetivo de este Trabajo de Fin de Grado es utilizar purines de explotaciones porcinas como combustible, que contienen un porcentaje de agua alto y, siguiendo lo expuesto en la Tabla anterior, la turbina de vapor no es una buena opción ya que habría que invertir mucha energía para quemar toda la humedad que contiene el purín. De todas

maneras, aunque se utilizaran motores de combustión interna alternativos o turbinas de gas sería necesario realizar un tratamiento a la biomasa para transformar ésta en un combustible gaseoso (biogás) a través de un proceso de gasificación previo.

Para elegir la tecnología más adecuada para la planta de cogeneración se han seguido estos indicadores:

Rendimiento del sistema	**Espacio necesario**	**Tiempo de arranque**	**Económico**	**Flexibilidad de funcionamiento**
La turbina y los motores de combustión interna alternativos tienen mejores rendimientos que la turbina de gas. Además, es que estos dos sistemas permiten operar a carga parcial sin disminuir excesivamente su rendimiento	Los motores de combustión interna alternativos presentan la tecnología que menor espacio necesitan para potencias similares, siendo la turbina de gas la alternativa que requiere mayor espacio.	La mejor opción son los motores de combustión. Esta característica es importante teniendo en cuenta que de vez en cuando las instalaciones necesitan hacer paradas para revisiones	Teniendo en cuenta la cantidad anual de combustible que se va a gestionar (tamaño de la planta), utilizar una turbina de gas con esta cantidad de combustible sería menos rentable.	Los motores de combustión interna permiten responder de manera casi inmediata a las variaciones de potencia, sin que ello conlleve un gran incremento en el consumo específico del motor

Tabla 6- Resumen de propiedades. [17]

Teniendo en cuenta todo lo anterior, se concluye que, para el caso estudiado, el motor de combustión interna alternativo es la tecnología más adecuada, sobre todo considerando el tamaño de la planta de cogeneración y el tipo de combustible utilizado. Teniendo en cuenta que aunque en el biogás se realicen pretratamientos antes de su utilización, siempre quedan restos de compuestos que hacen que no sean combustibles puros, lo que en la turbina de gas por especificaciones complica su funcionamiento y baja su rendimiento.

5 APLICACIÓN DEL CASO PRÁCTICO

En este apartado, se va a analizar los distintos puntos del diseño de la planta de cogeneración. Primero se estudiará los sistemas de pretratamiento, tanto de agua, como del combustible (biogás). También en este apartado se detallará el sistema de cogeneración junto con la elección de los componentes y los cálculos. En el Anexo1, podemos observar un diagrama del conjunto

5.1 SISTEMAS DE PRETRATAMIENTO.

Los sistemas de pretratamiento se han divido en dos: el pretratamiento del biogás y el tratamiento del agua.

5.1.1 PRETRATAMIENTO DEL BIOGÁS.

Para llegar a tener el biogás con el que se suministraran los motores, llevan una serie de procesos desde que el purín esta en las granjas.

5.1.1.1 Transporte de purines desde las explotaciones porcinas a la planta centralizada.

El transporte de los purines desde las explotaciones a la planta centralizada de digestión anaerobia es uno de los puntos clave a tener en cuenta ya que en muchas ocasiones los costes asociados al mismo pueden ser los que limiten la rentabilidad del proyecto. Por ello resulta altamente recomendable analizar dichos costes de forma exhaustiva sustituyendo las estimaciones por datos concretos y lo más precisos posible. Se tendrán en cuenta los siguientes datos:

- El transporte de los purines de las granjas porcinas hasta la planta centralizada se realizará empleando los propios tractores con las cubas de los ganaderos para ahorrar en la inversión de camiones cisterna, además el trayecto que deberán recorrer es corto por lo tanto no influye que el tractor alcance una velocidad reducida.

- La cantidad diaria de purín que llegue a la planta será la equivalente a la capacidad de tratamiento de la planta en cada caso. Se evitará en la medida de lo posible tiempos elevados de almacenamiento de los purines en las explotaciones.

5.1.1.2 Bombeo de cabecera.

Para un buen funcionamiento del proceso de digestión es necesario que la alimentación sea uniforme, a fin de que las condiciones sean lo más estables posible. La alimentación em continuo no es práctica, ya que la recepción de los residuos se produce de forma discontinua (a medida que los camiones van descargando en planta) por lo que la impulsión de los purines hacia el digestor, previo paso por el tamiz va a realizarse en intervalos frecuentes y en volúmenes relativamente bajos en comparación con el volumen del digestor con el fin de evitar alteraciones bruscas de las condiciones normales de operación.

Las bombas deben escogerse de acuerdo con las características del influente. Por su consistencia fluida y el alto contenido en materia orgánica, las bombas centrífugas sumergidas con rotor picador proporcionan un resultado óptimo gracias a su robustez y fiabilidad.

5.1.1.3 Digestión anaerobia.

La digestión anaerobia consiste en la hidrolisis y reducción de sustancias orgánicas complejas mediante la acción de diversos microorganismos en ausencia de oxígeno. Los productos de la digestión anaerobia son: metano, dióxido de carbono, gases de traza y sólidos orgánicos estabilizados. El conjunto del proceso es llevado a cabo por numerosos tipos de bacterias trabajando de manera sintrófica, por lo que el desarrollo de este va a estar gobernado por el balance relativo de poblaciones viables entre los diferentes tipos de bacterias. La población microbiana responsable del proceso de transformación puede dividirse en tres grandes grupos según la fase del proceso en la que intervienen: hidrólisis, acidogénesis (y acetogénesis) y metanogénesis.

