



ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

TRABAJO DE FIN DE GRADO

**ESTUDIO Y DISEÑO PRELIMINAR DE UNA
INSTALACIÓN DE COGENERACIÓN CON BIOGÁS
PARA UNA GRANJA AVÍCOLA AUTÓNOMA**

Titulación

Grado en Ingeniería Mecánica

Autor

Rubén Rodríguez Medina

Tutor

Agustín Manuel Delgado Torres

La Laguna, septiembre de 2018

Abstract

In this work, the design of an installation capable of producing electricity from biogas has been studied. The main objective of the project is to cover the entire electricity demand of a real poultry farm located in the municipality of Tegueste, in Santa Cruz de Tenerife (Spain). The biogas is obtained from the anaerobic digestion of the livestock residues (chicken manure) generated in the farm with what we can turn the farm into a “self-sufficient energy farm”.

The installation is composed of an anaerobic digestion tank, also called biodigester, in which waste is stored and a fermentation occurs thanks to the action of microorganisms in an environment without oxygen and certain temperature, a gasometer in which we can store the surplus of biogas produced, an adsorption system for the refining of biogas with the objective of making it seem natural gas, and a micro-cogeneration module composed by a motor-generator to produce electricity and a heat recovery unit. Thanks to the cogeneration system, the heat produced in the engine can be used to keep the operating temperature in the digestion tank.

For the realization of the project, the residue produced in the farm has been studied first, both the amount generated, as its composition and properties. Then we design the digestion tank defining its operating temperature and the retention time of the matter inside.

Next, we studied the amount of biogas that was able to generate this waste, as well as its composition and its main properties to know the fuel power that was able to be transmitting. Later, the electricity demand of the farm and the thermal demand of the biodigester were calculated.

Finally, the ideal micro-cogeneration module available in the market was selected according to the biogas flow that we had and the energy demand that we had to cover.



ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

TRABAJO DE FIN DE GRADO

ÍNDICE GENERAL

Titulación

Grado en Ingeniería Mecánica

Autor

Rubén Rodríguez Medina

Tutor

Agustín Manuel Delgado Torres

La Laguna, septiembre de 2018

Índice de la memoria

1. Objeto.....	24
2. Alcance	25
3. Antecedentes	27
4. Normas y referencias	29
4.1 Disposiciones legales y normas aplicadas	29
4.2 Bibliografía consultada.....	31
4.3 Referencias.....	31
5. Definiciones y abreviaturas.....	32
6. Requisitos de diseño	34
6.1 Localización de la instalación	34
6.2 Capacidad del biodigestor	35
6.3 Demanda energética	35
7. Análisis de soluciones.....	37
7.1 Digestor anaerobio.....	38
7.1.1 Acondicionamiento previo del residuo	43
7.1.2 Proceso continuo, discontinuo o semicontinuos.	43
7.1.3 Combinaciones.....	44
7.1.4 Temperatura de trabajo en el biodigestor.....	45
7.1.5 Concentración del sustrato	47
7.1.6 Geometría del tanque de digestión	48
7.1.7 Dimensionado y fabricantes.....	48
7.2 Módulo de cogeneración	55
8. Resultados finales.....	60
8.1 Datos de partida	60
8.2 Digestión anaerobia	61
8.2.1 Carga del biodigestor y tiempo de retención.....	61

8.2.2	Volumen del biodigestor	62
8.2.3	Caudal de biogás obtenido.....	63
8.2.4	Digestato producido.....	64
8.3	Microgeneración	65
8.3.1	Potencia demandada	65
8.3.2	Módulo de microgeneración seleccionado	68
8.3.3	Pretratamiento del biogás.....	70
8.4	Almacenamiento del excedente de biogás	72
8.5	Esquema del módulo de microgeneración.....	74
8.6	Normativa asociada a instalaciones de autoconsumo.....	75
8.7	Rendimiento de la instalación.....	75
8.8	Intercambio de calor (serpentín)	77
8.9	Equipo auxiliar de emergencia.....	77
9.	Presupuesto.....	79
10.	Conclusiones.....	80

Anexo I. Cálculos

1.	Introducción.....	7
2.	Cálculos del biodigestor	7
2.1	Materia prima para la carga.....	8
2.2	Porcentaje de sólidos totales.....	8
2.3	Cantidad de sólidos totales.....	9
2.4	Masa de agua a agregar a la mezcla.....	9
2.5	Carga del biodigestor.....	9
2.6	Cálculo del tiempo de retención.....	10
2.7	Volumen del tanque de digestión (biodigestor).....	10
2.8	Volumen de la cúpula del tanque	10

3. Productos de la digestión.....	11
3.1 Biogás producido	11
3.2 Caudal volumétrico de metano producido	12
3.3 Poder calorífico inferior del biogás	12
3.4 Densidad del biogás	13
3.5 Caudal másico de gas producido.....	13
3.6 Potencia producida	14
3.7 Caudal másico de digestato.....	14
4. Demanda de calor	15
4.1 Pérdidas de calor	16
4.1.1 Pérdidas de calor a través de medios físico	16
4.1.2 Pérdidas de calor por evaporación del agua.....	25
4.1.3 Pérdidas en el biogás que sale del biodigestor	26
4.2 Demanda total de calor del biodigestor	26
5. Módulo de microgeneración.....	27
5.1 Ajuste de potencia eléctrica y térmica	27
5.2 Caudal de gas necesario	28
5.3 Caudal de gas a almacenar	28
6. Intercambio de calor (serpentín)	30
6.1 Dimensiones del serpentín	30
6.2 Caudal másico de agua para el intercambio de calor.....	33
7. Equipo auxiliar de emergencia.....	34

Anexo II. Tecnología CHP (cogeneración)

1. Introducción	5
1.1 Energía	5
1.2 Trabajo y potencia	5
1.3 Calor	6
1.4 Termodinámica	6
2. Cogeneración.....	7
2.1 Clasificación de los sistemas de cogeneración.....	8
2.2 Módulos de cogeneración.....	8
2.2.1 Cogeneración con motor alternativo.....	9
2.2.2 Cogeneración con turbina de gas	10
2.2.3 Cogeneración con turbina de vapor	12
2.2.4 Cogeneración en ciclo combinado con turbina de gas.....	13
2.2.5 Trigeneración.....	15
3. Combustibles para cogeneración.....	15
4. Rendimientos en una planta de cogeneración.....	16

Anexo III. Catálogos, fichas técnicas y presupuestos

1. Catálogos y fichas técnicas	5
1.1 Dimensiones disponibles para el tanque de digestión (CEC Tanks)	5
1.2 Módulo de microcogeneración (Grupo Casli).....	6
1.3 Equipo auxiliar de emergencia (Tecnicos Carpi Grupos Electrógenos)	7
2. Presupuestos	9
2.1 Presupuesto del tanque (CEC Tanks).....	9
2.2 Presupuesto del grupo electrógeno (Tecnicos Carpi GE).....	10

Índice de planos

Plano 1. Plano de situación.....	5
Plano 2. Plano de emplazamiento.....	6
Plano 3. Esquema general de la instalación.....	7



ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

TRABAJO DE FIN DE GRADO

MEMORIA

Titulación

Grado en Ingeniería Mecánica

Autor

Rubén Rodríguez Medina

Tutor

Agustín Manuel Delgado Torres

La Laguna, septiembre de 2018

HOJA DE IDENTIFICACIÓN

PROYECTO

Estudio y diseño preliminar de una instalación de cogeneración con biogás para una granja avícola autónoma.

PETICIONARIO

Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología, Universidad de La Laguna.

Avenida Astrofísico Francisco Sánchez, s/n. San Cristóbal de La Laguna, Santa Cruz de Tenerife.

AUTOR

Rubén Rodríguez Medina

54109777-T

Las Peñuelas, 12. Tegueste, Santa Cruz de Tenerife.

rubenrmt6@gmail.com / alu0100832822@ull.edu.es

Índice de la memoria

1. Objeto.....	24
2. Alcance	25
3. Antecedentes	27
4. Normas y referencias	29
4.1 Disposiciones legales y normas aplicadas	29
4.2 Bibliografía consultada.....	31
4.3 Referencias.....	31
5. Definiciones y abreviaturas.....	32
6. Requisitos de diseño	34
6.1 Localización de la instalación	34
6.2 Capacidad del biodigestor.....	35
6.3 Demanda energética.	35
7. Análisis de soluciones.....	37
7.1 Digestor anaerobio.....	38
7.1.1 Acondicionamiento previo del residuo	43
7.1.2 Proceso continuo, discontinuo o semicontínuos.....	43
7.1.3 Combinaciones.....	44
7.1.4 Temperatura de trabajo en el biodigestor.....	45
7.1.5 Concentración del sustrato	47
7.1.6 Geometría del tanque de digestión	48
7.1.7 Dimensionado y fabricantes.....	48
7.2 Módulo de cogeneración	55
8. Resultados finales.....	60
8.1 Datos de partida	60
8.2 Digestión anaerobia	61
8.2.1 Carga del biodigestor y tiempo de retención.....	61

8.2.2	Volumen del biodigestor	62
8.2.3	Caudal de biogás obtenido.....	63
8.2.4	Digestato producido.....	64
8.3	Microgeneración	65
8.3.1	Potencia demandada	65
8.3.2	Módulo de microgeneración seleccionado	68
8.3.3	Pretratamiento del biogás.....	70
8.4	Almacenamiento del excedente de biogás	72
8.5	Esquema del módulo de microgeneración.....	74
8.6	Normativa asociada a instalaciones de autoconsumo.....	75
8.7	Rendimiento de la instalación.....	75
8.8	Intercambio de calor (serpentín)	77
8.9	Equipo auxiliar de emergencia.....	77
9.	Presupuesto.....	79
10.	Conclusiones.....	80

Índice de figuras

Figura 1. Esquema de los productos obtenidos a partir de la gallinaza y el biodigestor.....	24
Figura 2. Gráfico del consumo eléctrico de la granja en el año 2017.....	36
Figura 3. Esquema básico de la instalación. Fuente.....	37
Figura 4. Fases de degradación del sustrato diferenciando las cinco poblaciones de microorganismos.....	38
Figura 5. Eliminación de sólidos volátiles y producción volumétrica de gas para un reactor anaerobio continuo de mezcla completa, en función del tiempo de retención hidráulico.....	40
Figura 6. Producción de biogás por unidad de carga en función de la OLR, para los datos de la figura 5.....	41
Figura 7. Relaciones C/N de varios productos residuales.....	41
Figura 8. Tasa de crecimiento relativo de microorganismos psicrófilico, mesófilico y termófilico.....	45
Figura 9. Rangos de temperaturas y tiempo de fermentación anaeróbica.....	45
Figura 10 y 11. Ejemplos de la colocación de serpentines en el interior del biodigestor.....	46
Figura 12. Curva logarítmica del tiempo de retención.....	49
Figura 13. Removedor SA260.....	51
Figura 14. Características del tanque de vidrio fundido al acero.....	52
Figura 15. Sistema de doble membrana.....	53
Figura 16. Cubiertas de doble membrana en tanques de almacenamiento de biogás.....	53

Figura 17. Tanque de vidrio fundido al acero con cubierta de doble membrana.....	54
Figura 18. Motor de combustión interna alternativo.....	56
Figura 19. Microturbina de gas.....	57
Figura 20. Tecnologías utilizadas para la valorización del biogás.....	58
Figura 21. Potencia eléctrica de la granja calculada.....	66
Figura 22. Esquema básico de la técnica de adsorción.....	71
Figura 23. Membranas del gasómetro	73
Figura 24. Gasómetros de doble membrana.....	73
Figura 25. Esquema del sistema de microgeneración.....	74

Índice de tablas

Tabla 1. Parámetros climáticos promedio de Tegueste (1982-2012).....	36
Tabla 2. Valores y características del residuo orgánico.....	50
Tabla 3. Diferentes modelos de sistemas de cogeneración.....	59
Tabla 4. Propiedades del biogás obtenido.....	63
Tabla 5. Características del grupo motogenerador.....	69
Tabla 6. Características del grupo electrógeno de emergencia.....	76
Tabla 7. Presupuesto global de la instalación.....	77

Índice de ecuaciones

Ecuación 1. Cálculo del tiempo de retención en función de la temperatura.....	49
Ecuación 2. Porcentaje de sólidos totales.....	61
Ecuación 3. Caudal másico del agua a añadir.....	61
Ecuación 4. Balance de masa en el biodigestor.....	64
Ecuación 5. Rendimiento eléctrico de la instalación.....	75
Ecuación 6. Rendimiento Global de la instalación.....	75
Ecuación 7. Rendimiento Eléctrico Equivalente.....	75

1. Objeto

Cada vez es más necesaria la búsqueda de caminos estratégicos con el fin de ahorrar recursos y reducir las emisiones de gases producidos por combustibles fósiles, ya sea a través de procesos de reciclado y economía circular, o mediante la creación de nuevos métodos alternativos de obtención de energía.

Uno de estos métodos puede ser la producción de energía a partir del biogás obtenido en un biodigestor. Este gas contiene un alto índice de metano (CH_4), lo que le permite ser empleado como combustible en determinadas máquinas térmicas. Los digestores biológicos, comúnmente denominados como biodigestores, son en su forma más simple un depósito cerrado, hermético e impermeable, dentro del cual se deposita materia orgánica (biomasa) con el fin de esperar su descomposición y la consecuente producción de biogás. Para conseguir una correcta fermentación, el biodigestor debe encontrarse sin oxígeno en su interior (digestión anaerobia) y a una determinada temperatura.

Este trabajo de fin de grado tiene como objeto estudiar la creación de una granja autónoma mediante la producción y aprovechamiento de biogás. Este biogás será obtenido a partir de los residuos orgánicos producidos en la propia granja.

La puesta en marcha de esta instalación reuniría varios de los aspectos clave en la protección del medio ambiente como son: el reciclaje, la economía circular y la obtención de energía a partir de combustibles alternativos.

Para lograr que la granja sea autónoma la instalación diseñada debe ser capaz de cubrir la demanda eléctrica de la granja en su totalidad. Para ello, el biogás será conducido a un sistema de cogeneración capaz de producir energía eléctrica y térmica. Esta energía en forma de calor, que se produce en el motor y es transmitida al recuperador de calor, se empleará para mantener la temperatura óptima de funcionamiento en el interior del biodigestor. La energía eléctrica proveerá de electricidad a la granja para su correcto funcionamiento, eliminando el consumo de la red eléctrica pública.

Además del biogás, en el biodigestor se obtendrá otro subproducto denominado digestato (producto sólido), que tras su respectivo tratamiento podría ser empleado como abono natural en los terrenos agrícolas que rodean a la propia granja.

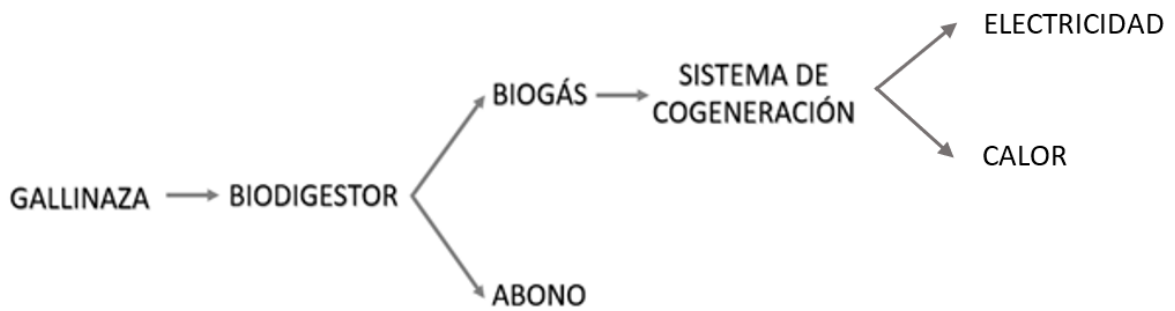


Figura 1. Esquema de los productos obtenidos a partir de la gallinaza y el biodigestor. Fuente: elaboración propia.

2. Alcance

En este estudio se analizarán las distintas posibilidades de diseño de una instalación alternativa capaz de cubrir la demanda total de energía de una granja avícola. Esto se conseguiría empleando como combustible el biogás producido a partir de los residuos orgánicos generados por los animales de la granja, logrando por tanto la autonomía energética

El estudio se llevará a cabo sobre una granja de gallinas real, situada en el municipio de Tegueste, en la isla de Tenerife. Esto implica que la mayoría de los datos de partida como la capacidad de la granja, la cantidad de residuo orgánico producido, el consumo eléctrico diario o la potencia eléctrica necesaria son datos reales proporcionados por el dueño de la granja o en el caso de la potencia, calculada a partir de los equipos instalados en la granja teniendo en cuenta sus factores de utilización.

Sin embargo, para la realización de determinados cálculos y ante la inviabilidad para un trabajo de fin de grado de realizar un análisis químico del residuo generado con el objetivo de conocer su composición y propiedades exactas, se ha optado por tomar los valores generales presentes en las fuentes consultadas para el tipo de residuo obtenido (gallinaza).

La instalación en cuestión estaría compuesta básicamente por un tanque de digestión anaerobia (biodigestor) en el que se produciría el biogás a partir de la biomasa almacenada en su interior y un sistema de cogeneración compuesto por un motogenerador capaz de cubrir la demanda energética de la granja y de la propia instalación diseñada.

El trabajo comenzará, por tanto, estudiando el caudal de biogás que se produciría en el biodigestor a partir del residuo real que se está generando actualmente en la granja. Una vez conocido este caudal, se estudiará la posibilidad de que, empleándolo como combustible en un

sistema de cogeneración, sea capaz de cubrir la demanda total de energía, tanto de la energía eléctrica que requiere la granja, como de la energía térmica que requiere el biodigestor.

El diseño preliminar de la instalación comprende las distintas soluciones adoptadas en cuanto a la selección del biodigestor y el módulo de cogeneración adecuado y disponible en el mercado, así como, las adoptadas para solucionar problemas como el almacenamiento de un excedente de biogás o el pretratamiento del gas antes de ser introducido en la máquina térmica. Además, también se estudia el método para mantener el biodigestor a la temperatura de operación aprovechando el calor generado en el sistema de cogeneración. Esto comprende tanto el diseño de un serpentín para el intercambio de calor entre las masas, como el correcto aislamiento del tanque o el análisis del intercambiador de calor del módulo de cogeneración. Como se ha mencionado, se aprovechará una pequeña parte del calor recuperado para mantener la temperatura en el biodigestor, pero al resto del calor recuperado no se le define concretamente ningún uso en este trabajo de fin de grado.

Por otro lado, a parte del biogás, en el biodigestor se obtiene otro producto denominado digestato (producto sólido) que puede ser empleado como fertilizante tras su respectivo tratamiento. Sin embargo, el análisis de este producto no se realizará en el presente trabajo de fin de grado.

En definitiva, forma parte del alcance de este estudio los siguientes aspectos básicos necesarios para su correcto funcionamiento:

- Estudio del caudal de biogás que se podría producir a partir del recurso orgánico disponible.
- Estudio de la posibilidad de emplear el caudal de biogás obtenido como combustible para cubrir la demanda energética total.
- Selección del biodigestor y módulo de cogeneración adecuado y disponible en el mercado.
- Diseño preliminar de la instalación teniendo en cuenta la posibilidad de encontrarnos con un excedente de biogás y de tratar el gas antes de ser introducido en la máquina térmica.
- Estudio del método más adecuado para mantener la temperatura de operación en el biodigestor aprovechando el calor recuperado del módulo de cogeneración.
- Diseño preliminar de un serpentín para el intercambio de calor en el biodigestor.

- Diseño preliminar del aislamiento empleado en el biodigestor para mantener la temperatura de operación.

Por último, y debido a que es inviable para un trabajo de fin de grado, se ha decidido excluir del alcance de este estudio los siguientes aspectos:

- Realización de un análisis químico de laboratorio para conocer la composición y las propiedades reales del residuo orgánico generado en la granja.
- Aprovechamiento del resto del calor obtenido en el intercambiador de calor del módulo de cogeneración.
- Tratamiento y aprovechamiento como fertilizante del digestato producido en el biodigestor.
- Estudio de la reducción de emisiones de CO₂.
- Estudio de seguridad y salud de la instalación.
- Pliego de condiciones.
- Mediciones.

3. Antecedentes

Uno de los principales problemas que ha existido siempre en el sector ganadero se encuentra en la gestión de los residuos orgánicos (gallinaza) que se produce en las granjas. Especialmente en Canarias, los granjeros se encuentran con este gran problema al no existir lugares adaptados para recibir estos residuos ni organismos que los asesoren, por lo que la gran mayoría de granjas tienen que buscar la forma de almacenarlo hasta encontrar un lugar en el que verterlo, muchas veces produciendo fuertes olores constantes que suponen un problema para la población, además, al tratarse de islas el problema se agrava, siendo estos lugares cada vez más escasos y menos apartados de la población.

El problema se ve agravado cuando el residuo orgánico no es de origen natural, quedando cada vez menos espacio en las celdas de vertido de los complejos ambientales de las Islas, además de su consecuente contaminación del suelo.

Este proyecto no solo ayuda a resolver el problema mediante la creación de un espacio estanco en la propia granja en el que verter el residuo, sino que, además, logra obtener un importante beneficio energético a partir del mismo. La producción de biogás a partir de

digestores anaerobios es una alternativa que está cobrando especial importancia en Sudamérica y países como Alemania.

La granja en la que se va a realizar el estudio y diseño preliminar de la instalación tiene actualmente a su disposición un terreno situado a unos 9 km de distancia para verter la gallinaza, y un camión realiza un total de cuatro viajes semanales para llevar la gallinaza hasta su destino, con lo que la instalación también supondría un ahorro de emisiones y combustible asociado al camión, el cual se ha estimado en unos 1200 € anuales, sin tener en cuenta gastos de mantenimiento o posibles reparaciones del vehículo.

La granja tiene capacidad para unas 12000 gallinas repartidas en filas de jaulas en el interior de dos naves situadas en el mismo edificio, una en el piso inferior y otra en el superior. Además, cuenta con una nave anexa de menor tamaño para la crianza de pollos que son trasladados posteriormente a las naves de gallinas. Diariamente se recogen unos 3240 kg de gallinaza mediante un sistema de cintas transportadoras que están programadas para actuar una vez al día. Cada fila de jaulas cuenta con una cinta que se desplaza longitudinalmente transportando la gallinaza hacia otra cinta situada transversalmente en la parte final de las naves, esto ocurre de manera automática todos los días. Por otro lado, la cinta transversal tiene su salida al exterior de las naves y sirve para recoger la gallinaza y desplazarlo hacia el camión que se sitúa en un plano inferior para facilitar su carga. Esta cinta es accionada manualmente por un operario cuatro veces a la semana.

Por otro lado, la granja tiene un consumo medio de electricidad de unos 80 kWh diarios, pudiendo ascender a unos 120-150 kWh en meses de verano debido a una mayor demanda energética de los equipos de ventilación. Esto se traduce en una media de unos 2400 kWh al mes, lo cual supone un gasto económico anual de unos 5000 €. Los únicos consumos energéticos que hay en la granja son en electricidad y en un calentador de aire situado en la nave de pollos y que funciona a gasoil en determinados períodos de tiempo en los que se está criando pollos.

Como ya se ha mencionado, el principal objetivo de este estudio es resolver la problemática comentada de la granja. Es decir, proveer a la granja de un espacio anexo y adecuado para el almacenamiento del residuo, y además obtener un importante beneficio energético a partir del mismo con el fin de cubrir la demanda eléctrica de la granja, eliminando así el gasto económico asociado al transporte de la residuo y al pago de facturas de la red eléctrica. Además, el digestato obtenido se puede convertir en abono que se puede vender o emplear en los terrenos agrícolas que rodean la granja.

Para finalizar este apartado, es importante mencionar otro aspecto beneficioso de una instalación de este tipo y es que puede ser perfectamente adaptada a cualquier otra granja avícola, redimensionando el biodigestor y el sistema de cogeneración en función de la cantidad de recurso disponible y de la demanda energética. Estos datos son muy sencillos y accesibles por parte de cada granja, por lo que la implantación del sistema no tendría por qué presentar problemas.

Por otro lado, los residuos orgánicos que se vierten en los biodigestores pueden ser tanto residuos ganaderos (gallinaza, purín de cerdo...), como residuos agrícolas, residuos de la industria alimentaria, lodos de depuradora, etc. Se debe tener en cuenta que cada tipo de residuo orgánico produce diferentes tipos de biogás en cuanto a su concentración de metano se refiere, la cual es una de las principales características que se tiene en cuenta para la elección del módulo de cogeneración, ya que está directamente relacionada con el PCI. En general, se suelen emplear dos tipos de máquinas térmicas: el motor alternativo o la turbina de gas, siendo el motor alternativo el que mayor PCI requiere.

4. Normas y referencias

4.1 Disposiciones legales y normas aplicadas

- Directiva 2012/27/UE del parlamento europeo y del consejo de 25 de octubre de 2012 relativa a la eficiencia energética, por la que se modifican las Directivas 2009/125/CE y 2010/30/UE, por la que se derogan las Directivas 2004/8/CE y 2006/32/CE.
- Directiva 2008/98/CE Residuos. Presenta condiciones generales, así como definiciones básicas en materia de residuos.
- Directiva 1999/31/CE. Establece diferentes medidas de control de vertido de residuos para prevenir y reducir efectos negativos en el medio ambiente.
- Directiva 2009/73/CE. Establece normas comunes en materia de utilización, transporte y almacenamiento del combustible gaseoso, como gas natural, GNL o biogás.
- Directiva 2012/27/CE. Expone medidas aplicables en los países pertenecientes a la Unión Europea con la finalidad de fomentar la eficiencia energética.

- Ley 24/2013, de 26 de diciembre, del Sector Eléctrico.
- Real Decreto 413/2014, de 6 de junio, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica a partir de fuentes de energía renovables, cogeneración y residuos.
- Real Decreto 616/2007, de 11 de mayo, sobre fomento de la cogeneración
- Real Decreto 900/2015, de 9 de octubre, por el que se regulan las condiciones administrativas, técnicas y económicas de las modalidades de suministro de energía eléctrica con autoconsumo y de producción con autoconsumo.
- Decisión de ejecución de la comisión de 19 de diciembre de 2011 por la que se establecen valores de referencia armonizados para la producción por separado de calor y electricidad, de conformidad con lo dispuesto en la Directiva 2004/8/CE del Parlamento Europeo y el Consejo, y por la que se deroga la Decisión 2007/74/CE de la Comisión.
- Ley 20/2011 sobre residuos, cuyo objetivo principal es el control de producción y gestión de residuos con la finalidad de reducir su impacto sobre la salud humana y el medioambiente. Posee de una sección específica donde se fomenta el empleo de bioresiduos en procesos de valorización mediante digestión anaeróbica.
- Real Decreto 506/2013 sobre el uso de fertilizantes. Establece una serie de valores que debe cumplir el digestato para poder ser empleado como fertilizante agrícola.
- Ley 11/1990, de 13 de julio, de Prevención del Impacto Ecológico.
- Ley 26/2007, de 23 de octubre, de Responsabilidad Medioambiental.
- Ley 34/2007, de 15 de noviembre, de calidad de aire y protección de la atmósfera.
- UNE 157001:2002, de febrero. Criterios generales para la elaboración de proyectos.
- UNE-EN ISO 80000 Magnitudes y unidades.

4.2 Bibliografía consultada

- *Fundamentos de termodinámica técnica*. Moran-Shapiro.
- *Motores de combustión interna alternativos*. F. Payri, J. M. Desantes.
- *Transferencia de calor y masa*. Yunus A. Çengel.

4.3 Referencias

- [1] I. para la D. y A. de la E. (IDAE), “Biomasa: Digestores anaerobios.,” 2007.
- [2] I. y C. A. A. de la E. Consejería de Economía, “ESTUDIO BÁSICO DEL BIOGÁS,” 2011.
- [3] L. O. G. S. Yeison Olaya Arboleda, “Fundamentos para el diseño de biodigestores,” 2009.
- [4] M. T. V. Moreno, “Manual de biogás,” 2011.
- [5] G. O. Diaz, “Biogas production in anaerobic reactors under different operation configurations,” 2007.
- [6] C. M. Vera, “Estudio preliminar de una planta de biometanización con sistema de cogeneración para lodos de depuradora,” Universidad de La Laguna, 2017.
- [7] F. Fdz-Polanco, M. Fdz-Polanco, and P. A. García Encina, “Criterios para la selección de tecnología de digestión anaerobia de residuos sólidos.”
- [8] Jesús Sánchez Rubal, “Optimización de la agitación de un digestor anaerobio mediante mecánica de fluidos computacional.,” Universidad Politécnica de Madrid, 2016.
- [9] Albert Masó, “¿Por qué no orinan las aves?,” 2014.
- [10] C. A. T. Santana, “Diseño y selección de elementos para una planta de biogás.,” 2008.
- [11] AFELMA; ANDIMAI, “Guía de Buenas Prácticas en el Aislamiento Industrial,” Madrid, 2016.
- [12] I. G. C. Iñaki Iruretagoiena, “Motores de cogeneración.,” 2010.
- [13] D. Fraile, “Cogeneración: Aspectos Tecnológicos,” *Master en Energías Renov. y Merc. Energético - Esc. Organ. Ind.*, p. 129, 2008.

- [14] C. M. León, "Tecnología CHP - Dimensionamiento de potencia de sistemas de cogeneración.," 2012.
- [15] agrobiomet, "Biogas agroindustrial." [Online]. Available: http://213.229.136.11/bases/ainia_agrobiomet.nsf/webContents/Biogas_agroindustrial. [Accessed: 22-Aug-2018].
- [16] Lianys, S. Rodríguez Muñoz, E. Fernández Santana, and L. Bárcenas Pérez, *Principales métodos para la desulfuración del biogás.*, vol. 36, no. 1. Centro de Investigaciones Hidráulicas, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, 2015.

5. Definiciones y abreviaturas

- **Anaerobio:** se define como la capacidad de un microorganismo para desarrollarse en un medio sin oxígeno.

- **Balance de energía:** es la herramienta que aplica el principio físico fundamental denominado ley de conservación de la energía para determinar las cantidades de energía intercambiadas en un sistema o volumen de control.

- **Balance de masa:** es la herramienta que aplica el principio físico fundamental denominado ley de conservación de la materia para determinar las cantidades de masa intercambiadas en un sistema o volumen de control.

- **Digestión anaerobia:** proceso mediante el cual la materia orgánica se descompone en ausencia de oxígeno por la acción de microorganismos. En este proceso se liberan gases destacando el metano y el dióxido de carbono.

- **C_p (calor específico medido a presión constante):** cantidad de calor que debemos suministrar a una unidad de masa para elevar su temperatura en una unidad mediante transformación isobárica.

- **Cogeneración:** se define como la producción simultánea de energía eléctrica y térmica a partir de un mismo combustible.

- **Entalpía:** es la magnitud cuya variación expresa la cantidad de energía absorbida o cedida por un sistema termodinámico, es decir, la cantidad de energía que un sistema intercambia con su entorno.

- **MCI (motor de combustión interna alternativo):** es una máquina térmica en la que los gases generados en la reacción exotérmica resultante de un proceso de combustión empujan un émbolo o pistón, desplazándolo en el interior de un cilindro y haciendo girar un cigüeñal, obteniendo finalmente un movimiento de rotación (energía mecánica).

- **MPC (materia prima para la carga):** es la cantidad de sustrato que se introduce en el reactor para su digestión. Está compuesta por cantidades de estiércol y de agua.

- **OLR (Organic Load Rate):** es la velocidad con la que se realiza la carga de materia orgánica de un biodigestor.

- **PCI (poder calorífico inferior):** es la cantidad de calor que se desprende en la combustión completa de una masa de combustible sin tener en cuenta la parte que corresponde al calor latente del vapor de agua generado en la combustión, ya que no se produce cambio de fase, y se expulsa como vapor.

- **ST (sólidos totales):** fracción que representa la cantidad de materia sólida en una mezcla.

- **SV (sólidos volátiles):** fracción de sólidos totales que tiene el potencial de ser digerida.

- **TR (Tiempo de retención):** es el tiempo que permanece el residuo en el digestor, desde que entra hasta que sale, sometido a la acción de los microorganismos.

6. Requisitos de diseño

Este trabajo de fin de grado requiere estudiar la posibilidad de diseñar una instalación capaz de conseguir abastecer energéticamente a una granja avícola de tamaño medio, empleando biogás obtenido a partir del residuo orgánico (gallinaza) que se produce en la propia granja.

Los requisitos principales de diseño de la instalación son:

- Aprovechar por completo el residuo orgánico generado en la granja, dándole un uso en el biodigestor.
- Ser capaz de cubrir totalmente, o en su defecto, la mayor cantidad posible, de la demanda eléctrica de la granja, a partir del biogás producido en el biodigestor (granja autónoma).
- Aprovechar el calor producido en el motogenerador para mantener la temperatura de operación en el biodigestor (cogeneración).
- La instalación debe estar situada de manera anexa a la granja.
- Permitir la posibilidad de aprovechar el digestato producido en el biodigestor para su empleo como fertilizante, tras su respectivo tratamiento.

6.1 Localización de la instalación

Este trabajo emerge a partir de las necesidades del cliente de encontrar un lugar adecuado en el que depositar los residuos orgánicos producidos en su granja avícola, con el objetivo de liberarse del trabajo y gasto económico que conlleva tener que transportar estos residuos a un terreno situado a unos 9 km de distancia de la granja.

Con esta idea, se le propuso al cliente crear un espacio preparado y anexo a la granja en el que depositar dichos residuos, y a su vez, obtener un importante beneficio energético a partir de los mismos, que sería luego empleado para abastecer de electricidad a la propia granja, lo que conllevaría un importantísimo ahorro económico en gastos de electricidad.

6.2 Capacidad del biodigestor

En la granja se produce una cantidad aproximada de unos 3240 kg diarios de residuo orgánico cuando la granja está en máxima capacidad (unas 12000 gallinas). El cliente ha puesto como requisito que el biodigestor se cargue, como mínimo, cuatro veces a la semana ya que, actualmente, el proceso de recogida y transporte del residuo se realiza estas cuatro veces (cuatro viajes del camión). Posteriormente y para simplificar el cálculo de la instalación, se decide que la carga del biodigestor será diaria, configurando y automatizando el sistema de cintas transportadoras de la granja para tal fin.

Teniendo en cuenta los tiempos de retención, la carga diaria del biodigestor, en la que se incluye la masa total de residuo y la masa de agua necesaria, se ha calculado que la capacidad mínima del tanque para la biodigestión deberá ser de unos 221,1 m³. Además, se debe tener en cuenta dejar un determinado volumen para el almacenamiento del biogás producido.

Estas cantidades pueden verse disminuidas en épocas en las que la granja puede no estar funcionando a máxima capacidad. En cualquier caso, el interior del biodigestor debe mantenerse con un ambiente sin oxígeno para que se produzca la biometanización y la producción del biogás. Esto se conseguirá mediante una válvula de vacío o un dispositivo similar, ya que el volumen del tanque no será variable.

6.3 Demanda energética.

Por otro lado, el consumo eléctrico medio de la granja es de unos 2400 kWh al mes (figura 2). Esto es, unos 80 kWh diarios, pudiendo llegar a picos de consumo de hasta 120 o 150 kWh durante los meses de verano debido a una mayor demanda energética de los equipos de ventilación. Por el contrario, durante estos meses de verano, la temperatura del aire ambiente aumentará acercándose a la temperatura de operación del biodigestor, con lo que disminuyen las pérdidas de calor y, por consiguiente, la demanda de energía calorífica por parte del biodigestor. De manera contraria, durante los meses de invierno la temperatura del aire ambiente disminuye provocando una mayor pérdida de calor en el biodigestor y una mayor demanda de energía térmica para mantener la temperatura, al aumentar el gradiente de temperatura entre el interior del tanque y el aire exterior.

En la tabla 1 expuesta a continuación, podemos observar las temperaturas medias del municipio de Tegueste.

Mes	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Anual
Temp. máx. media (°C)	17.3	17.5	18.8	19.4	20.6	22.5	25.1	26.3	25.0	23.4	20.4	18.3	21.2
Temperatura media (°C)	14.3	14.4	15.3	15.8	17.0	18.8	21.1	21.9	21.4	19.9	17.4	15.2	17.7
Temp. mín. media (°C)	11.3	14.4	11.9	12.3	13.4	15.2	17.1	17.6	17.8	16.4	14.4	12.2	14.3

Tabla 1. Parámetros climáticos promedio de Tegueste (1982-2012). Fuente: Climate-data.org

Todo esto nos ayuda a tener una idea de cómo va a interactuar la granja y la instalación diseñada con el entorno y sus consecuentes variaciones de demanda energética, ya que el sistema de cogeneración deberá estar capacitado para cubrir estos picos de demanda energética.

Por otro lado, el análisis del consumo eléctrico nos permite conocer el gasto económico anual de la granja, el cual lo podemos estimar en unos 5000 euros, a partir de una tarifa estándar de 0,18 €/kWh.

En la siguiente gráfica se puede observar el consumo eléctrico anual de la granja en el año 2017 (figura 2).

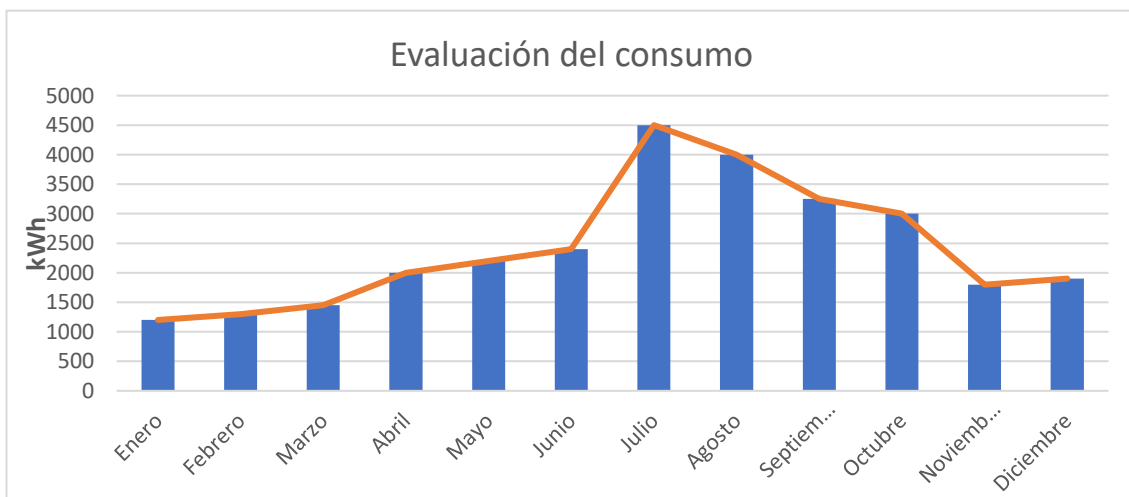


Figura 2. Gráfico del consumo eléctrico de la granja en el año 2017. Fuente: ENDESA Energía S.L.U

Para el diseño de la instalación se tendrán en cuenta siempre los datos más desfavorables de consumo energético.

7. Análisis de soluciones

Atendiendo a los requisitos de diseño, se plantea una instalación compuesta por un biodigestor, en el que se obtendrá biogás a partir de la digestión anaerobia de la mezcla, y un sistema de cogeneración encargado de producir la energía necesaria. Una parte menor de esta energía producida se empleará como energía calorífica para mantener el biodigestor a la temperatura óptima de funcionamiento, y el resto de energía se empleará para la producción de electricidad.

Del biodigestor se podría aprovechar también el producto sólido (digestato) para emplearlo como abono.

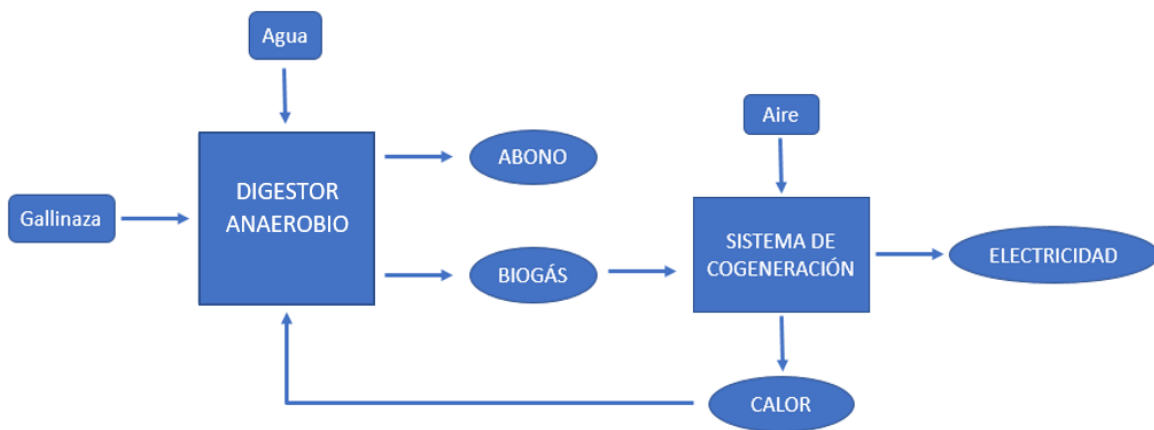


Figura 3. Esquema básico de la instalación. Fuente: elaboración propia.