Dado que el proceso tiene lugar en ausencia de aire, el oxígeno contenido em la materia orgánica junto con el presente en nitritos, nitratos, sulfatos, etc., es utilizado por los organismos aerobios para producir elementos inocuos y otros producidos que se emplean en el propio proceso de digestión anaerobia.

5.1.1.4 Separación sólido-líquido del digestato.

Para la separación de las fracciones sólidas y líquidas del digestato se ha seleccionado el decantador centrífugo horizontal como sistema óptimo de separación del digestato de acuerdo con lo siguiente:

- Las características del digestato como por ejemplo su textura (más homogénea que ne el caso de los purines ‘’frescos’’), resultan óptimas para la separación mediante este tipo de tecnología.
- Es el equipo que mayor rendimiento de separación presenta en cuanto a materia seca, nitrógeno y fosforo se refiere. Este hecho afecta directamente a la viabilidad económica de la planta puesto que el transporte de la fracción sólida resultará más económico cuanto menor sea su contenido en agua.

La determinación del caudal a centrifugar diariamente viene dada por la capacidad de tratamiento de la planta y rendimiento de separación del tamiz, puesto que cierto volumen de purines es separado antes de la entrada al digestor.

5.1.1.5 Almacenamiento de la fracción líquida del digestato.

La fertilización de los campos de cultivo se lleva a cabo entre los meses de septiembre-octubre y marzo-abril. Llevar a cabo una fertilización eficaz implica un conocimiento profundo tanto del tipo de cultivo como del tipo de suelo por lo que, en muchas ocasiones, cuando no se dispone de la información necesaria se produce un manejo inadecuado de los fertilizantes. Para evitar prácticas inadecuadas, la Junta de Castilla y León limita, entre otras actividades, la aplicación de fertilizantes durante los meses de invierno.

Dado que la fracción líquido no va a tener salida en los meses de invierno, es necesario disponer de un sistema de almacenamiento con una capacidad suficiente para almacenarla. O una opción más adecuada, que es depurar el digestato en una depuradora e utilizar esta agua depurado para uso de las propias instalaciones o se si consiguieran la pureza adecuada se podría verter al río Cega.

5.1.1.6 Almacenamiento de la fracción sólida del digestato.

El digestato sólido es un producto estabilizado, carente de olor, con un alto porcentaje de materia seca y con alto valor como fertilizante o como material susceptible de compostaje. Por estas razones, lo más habitual es que la salida de la planta se produzca de forma más frecuente que en el caso de a fracción líquida.

El digestato sólido se mezclará, con la fracción sólida eliminada por el tamiz. Esta última se recoge en contenedores dispuestos a la salida del tamiz que deben ser transportados para realizar la mezcla.

5.1.1.7 Almacenamiento del biogás.

El sobredimensionamiento de los digestores va a permitir que cierta cantidad de gas sw acumule en la parte superior al no estar ocupada por el líquido mezcla. No obstante, y para evitar problemas de sobrepresiones, la planta dispondrá además de un depósito en el que se recoja el biogás que vaya produciéndose en el digestor.

El depósito seleccionado se denomina de cúpula flotante. La presión del gas en el interior depende del peso de la cúpula y la sección transversal de la misma. Las oscilaciones del volumen almacenado se deben a las oscilaciones de producción y consumo de gas, y se traducen en desplazamientos verticales, ascendentes o descendientes de la cúpula a través de railes. Este tipo de tanques incorporan un sello hidráulico que evita que el gas escape entre los espacios que existen entre la cúpula y la pared del tanque.

El depósito incorporará un sistema de sobre presiones de forma que en caso de producirse un aumento de presión por encima de la máxima admitida (bien porque continúe entrando gas una vez el techo ha agotado su recorrido, bien porque exista algún fallo en la planta) la válvula de seguridad se abrirá liberando el gas hacia la antorcha, que se encargara de quemar el gas.

5.1.1.8 Tratamiento y purificación del biogás.

Un importante problema que puede presentarse en los equipos donde se utiliza el biogás es la condensación de ácido sulfúrico en el interior de algunas de las unidades.

Entre los productos resultantes de la combustión del biogás se encuentran el dióxido de azufre (SO_2) y el vapor de agua, este último procedente del contenido en hidrogeno del propio biogás, del agua en suspensión del mismo y de la humedad relativa del aire de combustión.

La combustión en los motores se efectúa con exceso de oxígeno por lo que parte del dióxido de azufre puede oxidarse a trióxido de azufre (SO_3) y éste, a su vez, reaccionar con el agua para dar ácido sulfúrico (H_2SO_4).

Si la temperatura de los gases de escape desciende lo suficiente podría llegar a condensar el ácido sulfúrico lo que causaría graves problemas de corrosión en los equipos donde esto sucediese.

Para evitar el riesgo de corrosión es imprescindible reducir el contenido de azufre en el biogás utilizando un sistema de desulfuración previo a la combustión en los motogeneradores. Para este cometido se ha seleccionado la eliminación mediante proceso íntegramente biológico. Se utilizan filtros percoladores en los que en la superficie del material de relleno del filtro se toma una biopelícula integrada por bacterias sulfuro-oxidantes, es decir microorganismos especializados en la oxidación de compuestos reducidos de azufre, proceso del cual obtiene la energía necesaria para su crecimiento. Estos biorreactores permiten eliminar el H_2S con un coste de explotación enormemente bajo, sin la utilización de reactivos químicos (ventaja económica, de seguridad y ambiental) y ofrecen una elevada y sostenida eficacia de eliminación.