Como vemos en el esquema de la figura 3, la mezcla que entra al digestor anaerobio está compuesta de agua y gallinaza, y de él se obtienen dos productos que son: digestato (producto sólido), que tras su respectivo tratamiento puede ser empleado como abono, y biogás (producto gaseoso). Este último producto, es empleado como combustible en un sistema de cogeneración al que también entra aire para provocar la combustión de la mezcla. Este sistema de cogeneración está formado por un motor y un alternador, y en él se producen dos tipos de energía. Por un lado, se es capaz de recuperar el calor producido en el motor y aprovecharlo para mantener la temperatura óptima de funcionamiento en el biodigestor mediante una serie de intercambiadores de calor, y, por otro lado, el motor genera energía mecánica que moverá un eje solidario al alternador para producir la electricidad que abastecerá a la propia granja.

El análisis de posibles soluciones y aspectos a tener en cuenta para el diseño de los dos equipos principales de la instalación (biodigestor anaerobio y sistema de cogeneración) se exponen a continuación.

7.1 Digestor anaerobio

La digestión anaerobia es un proceso biológico en el que la materia orgánica, en ausencia de oxígeno, y mediante la acción de un grupo de bacterias específicas, se descompone, por un lado, en un producto gaseoso denominado biogás (CH_4 , CO_2 , H_2 , H_2S , etc.), y en otro producto sólido, denominado digestato, que es una mezcla de productos minerales (N, P, K, Ca, etc.) y compuestos de difícil degradación.

Este proceso de digestión está caracterizado por componerse de varias fases consecutivas diferenciadas durante el procedimiento de degradación del sustrato, interviniendo cinco grandes poblaciones de microorganismos (figura 4) [1].

- 1) Bacterias hidrolíticas-acidogénicas.
- 2) Bacterias acetogénicas.
- 3) Bacterias homoacetogénicas.
- 4) Bacterias metano-génicas hidrogenófilas.
- 5) Bacterias metanogénicas acetoclásticas.

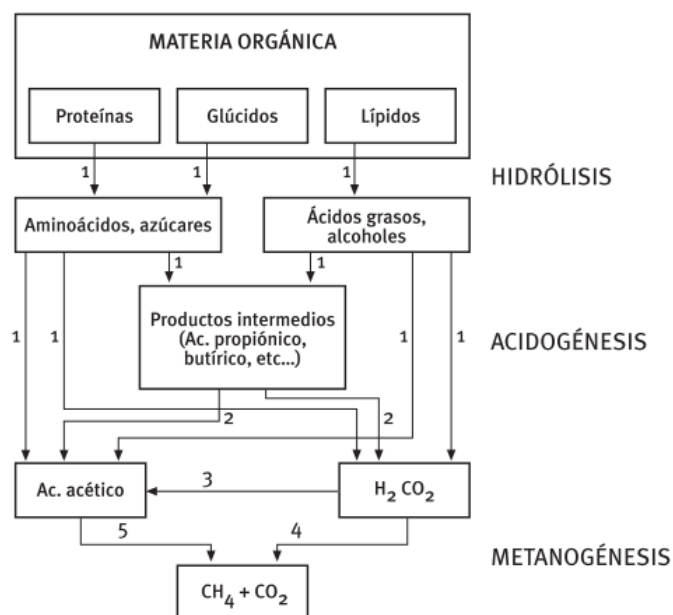


Figura 4. Fases de degradación del sustrato diferenciando las cinco poblaciones de microorganismos. Fuente: BiodiSol.

Como también se puede apreciar en la figura 4, las fases de la digestión anaerobia son:

- 1) Hidrólisis: en la cual se produce la rotura de enlaces químicos provocando que los polímeros que conforman la materia orgánica se transformen en monómeros.
- 2) Acidogénesis: donde dichos monómeros se metabolizan, produciendo ácidos orgánicos y alcoholes.
- 3) Metanogénesis: en esta última etapa, gran parte del biogás se transforma en metano debido a las bacterias características de esta etapa.

Para este tipo de digestión anaerobia existen varios parámetros operacionales fundamentales que hacen referencia a las condiciones de trabajo del biodigestor:

- 1) La temperatura de digestión. Está considerado como uno de los más importantes parámetros de diseño. Existe la posibilidad de operar en tres rangos de temperaturas. A temperatura ambiente (rango psicrófilo), a temperaturas en torno a los 35 °C (rango mesófilo) o a temperaturas en torno a los 55°C (rango termófilo). Las tasas de crecimiento y reacción aumentan conforme aumenta la temperatura, esto acelera el proceso de digestión, proporcionando una mayor cantidad de biogás. Pero también aumenta la sensibilidad a algunos inhibidores, como el amoníaco, lo cual, perjudica el desarrollo estable del proceso. Es necesario estudiar el régimen de temperatura y seleccionar el más adecuado para obtener el máximo rendimiento de la instalación.
- 2) Movilización de la mezcla. Es importante contar con equipos dentro del digestor que provoquen la correcta mezcla de la biomasa que se encuentra en el interior, con el objetivo de conseguir que se creen condiciones químicas, físicas y biológicas uniformes, y sobre todo lograr una temperatura uniforme en todo el volumen reduciendo los gradientes interiores. Además, la biomasa fresca que llega nueva al digestor se mezcla íntimamente con la de digestión activa, se evita la formación de espumas y se aprovecha el máximo volumen activo y se minimiza la acción de elementos tóxicos al favorecer su rápida dispersión. Así, se crea un entorno homogéneo dentro del digestor perfecto para su correcta fermentación. Esta agitación puede ser mecánica (agitador de hélice o palas, de eje vertical u horizontal) o neumática (recirculación de biogás a presión), y nunca debe ser violenta.

- 3) Tiempo de retención. Es el tiempo medio de permanencia del influente en el digestor, sometido a la acción de los microorganismos. La producción de gas máxima por unidad de volumen se consigue para un tiempo de retención correspondiente a una eliminación de sustrato de entre el 40 y 60 %. Además, existe un tiempo mínimo por debajo del cual el digestor no presenta actividad, y la eliminación de materia orgánica sigue una tendencia asintótica. Estos parámetros se pueden comprobar en la gráfica de la figura 5.

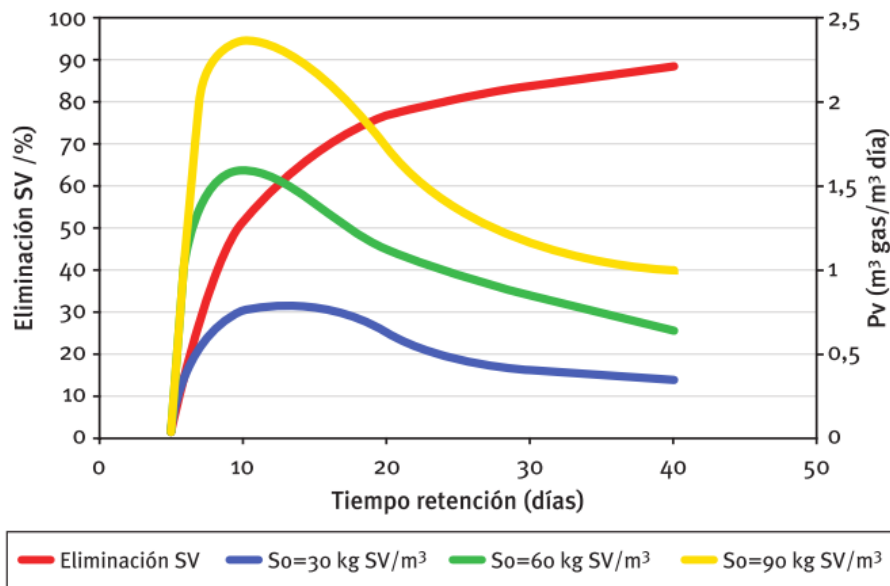


Figura 5. Eliminación de sólidos volátiles, SV (%) y producción volumétrica de gas P_v (m^3 biogás/ m^3 dig* $día$) para un reactor anaerobio continuo de mezcla completa, en función del tiempo de retención hidráulico. Fuente: GIRO.

- 4) Velocidad de carga orgánica, OLR por sus siglas en inglés. Es la cantidad de materia orgánica introducida por unidad de volumen y tiempo. Un valor bajo de OLR implica baja concentración en el influente y/o elevado tiempo de retención. Por el contrario, valores altos en la OLR implica una reducción en la producción de biogás por unidad de materia orgánica introducida. Por lo tanto, es necesario encontrar un valor óptimo para cada instalación.

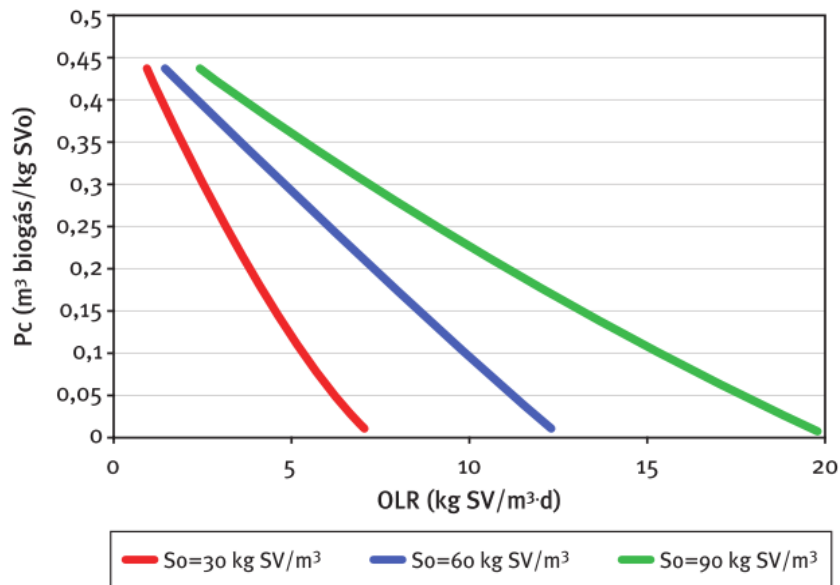


Figura 6. Producción de biogás por unidad de carga en función de la OLR, para los datos de la figura 5. Fuente: GIRO.

5) Relación Carbono/Nitrógeno: los materiales de fermentación están compuestos en su mayor parte por carbono (C) y también contienen nitrógeno (N), por lo que se establece la relación C/N que influye directamente en la producción de biogás, siendo la relación adecuada entre 20:1 y 30:1.

La figura 7 muestra las relaciones C/N para varios productos residuales.

Sustancia	Relación C/N
Orina	0.80
Estiércol equino	25
Estiércol vacuno	18
Alfalfa	16-20
Algas marinas	19
Aserrín	511
Basura	25
Cáscaras de papa	25
Paja seca de trigo	87
Paja seca de arroz	67
Tallo del maíz	53
Hojas secas	41
Estiércol de aves	32
Pasto	27
Estiércol ovino	29
Estiércol de cerdos	13
Excretas frescas humanas	2.90

Figura 7. Relaciones C/N de varios productos residuales. Fuente: Guevara, 1996; Corace et al. 2006.

- 6) El nivel de pH. Las bacterias metanogénicas son muy sensibles a las variaciones de pH, por lo que las condiciones óptimas para que se desarrolle el proceso se dan con un pH estable de alrededor de 7,0-7,2. [2]

En definitiva, la producción de biogás depende de varios aspectos entre los que destacan: el tiempo de retención, la velocidad de carga orgánica, la temperatura de operación y la presencia de inhibidores.

Por otra parte, el parámetro más importante que se debe conocer del biogás si se quiere emplear como combustible es su concentración en metano, ya que la cantidad de metano que contiene el biogás es directamente proporcional al PCI del gas. Esto es porque el metano es el componente que da al biogás la capacidad de producir la energía al producirse la reacción química de combustión en el interior de la máquina térmica.

Se han encontrado varias fuentes contrastadas de información para las cantidades de metano y biogás que se pueden obtener a partir de la gallinaza:

Según el “Estudio básico del biogás” de la Agencia Andaluza de la Energía la cantidad de metano que se puede obtener a partir de la gallinaza es de 54,4 m³ de CH₄ por tonelada de residuo. A su vez, estipulan la producción potencial de biogás a partir de este residuo en 90,7 m³ de biogás por tonelada de residuo. Según estos datos, el porcentaje de metano en el biogás producido a partir de la gallinaza es de un 59,9% de CH₄. [2]

Por otro lado, según el estudio de la Universidad Nacional de Colombia denominado “Fundamentos para el diseño de biodigestores”, se establece que el biogás producido a partir de la gallinaza cuenta con un porcentaje de metano del 59,8%, y que se pueden obtener unos volúmenes de 0,3111 m³ de biogás por kg de residuo. [3]

Esto es 311,1 m³ de biogás por tonelada de residuo frente a los 90,7 m³ de biogás por tonelada que se mencionan en el estudio de la AAE.

Posteriormente se han encontrado fuentes, como la Corporación Técnica Alemana para el desarrollo sostenible (GTZ), en la que se estipula para la gallinaza, una producción de 0,4 m³ de biogás por kg de residuo orgánico. Esto es 400 m³ de biogás por tonelada de residuo.

Podríamos realizar una media de los tres valores encontrados en la bibliografía, aproximando una producción de biogás a partir de la gallinaza de unos 267,27 m³ por tonelada de residuo.

Sin embargo, para los cálculos de este proyecto se tendrá en cuenta el dato proporcionado por la GTZ, ya que el resto de los datos empleados para el análisis del recurso serán provenientes de la misma fuente.

7.1.1 Acondicionamiento previo del residuo

Es importante tener en cuenta, sobre todo si no se lograra la potencia requerida, que se pueden realizar una serie de operaciones de acondicionamiento a los residuos con el fin introducir el residuo lo más homogéneo posible, con las condiciones fisicoquímicas adecuadas al proceso al que va a ser sometido y sin elementos que puedan dañar el digestor. Dependiendo del tipo de reactor el grado de estos pretratamientos será diferente. Estos pueden ser: reducción del tamaño de partícula, espesamiento, precalentamiento, control de pH, eliminación de metales y/o eliminación de gérmenes patógenos.

Aun así, es muy importante, tener en cuenta que el residuo no se debe almacenar durante demasiado tiempo, ya que la productividad del biogás decaería muy deprisa, al producirse fermentaciones espontáneas. Según el estudio de *Biomasa* del IDAE, tiempos de almacenaje superiores a 3 meses pueden reducir su potencial de producción en más del 70%, ya que durante el almacenaje tiene lugar un proceso de fermentación incontrolado con emisión del metano a la atmósfera. En nuestro caso, esto no es una opción ya que nuestro proceso de carga será continuo, por lo que los residuos generados estarán diariamente entrando en el tanque de digestión.

7.1.2 Proceso continuo, discontinuo o semicontinuos.

Para que la planta de digestión anaerobia sea rentable es imprescindible garantizar el suministro de materia prima tanto en tiempo como en calidad. Además, es muy importante la homogeneidad del sustrato a la entrada del digestor para conseguir una eficiencia y rendimiento elevado de biogás.

En los procesos continuos, la materia prima es introducida continuamente en el biodigestor. Es decir, la cantidad de sustrato en la entrada del biodigestor es la misma que a la salida por lo que el nivel se mantiene constante. Por el contrario, en los procesos discontinuos se llena el biodigestor, se sella y se inicia el proceso de digestión. La producción de biogás se va incrementando hasta que alcanza un punto máximo. Es entonces, cuando se abre el biodigestor, se vacía y se prepara para volverlo a cargar de materia prima y repetir la operación. Este último

proceso presenta varias desventajas ya que la producción de biogás no es continua y su calidad es muy variable. Además, por lo general, requieren de una mayor mano de obra y de un espacio de almacenaje para la materia prima que no se ha cargado si esta se produce de manera continua, como sería el caso de nuestra granja.

También existen biodigestores de flujo semicontinuo en los que la carga y la descarga del sustrato se realiza de manera continua o por pequeñas etapas (por ej. una vez al día, cada 12 horas...) durante el proceso.

El proceso de flujo continuo es el más utilizado a nivel mundial dada las ventajas que tiene en su operación.

7.1.3 Combinaciones.

Según el residuo a tratar, los digestores anteriores se pueden combinar con el fin de obtener sistemas más eficientes.

Los sistemas de dos etapas consisten en un primer digestor con elevado tiempo de retención, en el cual se favorece la hidrólisis, seguido de otro digestor de bajo tiempo de retención que digiere la materia orgánica disuelta y los ácidos producidos en la primera etapa. Este sistema se ha empleado en reactores de flujo discontinuo donde se permite mantener fácilmente la temperatura en el reactor discontinuo controlando la temperatura del efluente del segundo reactor. Funciona especialmente bien para tratar residuos sólidos cuya etapa limitante es la hidrólisis: residuos sólidos urbanos, residuos de ganado, etc.

En los sistemas de dos fases, a diferencia de los sistemas de dos etapas, la separación de fases se produce manteniendo dos reactores en serie en los cuales se realizan, respectivamente, las fases de acidogénesis y metanogénesis con el objetivo de conseguir un tiempo de retención global inferior al correspondiente a un único reactor de mezcla completa. Este tipo de sistema se suele aplicar con éxito en la digestión de residuos con alta concentración de azúcares y bajo contenido en sólidos.

A pesar de todo, el reactor más utilizado es el de mezcla completa, sobre todo, por ser el más sencillo. Consiste en un reactor en el que se mantiene una distribución uniforme de concentraciones, tanto de sustrato como de microorganismos. Esto se consigue mediante el sistema de agitación que se mencionaba con anterioridad.

7.1.4 Temperatura de trabajo en el biodigestor.

Es muy importante definir una temperatura óptima de funcionamiento para el digestor. Como se mencionó con anterioridad, existen tres tipos de regímenes de temperaturas de funcionamiento: régimen psicrófilico, régimen mesófilico y régimen termófilico. El primero de ellos queda descartado por su lentitud en el proceso al trabajar con temperaturas muy bajas, es decir, necesitaría un tiempo de retención muy elevado para obtener los mismos resultados.

El régimen mesófilico de operación es el más utilizado, a pesar de que en la actualidad se está implementando cada vez más el rango termófilico para conseguir una mayor velocidad del proceso. Sin embargo, el régimen termófilico suele ser más inestable a cualquier cambio de las condiciones de operación y presenta mayores problemas de inhibición del proceso, además de una mayor demanda energética al trabajar con temperaturas más elevadas. [4]

En nuestro caso, se empleará el régimen mesófilico ya que proporciona un proceso bastante controlado con unos tiempos de retención razonables (entre 30-60 días). Nuestra temperatura de operación será aproximadamente de 30°C ya que como podemos apreciar en las figuras 8 y 9, esta es una temperatura de funcionamiento óptima para el régimen mesófilico.

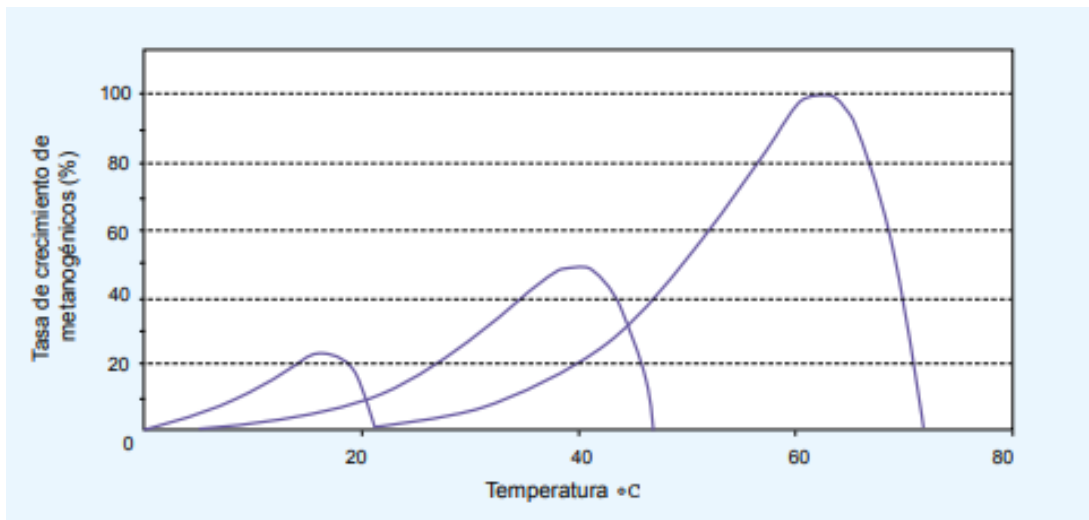


Figura 8. Tasa de crecimiento relativo de microorganismos psicrófilico (curva izquierda), mesófilicos (curva central) y termófilicos (curva derecha). Fuente: Speece, 1996.

Fermentación	Mínimo	Óptimo	Máximo	Tiempo de fermentación
Psycrophilica	4-10 °C	15-18°C	20-25°C	Sobre 100 días
Mesophilica	15-20 °C	25-35°C	35-45°C	30-60 días
Thermophilica	25-45°C	50-60°C	75-80°C	10-15 días

Figura 9. Rangos de temperaturas y tiempo de fermentación anaeróbica. Fuente: Lagrange, 1979.

Formas de calentamiento del biodigestor

El método más común para lograr el calentamiento de la materia prima, en el interior del biodigestor, es mediante el uso de serpentines. Como se mencionó con anterioridad, el calor que estos transmitirán será proveniente del sistema de cogeneración, aprovechando la energía térmica que se produce en él. Es decir, por los serpentines correrá el agua procedente del sistema de recuperación de calor del módulo de cogeneración.

Se pueden distinguir tres formas en la disposición del serpentín para calentar la biomasa:

- Serpentín en contacto con la biomasa: presenta algunas desventajas como la posibilidad de sufrir daños durante la agitación o la posible adherencia de incrustaciones en las paredes del serpentín. Para esto último, se ha investigado que mientras la temperatura del fluido en el interior de la tubería no sobrepase los 54,4 °C no debería haber problemas de incrustación en la tubería. [5]

Sin embargo, esta disposición permite una elevada tasa de transferencia de calor, por lo que cuidando los problemas que pueda acarrear, es una propuesta bastante razonable a considerar.



Figura 10 y 11. Ejemplos de la colocación de serpentines en contacto con la biomasa. Fuente: Engormix.

- Serpentin en el interior de las paredes del reactor: esta disposici3n tiene una menor tasa de intercambio de calor al presentar un mayor n3mero de resistencias t3rmicas por lo que no se considera una soluci3n viable.
- Serpentin situado en el exterior del reactor: esta disposici3n requiere de un gasto de energ3a el3ctrica adicional para una bomba de circulaci3n si no se trabaja con flujo continuo. Adem3s, tambi3n presenta una baja tasa de transferencia de calor. Su ventaja es que permite una limpieza regular en la superficie de los serpentines.

Tambi3n se pueden encontrar tipos de calentamiento de la biomasa sin el uso de serpentines, como es el calentamiento directo, realizado mediante la inyecci3n directa de vapor o gases calientes en el interior del reactor. [5]

Para el correcto dise1o de una instalaci3n con sistema de cogeneraci3n, es muy importante conocer la demanda t3rmica del proceso. Esto se discutir3 en el apartado de resultados y los c3lculos est3n recogidos en el Anexo I.

7.1.5 Concentraci3n del sustrato

Junto con la temperatura de operaci3n, la concentraci3n del sustrato representa una de las caracter3sticas diferenciales m3s significativas. Existen dos tipos de digesti3n: en v3a h3meda y en v3a seca.

- V3a h3meda: en este tipo de digesti3n, la concentraci3n de ST var3a entre el 5 y el 15 %, lo que implica importantes diferencias en las necesidades de agua de diluci3n. Pese al gasto de agua que conlleva, esta v3a presenta algunas ventajas como la diluci3n de sustancias inhibitoras, facilidad de liberaci3n de biog3s ya que las burbujas formadas se separan de las c3lulas bacterianas y de los s3lidos suspendidos sin dificultades y con alta eficiencia, y, adem3s, se trata de una tecnolog3a basada en procesos ya conocidos y equipos mec3nicos menos sofisticados. [6]
- V3a seca: para este tipo de digesti3n, la concentraci3n de ST es del orden del 40%, lo que modifica notablemente las caracter3sticas hidrodin3micas del sistema. Se pasa de trabajar con masas fluidas de viscosidad pr3xima a la del agua a trabajar con aut3nticas "pastas". Estos procesos son m3s complejos y exigen mayor conocimiento y rigor en el dise1o y operaci3n [7].

En nuestro caso, seleccionaremos el proceso de digestión en vía húmeda por su sencillez y su amplio abanico de información. Además, indicaremos un límite del 10% en el porcentaje de sólidos totales para la mezcla.

7.1.6 Geometría del tanque de digestión

Las geometrías posibles para los tanques suelen ser las siguientes:

- Cilíndricos: son los más usuales. La relación entre el radio y la altura es variable, recomendándose que si se va a realizar agitación con la presencia de gas, esté comprendida entre 0,7 y 2. Los tanques bajos presentan problemas de acumulación de arenas y espumas y dificultades para conseguir mezclas adecuadas. Así mismo, a mayor altura del tanque, mayor será la carga hidráulica sobre los muros, con la consecuente necesidad de refuerzo de la estructura y, por lo tanto, mayor coste económico.
- Rectangulares: son de construcción muy sencilla. La agitación presenta puntos muertos, por lo que existen problemas de mezcla, particularmente en las esquinas, lo que implica una mayor acumulación de arenas y espumas. Debido a estos problemas, apenas son utilizados.
- Ovoides: su forma evita acumulaciones de arenas y espumas y favorece la mezcla permitiendo utilizar menor potencia. Sin embargo, tienen unos altos costes de construcción y no permite un buen almacenamiento del biogás. [8]

7.1.7 Dimensionado y fabricantes

Dimensionado

Para el dimensionado del tanque de digestión es necesario tener varios aspectos en cuenta como son:

- Cantidad de estiércol que se produce en la granja. En este estudio se entenderá por estiércol como el residuo sólido que expulsan los animales.
- Cantidad de orina que expulsan los animales. Aunque se sabe que las aves no orinan, en su palabra propiamente dicha, estas expulsan, aunque sea por la misma vía (cloaca), por un lado, el residuo sólido (estiércol) y por otro, una sustancia líquida que podríamos considerar como orín [9]. En nuestros cálculos tomaremos una cantidad estimada del residuo líquido que producen las gallinas generalmente, ya que no hemos podido

analizar el residuo de la granja para conocer el porcentaje de sólidos y líquidos que se produce.

- Porcentaje de sólidos totales, sólidos volátiles y cantidad de agua a agregar al digestor. En cuanto a los sólidos totales, existen varios valores de porcentaje de ST indicados para la digestión en vía húmeda, siendo un 10% el valor límite por debajo del cual no es necesario agregar agua [10].
- Tiempo de retención. Representa un parámetro muy importante a tener en cuenta para el dimensionado del biodigestor y se calcula mediante la ecuación 1 teniendo en cuenta la temperatura de trabajo en el interior del digestor. Este parámetro ha sido motivo de controversia debido a que, en algunas de las fuentes consultadas se toma como la temperatura del aire ambiente en el que se encuentra el tanque de digestión, mientras que en otras se toma como la temperatura del interior del tanque. Personalmente, creo que lo correcto es considerar dicho parámetro como la temperatura en el interior del tanque de digestión, ya que, si el tanque está correctamente aislado térmicamente, poco tendrá que ver para la biometanización la temperatura del aire ambiente en el que se encuentre.

En nuestro caso, como mencionamos con anterioridad, vamos a trabajar en rango mesofílico por lo que indicaremos una temperatura de operación de unos 30°C.

$$TR = [-51,227 * \ln[T(^{\circ}C)] + 206,72]$$

Ecuación 1. Cálculo del tiempo de retención en función de la temperatura.

La ecuación 1 se rige por la curva siguiente:

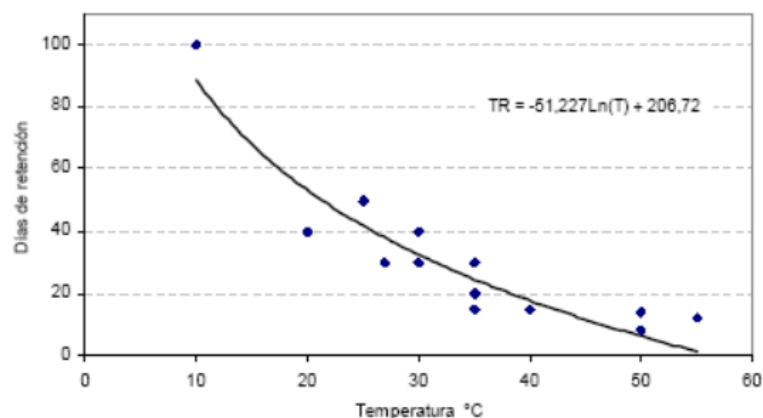


Figura 12. Curva logarítmica del tiempo de retención. Fuente: UPME, 2003.

- Cúpula. Se debe tener en cuenta dejar un volumen reservado para el almacenamiento del gas producido. Normalmente, este volumen reservado se encuentra en la cúpula del tanque.

En la tabla 2 expuesta a continuación, se pueden observar varios datos característicos de los residuos orgánicos de varios tipos de seres vivos. Estos datos son necesarios para el dimensionado del biodigestor.

Clase de animal	% por peso vivo		% del material de digestión		Relación C/N	P – Producción de biogás (m ³ de gas/1kg SO)
	PE - Estiércol	PO - Orina	%EST – Sólidos	%SO – Sólidos Orgánicos		
Vacunos	5	4	15-16	13	20	0,250
Cerdos	2	3	16	12	13	0,350
Caprinos, ovejas	3	1,5	30	20	30	0,200
Caballos	5	4	25	15	20	0,250
Avícolas, gallinas	4,5	4,5	25	17	5-8	0,400
Humanos	1	2	20	15	8	0,300

Tabla 2. Valores y características del residuo orgánico. Fuente: GTZ, 1987.

Fabricante

Existen varios fabricantes de tanques enfocados a la bioenergía como pueden ser Farmatic o el fabricante chino CEC Tanks. En todo caso, para la selección del fabricante se debe tener en cuenta que sea capaz de satisfacer las necesidades de la instalación en cuanto al dimensionado del tanque, geometría, capacidad de agitación de la mezcla, empleo de materiales idóneos para el proceso, capacidad de almacenamiento del biogás en caso de que sea necesario, además, de otros aspectos como el presupuesto y el montaje.

Se ha seleccionado un tanque de CEC Tanks como posible solución. A continuación, se exponen sus características:

- Tanque de almacenamiento de biomasa del fabricante CEC Tanks.

Este tipo de tanque se fabrica con láminas de vidrio fundido al acero, con lo que se logra una adecuada resistencia y flexibilidad, además de una óptima resistencia a la corrosión gracias al vidrio. Este material aplicado tanto en el interior como en el exterior del tanque es capaz de

proporcionar una vida útil suficientemente larga. Además, en el interior del tanque se debe llevar a cabo una digestión anaerobia, es decir, sin la presencia de oxígeno por lo que se instalarán en él una serie de válvulas de vacío para lograr un ambiente sin oxígeno.

Por otro lado, como se mencionó anteriormente, es necesaria la agitación de la mezcla para su correcta homogenización y producción de biogás. Para ello, se hará uso de unos removedores de dos aspas que cubrirán todo el diámetro del tanque. Estas aspas, impulsadas por un motor eléctrico removerán la biomasa para su correcta homogenización. Se colocarán dos removedores, uno en el fondo del tanque y otro en un punto intermedio situado a unos 3 metros sobre el suelo, con lo que se conseguirá la completa movilización de la mezcla. Los motores eléctricos se sitúan en el exterior del tanque para un fácil mantenimiento.

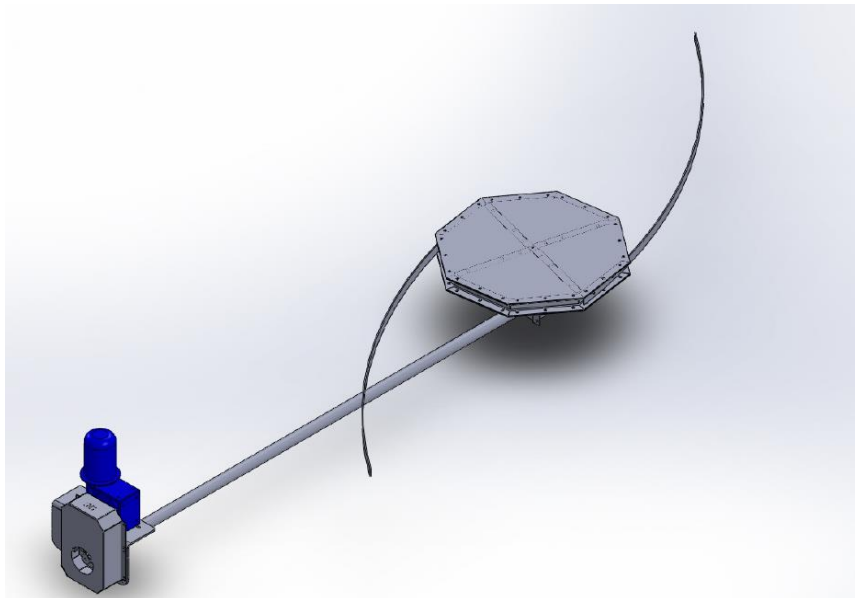


Figura 13. Removedor SA260. Fuente: ecokcal.

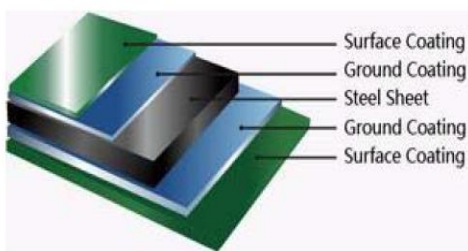
Ante la duda de si el tanque está o no correctamente aislado, al no disponer de demasiada información por parte del fabricante, se ha considerado añadir una capa de aislamiento en el interior del tanque junto con un recubrimiento de acero inoxidable que será la zona que estará en contacto con la biomasa. Este aislamiento térmico aportará a la instalación ciertas ventajas como un ahorro importante de energía, al dificultar la pérdida de calor a través de las paredes del tanque, o una mayor seguridad ante posibles fuegos o humos.

La capa de aislamiento seleccionada será el vidrio celular o vidrio expandido, que es un material elaborado a partir de polvo de vidrio cocido. Es empleado fundamentalmente como

aislante térmico y como protección contra el fuego. Según la norma UNE-EN 14305 las instalaciones industriales que incorporen este aislamiento deben trabajar en un rango de temperatura aproximadamente de $-265\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+430\text{ }^{\circ}\text{C}$. El espesor de esta capa de aislamiento se ha estimado en unos 100 mm (valor estimado a partir de las fuentes consultadas) con el objetivo de asegurarnos que realice correctamente su función.

La superficie aislada contará con un recubrimiento de chapa de acero inoxidable de aleación AISI 316L debido a su buen comportamiento en ambientes altamente corrosivos. En cuanto a su espesor, según las fuentes consultadas, para diámetros exteriores superiores a 801 mm y superficies planas, el espesor mínimo de la chapa deberá ser de 0,8 mm. [11]

Double Coating Layer Structure



Coating Properties

Coating Thickness: 0.25-0.40mm
Double coating: 2 layers each side
Adhesive power: 3,450 N / cm
Coating Elasticity: 500 kN/mm
Hardness: 6.0 (Moh's hardness)
Service life: ≥ 30 years

Figura 14. Características del tanque de vidrio fundido al acero. Fuente: CEC Tanks.

El espesor de la chapa de vidrio fundido al acero (GFS, por sus siglas en inglés) se ha estimado en 5 mm según las fuentes consultadas. [6]

Suelo

El tanque irá colocado sobre una base plana de hormigón de 0,5 metros de altura, lo que servirá para proporcionar al tanque de una adecuada estabilidad y agarre con el suelo, y, además, debido a las propiedades aislantes de este material, servirá también para aislarlo térmicamente en la zona baja, lo cual es de gran importancia.

Tras varios cálculos de diseño y con el fin de obtener una menor pérdida de calor a través del fondo del tanque, se determina que el espesor de aislamiento de vidrio expandido en el suelo será de 150 mm.

Cubierta

Por otro lado, este tipo de tanque puede incorporar una cubierta de doble membrana en forma de cúpula y volumen variable. Esta cubierta hará las veces de gasómetro en menor medida de manera que podremos tener cierto gas almacenado en la cúpula del propio biodigestor. La doble membrana está conformada por dos capas de lona de PVC de color blanco opaco que están separadas por una cámara de aire mantenida a baja presión. El hinchado de esta cámara se puede llevar a cabo mediante un soplador de reducido consumo eléctrico que solo entra en funcionamiento cuando la cámara pierde presión.

El empleo de una cubierta de doble membrana presurizada presenta ventajas térmicas en cuanto a aislamiento se refiere además de eliminar condensaciones y amortiguar posibles ruidos o movimientos de la estructura. Se suele emplear una capa de unos 15 cm.

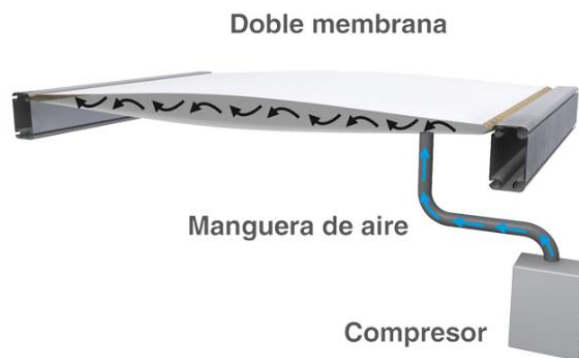


Figura 15. Sistema de doble membrana. Fuente: aracarpas.com



Figura 16. Cubiertas de doble membrana en tanques de almacenamiento de biogás. Fuente: Upbiogas

En cuanto a sus dimensiones, el fabricante nos ha proporcionado una tabla Excel en la que podemos seleccionar la altura y el diámetro del tanque en función de su volumen comercial.

Ventajas de emplear este tipo de tanque

- Corto período de construcción. Procedimiento rápido y sencillo.
- Alta resistencia a la corrosión. La vida útil es superior a los 30 años.
- Costes económicos bajos. Una vez que se instala el tanque, los trabajos de mantenimiento tienen bajos costes y son fáciles de realizar.
- El volumen del tanque se puede ampliar fácilmente si se especifica al fabricante antes de la fabricación.
- Buen aspecto. El color se puede personalizar y el acabado superficial es bueno.
- Fácil de ampliar, desmontar y mover. El tanque es atornillado, por lo que no es necesario equipos grandes para su instalación o desinstalación, por lo que también es fácil de desplazar.



Figura 17. Tanque de vidrio fundido al acero con cubierta de doble membrana. Fuente: CEC Tanks.

7.2 Módulo de cogeneración

En este apartado analizaremos las posibles soluciones para el módulo de cogeneración, el cuál debe ser seleccionado en función de la producción de biogás que se obtiene del biodigestor y de su respectiva capacidad de potencia. Además, otro aspecto relevante a tener en cuenta para su elección es la capacidad de producción de potencia eléctrica y calorífica para cubrir la requerida por la granja y la instalación. Por ello, se plantearán varios posibles equipos candidatos para, tras los cálculos necesarios, seleccionar el módulo más adecuado para la instalación.

Los motores que emplean gases procedentes de biometanizaciones montan una configuración diferente al de otro tipo de aplicaciones debido principalmente a los requerimientos en robustez necesaria para hacer frente al tipo de gases empleados. La ventaja de la cogeneración frente a los sistemas que únicamente generan electricidad es la mayor eficiencia energética global del proceso. Las máquinas térmicas para cogeneración que se han considerado más adecuadas a este proyecto pueden clasificarse basándose en dos tipos de generadores de energía: el motor de combustión interna alternativo (MCIA) y la microturbina de gas. [12]

Motor de combustión interna alternativo

Los MCIA emplean la energía química contenida en el combustible (en nuestro caso, biogás) para junto con el aire que entra al cilindro y la compresión producida por el pistón, provocar la combustión en el interior del cilindro, con lo que se consigue producir energía mecánica al desplazar el pistón nuevamente en la expansión. Si conectamos el MCIA a un alternador, este trabajo mecánico puede convertirse en energía eléctrica. A su vez, durante el proceso se desprende gran cantidad de energía en forma de calor, la cual puede ser recuperada a través del sistema de refrigeración y del recuperador de calor de los gases de escape.

Dentro de los MCIA podemos encontrar dos tipos, si para la combustión de la mezcla es necesario el aporte de chispa en el interior del cilindro en el momento final de la compresión, estos MCIA se denominan MEP (Motor de Encendido Provocado) y emplean combustibles ligeros como gasolina o gas natural. Por el contrario, si la reacción de combustión se produce por autoignición de la mezcla aire-combustible debido a los altos valores de presión que se dan en el interior del cilindro durante el movimiento de compresión del pistón, estos motores se

denominan MEC (Motor de Encendido por Compresión) y emplean combustibles más pesados como el gasoil.