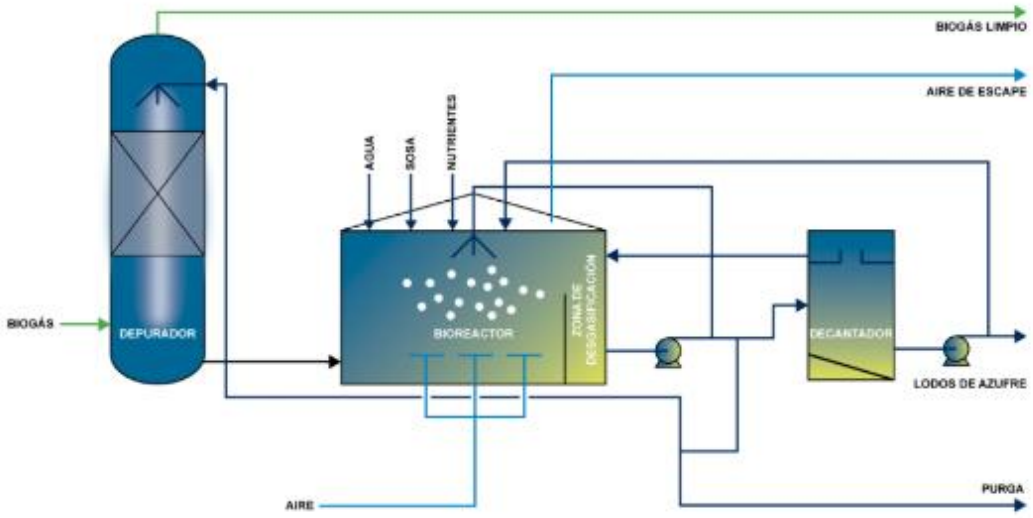


Ilustración 14- Esquema desulfuración.[17]

5.1.2 PLANTA DE TRATAMIENTO DEL AGUA.

La operación de introducir y mantener el agua de gran calidad y pureza dentro del ciclo termodinámico es una operación de mantenimiento muy importante, ya que de esta manera se consigue:

- Aumentar la vida útil de los distintas partes del ciclo termodinámico.
- Reducir los gastos de mantenimiento.
- Mantener el rendimiento correcto.

A fin de garantizar el control químico apropiado del agua del ciclo se deben vigilar tres parámetros fundamentalmente el oxígeno disuelto el pH, y, las sales. Si el control de estas tres variables es insuficiente, el coste de la pérdida es diez veces superior al coste de las

reparaciones, depende que la rentabilidad del agua depende en gran medida de la calidad del agua.

Los principales problemas que pueden surgir en el ciclo son: la corrosión por picadura, la corrosión por fatiga, el agrietamiento por corrosión bajo tensión, la erosión debido a partículas sólidas, la acumulación de deposiciones, y la erosión por gotas de agua.

De forma cualitativa, los compuestos químicos presentes en el agua producen principalmente los siguientes daños:

- Escamas: pueden originarse por la presencia de calcio (Ca), magnesio (Mg).

- Deposiciones: debido a la presencia de sílice (SiO_2) por debajo de los 41 bar, de sodio (Na), de cobre (Cu), de dióxido de carbono (CO_2) y ácido carbónico (H_2CO_3).

- Corrosión: principalmente generada por cloruros (CI-R), sulfatos (SO_4-R). Estos componentes actúan disminuyendo el p H. Si mantenemos el p H en torno a 9, se garantiza en gran medida la inhibición de la corrosión, oxígeno (O_2).

- Oxidación: debido al hierro (Fe).

La garantía en el suministro de agua de calidad pasa primero por conocer las peculiaridades del agua que se va a emplear en el ciclo de agua-vapor. Una vez evaluadas las características, se debe tratar el agua para que presente las propiedades óptimas. En términos generales, la mayoría de las plantas de tratamiento de agua presentan los siguientes tres procesos:

- Tratamientos previos: se basan en acondicionar el agua mediante una filtración o una ultrafiltración, una adicción de biocida, y un ablandamiento con sustitución de sales cálcicas y magnésicas por sales sódicas.

- Osmosis inversa: consiste en retirar las sales y los minerales disueltos en el agua. La osmosis normal, tiene lugar de forma espontánea, donde el disolvente pasa de una solución menos concentrada a una más concentrada a través de una membrana semipermeable. En el caso de la osmosis inversa, el disolvente pasa de una concentración más concentrada a una menos concentrada, mediante la aplicación de una presión determinada.

- Afino: fase que consiste en la depuración del agua hasta obtener una conductividad requerida por el ciclo del agua-vapor, ya que la conductividad del agua es función de la cantidad de sales disueltas (el agua pura tiene una conductividad de 0,05 µS/cm. Este afino, puede realizarse a través de dos formas: mediante intercambio iónico o con electrodesionización.

5.2 ELECCIÓN DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA DE COGENERACIÓN.

Una vez que se ha seleccionado el tipo de sistema que se va a utilizar (motor combustión interna alternativo), vamos a ver con más detalle el motor seleccionado y sus elementos auxiliares.

5.2.1 MOTOGENERADOR

El motor escogido es el ``Jenbacher tipo 4 J420 GS´´, con una potencia máxima de 1500 kW, este motor se caracteriza por una alta densidad de potencia y un rendimiento excepcional.

Los motores estacionarios `` Jenbacher, tipo 4 J420 GS ´´ se basan en el ciclo Otto. El ciclo es abierto, pues la mezcla combustible gas-aire se renueva en cada tiempo o fase de admisión. El ciclo es abierto, pues la mezcla combustible gas-aire se renueva en cada tiempo o fase de admisión. El ciclo completo consta de 4 tiempos, dos de subida del pistón y dos de bajada.

- Tiempo1: Admisión: El pistón se encuentra en el PMS (punto muerto superior). La válvula de admisión se abre y entra la mezcla de gas y aire en el cilindro. Esta mezcla puede estar a presión atmosférica y ser aspirada por la depresión creada en el movimiento de bajada, o como en los actuales motores industriales, puede haber sido comprimida en n turbogenerador y ser inyectada en el cilindro a presión. Cuando el pistón llega al PMI (punto muerto inferior) la válvula de admisión se cierra. El cigüeñal ha dado media vuelta.