Este tipo de máquina térmica es adecuada para potencias bajas (hasta 15 MW) en las que la generación eléctrica es muy importante en el peso del plan de negocio. Los MCIAs son la máquina térmica que más rendimiento eléctrico tiene [13] (entre 30-40%). Además, permite puestas en marcha y paradas bruscas sin necesidad de grandes tiempos de calentamiento ni preparación y presenta consumos específicos de combustible constantes si su potencia de trabajo está por encima del 50% de la potencia nominal.

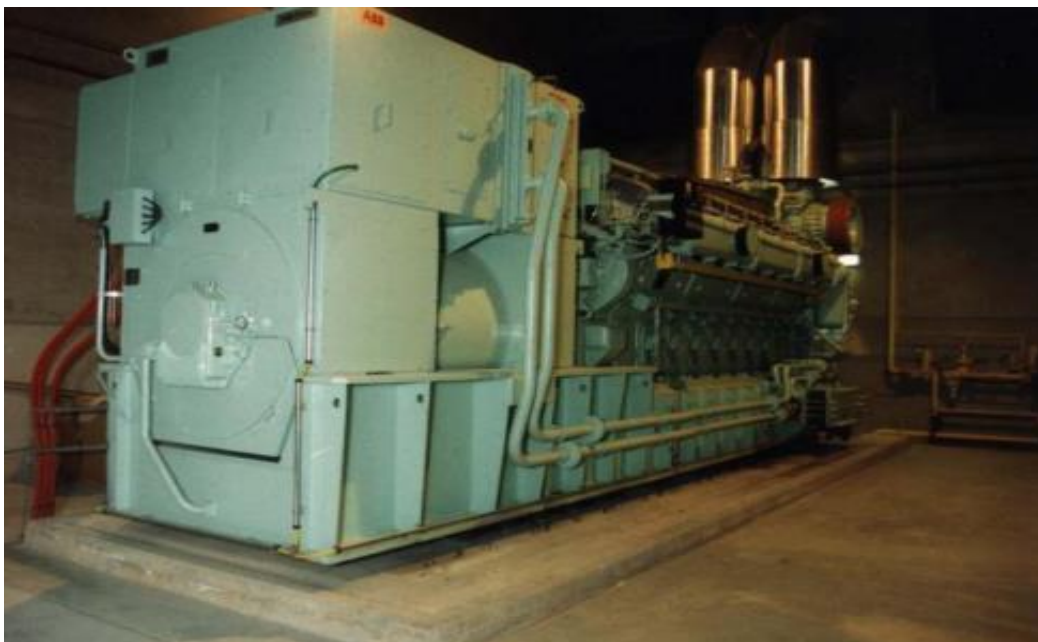


Figura 18. Motor de combustión interna alternativo (MCI). Fuente: eoi.

Microturbina de gas

Las microturbinas de gas son máquinas de combustión basadas en el mismo principio que las turbinas convencionales, pero simplificando los elementos mecánicos. Las turbinas para generación de energía disponen habitualmente de un compresor de aire de varias etapas, una cámara de combustión en la que se introduce el aire comprimido y el combustible para ser quemados, y varias etapas de turbina en las que se absorbe la energía de los gases de escape. Las microturbinas simplifican todos estos elementos quedando únicamente una pieza móvil en toda la máquina. Si se conecta a un alternador, la energía mecánica del eje se transformará en energía eléctrica. También, los gases calientes provenientes de la combustión transmiten energía en forma de calor.

Su rendimiento eléctrico es normalmente inferior al de las plantas con motores alternativos, pero presentan la ventaja de que permiten una recuperación fácil del calor, concentrado prácticamente todo en los gases de escape.

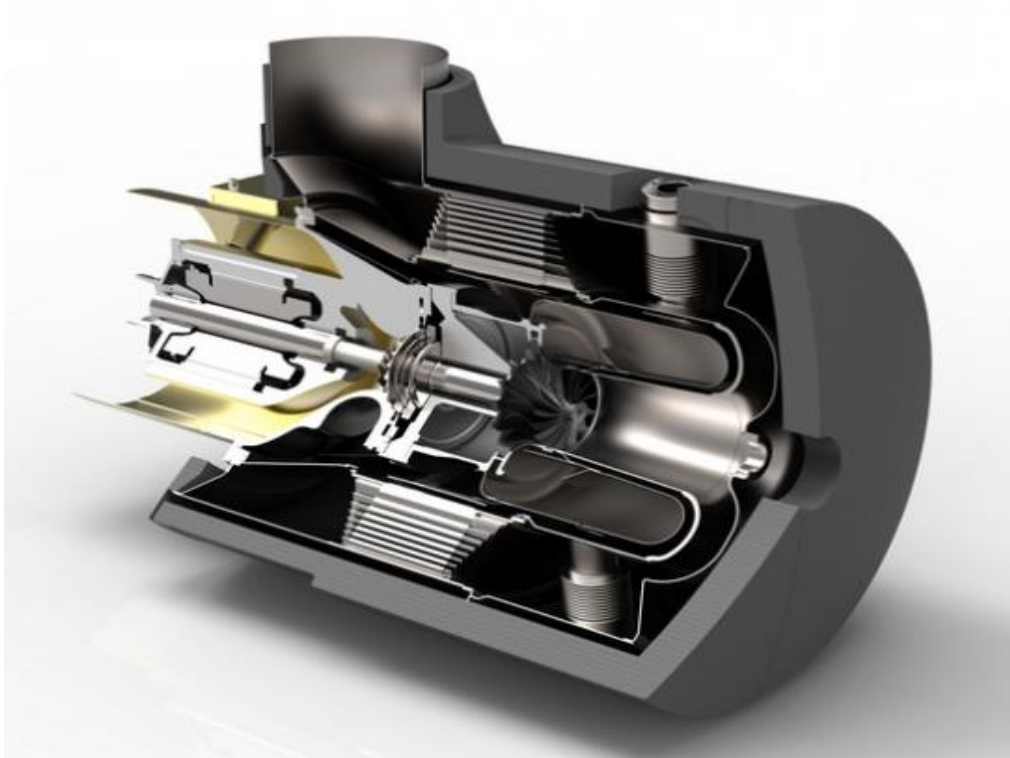


Figura 19. Microturbina de gas. Fuente: Micropower Europe; Capstone Turbine Corporation.

Además de estos dos tipos de máquinas térmicas, la cogeneración se puede llevar a cabo con otros sistemas como las turbinas de gas, los motores Stirling, mediante ciclos Rankine o pilas de combustible. La elección del tipo de tecnología adecuada a emplear depende de parámetros como el rango de potencia necesario o la inversión económica.

A continuación, se adjunta una tabla con distintas tecnologías que pueden ser empleadas usando biogás como combustible (figura 20).

Tecnología	MCIA	Microturbina	Turbina de gas	Stirling	Pilas de combustible
Tamaño (MW)	0,03 – 6	0,001 – 0,4	0,5 – 30	0,0250 – 0,055	0,1 – 3
Inversión (€/MW)	560.000 – 965.000	950.000 – 1.350.000	325.000 – 725.000	900.000 – 1.600.000	3.200.000 – 4.000.000
O&M (€/MWh)	6,2 – 16	6,4 – 12	3,2 – 8	4 – 6,4	1,5 – 2,3
Eficiencia sobre PCI (%)	30 – 42	14 – 30	21 – 40	30	26 – 50

Figura 20. Tecnologías utilizadas para la valorización del biogás. Fuente: IDAE

Teniendo en cuenta la potencia eléctrica que es capaz de generar nuestro residuo, el cual lo podemos estimar rápidamente a partir del dato proporcionado por el estudio de AquaLimpia Engineering en colaboración con la GIZ alemana (antigua GTZ), en el que estiman que por cada 100 toneladas diarias de gallinaza se puede instalar 1 MWe promedio. Redimensionando este dato a nuestro proyecto, en el que se generan unas 2 toneladas diarias de gallinaza, podemos decir que nuestra potencia de instalación será del orden de los 20 kWe.

Según la directiva 8/EC/2004, esto significa que estamos en rangos correspondientes a la denominada microgeneración, que simplemente indica que la producción de potencia de la instalación no sobrepasa los 50 kWe. [14]

Como se puede observar en la figura 20, las máquinas que trabajan con este rango de potencia son los MCIA, las microturbinas o los motores Stirling. De estos tres tipos de máquinas térmicas, los MCIA son los que requieren una menor inversión económica, además, de que presentan un mayor rango de eficiencia sobre el PCI del combustible.

Por otro lado, como se menciona en las fuentes consultadas y se recoge en este documento, los motores alternativos son la máquina térmica con mayor eficiencia eléctrica, por lo que son los empleados en casos en los que la producción eléctrica tiene mucha importancia en el peso del plan de negocio. En nuestro caso, el principal objetivo de la instalación es cubrir la demanda eléctrica de la granja, y en un segundo plano, aprovechar el calor para mantener el biodigestor en la temperatura de operación. Además, la potencia de la instalación no superará

en ningún caso los 15 MW mencionados con anterioridad, lo cual es otro de los aspectos a tener en cuenta para el empleo de motores alternativos en la cogeneración.

Todo esto nos ha llevado a elegir al motor alternativo como nuestra máquina térmica para conformar el módulo de microcogeneración de nuestra instalación.

Existen varias empresas enfocadas en el diseño de módulos de cogeneración que emplean biogás como combustible, como pueden ser 2G, MAN, Rolls-Royce, Grupo Casli o Altare energía. Consultando sus catálogos hemos observado que existe una gran variedad de motores alternativos a gas destinados a la microcogeneración. A pesar de ello, se ha observado que la gran mayoría están diseñados para trabajar con grandes rangos de potencia.

Aun así, se expone a continuación la tabla 3, de elaboración propia en la que se recogen algunos de los modelos diseñados para microcogeneración que se han podido encontrar en el mercado. En ella se pueden observar tanto la marca y modelo de los grupos motogeneradores como sus distintos parámetros de funcionamiento:

Modelo	KWE SB 33	OEKO 45 BG	MC 20/40	MC 30/60
Fabricante del motor	KUBOTA	MAN	GM	GM
Potencia de entrada (kW)	99,2	135	76	103
Potencia eléctrica (kWe)	33	45	20	30
Potencia térmica (kWt)	71,6	72	46	62
Eficiencia eléctrica (%)	33,8	33,3	26	29
Eficiencia térmica (%)	72,2	53,3	60	60
Eficiencia total (%)	105,5	86,6	86	89
Cilindros	-	4 en línea	4 en línea	6 en V
Cilindrada (cm ³)	3600	4580	2966	4294
Temperatura gases escape (°C)	90	180	120	120
Emisiones NO _x	< 100 mg/m ³	<500 mg/Nm ³	-	-
Sistema de refrigeración	-	Agua	Agua	Agua

Tabla 3. Diferentes modelos de sistemas de cogeneración. Fuente: elaboración propia

Más adelante, se discutirá la selección del modelo de motor alternativo final escogido para el módulo de microgeneración.

8. Resultados finales

En este apartado se exponen los resultados obtenidos tras el respectivo análisis de las posibles soluciones y la resolución de los cálculos.

8.1 Datos de partida

A continuación, se exponen los datos y características conocidas del residuo orgánico que se produce en la granja. Algunos de estos datos como la cantidad total de residuo orgánico generado son datos reales proporcionados por el dueño de la granja, mientras que otros son valores generales obtenidos en la bibliografía. Estos datos son de vital importancia para la realización de los cálculos y exposición de los resultados finales de la instalación.

Residuo orgánico

Ante la imposibilidad de realizar análisis químicos en el residuo generado, hemos decidido tomar los parámetros proporcionados por la Corporación Técnica Alemana para el desarrollo sostenible (GTZ) con respecto al residuo orgánico producido por las gallinas (tabla 2):

- Porcentaje de estiércol por peso vivo: 4,5 %
- Porcentaje de orina por peso vivo: 4,5 %
- Porcentaje de sólidos en el estiércol: 25%
- Porcentaje de sólidos orgánicos (sólidos volátiles): 17 %
- Relación C/N: 5-8
- Producción de biogás: 0,400 m³ de gas/kg SO

Ahora bien, para el dimensionado de la instalación en general, es necesario conocer primero la cantidad de materia prima de la que disponemos. Esto es 3240 kg diarios. Se considera que dicha cantidad de materia prima que se carga en el biodigestor representa la suma del residuo sólido (estiércol) y el residuo líquido (orina).

En nuestro caso, a partir de una estimación considerando el número de gallinas que se encuentran en la granja (12000 gallinas), su peso vivo medio y el porcentaje de estiércol que producen, hemos podido estimar que, en el residuo generado, tenemos unos 1620 kg de estiércol diarios. Como sabemos que las gallinas producen el mismo porcentaje de estiércol que

de orín, obtenemos también que en la granja se producen diariamente otros 1620 kg de residuo líquido. Esta suma representan los 3240 kg diarios de materia prima que se cargarán en el biodigestor (MPC).

8.2 Digestión anaerobia

En este apartado se discutirán todos los resultados relacionados con el biodigestor y el proceso de digestión anaerobia que se produce en su interior.

8.2.1 Carga del biodigestor y tiempo de retención

Una vez conocida la cantidad de materia prima que se ve a cargar al biodigestor, es necesario conocer la cantidad de agua que será necesaria añadir para la digestión en vía húmeda. Como hemos mencionado en el análisis de soluciones, consideraremos que la mezcla debe tener un 10% de ST para el proceso de digestión en vía húmeda.

Para fijar este 10%, lo primero que hemos hecho ha sido calcular el porcentaje de ST que presentaba nuestra materia prima inicialmente mediante la relación siguiente:

$$\%ST = \frac{E * \%EST}{MPC}$$

Ecuación 2. Porcentaje de sólidos totales.

El resultado fue de un 12,5%. Esto nos indicaba que, para trabajar con el nivel de humedad acordado, sería necesario añadir agua, con lo que se disminuyen los sólidos en la materia prima.

Para calcular entonces la masa de agua necesaria a añadir, debemos conocer primero la cantidad de sólidos totales diarios que tenemos en nuestra materia prima. Mediante el cálculo correspondiente, obtenemos una cantidad de 405 kg diarios de sólidos totales. Entonces, la masa de agua necesaria para reducir estos sólidos al 10% es:

$$M_{H_2O} = \frac{MPC * ST}{10} - MPC = 810 \text{ kg/día}$$

Ecuación 3. Caudal másico de agua a añadir

Esto es unos 810 litros diarios, considerando que la densidad del agua es 1 kg/l.

En definitiva, la carga total del biodigestor es la suma de la materia prima (MPC) y la masa de agua a agregar a la mezcla (M_{H_2O}). Lo cual representa un total de 4050 kg diarios de carga.

El último parámetro por identificar relacionado con la carga del biodigestor será indicar el tipo de flujo con el que se trabajará. En nuestro caso, operaremos con un flujo semicontinuo que cargará el tanque de digestión una vez al día. Este tipo de flujo es muy similar al de flujo continuo manteniendo prácticamente todas sus ventajas.

En cuanto al tiempo de retención, haciendo uso de la ecuación 1 e indicando que se operará en un rango mesofílico óptimo, concretamente a unos 30 °C, se ha obtenido un TR de 33 días. Este es un valor normal, ya que la estimación de tiempos de retención para un rango mesofílico es de entre 30 y 60 días de fermentación (figura 9).

8.2.2 Volumen del biodigestor

Para obtener el volumen del tanque de digestión, es imprescindible conocer el flujo de carga (4050 kg/día) y el tiempo de retención (33 días). Además, se quiere tener en cuenta dejar un espacio en el interior del tanque para el almacenamiento del biogás, que se conseguirá mediante una cúpula superior de doble membrana. La forma del tanque será cilíndrica para evitar diferencias de concentración en las esquinas. Por otro lado, debido a la ubicación del tanque, se ha decidido que la altura de este no sea superior a los 8,5 metros que hay entre el suelo donde irá ubicado y el punto más alto de la granja.

Teniendo en cuenta la carga del biodigestor y el tiempo de retención, el volumen mínimo necesario para el cilindro deberá ser de 221,1 m³.

Obedeciendo al catálogo del fabricante CEC Tanks, cuya tabla Excel se muestra en el Anexo III, el volumen comercial inmediatamente superior disponible es de 223 m³, con una altura de 6 metros y un diámetro de 6,88 metros.

En cuanto a la cubierta del tanque, que tendrá forma de cúpula y servirá para el almacenamiento del biogás, deberá tener un volumen mínimo 24,78 m³, ya que, según las fuentes consultadas, este volumen representa el 10% del volumen útil del tanque destinado al almacenamiento de la biomasa. Mediante los cálculos oportunos se ha obtenido que para este

volumen y fijando como diámetro de la cúpula el diámetro del cilindro, será necesario una altura de la cúpula de 1 metro.

En definitiva, la altura total del tanque será: $H_{\text{biodigestor}} = 6 + 1 = 7$ metros.

Y el diámetro: $D_{\text{biodigestor}} = 6,88$ metros.

8.2.3 Caudal de biogás obtenido

Los cálculos de este parámetro producto de la digestión anaerobia se encuentran en el Anexo 1.

El caudal de gas producido depende del caudal de materia prima total que se carga en el biodigestor, pero es importante entender que para la obtención de este producto, la materia prima que se transforma en biogás es la materia volátil. Por lo tanto, el caudal de biogás obtenido dependerá de la materia prima total que se carga en el tanque, y a su vez, de la cantidad de materia volátil que contiene esa propia materia. En nuestro caso, el porcentaje de materia volátil de la gallinaza la obtenemos de la tabla 2 y es el 17%. A partir de la misma fuente, también podemos obtener la producción teórica de biogás que presenta nuestro residuo ($P = 0,400 \text{ m}^3$ de gas/ kg SO).

Realizando el cálculo oportuno obtenemos un caudal volumétrico de gas de $220,32 \text{ m}^3$ diarios que podrán ser empleados como combustible en el sistema de cogeneración. Esto es un caudal másico de gas de $2,41 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$.

Las principales propiedades a tener en cuenta de este gas son su concentración de metano, que es fundamental para la selección de la máquina térmica ya que influye directamente en el PCI del biogás y por tanto en la potencia de combustible. Además de otras como la densidad del gas, que puede ser útil para los cálculos de caudales másicos o caudales volumétricos del gas.

Cantidad de metano	165,24 m ³ /día (75% de CH ₄)
PCI del biogás	37571,27 kJ/kg
Densidad del biogás	0,947 kg/m ³

Tabla 4. Propiedades del biogás obtenido. Fuente: elaboración propia.

Todos los cálculos necesarios para la obtención de estas propiedades están recogidos en el anexo correspondiente a cálculos (Anexo I).

8.2.4 Digestato producido

El digestato producido es la cantidad de materia que no se transforma en gas. Es decir, del caudal másico total que se emplea para la carga diaria del biodigestor, en el que se cuenta tanto la materia prima (gallinaza) como el agua necesaria para la digestión, una parte se transforma en gas como ya mencionamos anteriormente, y la otra parte se transforma en digestato.

Podemos definir entonces al digestato como las fracciones sólidas y líquidas del caudal másico de carga que no se han transformado en gas. Estas fracciones sólidas y líquidas pueden ser separadas mediante sistemas mecánicos como prensas, decantadores, centrifugas o tambores de deshidratación. De manera que la fracción sólida puede ser empleada como fertilizante para los terrenos agrícolas que rodean a la propia granja y la fracción líquida puede ser empleada para el riego de dichos terrenos. Esto último tendrá un gran beneficio en la agricultura debido a los nutrientes que adquiere esta agua.

Para el cálculo del caudal másico de digestato obtenido, simplemente se ha realizado un balance de masa con el tanque de digestión como volumen de control. De manera que:

VC: biodigestor

$$\dot{m}_{carga} = \dot{m}_{biogás} + \dot{m}_{digestato}$$

Ecuación 4. Balance de masa en el biodigestor

Con esto, hemos obtenido que diariamente se obtendrán unos 3841,36 kg de digestato provenientes del tanque. Es decir, tan solo un 5,15% de la carga del biodigestor se transforma en gas, y el 94,85% restante se transforma en digestato.

Una vez separadas la fracción sólida y líquida pueden ser almacenadas en tanques para su posterior uso como abono y regadío respectivamente.

El presente estudio se centra en el producto gaseoso (biogás) y su correspondiente empleo en un sistema de cogeneración, por lo que el estudio y administración de este otro producto no tendrá mayor relevancia en el trabajo de fin de grado que la dada en este apartado.

8.3 Microgeneración

En este apartado se discutirán todos los resultados obtenidos en cuanto a la cogeneración se refiere, así como la selección del módulo de microgeneración a emplear. Se puede decir que este apartado es el de mayor importancia en la síntesis total del proyecto debido a que en él se presentan las distintas soluciones que se han tomado para cumplir los principales objetivos del proyecto.