- Tiempo2: Compresión: El pistón, en su subida desde el punto muerto inferior hasta el punto muerto superior comprime la mezcla. Las válvulas de admisión y escape están cerradas. Un poco antes de llegar a la parte superior se produce el encendido de la bujía y la mezcla se deflagra. El cigüeñal ha dado ya una vuelta completa. Estas dos etapas o tiempos son consumidoras de energía, pues hasta ahora no se ha generado ningún trabajo.

- Tiempo3: Expansión: Los gases producidos en la explosión se expansionan, lanzando el pistón hacia abajo y produciendo el movimiento del cigüeñal. Las válvulas de admisión y escape siguen cerradas. De los cuatro tiempos, este es el único en el que se desarrolla trabajo. Los otros tres consumidores de energía mecánica. El cigüeñal ha dado media vuelta. El pistón llega finalmente al PMI.

- Tiempo4: Al alcanzar el PMI, la válvula de escape se abre y libera los gases quemados producidos en la combustión. Al llegar, al PMS esta válvula se cierra y se abre nuevamente la de admisión, comenzando un nuevo ciclo. El cigüeñal ha dado dos vueltas completas.

De los cuatro tiempos, solo en uno se genera energía mecánica. La inercia y otros cilindros, cuyos factores, aseguran que el movimiento sea continuo, aunque hay naturalmente esfuerzos variables.

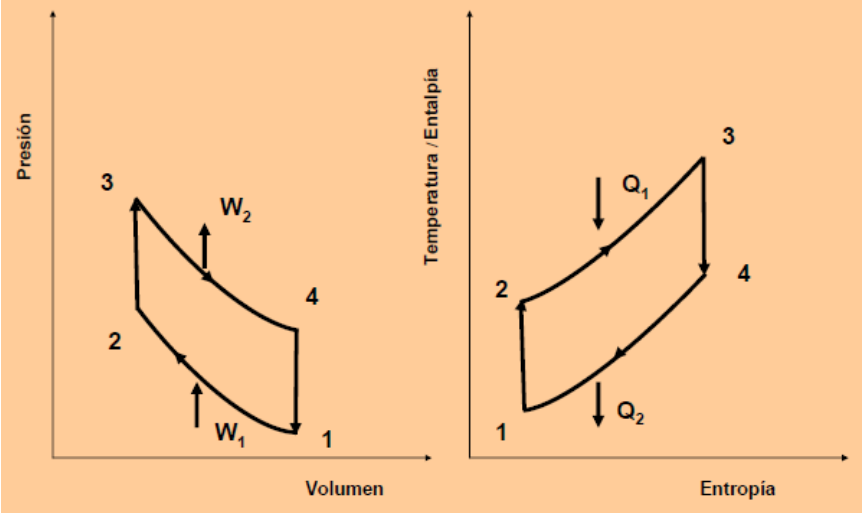


Ilustración 15-Ciclo Otto. Diagramas P-V y T-S. [19]

El ciclo se compone de la compresión isoentrópica 1-2, en la que se consume trabajo, la explosión isocora 2-3 en la que se verifica la aportación de calor Q_1, la expansión isentrópica 3-4, durante la cual se produce el trabajo útil, y por último, la isocora de escape 4-1, durante la cual se produce la cesión de calor Q_2.

Dicho motor tiene una relación de compresión de 9. Al comienzo de la compresión tene P_1=9KPa y T_1=310K. Suponiendo una masa de aire de 3g. Y la temperatura máxima que se alcanza es 1020K. Se va a calcular el rendimiento de dicho motor:

Para ello necesitamos calcular las temperaturas que se alcanzan en los 4 puntos del ciclo Otto:

Según la ley de los gases ideales, Pv=RT obtenemos:

$V_1 = \frac{8314x310}{95000}$=27,13m^3/kmol

A partir de la relación de compresión:

$V_2 = \frac{V1}{9}$=3,01m^3/kmol

Ya que es una compresión isoentrópica se cumple, δ=1,4:

$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\delta-1}$ T_2=746,55K

$\frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{V_3}{V_4}\right)^{\delta-1}$ T_4=423,55K

Calor del foco caliente=C_V (T_3-T_2) =$\frac{5}{2}x\frac{8,314}{28,964}$ x 0,03 x (1020-746,55) =0,588KJ

Calor del foco frio $=C_V (T_1-T_4) = \frac{5}{2}$ x $\frac{8,314}{28,964}$ x 0.03 x (310-423,53) =-0,244KJ

El trabajo obtenido = calor del foco caliente – |calor del foco frío|=0,344Kj

Por lo tanto, el rendimiento obtenido es: $\frac{0,344}{0,588}$x100= 58,5%

Ilustración 16- Motor Jenbacher [20]

Sus características técnicas principales son:

Datos técnicos	
Configuración	V 70
Calibre (mm)	145
Carrera (mm)	185
Displacement/cylinder (lit)	3,06
Velocidad (rpm)	1500(50 Hz)
Velocidad media del pistón	9,3(1500rpm)
Tipo de gas	Biogás
Nª de cilindros	20
Desplazamiento total (encendid	61,1

Tabla 7-Datos técnicos del motor. [20]

	largo (mm)	ancho(mm)	alto(mm)
Dimensiones	7100	1800	2200

Tabla 8- Dimensione del motor. [20]

Potencias y eficiencias	
Potencia electrica (KW)	1487
Rendimento eléctrica (%)	42,2
Potencia térmica (KW)	1472
Rendimiento térmico (%)	41,7
Rendimiento total	83,9

Tabla 9- Potencias y eficiencias. [20]

5.2.1.1 Recuperación de energía térmica en el motor alternativo.

Existen tres fuentes de energía térmica que puede ser recuperada en el motor alternativo de gas:

- Gases de escape
- Agua de refrigeración de camisas
- Agua de refrigeración del aceite de lubricación

Los gases de escape contienen aproximadamente treinta y cinco por ciento de la energía del combustible, que será usado, para producir vapor en la caldera que luego será utilizado para suministrar calor a los digestores.

Un motor de combustión interna tiende a aumentar su temperatura, debido a la continua generación de calor durante su funcionamiento. Motivo por el cual es importante la refrigeración de los cilindros. Con esto se impedirá que se recaliente el motor. Uno de los dispositivos del sistema de refrigeración mas importante, por su ubicación y función es la camisa de agua, Estos elementos rodean, de manera total, a los cilindros del block del motor. Alrededor de ellos circula el líquido refrigerante (agua) que los enfría y mantiene la temperatura óptima de trabajo. En el caso que el agua del motor superara los 98º C se produce la parada automática del motor. Esta agua puede ser aprovechado como agua caliente para diversos usos.

El aceite del motor es fundamental para su funcionamiento, reducción de desgastes y duración. Además, de reducir rozamientos y desgastes entre los diferentes componentes del motor, el aceite llega a zonas muy calientes enfriándolas además de engrasarlas. El agua del aceite de refrigeración del aceite no se aprovecha, por su baja temperatura (30-40ºC).

5.2.2 EL INTERCAMBIADOR DE CALOR.

El intercambiador de calor que se va a emplear es del fabricante “EKIN ENDÜSTRIYEL”. Concretamente, se trata de un intercambiador de calor de carcasa y tubos.

Un intercambiador de carcasa y tubos consigue la transferencia de calor mediante dos fluidos, uno circula por dentro de los tubos, y el otro, fluye por fuera de ellos, pero por dentro de la carcasa, ya sea en paralelo o en contracorriente a la dirección del fluido de los tubos. Los componentes del intercambiador de calor son los siguientes:

- Los tubos rectos o en U, que permiten la transferencia de calor.
- Una carcasa cilíndrica en forma que envuelve el sistema.
- Placas frontales que permiten la fijación de los tubos.

- Baffles que direccionan el flujo por fuera de los tubos, pero por dentro de la carcasa, y que además soportan los tubos.

- Boquillas que permiten la entrada de los fluidos, tanto para la entrada de la carcasa, como para la de los tubos.

- Bridas, sujeciones, y aislantes que previenen las pérdidas del calor hacia el exterior.

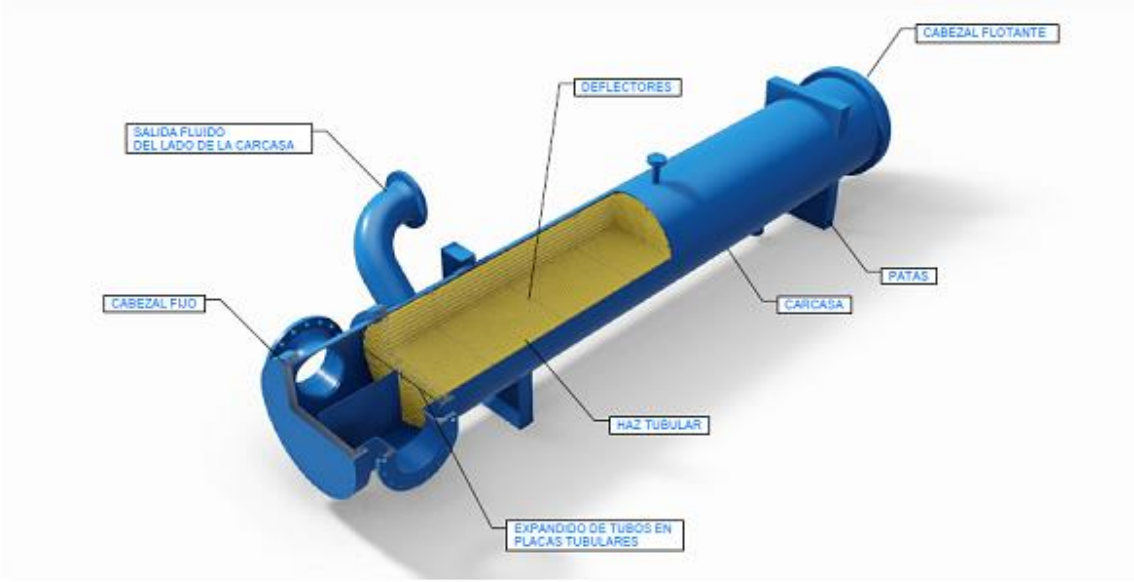


Ilustración 17-Intercambiador. [21]

La elección de este tipo de intercambiadores de calor frente a otros estriba en las siguientes causas:

- Se pueden utilizar cuando la presión del fluido es muy alta.

- Su diseño es muy flexible.

- Pueden emplearse en rangos de temperatura muy elevados.

- Son resistentes al choque térmico.

- No poseen limitaciones en cuanto a sus dimensiones.

- Las pérdidas de carga que experimentan son mínimas.

5.2.3 LA CALDERA.

Una caldera es un aparato a presión donde el calor procedente de un combustible o de otra fuente de energía se transforma en energía térmica utilizable a través de un fluido caloportador en fase líquida o vapor, en este caso el calor procede de una fuente de energía.