8.3.1 Potencia demandada

Primero se exponen las potencias, tanto eléctrica como calorífica que necesita la granja y el biodigestor para su correcto funcionamiento. Este análisis nos facilitará la selección del modelo y fabricante del motor a emplear para el módulo de microgeneración ya que tanto la potencia eléctrica como la potencia calorífica que sea capaz de producir este equipo irá acorde con la demanda de energía de la granja y el biodigestor.

Potencia eléctrica

El principal objetivo del módulo de cogeneración será el de abastecer de energía eléctrica a la granja ya que es el consumo de mayor importancia y magnitud.

Para conocer la potencia eléctrica que demanda la granja, se ha realizado una tabla en Excel en la que podemos observar los distintos consumos eléctricos de iluminación y de equipos que hay instalados en la granja. Así como, sus correspondientes factores de simultaneidad. (Figura 21).

Iluminación y equipos	Potencia eléctrica (W)	Fs	Puntos utilizados	Potencia total (W)
Iluminación 1	18	0,75	8	108
Iluminación 2	40	0,75	45	1350
Iluminación 3	40	0,75	45	1350
Iluminación 4	40	0,75	35	1050
Motores jaulas piso sup	660	0,6	16	6336
Ventiladores piso sup	1125	1	3	3375
Motores jaulas piso inf	660	0,6	10	3960
Ventiladores piso inf	1125	1	2	2250
Motores jaulas pollos	500	0,6	4	1200
Ventiladores pollos	660	1	2	1320
Arranque calentador gasoil pollos	250	1	1	250
Clasificadora	370	1	2	740
Transfer clasificadora	370	0,5	2	370
Removedores	1125	1	2	2250
Potencia total de la granja (W)				25909
Potencia total de la granja (kW)				25,91

Figura 21. Potencia eléctrica de la granja calculada. Fuente: elaboración propia.

Los cuatro circuitos de iluminación se corresponden con cuatro zonas diferenciadas en la granja: el circuito de iluminación 1 se corresponde con la habitación en la que se realiza la clasificación de huevos por tamaño y su preparación para la venta, esta habitación cuenta con 8 lámparas fluorescentes de 18 W cada una. El circuito de iluminación 2 y el de iluminación 3 se corresponden con las dos naves en las que se encuentran las jaulas de gallinas ponedoras. Estas naves se encuentran en un mismo edificio, una situada en el piso superior y la otra en el piso inferior. Cuentan con 45 bombillas de 40 W cada una. El circuito de iluminación 4, es el circuito de iluminación de la nave destinada a la crianza de pollos y cuenta con 35 bombillas de 40 W cada una.

En cuanto a los equipos de la granja, que se basan fundamentalmente en los sistemas de cintas transportadoras, estos están impulsados por una serie de motores eléctricos asíncronos.

En la nave del piso superior actúan hasta 16 motores de 0,66 kW para impulsar las distintas cintas transportadoras encargadas de transportar la gallinaza, el pienso, los huevos, etc. Estos motores no suelen funcionar todos a la vez por lo que se ha considerado emplear un factor de simultaneidad de 0,6. En esta nave también actúan varios ventiladores sobre todo en los meses de verano y están impulsados por 3 motores 0,90 kW.

La nave del piso inferior es bastante similar a la del piso superior pero el tipo de jaulas montadas aquí precisan de un menor número de motores. En total actúan 10 motores de 660 kW. Además, los ventiladores también son diferentes a los del piso superior actuando 2 motores en lugar de 3.

En cuanto a las jaulas instaladas en la nave de pollos, estas precisan de 4 motores de 0,5 kW y 2 ventiladores de 0,66 kW. En esta nave se encuentra además un calentador de aire que funciona a gasoil, aunque en el momento de su arranque precisa de un motor eléctrico de 0,25 kW.

En cuanto a la habitación de la clasificadora, en ella funcionan varios equipos. Por un lado, actúan dos cintas transfer que transportan los huevos, una desde la nave inferior y otra desde la nave superior. Estas cintas transfer están impulsadas por un motor de 0,37 kW cada uno y cuando actúa una de ellas, la otra se encuentra parada y viceversa, por lo que se ha considerado un factor de simultaneidad de 0,5. Por otro lado, la máquina clasificadora de huevos funciona mediante dos motores de 0,37 kW de potencia.

Por último, hemos considerado los dos motores de los agitadores del tanque de digestión. Estos motores son similares a los motores que impulsan las cintas transportadoras de las jaulas, de una potencia de 0,90 kW cada uno. Por otro lado, estos motores de 0,90 kW son los de mayor potencia en la granja por lo que según el reglamento ITC-BT-47, se debe considerar un factor de arranque de 1,25 en relación al pico de consumo que se produce en el momento de arranque del motor. Es por ello por lo que hemos considerado una potencia de 1,125 kW en cada uno.

En definitiva, la suma total de potencia eléctrica que precisa la granja es de 25,91 kWe. Es decir, hará falta un sistema de cogeneración cuya potencia eléctrica generada sea de esta magnitud.

Potencia térmica

Esta demanda está asociada con la energía en forma de calor que necesita el biodigestor para mantener constante su temperatura de operación. Este calor lo produce el módulo de microcogeneración durante su funcionamiento y es gracias al sistema de refrigeración del motor y el recuperador de calor de los gases de escape, como se puede aprovechar para el calentamiento del biodigestor.

Para la realización del estudio de demanda calorífica se ha calculado primero la cantidad de calor que se debe aportar al biodigestor para realizar el calentamiento de la materia hasta su temperatura de operación. Esta potencia calorífica es de 3,67 kWt.

En segundo lugar, se han calculados las pérdidas de calor que se producen en el biodigestor. Por un lado, las producidas a través de medios físicos, es decir, las paredes, el fondo y la cubierta del tanque, y por otro lado las pérdidas producidas debido a la evaporación del agua y las debidas a la salida de biogás del biodigestor. El fin de calcular estas pérdidas es que, para mantener constante la temperatura de operación, se tendrá que aportar al biodigestor la misma cantidad de calor que se pierde.

En cuanto a las pérdidas de calor a través de medios físicos, estas son de 1,26 kWt. Las pérdidas de calor debidas a la evaporación son de 0,075 kWt y las debidas al biogás que sale del biodigestor son de 0,079 kWt.

En total, la cantidad de potencia térmica que precisa el biodigestor es la suma de todas estas potencias anteriores, es decir, 5,084 kWt. Esto significa que nuestro módulo de cogeneración deberá ser capaz de aportar esta cantidad de potencia térmica al tanque de digestión para su correcta operación.

8.3.2 Módulo de microgeneración seleccionado

Para la selección del módulo de microgeneración se ha tenido en cuenta tanto la potencia eléctrica que demanda la granja (25,91 kWe), como la potencia calorífica que demanda el biodigestor (5,084 kWt). Además de otras características como que sea capaz de funcionar empleando gas como combustible, el consumo, emisiones, etc.

En definitiva, se ha seleccionado el modelo MC 30/60 del Grupo Casli, el cual emplea un motor a gas del fabricante General Motors, modelo PSI GM 4.3 L. En un principio, este motor está diseñado para trabajar con gas natural, pero una vez el biogás haya sido tratado de manera adecuada, su contenido en metano aumentará y sus características serán muy similares a las del gas natural, por lo que podría ser utilizado en aquellos motores en los que se utiliza como combustible el gas natural. [15]

Modelo del módulo CHP	MC 30/60
<u>Cogeneración</u>	
Energía de entrada al 100% COP (kW)	103
Potencia eléctrica (kWe)	30
Potencia térmica (kW)	62
Eficiencia eléctrica (%)	29
Eficiencia térmica (%)	60
Rendimiento global (%)	89
Temperaturas máx. de salida (°C)	85
Salto de temperatura (°C)	15
Recuperador de calor	Refrigeración por agua
<u>Motor</u>	
Marca y modelo	PSI GM 4.3 L
RPM	1500
N.º de cilindros	6 en V
Cilindrada (cm ³)	4294
Consumo de gas natural (kg/h) al 100% COP	8,3
Consumo de biogás (kg/h) al 100% COP	9,87
<u>Alternador</u>	
Marca	LEROY SOMER
Modelo	42.3 S5
Potencia (kW)	32
Tensión (V)	400
Fases	3
Factor de potencia	0,90
Frecuencia (Hz)	50
Protección	IP23
<u>Dimensiones</u>	
Alto x largo x ancho (mm)	1900 x 2000 x 1000

Tabla 5. Características del grupo motogenerador MC 30/60. Fuente: caslienergy.com

Como podemos observar en la tabla 5, la potencia eléctrica que produce este motogenerador a plena carga es de 30 kWe. Esta potencia es superior a la necesaria, por lo que podemos ajustar el motor para que no trabaje a 100% de su capacidad. Realizando los cálculos oportunos, concluimos que para generar los 25,91 kWe necesarios, el motor debe trabajar al 86,37 % de su capacidad.

Se especifica entonces, la potencia de entrada necesaria para el funcionamiento del motor, la cual será suministrada por el biogás.

$$\text{Potencia de entrada al motor trabajando al } 86,37\% \text{ de su capacidad} = 88,96 \text{ kW}$$

Esta potencia es perfectamente alcanzable por el biogás producido en la granja, ya que la potencia máxima que es capaz de transmitir este gas es de 90,55 kW. Esto se calculó suponiendo que en la instalación se consumiera la totalidad del biogás producido, es decir, los $2,41 \times 10^{-3}$ kg/s calculados.

En este caso, en el que el motor trabaja al 86,37% de capacidad, el caudal másico de combustible que se necesita es de $2,37 \times 10^{-3}$ kg/s.

En cuanto a la energía calorífica generada en el grupo motogenerador, se ha calculado que trabajando a un 86,37% de capacidad, se generan 53,55 kWt. Esto es un 90,51% más de la energía térmica que precisa el biodigestor para su correcto funcionamiento (5,084 kWt).

Se considera que este calor sobrante es bastante alto, por lo que se ha pensado en distintas alternativas para su aprovechamiento, como su empleo para la calefacción de la nave de pollos, en donde actualmente se emplea un calentador de aire a gasoil. En cualquier caso, este estudio no formará parte del presente trabajo de fin de grado por el aumento de la carga de trabajo que supondría en relación con la de un TFG.

Sería entendible pensar que el rendimiento total de la instalación de cogeneración diseñada es algo bajo ya que tan solo se aprovecha una pequeña parte de todo el calor generado, pero lo cierto es que, tras largas búsquedas en páginas webs y catálogos de diferentes fabricantes y empresas, este ha sido el modelo de grupo motogenerador que mejor se ha podido ajustar a las necesidades del estudio. Además, la elección de este modelo permite la posibilidad de poder seguir empleándolo en el caso en que la granja aumentase su capacidad, y, por tanto, su producción de biogás, o en el caso en que la demanda energética sea mayor, siempre y cuando no sobrepase los valores nominales de la máquina.

En resumen, el grupo motogenerador precisará de una potencia de entrada, suministrada por el combustible, de 88,96 kW para producir 25,91 kWe y 53,55 kWt.

8.3.3 Pretratamiento del biogás

El uso del biogás como combustible requiere de una serie de pretratamientos en los que se depura y se concentra previamente. Esto ayuda a aumentar su contenido en metano y parecerse más al gas natural. El contenido en metano del gas es uno de los aspectos más importantes que hay que tener en cuenta si se quiere emplear como combustible, ya que este

está directamente relacionado con el PCI del biogás. A mayor concentración de metano en el gas, mayor será el PCI del gas, y, por tanto, mayor potencia de combustión presentará el gas.

Para la obtención de un biogás con alta concentración en metano se necesita realizar un pretratamiento adecuado que elimine el ácido sulfhídrico, los siloxanos, el CO_2 , la humedad, etc. Cada uno de estos compuestos posee un efecto nocivo:

- El H_2S es corrosivo para los equipos, acortan la vida del aceite del motor y ponen en peligro el sistema de combustión de este.
- Los compuestos clorados generan HCl y CO_2 en los MCIAs. El HCl es corrosivo.
- El CO_2 produce una reducción del poder calorífico al disminuir la concentración de CH_4 .
- El agua provoca la formación de condensados y soluciones ácidas.

Existen diversos métodos para la depuración del biogás y eliminar o reducir los contaminantes presentes, como son los métodos de adsorción y absorción, la separación por membrana, métodos biológicos, etc. [15]

Se ha decidido realizar un pretratamiento de adsorción para nuestro biogás. La adsorción es la unión de los átomos, iones o moléculas del gas (adsorbato) a la superficie de un sólido granulado (adsorbente). Se basa en la capacidad de ciertos sólidos de extraer con preferencia ciertas sustancias de una solución, concentrándola sobre su superficie. Los adsorbentes más empleados son las alúminas, el sílicagel, el carbón activado y los tamices moleculares.

El proceso de adsorción ocurre sobre la superficie del adsorbente donde las moléculas son retenidas por fuerzas electrostáticas débiles.

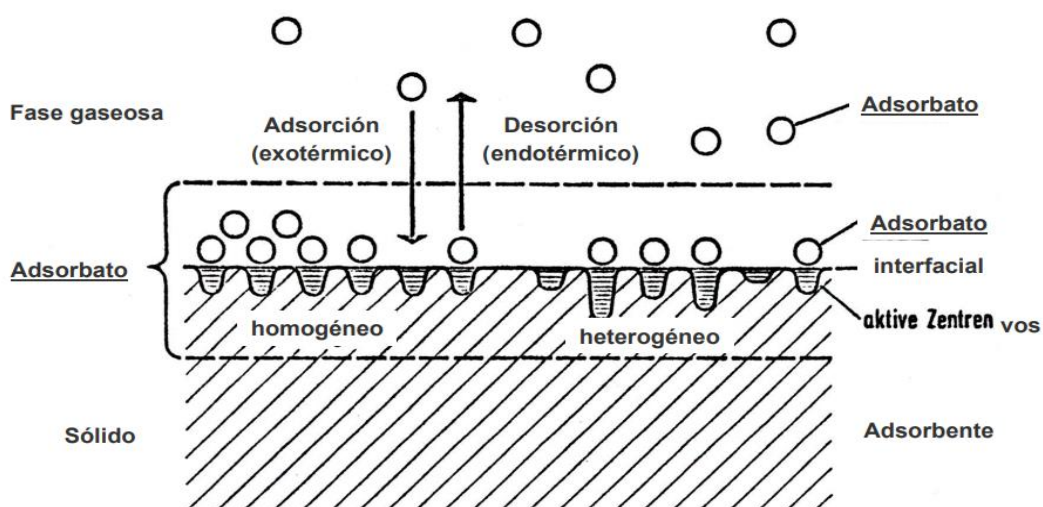


Figura 22. Esquema básico de la técnica de adsorción. Fuente: INNOGAS.

Este método se utiliza principalmente para eliminar agua, CO₂ y H₂S del gas.

Los métodos de purificación por adsorción son muy efectivos y reducen las cantidades de contaminantes hasta los niveles requeridos pero sus costos de operación son altos. [16]

En resumen, para el correcto funcionamiento y el alargamiento de la vida útil del sistema de microgeneración, realizaremos un pretratamiento a nuestro biogás haciéndolo pasar por un sistema de adsorción justo antes de su entrada en el motor. Esto aumentará su concentración en metano, haciéndolo parecer al gas natural.

8.4 Almacenamiento del excedente de biogás

Como se ha mencionado en los apartados anteriores, y se demuestra en los cálculos del Anexo I, nuestro grupo motogenerador precisa de un caudal másico de combustible de $2,37 \times 10^{-3}$ kg/s, mientras que en el biodigestor se produce un caudal másico de $2,41 \times 10^{-3}$ kg/s. Esto significa, que diariamente tendremos un excedente de gas que no se empleará como combustible en ese momento, por lo que tendrá que ser almacenado durante un período más o menos corto de tiempo.

Realizando los cálculos necesarios, se obtiene que el volumen de excedente diario de gas será de 3,65 m³. En apartados anteriores, se comentaba que la cúpula del tanque de digestión serviría para el almacenamiento del biogás producido, siendo el volumen de este espacio de unos 24,78 m³, por lo que es perfectamente apto para almacenar el excedente de biogás producido.

De igual forma, se considera razonable proveer a la instalación de un depósito auxiliar para el almacenamiento de biogás, pensado para casos en los que el excedente de biogás sea mucho mayor o en momentos en los que el módulo de cogeneración se encuentre sin funcionar y se siga produciendo biogás en el tanque de digestión.

Para ello se ha seleccionado un gasómetro de doble membrana del fabricante Sattler, que consiste en un depósito de gas externo con forma de $\frac{3}{4}$ de esfera. Está compuesto por una membrana exterior, además de una interior y una membrana de fondo que constituyen el espacio de almacenamiento para el biogás. La forma de $\frac{3}{4}$ de esfera es conservada gracias a un dispositivo que suministra aire de apoyo a la membrana exterior del gasómetro, permitiendo que resista cargas externas de viento o de nieve. Al mismo tiempo, este suministro de aire ejerce

una ligera sobrepresión sobre la membrana interior que permite la salida del gas almacenado cuando este se requiera.

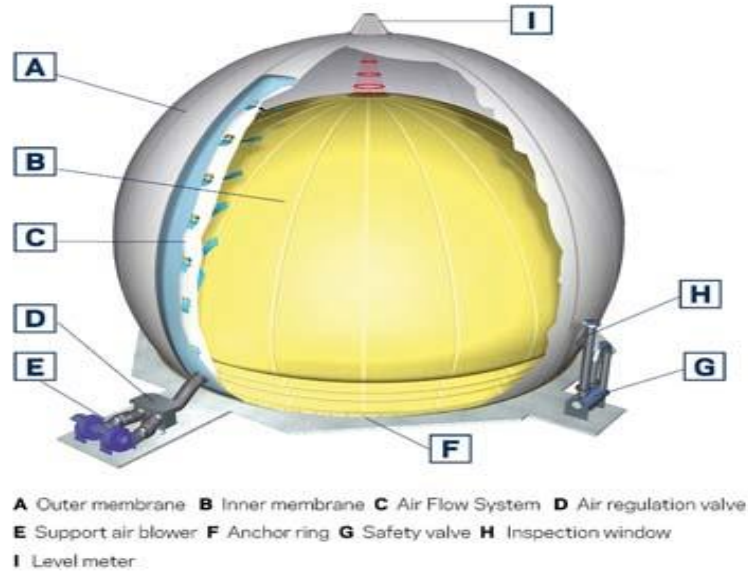


Figura 23. Membranas del gasómetro. Fuente: Sattler.

Las tres membranas están sujetas a la bancada mediante un sólido anillo de anclaje, de forma permanente y hermética. Además, una válvula de seguridad de accionamiento hidráulica asegura que el gasómetro no sufra ningún daño, en caso de alguna sobrepresión de biogás.



Figura 24. Gasómetros de doble membrana Sattler. Fuente: Sattler.

Con el empleo de esta tecnología, nos aseguramos de que el biogás producido no se desperdicie y permanezca correctamente almacenado hasta que el sistema de microgeneración lo precise.

8.5 Esquema del módulo de microgeneración

El esquema del módulo de microgeneración, en el que se tiene en cuenta tanto el gasómetro para el posible almacenamiento de biogás como el sistema de adsorción para su refinado, es el siguiente:

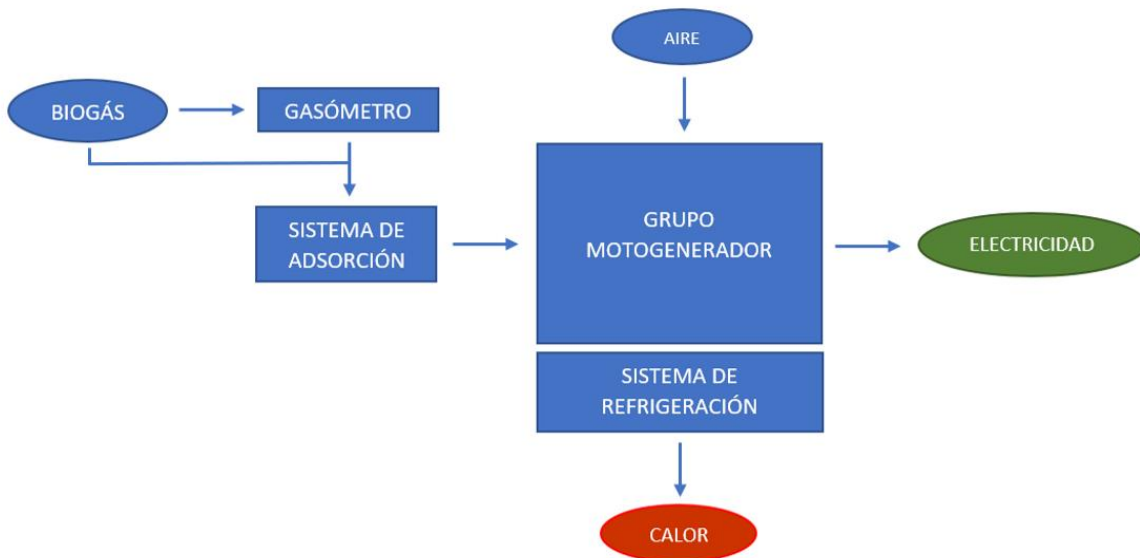


Figura 25. Esquema del sistema de microgeneración. Fuente: elaboración propia.