Las partes fundamentales de una caldera son:

- Hogar
- Quemador
- Humos
- Intercambio de calor
- Fluido caloportador
- Chimenea

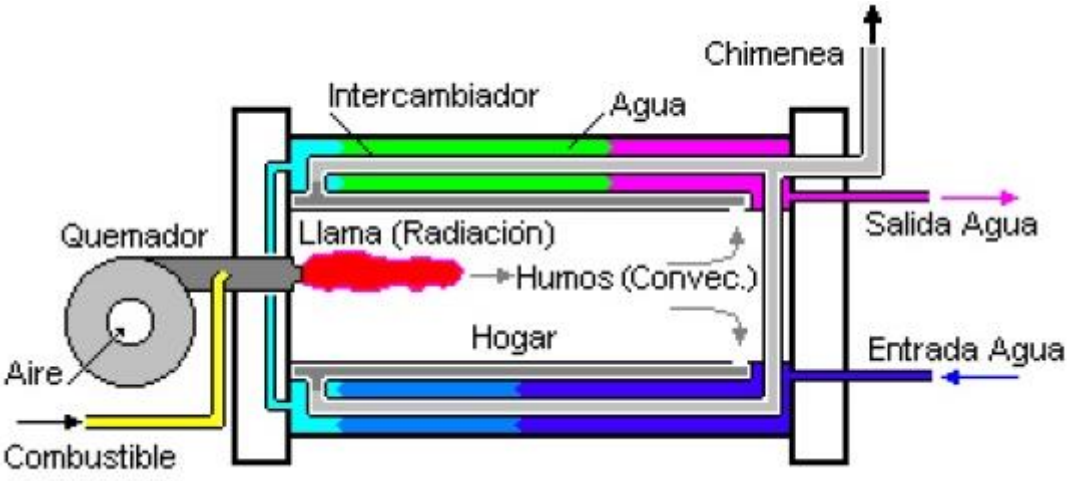


Ilustración 18- Esquema Caldera [22]

Las calderas pueden clasificarse atendiendo a distintos conceptos:

- Por la energía utilizada:
  - Calderas de combustión, en las que el calor proviene directamente de la combustión de un combustible.
  - Calderas de recuperación, en las que el calor procede de un fluido a alta temperatura (gases calientes).

- Calderas mixtas, en el caso de estar situadas en el escape de turbinas de gas, algunas calderas suelen incorporar también un quemador, con lo que son simultáneamente de recuperación y combustión.

- Por el fluido caloportador:

  - Calderas de agua caliente.

  - Calderas de agua sobrecalentada.

  - Calderas de fluidos térmicos.

  - Calderas o generadores de aire caliente.

- Por su disposición:

  - Horizontales: La dirección del flujo de gases es horizontal y los haces tubulares se disponen transversalmente, es decir, son verticales.

  - Verticales: La dirección del flujo de gases es vertical, mientras que los haces tubulares se disponen transversalmente, es decir, son horizontales o inclinados.

Ilustración 19- Caldera vertical y horizontal [23]

- Por el tipo de funcionamiento:

  - Pirotubulares (agua envolviendo al hogar). Los gases calientes circulan por el interior de tubos, que están inmersos en el agua.

- Acuotubulares (agua / vapor por el interior de los tubos y los gases de combustión por fuera de los mismos.

La caldera seleccionada para la planta de tratamiento de purines es una caldera de recuperación (el calor procede de los gases de escape de los motores), el fluido calorportador será el agua caliente que llegara hasta los digestores y será una caldera acuotubular (conseguiremos ahorrar espacio y el rango de la temperatura del vapor es alto).

5.3 ENERGÍA TÉRMICA Y ENERGÍA ELÉCTRICA OBTENIDAS MEDIANTE COGENERACIÓN.

El biogás va a emplearse en los motores descritos en el apartado correspondiente para producir energía eléctrica y energía térmica. La energía eléctrica que puede conseguirse en un motor depende de la energía mecánica producida. Del total de la energía contenida en el biogás la energía mecánica es del orden del 35%.

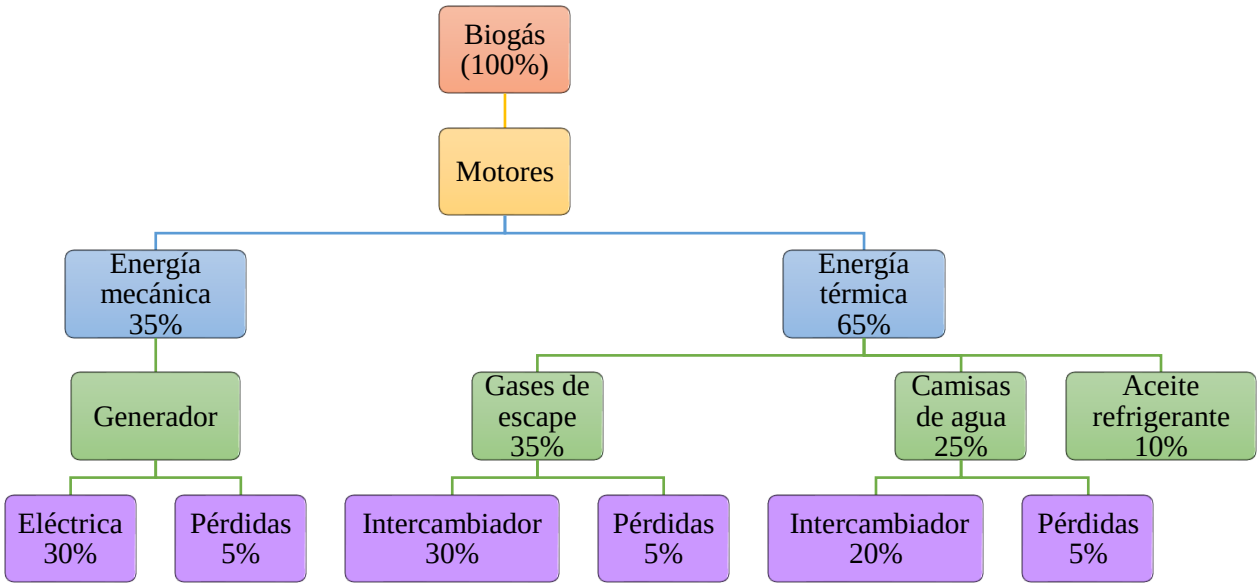


Ilustración 20- Esquema [17]

Para determinar, la cantidad de energía eléctrica y energía térmica producida se hace necesario, en primer lugar, conocer la cantidad de gas que será producida en los biodigestores diariamente.

En el punto 4 determinamos que es producción diaria de biogás (PDB)es de 2297m^3:

La energía total producida (ETP) mediante cogeneración puede hallarse a través de la siguiente expresión,

$ETP_{Cogeneración}$= PDM x PCI_{CH4} =2297m^3/h x 7kWh/m^3 =16.044 kw

* $PCI_{biogás}$= 7kWh/m^3

$ETP_{Cogeneración=}$ 57.888.600,0001kW/h

En estas condiciones la producción de energía eléctrica, descontando las pérdidas es,

$E_{eléctrica}$ = ETP * 30% =17.366.580kW/h

Por otra parte, la energía térmica generada por los dos motores es,

$E_{térmica=}$= ETP * 50% =28.944.300KW/h

6 CONCLUSIONES.

Como resumen, el presente Trabajo Fin de Grado se basa en el diseño de una planta de tratamiento de residuos de la explotación ganadera, en la que se trataran 1.000 toneladas diarias de purines. Estos residuos, tras un pretratamiento, constituirán el combustible utilizado en el proceso de cogeneración basado en un ciclo Otto con motor de combustión interna alternativo.

El residuo a valorizar en la planta de cogeneración se obtendrá de un radio de 15 km desde el punto en el que se ha establecido la potencial ubicación de la planta, en el municipio de Cuéllar (Segovia).

CONCLUSIONES DEL ESTUDIO

Las conclusiones más importantes de la realización de este Trabajo Fin de Grado son las siguientes:

- Se ha conseguido valorizar residuos de la ganadería porcina de la zona, convirtiendo lo que antes era un problema de gestión de residuos, en un recurso energético capaz de actuar como combustible.

- El hecho de centralizar todos los residuos en un mismo lugar, además de facilitar su gestión, hace que se pueda tener un mayor control de los mismos, evitando que sean desechados de manera ilegal y poco respetuosa con el medio ambiente.

- Se evita el almacenamiento de los purines en balsas durante largo tiempo, evitando que se produzcan emisiones contaminantes a la atmosfera, ya que con la valorización en la planta su tratamiento será inmediato.

- Se reduce la cantidad de residuos porcinos que se vierten a las tierras de cultivos, permitiendo reducir los niveles de nitratos de dichas tierras y de los acuíferos colindantes, asegurando el cumplimiento de la legislación vigente.

- El uso de purín como combustible permite un mayor acercamiento a los objetivos del PER previstos para el año 2020.

- La implantación de este tipo de cogeneración tiene como consecuencia un refuerzo del sector agroindustrial, ya que permite continuar con el modelo de explotación ganadera intensiva, crítica para el desarrollo de las zonas rurales, pero evitando daños medio ambientales derivados de la misma.

- La construcción de dicha planta permitirá la creación de nuevos puestos de trabajo y por lo tanto disminuir la despoblación de estas zonas rurales.

- La reducción de desagradables olores derivados del almacenamiento o vertido del purín permite incentivar el turismo gastronómico y cultural en esta zona.

LINEAS FUTURAS

Se sugieren a continuación varias vías de mejora en cuanto a la instalación y funcionamiento de la planta de cogeneración, que ahondan en la búsqueda de soluciones eficaces a problemas o debilidades surgidas en el análisis global del conjunto de informaciones y datos contenidos en este trabajo fin de grado:

- Las deyecciones ganaderas, presentan un bajo potencial de producción de biogás en comparación con otros productos. En este sentido, podría ser especialmente interesante realizar análisis asociados a la construcción de una planta de cogeneración para la codigestión de purines porcinos con otros residuos.

- Para maximizar los ingresos, podría resultar beneficioso incluir equipamientos adicionales necesarios para llevar a cabo el compostaje de la fracción sólida del digestato. El compost es un producto muy demandado y podría ser un elemento a tener en cuenta a la hora de aumentar los ingresos de la planta.

- Puede resultar interesante en la estación estival, ya que el rio Cega disminuye notablemente su caudal, emplear otros medios de refrigeración. Una buena opción puede ser aerocondensadores, que refrigeran el agua utilizando aire en forma menos agresiva con el medio ambiente.

7 REFERENCIAS.

[1]. (CES de Castilla y León; Garrido et al, 2009). Directiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de abril relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables por la que se modifican y derogan las Directivas 2001/77/CE y 2003/30/CE.

[2]. (2017/03) Decreto por el que se designan las zonas vulnerables a la contaminación de las aguas por nitratos procedentes de fuentes de origen agrícola y ganadero, y se aprueba el código de buenas prácticas agrarias.

[3]. http://www.vidasostenible.org/informes/contaminacion-por-metano/

[4]. *Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital 2016*

[5]. Instituto tecnológico de Galicia. http://www.itg.es

[6]. http://energiaupz.blogspot.com/2013/04/materia-seminario-en-energia-de-biomasa.html

[7]. http://www.fao.org/docrep/T0512S/t0512s03.html

[8]. Prabir Basu, “Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory,” 2013.