Como podemos observar, el biogás proveniente del biodigestor pasa por el sistema de adsorción para su tratamiento previo antes de ser introducido en el grupo motogenerador para su empleo como combustible. En el caso de producirse un excedente de biogás mayor que no quepa en la cúpula del tanque, este se podrá almacenar en el gasómetro para luego pasar directamente al sistema de adsorción en el momento en que se requiera su uso. Una vez tratado, el biogás se introduce en el grupo motogenerador al que también entra aire para formar la mezcla aire-combustible encargada de producir la reacción de combustión en el interior del cilindro y transmitir la energía a los pistones del motor. Del grupo motogenerador obtenemos los dos productos de la cogeneración, por un lado, la electricidad demandada por la granja, y, por otro lado, el calor absorbido por el sistema de refrigeración del motor, que es aprovechado en el biodigestor.

8.6 Normativa asociada a instalaciones de autoconsumo.

La legislación vigente asociada a instalaciones de autoconsumo viene dada por el Real Decreto 900/2015, de 9 de octubre, por el que se regulan las condiciones administrativas, técnicas y económicas de las modalidades de suministro de energía eléctrica con autoconsumo y de producción con autoconsumo.

El presente Real Decreto clasifica las modalidades de autoconsumo en dos tipos, siendo nuestra instalación del tipo 1, al tratarse de “un consumidor en un único punto de suministro o instalación, que disponga en su red interior de una o varias instalaciones de generación de energía eléctrica destinadas al consumo propio y que no estuvieran dadas de alta en el correspondiente registro como instalación de producción”.

A su vez, se expone en el mencionado Real Decreto que las instalaciones de cogeneración de energía de la modalidad de tipo 1, deberán cumplir con los requisitos y configuración de medida establecidos en los artículos 11 y 12 de dicho RD.

8.7 Rendimiento de la instalación

El estudio de este parámetro es de vital importancia para la justificación de cualquier tipo de instalación generadora de energía. Además, si la instalación está diseñada para la producción de energía en régimen retributivo, estos rendimientos, que a su vez están asociados al ahorro de energía primario de cualquier instalación de cogeneración, deben superar unos valores mínimos establecidos por la Ley. En nuestro caso, la instalación diseñada es para autoconsumo, por lo que no tenemos por qué cumplir estos valores, aunque lógicamente, nos interesa disponer de valores de eficiencia altos.

Para poder calcular estos rendimientos, es necesario medir tanto la energía eléctrica como el calor generado de manera real, es decir, la instalación debe estar en funcionamiento para calcular los valores exactos de estos rendimientos.

Nosotros realizaremos una aproximación a estos valores, tomando los valores teóricos de energía que produciremos según el diseño preliminar llevado a cabo.

El rendimiento eléctrico de nuestra instalación de cogeneración sería el siguiente:

$$\eta_e = \frac{E}{Q} = \frac{25,91 (kW)}{2,37 \times 10^{-3} \left(\frac{kg}{s}\right) * 37571,27 \left(\frac{kJ}{kg}\right)} = 29,1\% \text{ (ec. 5)}$$

Donde E es la energía eléctrica generada en un período medida en los bornes del generador y Q es el combustible consumido por la planta en términos de energía, es decir en kWh PCI.

Junto con este valor, se puede calcular el Rendimiento Global de la instalación añadiendo el valor V que representa el calor útil producido, en nuestro caso, los 5,084 kWt que se aprovechan para calentar el biodigestor.

$$\eta_g = \frac{V + E}{Q} = \frac{5,084(kW) + 25,91(kW)}{2,37 \times 10^{-3} \left(\frac{kg}{s}\right) * 37571,27 \left(\frac{kJ}{kg}\right)} = 34,81\% \text{ (ec. 6)}$$

Por último, se presenta el Rendimiento Eléctrico Equivalente de una instalación de cogeneración como [13]:

$$\eta_{ee} = \frac{E}{Q - \frac{V}{0,9}} = \frac{25,91(kW)}{[2,37 \times 10^{-3} \left(\frac{kg}{s}\right) * 37571,27 \left(\frac{kJ}{kg}\right)] - \frac{5,084(kW)}{0,9}} = 31\% \text{ (ec. 7)}$$

Como podemos observar, los valores de eficiencia obtenidos son algo bajos. Esto es debido a que la demanda energética de calor por parte del biodigestor es muy baja por lo que se desaprovecha gran parte de la energía térmica generada en el módulo de cogeneración. Se ha pensado en varias alternativas para solucionar este aspecto como podría ser el diseño de una instalación enfocada solo a la producción de electricidad a partir de biogás, empleando otro tipo de tecnología como placas solares para el calentamiento del biodigestor ya que la demanda térmica es bastante baja (sobre 5 kWt). Otra alternativa que ya ha sido mencionada en este documento es la de aprovechar el resto del calor generado para el calentamiento del aire de la nave de pollos con lo que aumentaría la eficiencia de la instalación de cogeneración al aprovechar una mayor cantidad de calor útil. Además, se prescindiría del actual calentador de aire que funciona a gasoil, eliminando el gasto económico y las emisiones nocivas que conlleva un equipo de este tipo.

8.8 Intercambio de calor (serpentín)

Como se mencionó en el diseño del tanque de digestión, para el calentamiento y mantenimiento de la temperatura de operación en su interior, se empleará un serpentín que estará en contacto con la biomasa y por el que circulará el agua caliente procedente de la refrigeración del motor.

Para este tipo de disposición del serpentín, se comentó en el análisis de soluciones que no se encontrarían problemas de incrustaciones a no ser que la temperatura del fluido interior superase los 54,4 °C. En nuestro caso, teniendo en cuenta que el fabricante no especifica las temperaturas normales de impulsión y retorno de la refrigeración, aunque si menciona un salto térmico de 15 °C, se ha considerado a partir de las fuentes consultadas, que la temperatura de impulsión será de 60 °C y la de retorno de 45°C. Esto significa que existirían posibilidades de encontrar incrustaciones en las tuberías del serpentín, lo que obligaría a realizar labores de mantenimiento, provocando una parada en la producción de biogás.

En cuanto al dimensionado del serpentín, tras realizar los cálculos oportunos, se ha determinado que el área superficial necesaria para el correcto intercambio de calor con el que se calentará el tanque de digestión debe ser de 0,83 m². Seleccionando una tubería de acero inoxidable de 1 pulgada de diámetro, se determinó a partir del área superficial requerida, que la longitud de dicha tubería debe ser de 10,40 m.

Por otro lado, se determinó el caudal másico de agua necesario para la transferencia de calor. Este caudal es de 0,081 kg/s. O, expresado en términos de caudal volumétrico 0,29 m³/h.

8.9 Equipo auxiliar de emergencia

Una de las ventajas de emplear un módulo de cogeneración con un motor alternativo que pueda funcionar con gas natural como combustible es que para casos puntuales en los que se precise una parada en la producción de biogás, por labores de mantenimiento como la que se mencionaba con anterioridad en el serpentín, se podría seguir produciendo electricidad conectando el motor a la red de gas natural si fuera posible. El inconveniente que presenta esta vía es que en caso de avería o mantenimiento en el módulo de microcogeneración, o en caso de no poderse conectar a la red de gas natural, el abastecimiento energético a la granja se vería afectado.

Por ello se ha considerado que no es una buena opción dejar la instalación diseñada sin un equipo electrógeno auxiliar de emergencia que funcione con combustibles convencionales, para emplearlo en casos puntuales de avería o mantenimiento.

Es por ello por lo que, pese a los costes económicos que supone, se ha seleccionado el siguiente grupo electrógeno que actuará de forma auxiliar y en casos de emergencia para poder seguir abasteciendo de electricidad a la granja:

Modelo del grupo electrógeno	TYD35E
Motor	
Fabricante y modelo del motor	TECNICS YD Y4102D
Combustible	gasoil
Potencia mecánica (kW)	33
Número de cilindros	4
Cilindrada (cm ³)	3875
Relación de compresión	19:1
Aspiración	Natural
Temperatura gases de escape (°C)	540
Sistema de refrigeración	Agua con glicol
Caudal entrada de aire (m ³ /min)	32
RPM	1500
Consumo específico (l/kWh)	0,28
Consumo a 50% de carga (l/h)	3,9
Consumo a 75% de carga (l/h)	5,9
Consumo a 100% de carga (l/h)	8,12
Alternador	
Modelo	TTCU188D
Tensión (V)	230/400
Fases	3
Potencia nominal (kW) (factor potencia = 0,8)	26,4
Potencia de emergencia (kW) (factor potencia = 0,8)	28,8
Dimensiones	
Largo x ancho x alto (mm)	2000 x 840 x 1130
Peso (kg)	860

Tabla 6. Características del grupo electrógeno de emergencia TYF35E. Fuente: Tecnicos Carpi grupos electrógenos.

El equipo irá montado en el interior de una carcasa de las dimensiones especificadas en la tabla 6 con el objetivo de reducir el ruido que produce.

Como podemos observar, la potencia eléctrica nominal capaz de producir este grupo electrógeno trabajando a plena capacidad es de 26,4 kWe, mientras que la demanda eléctrica de la granja es de 25,91 kWe. Esto significa que se debe ajustar la capacidad de funcionamiento del motor para que tan solo produzca los 25,91 kWe requeridos. Tras el cálculo pertinente, se ha obtenido que el porcentaje de capacidad de trabajo del motor debe reducirse a un 98,14%, con lo que se consumirían 7,97 litros de combustible a la hora.

9. Presupuesto

En el presente apartado se expone un posible presupuesto aproximado de la instalación al completo. Este presupuesto es una estimación general basándose sobre todo en el precio de algunos de los equipos, ante el desconocimiento de otro tipo de costes como la mano de obra, permisos, transportes, etc.

PRESUPUESTO GLOBAL DE LA INSTALACIÓN	
<u>Tanque de digestión (biodigestor)</u>	
Tanque GFS del fabricante Center Enamel. Dimensiones del tanque: Ø6,88*6 (m) Capacidad: 223 (m ³)	15.688,38 €
Cubierta en forma de cúpula de doble membrana (Center Enamel) Dimensiones de la cubierta: Ø6,88*1 (m)	8.641,90 €
Envío por mar desde XinGang Port a puerto local en España.	1.582,76 €
Instalación del tanque. 1 supervisor enviado por el fabricante. Nº de días: 16 Coste por día: 137,55 €	2.627,14 €
Herramientas para la instalación.	2.310,71 €
6 trabajadores locales. Nº de días: 16 Coste por día: 60,00 €	960,00 €
Billete de avión, transporte local, estancia y manutención para el supervisor.	~1.500,00 €
2 x removedores de biomasa (~1.000,00 €)	~2.000,00 €
Subtotal:	35.310,89 €
<u>Módulo de microgeneración</u>	
Grupo motogenerador	~8.000,00 €
Gasómetro	~2.000,00 €
Sistema de adsorción	~3.500,00 €
Subtotal:	~13.500,00 €

<u>Grupo electrógeno auxiliar</u>	
Modelo: TYD35E Versión insonorizada	6.653,00 €
Pack conmutación (cuadro, conmutador motorizado, config. FTR y mant. Baterías)	410,00 €
Subtotal:	7.063,00 €
Total:	55.873,89 €

Tabla 7. Presupuesto global de la instalación. Fuente: elaboración propia.

Como podemos observar el coste económico total estimado para la instalación es de unos 55.873,89 €. Los costes asociados al tanque de digestión han sido proporcionados por el fabricante tras ponernos en contacto con ellos y habernos enviado un presupuesto real bastante detallado, así como el grupo electrógeno auxiliar del que también disponemos de presupuesto real. Por otro lado, no hemos podido averiguar los precios de los equipos relacionados con el módulo de microgeneración, por lo que se ha realizado una estimación basándose en el coste de equipos similares encontrados en internet. Además, no se han tenido en cuenta la mano de obra asociada con la instalación de estos equipos, el transporte de estos o el precio de las tuberías para el transporte del biogás, por lo que probablemente el precio total real de la instalación sea algo superior, acercándose a los 60.000,00 €.

10. Conclusiones

Para finalizar el presente estudio se realizará una valoración general analizando varios aspectos importantes.

Por un lado, en cuanto al gasto económico que conllevaría llevar a cabo la instalación, teniendo en cuenta, como se menciona en el presente documento, que el gasto económico en electricidad de la granja es de unos 5.000 euros anuales y que la inversión necesaria para la puesta en marcha de la instalación diseñada sería de unos 60.000 euros, podemos decir que esta inversión produciría un ahorro real a partir de un período de corto a medio plazo, esto es, unos 12 años teniendo en cuenta que a partir de la puesta en marcha de la instalación el gasto económico en facturas de electricidad de la granja se reduce a cero, convirtiéndose en una granja autónoma.

Además, si se complementa la instalación con un sistema de tratamiento para el digestato con el objetivo de obtener abono fertilizante y agua para riego, la cual también puede actuar como fertilizante gracias a los nutrientes que adquiere a su paso por el biodigestor, el ahorro económico puede ser incluso mayor, reduciéndose el período de ahorro real ya que este tratamiento presenta bajos costes. Este abono puede ser empleado tanto para su venta como para los terrenos agrícolas que rodean la granja y que son del mismo propietario. En ambos casos, se generarían ganancias, en uno de manera directa e inmediata y en el otro por el ahorro en gastos que supone.

Por otro lado, otra de las ventajas que tiene una instalación de este tipo es que puede ser aplicada a cualquier otra granja o industria que tenga la posibilidad de generar biogás aprovechando sus residuos, simplemente adaptando la instalación a las necesidades que se deseen cubrir y la cantidad de residuo del que se dispone. Esto es, siempre que se tengan en cuenta ciertas características, la aplicación de biodigestores para el aprovechamiento del biogás es una opción bastante viable e interesante para obtener una ganancia extra a partir de residuos que generalmente se desaprovechan. Esta tecnología tiene un amplio abanico de aplicaciones y representa una importante estrategia de reciclado de los residuos orgánicos en general y de producción de energía a partir de ellos. Además de esta ganancia, la producción del biogás y su aprovechamiento solucionan otro problema como es el almacenamiento de residuos, el cual está cobrando cada vez más importancia ante el crecimiento exponencial de las ciudades y la sobrepoblación del territorio.

Otro aspecto importante y beneficioso de la producción de energía a partir de biogás, es la alternativa que representa a la producción de energía a partir de combustibles fósiles, implicando, por tanto, un menor impacto ambiental y convirtiéndose en una energía renovable a tener en cuenta tanto para su aplicación en generación de electricidad y/o calor, como para su empleo en vehículos. Esta última aplicación resulta muy interesante y ya se está llevando a cabo en países europeos para transportes públicos y algún que otro vehículo privado.



ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

TRABAJO DE FIN DE GRADO

ANEXO I. CÁLCULOS

Titulación

Grado en Ingeniería Mecánica

Autor

Rubén Rodríguez Medina

Tutor

Agustín Manuel Delgado Torres

La Laguna, septiembre de 2018

Índice Anexo I

1.	Introducción.....	7
2.	Cálculos del biodigestor.....	7
2.1	Materia prima para la carga.....	8
2.2	Porcentaje de sólidos totales.....	8
2.3	Cantidad de sólidos totales.....	9
2.4	Masa de agua a agregar a la mezcla.....	9
2.5	Carga del biodigestor.....	9
2.6	Cálculo del tiempo de retención.....	10
2.7	Volumen del tanque de digestión (biodigestor).....	10
2.8	Volumen de la cúpula del tanque.....	10
3.	Productos de la digestión.....	11
3.1	Biogás producido.....	11
3.2	Caudal volumétrico de metano producido.....	12
3.3	Poder calorífico inferior del biogás.....	12
3.4	Densidad del biogás.....	13
3.5	Caudal másico de gas producido.....	13
3.6	Potencia producida.....	14
3.7	Caudal másico de digestato.....	14
4.	Demanda de calor.....	15
4.1	Pérdidas de calor.....	16
4.1.1	Pérdidas de calor a través de medios físicos.....	16
4.1.2	Pérdidas de calor por evaporación del agua.....	25
4.1.3	Pérdidas en el biogás que sale del biodigestor.....	26
4.2	Demanda total de calor del biodigestor.....	26
5.	Módulo de microgeneración.....	27
5.1	Ajuste de potencia eléctrica y térmica.....	27

5.2	Caudal de gas necesario	28
5.3	Caudal de gas a almacenar	28
6.	Intercambio de calor (serpentín)	30
6.1	Dimensiones del serpentín.....	30
6.2	Caudal másico de agua para el intercambio de calor	33
7.	Equipo auxiliar de emergencia	34

Índice de ecuaciones

Ecuación 1. Materia prima para la carga del biodigestor.....	8
Ecuación 2. Cantidad de estiércol producida.....	8
Ecuación 3. Porcentaje de sólidos totales en el residuo.....	8
Ecuación 4. Cantidad de sólidos totales al día.....	9
Ecuación 5. Caudal másico de agua para la carga del biodigestor.....	9
Ecuación 6. Caudal másico de carga total del biodigestor.....	9
Ecuación 7. Tiempo de retención.....	10
Ecuación 8. Volumen del tanque de digestión.....	10
Ecuación 9. Volumen de la cúpula del tanque.....	10
Ecuación 10. Volumen de un casquete esférico.....	11
Ecuación 11. Caudal volumétrico de biogás producido.....	11
Ecuación 12. Densidad del biogás.....	13
Ecuación 13. Caudal másico de biogás producido.....	13
Ecuación 14. Balance de masa en el biodigestor.....	14
Ecuación 15. Balance de energía en el biodigestor.....	15
Ecuación 16. Calor específico del alimento.....	16
Ecuación 17. Razón global de transferencia de calor.....	16
Ecuación 18. Coeficiente global de transferencia de calor.....	17
Ecuación 19. Resistencia térmica total que presenta un medio.....	17
Ecuación 20. Resistencia térmica de conducción por una pared cilíndrica.....	17
Ecuación 21. Resistencia térmica de convección.....	17
Ecuación 22. Resistencia térmica de conducción por una pared plana.....	20
Ecuación 23. Transferencia de calor en una esfera.....	22
Ecuación 24. Resistencia de conducción a través de una superficie esférica.....	22
Ecuación 25. Área superficial de una esfera.....	24
Ecuación 26. Área superficial de un casquete esférico.....	24
Ecuación 27. Pérdida de calor asociada a la evaporación del agua.....	25

Ecuación 28. Tasa de evaporación del agua.....	25
Ecuación 29. Fracción molar del agua.....	25
Ecuación 30. Pérdida de calor asociada a la salida del gas.....	26
Ecuación 31. Demanda total de calor del biodigestor.....	26
Ecuación 32. Capacidad de funcionamiento del motogenerador.....	27
Ecuación 33. Diferencia de temperatura media logarítmica para intercambiador a contraflujo y teniendo en cuenta factor de corrección.....	31
Ecuación 34. Diferencia de temperatura media logarítmica.....	31
Ecuación 35. Balance de energía en el sistema de refrigeración (serpentín).....	33

Índice de figuras

Figura 1. Composición del biogás.....	12
Figura 2. Esquema de resistencias térmicas de las paredes del tanque de digestión....	17
Figura 3. Esquema de resistencias térmicas del suelo del tanque de digestión.....	20
Figura 4. Esquema de resistencias térmicas de la cubierta del tanque de digestión.....	22
Figura 5. Gráfica para la determinación del factor de corrección (F) en intercambiadores de calor de un paso por la coraza y cualquiera múltiplo de 2 pasos por los tubos.....	32
Figura 6. Factor de corrección (F) para el intercambiador estudiado.....	32

1. Introducción.

En este documento se recogen todos los cálculos y análisis realizados a lo largo del estudio.