[9]. http://thermopedia.com/content/1072

[10]. http://opex-energy.com/ciclos/ciclo_brayton.html

[11]. http://www.chduero.es/Inicio/Gesti%C3%B3ndelaCuenca/Estadoycalidaddelasaguas/AguasSubterr%C3%A1neas/RedOficialdeControldelEstadoQu%C3%ADmico/tabid/568/Default.aspx

[12]. www.googlemaps/Cuellar

[13]. https://datosabiertos.jcyl.es/web/jcyl/set/es/medio-rural-pesca/ganaderia_porcino_2017/1284707659296

[14]. https://www.pigchamp-pro.com/wp-content/uploads/2014/10/Valorizacion-agricola-de-purines-y-sistemas-de-tratamiento-en-granja-SUIS-2015.pdf

[15]. http://www.fao.org/docrep/019/as400s/as400s.pdf

[16]. Blanco et al (2011)

[17]. Elaboración propia

[18]. http://www.kromschroeder.es/productos-kromschroeder/eficiencia-energetica-renovables/renovables/desulfuracion-biogas-sulfurex/

[19]. Escuela oficial de organización industrial

[20]. http://pegsa.com.co/2016/08/31/motores-jenbacher/

[21]. http://www.mch.cl/reportajes/innovaciones-en-la-fabricacion-de-intercambiadores-de-calor/

[22]. https://montajescupaje.wordpress.com

[23]. http://calderasintesa.com

8 ANEXOS

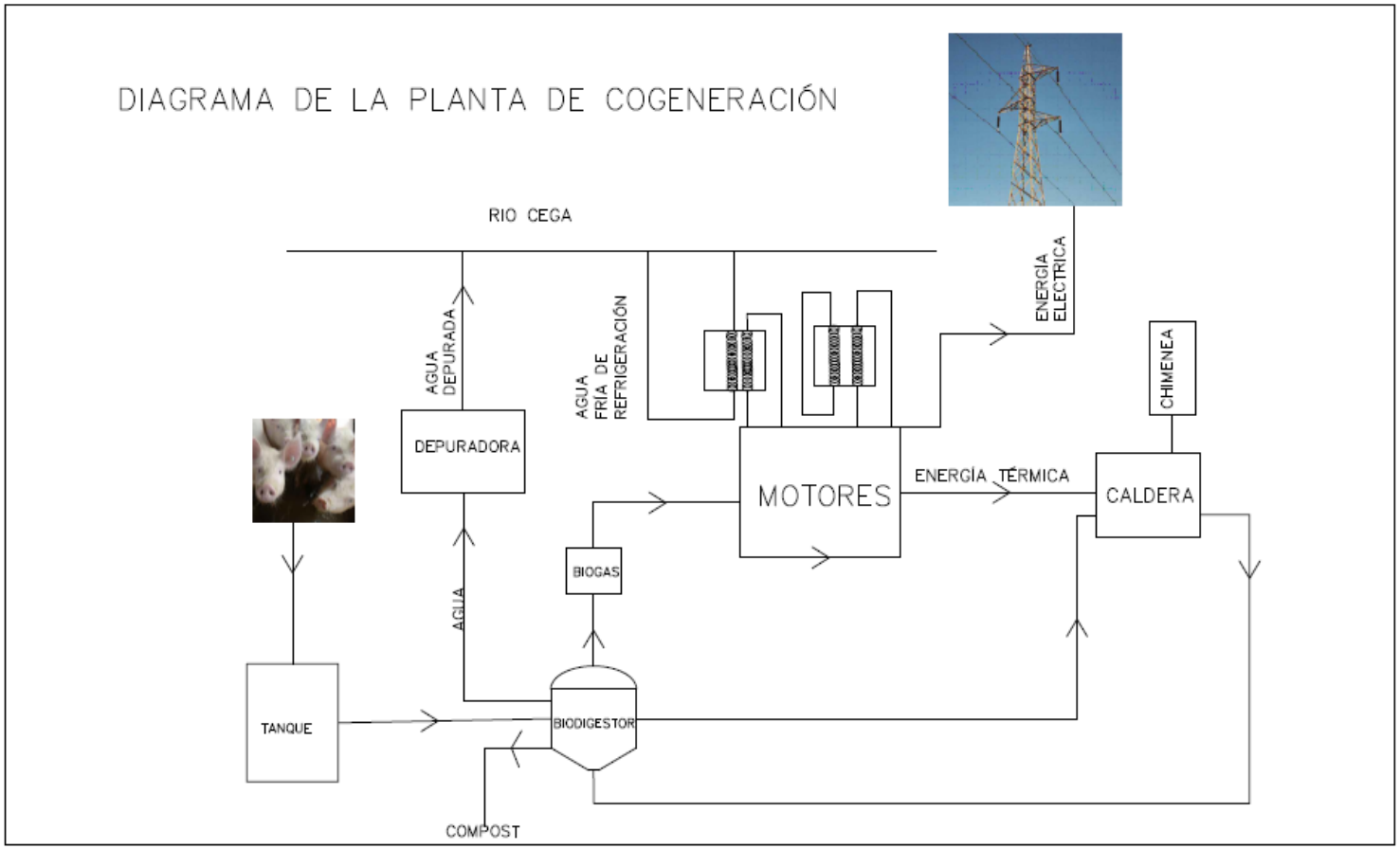


DIAGRAMA DE LA PLANTA DE COGENERACIÓN
RIO CEGA
AGUA DEPURADA
AGUA FRÍA DE REFRIGERACIÓN
ENERGIA ELECTRICA
CHIMENEA
DEPURADORA
MOTORES
ENERGÍA TÉRMICA
CALDERA
BIOGAS
AGUA
TANQUE
BIODIGESTOR
COMPOST