Para la realización de los cálculos termodinámicos y de transferencia de calor de los equipos, así como los balances de energía y balances de masa, se han tenido en cuenta las siguientes hipótesis de trabajo:

- Se considera un régimen estacionario para los sistemas, por lo que no se producen variaciones en los datos con respecto al tiempo.
- Las variaciones de energía cinética y potencial en los flujos másicos son despreciables, de modo que la energía de dichos flujos viene dada por el término de la entalpía.
- Se desprecian las pérdidas de carga en los intercambiadores de calor al no constituir valores significativos.
- Los intercambiadores de calor están bien aislados, de modo que la pérdida de calor hacia los alrededores es despreciable, de modo que la transferencia de calor ocurre, en su totalidad, entre los fluidos.
- Se establece el siguiente convenio de signos para las transferencias de calor y trabajo entre los sistemas: signo positivo cuando son entregadas al sistema (entradas) y negativo cuando son producidas por el sistema (salidas).
- Las propiedades de los fluidos se consideran constantes a su paso por el sistema.
- Se desprecia la resistencia térmica que presenta el recubrimiento del aislante de acero inoxidable colocado en el interior del tanque de digestión, ya que su material es altamente conductor y su espesor es despreciable.

2. Cálculos del biodigestor

En este anexo aparecen todos los cálculos realizados para el dimensionado del tanque de digestión (biodigestor). Como hemos definido que la carga del biodigestor será diaria, todos los resultados se encontrarán en esa medida.

2.1 Materia prima para la carga

La MPC se calcula sumando el total de estiércol, o residuo sólido, y el total de orina, o residuo líquido, generado por los animales de la granja en kg por día. Esto es un dato real conocido que nos ha proporcionado el cliente.

Como se menciona anteriormente, consideraremos que la MPC es una suma del residuo sólido y el residuo líquido que expulsan las aves, por lo tanto:

$$MPC = E + O = 3240 \text{ kg/día (ec. 1)}$$

En los siguientes apartados necesitaremos conocer la cantidad específica de estiércol, por lo que la calcularemos con la ayuda de la tabla 3:

$$E = NA * PVP * \frac{PE}{100} \text{ (ec. 2)}$$

Donde NA = número de animales = 12000 gallinas

PVP = peso vivo promedio del animal = 3 kg

PE = producción de estiércol por animal por día en porcentaje de peso vivo = 4,5% (tabla

3)

$$E = 12000 (\text{gallinas}) * 3(\text{kg}) * \frac{4,5\%}{100} = 1620 \text{ kg de estiércol.}$$

2.2 Porcentaje de sólidos totales

El porcentaje de sólidos totales contenidos en la MPC, como hemos acordado anteriormente, si este valor es menor al 10%, no es necesario agregar agua al biodigestor. Se obtiene a partir de la relación:

$$\%ST = \frac{E * \%EST}{MPC} \text{ (ec. 3)}$$

donde E = la cantidad de estiércol generado en un día, en kg.

$\%EST$ = porcentaje de sólidos en el estiércol de las gallinas, obtenido a través de la tabla

3.

$\%EST = 25$

MPC = materia prima para carga = 3240 kg/día.

$$\%ST = \frac{1620(\text{kg}) * 25\%}{3240(\text{kg})} = 12,5\%$$

Como vemos, el valor es superior al 10% por lo que sí será necesario agregar agua a la mezcla en el biodigestor.

2.3 Cantidad de sólidos totales

La relación de sólidos totales en kg por día se calcula mediante la relación siguiente:

$$\dot{m}_{ST} = \frac{\%ST * MPC}{100} = \frac{12,5\% * 3240(kg)}{100} = 405 \text{ kg/día (ec. 4)}$$

2.4 Masa de agua a agregar a la mezcla.

Mediante esta acción, conseguimos reducir hasta el 10% los sólidos orgánicos contenidos en la materia prima, en kg por día, lo cual es una de las condiciones acordadas para la digestión en vía húmeda.

$$\dot{m}_{H_2O} = \frac{MPC * ST}{10} - MPC = \frac{3240(kg) * 12,5\%}{10} - 3240 = 810 \text{ kg/día (ec. 5)}$$

Esto es 810 litros de agua al día si se considera que la densidad del agua es 1 kg/l.

2.5 Carga del biodigestor

En definitiva, la carga del biodigestor representa la cantidad total de kg que se introducirán en el tanque diariamente. Es decir, la suma de la MPC y la M_{H_2O} en kg/día.

$$\dot{m}_{carga} = MPC + M_{H_2O} = 3240(kg) + 810(kg) = 4050 \text{ kg/día (ec. 6)}$$

Este valor conviene tenerlo en volumen para el cálculo posterior del volumen del tanque de digestión. Ante la imposibilidad de analizar el residuo real de la granja, usaremos los valores proporcionados por la bibliografía: la densidad de la gallinaza es 550 kg/m³ [19] y la del agua es 1000 kg/m³.

- MPC: $(3240 \text{ kg/día}) / (550 \text{ kg/m}^3) = 5,89 \text{ m}^3/\text{día}$
- Masa de agua: $(810 \text{ kg/día}) / (1000 \text{ kg/m}^3) = 0,81 \text{ m}^3/\text{día}$

El caudal volumétrico total de carga es: $V_{carga} = 5,89(m^3) + 0,81 (m^3) = 6,7 \text{ m}^3/\text{día}$

2.6 Cálculo del tiempo de retención

Como se explica anteriormente, el cálculo del tiempo de retención se obtiene a partir de la ecuación 7 teniendo en cuenta el régimen de temperatura con el que se trabajará en el interior del tanque. Nosotros hemos indicado que trabajaremos con un régimen mesofílico óptimo, por lo que trabajaremos a 30 °C.

$$TR = [-51,227 * \ln[30] + 206,72] = 33 \text{ días (ec. 7)}$$

2.7 Volumen del tanque de digestión (biodigestor)

En definitiva, el volumen mínimo que necesitará nuestro tanque de digestión será de:

$$V = V_{carga} * TR \text{ (ec. 8)}$$

Donde C = carga total del biodigestor = 4050 kg/día

TR = tiempo de retención = 33 días

$$V = 6,7(m^3) * 33(días) = 221,1 m^3$$

Este volumen es el volumen de la parte con forma cilíndrica en el que se encontrará la mezcla. A continuación, calcularemos el volumen mínimo de la cúpula del tanque, que servirá para el almacenamiento de biogás. Teniendo en cuenta que el volumen útil del tanque debe ser un 90% de su volumen real [7], se deduce que:

2.8 Volumen de la cúpula del tanque.

$$V_T = \frac{V_u}{0,9} \text{ (ec. 9)}$$

donde V_T es el volumen total del tanque de digestión

V_u es el volumen útil del tanque o volumen dedicado al almacenamiento de la mezcla.

$$V_T = \frac{223(m^3)}{0,9} = 247,78 m^3$$

Por lo tanto, el volumen mínimo de la cúpula para el almacenamiento del biogás será:

$$V_{cúpula} = 247,78(m^3) - 223(m^3) = 24,78 m^3$$

Una vez determinado el volumen, podemos calcular la altura de la cúpula, mediante la ecuación de volumen de un casquete esférico:

$$V_{casquete\ esférico} = \frac{1}{6} * \pi * h * (3a^2 + h^2) \text{ (ec. 10)}$$

donde "h" es la altura de la cúpula (valor a calcular)
y "a" es el radio del cilindro, es decir, $a = 6,88/2 = 3,44 m$.

$$24,78(m^3) = \frac{1}{6} * \pi * h * (3 * 3,44(m)^2 + h^2); h = 0,9998 m = 1 m$$

3. Productos de la digestión.

En este anexo se exponen todos los cálculos realizados para conocer de manera cuantitativa los productos de la digestión.

3.1 Biogás producido.

En el Anexo 1 se calculó el caudal másico de carga del biodigestor (MPC = 3240 kg/día). Una vez conocido este valor, para poder conocer el caudal de biogás que vamos a obtener a partir de nuestro residuo, necesitamos saber el porcentaje de sólidos orgánicos que hay en nuestra materia prima. Este dato lo obtenemos a partir de la bibliografía, ante la imposibilidad de realizar análisis reales. En la tabla 3 aparece el porcentaje de sólidos orgánicos que presenta la gallinaza (%SO = 17). A partir de la misma fuente (tabla 3) también podemos obtener la producción de biogás que presenta dicho residuo ($P = 0,400 m^3$ de gas/ kg SO).

En definitiva, realizando el siguiente cálculo, logramos obtener el caudal de biogás que produciremos en nuestra instalación: [11]

$$\begin{aligned} V_{biogás} &= MPC * \%SO * P = 3240 \frac{kg}{día} * 0,17 * 0,400 (m^3/kg SO) \\ &= 220,32 m^3/día \text{ (ec. 11)} \end{aligned}$$

Es decir, diariamente obtendremos un caudal de gas de 220,32 m³ para ser empleado como combustible en el sistema de cogeneración.

3.2 Caudal volumétrico de metano producido

Para conocer el caudal de metano que se produce, simplemente debemos conocer el porcentaje de metano que contiene el biogás.

Según fuentes consultadas, la composición del biogás procedente de la gallinaza, sin tratamientos previos, es la siguiente:

COMPONENTES	%
Metano (CH ₄)	50-70
Dióxido de Carbono (CO ₂)	30-50
Nitrógeno (N ₂)	0-3
Ácido Sulhídrico (H ₂ S)	0-1
Monóxido de Carbono (CO)	0-1.5
Vapor de agua	Variable

Figura 1. Composición del biogás. Fuente: GTZ

Realizando los diferentes pretratamientos mencionados al biogás obtenido se pretende conseguir un gas con un porcentaje de metano del 75%. Entonces, el caudal de metano producido sería:

$$V_{CH_4} = 220,32 \left(\frac{m^3}{día} \right) * 0,75 = 165,24 m^3/día$$

Es decir, la producción diaria de metano es de 165,24 m³.

3.3 Poder calorífico inferior del biogás

El PCI del biogás depende exclusivamente de su contenido en metano, ya que es el componente que da al biogás la capacidad de producir la energía al producirse la reacción química de combustión en la máquina térmica. [7]

$$PCI_{biogás} = PCI_{CH_4} * \%CH_4$$

Donde el poder calorífico inferior del metano es 11973 kcal/kg.

$$PCI_{biogás} = 11973 \left(\frac{kcal}{kg} \right) * 0,75 = 8979,75 \text{ kcal/kg} = 37571,27 \text{ kJ/kg}$$

O también,

$$PCI_{biogás} = 8900 \left(\frac{kcal}{m^3} \right) * 0,75 = 6675 \text{ kcal/m}^3$$

3.4 Densidad del biogás

Para obtener la densidad del biogás debemos tener en cuenta su composición y las densidades de cada compuesto.

Supondremos, según las fuentes consultadas y el pretratamiento a realizar, que nuestro biogás está compuesto aproximadamente por un 75% de CH₄ ($\rho_{CH_4} = 0,656 \text{ kg/m}^3$), un 24% de CO₂ ($\rho_{CO_2} = 1,842 \text{ kg/m}^3$) y un 1% de N₂ ($\rho_{N_2} = 1,2506 \text{ kg/m}^3$). Esto es una suposición que realizaremos para los cálculos. En la realidad, habría que estudiar la composición exacta del biogás una vez refinado.

Por lo tanto, la densidad de nuestro biogás es:

$$\rho_{biogás} = 0,75 * 0,656 \left(\frac{kg}{m^3} \right) + 0,24 * 1,842 \left(\frac{kg}{m^3} \right) + 0,01 * 1,2506 \left(\frac{kg}{m^3} \right) = 1,006 \frac{kg}{m^3} \text{ (ec. 12)}$$

La densidad de nuestro biogás es de 0,947 kg/m³.

3.5 Caudal másico de gas producido

Por lo tanto, el caudal másico de biogás será ($\rho = m/V$):

$$\dot{m}_{biogás} = 0,947 \left(\frac{kg}{m^3} \right) * 220,32 \left(\frac{m^3}{día} \right) = 208,64 \frac{kg}{día} = 2,41 \times 10^{-3} \text{ kg/s (ec. 13)}$$

Es decir, tenemos un caudal másico de combustible, para nuestro sistema de cogeneración de $2,41 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$.

3.6 Potencia producida

La potencia que se podría producir empleando la totalidad del caudal de gas en una máquina térmica, se calcula a partir del PCI del biogás. De manera que:

$$W_{producida} = PCI_{biogás} * \dot{m}_{biogás} = 37571,27 \left(\frac{kJ}{kg} \right) * 2,41 \times 10^{-3} \left(\frac{kg}{s} \right) = 90,55 \text{ kW}$$

Esto significa que nuestro biogás, empleándolo como combustible en una máquina térmica, puede producir hasta 90,55 kW. Entonces, la máquina térmica que se seleccione debe tener un rango de potencia de entrada en torno a los 90 kW para su funcionamiento.

3.7 Caudal másico de digestato

Si realizamos un balance de masa con el tanque de digestión como volumen de control, tenemos que:

VC: biodigestor

$$\dot{m}_{carga} = \dot{m}_{biogás} + \dot{m}_{digestato} \text{ (ec. 14)}$$

Por lo tanto,

$$4050 \frac{kg}{día} = 208,64 \frac{kg}{día} + \dot{m}_{digestato}; \dot{m}_{digestato} = 3841,36 \text{ kg/día}$$

Es decir, diariamente se sacan del biodigestor unos 3841,36 kg de digestato.

$$\% \text{ que se transforma en digestato} = \frac{3841,36(kg/día)}{4050(kg/día)} * 100 = 94,85\%$$

$$\% \text{ que se transforma en biogás} = \frac{208,64(kg/día)}{4050(kg/día)} * 100 = 5,15\%$$

4. Demanda de calor

En este apartado se calculará la demanda de energía calorífica que presenta el biodigestor, la cual será fundamental para la selección de la máquina térmica para la cogeneración.

Para ello también será necesario calcular las pérdidas de calor que presenta el biodigestor.

Empezaremos calculando la demanda de energía calorífica que requiere el biodigestor para su calentamiento hasta la temperatura de 30 °C.

Para ello realizaremos un balance de energía tomando el biodigestor como volumen de control:

VC: tanque de digestión (biodigestor)

$$Q_{calentamiento} + \dot{m} * h_1 - \dot{m} * h_2 = 0$$

$$Q_{calentamiento} = \dot{m}(h_2 - h_1)(ec. 15)$$

*Donde m es el caudal másico total que entra al biodigestor,
h₁ es la entalpía de la materia que entra al biodigestor
y h₂ es la entalpía de la materia que sale del biodigestor*

Realizando un balance de masa con el mismo volumen de control, sabemos que el caudal másico que entra al tanque es el mismo que el que sale, es decir:

VC: tanque de digestión (biodigestor)

$$\dot{m}_1 - \dot{m}_2 = 0; \dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}$$

Retomando el balance de energía y suponiendo que la diferencia de entalpía puede ser sustituida por el calor específico del alimento de carga y su diferencia de temperaturas, el balance quedaría así:

$$Q_{calentamiento} = \dot{m}(h_2 - h_1) = \dot{m} * Cp * (T_{int} - T_{ext})$$

El calor específico del alimento de carga del biodigestor se calcula mediante la siguiente expresión [7]:

$$Cp = 4,19 \left(\frac{kJ}{kg * ^\circ C} \right) - 0.0275 \left(\frac{kJ}{kg * ^\circ C} \right) * \% \frac{ST}{100} \text{ (ec. 16)}$$

$$Cp = 4,19 \left(\frac{kJ}{kg * ^\circ C} \right) - 0.0275 \left(\frac{kJ}{kg * ^\circ C} \right) * \frac{12,5\%}{100} = 4,187 \frac{kJ}{kg * ^\circ C}$$

Retomando el balance de energía, obtenemos la energía calorífica que demanda el biodigestor para su calentamiento hasta la temperatura de 30°C.

$$\begin{aligned} Q_{calentamiento} &= 4050 \left(\frac{kg}{día} \right) * 4,187 \left(\frac{kJ}{kg * ^\circ C} \right) * (30 - 11,3)^\circ C = 317026,71 \frac{kJ}{día} = 3,67 \frac{kJ}{s} \\ &= 3,67 \text{ kW} \end{aligned}$$

Es decir, el biodigestor necesita de una potencia calorífica de 3,67 kW para su calentamiento.

4.1 Pérdidas de calor.

Aquí analizamos las pérdidas de calor que tienen lugar en el tanque de digestión, es decir, en el biodigestor, las cuales provocan que la demanda de calor del biodigestor sea mayor para poder mantener la temperatura indicada de digestión en su interior. Las pérdidas de calor se producen a través de las paredes del tanque, así como de la cubierta y el suelo por transferencia de calor, además de por el gas que sale del biodigestor y el agua que se evapora en él.

4.1.1 Pérdidas de calor a través de medios físicos.

En la naturaleza existen tres mecanismos de transferencia de calor: por conducción, por convección y por radiación.

La razón global de transferencia de calor se rige por la siguiente ecuación:

$$Q = U * A * \Delta T \text{ (ec. 17)}$$

Donde Q es la energía calorífica transferida.
 U es el coeficiente global de transferencia de calor.
 A es el área de la superficie a través de la cual se transfiere el calor.
 ΔT es el gradiente de temperatura entre el interior del biodigestor y el aire ambiente.

La temperatura en el interior del biodigestor hemos indicado que será de 30°C, mientras que, para la temperatura del aire ambiente, emplearemos la temperatura mínima media de la localización de la granja (municipio de Tegueste, Sta. Cruz de Tenerife) ya que es el valor más desfavorable. Esta temperatura será de 11,3 °C. [20]

Para calcular el coeficiente global de transferencia de calor, aplicamos la ecuación:

$$U = \frac{1}{R * A} \text{ (ec. 18)}$$

Donde R es la resistencia térmica que presenta el medio a la transferencia de calor.

Esta resistencia térmica se divide a su vez en la resistencia debida a la conducción, es decir, la resistencia que presenta un cuerpo físico y la resistencia térmica debida a la convección, es decir, la debida a la transferencia de calor entre un cuerpo y un fluido.

En definitiva,

$$R = \sum(R_{conducción} + R_{convección}) \text{ (ec. 19)}$$

Paredes

El circuito de resistencias térmicas de las paredes del tanque es el siguiente:

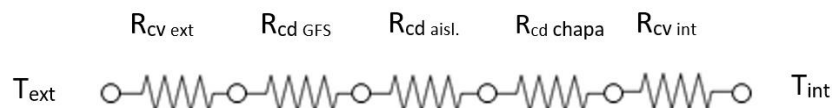


Figura 2. Esquema de resistencias térmicas de las paredes del tanque de digestión. Fuente: elaboración propia.

Donde la resistencia térmica de conducción para una pared cilíndrica es:

$$R_{cond} = \frac{\ln\left(\frac{r_{ext}}{r_{int}}\right)}{2\pi * L * K} \text{ (ec. 20)}$$

Y la resistencia térmica de convección es:

$$R_{conv} = \frac{1}{A * h} \text{ (ec. 21)}$$

Donde el área (A) de la superficie es: $A = 2\pi * r * L$

Calculamos cada parámetro del circuito térmico:

- Resistencia térmica por la convección entre el aire y la chapa de GFS

Radio del tanque: $r = 3,44 \text{ m}$

Altura del tanque: $L = 6 \text{ m}$

$$A = 2\pi * r * L = 2\pi * 3,44(\text{m}) * 6(\text{m}) = 129,68 \text{ m}^2$$

Coeficiente de convección entre el aire y la chapa de GFS: $h_{cv} = 28 \text{ W/m}^2\text{K}$. [7]

$$R_{cv \text{ ext}} = \frac{1}{129,68 (\text{m}^2) * 28 \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2 * \text{K}}\right)} = 2,754 \times 10^{-4} \text{ K/W}$$

- Resistencia térmica por la conducción de la chapa de GFS

Radios del tanque teniendo en cuenta solo la chapa de GFS: $R_{ext} = 3,44 \text{ m}$; $R_{int} = 3,435 \text{ m}$;

Altura del tanque: $L = 6 \text{ m}$

*Conductividad del GFS: $2,94 \text{ W/m} * \text{K}$. [7]*

$$R_{cd, GFS} = \frac{\ln\left(\frac{3,44 (\text{m})}{3,435 (\text{m})}\right)}{2\pi * 6 (\text{m}) * 2,94 \left(\frac{\text{W}}{\text{m} * \text{K}}\right)} = 1,312 \times 10^{-5} \text{ K/W}$$

- Resistencia térmica por la conducción del aislamiento

Radios del tanque teniendo en cuenta el aislamiento: $R_{ext} = 3,435 \text{ m}$; $R_{int} = 3,335 \text{ m}$.

Altura del tanque: $L = 6 \text{ m}$

Conductividad del vidrio expandido: $0,045 \text{ W/mK}$ [21]

$$R_{cd, aislamiento} = \frac{\ln\left(\frac{3,435 (\text{m})}{3,335 (\text{m})}\right)}{2\pi * 6 (\text{m}) * 0,045 \left(\frac{\text{W}}{\text{m} * \text{K}}\right)} = 0,0174 \text{ K/W}$$

- Resistencia térmica por la conducción de la chapa de acero inoxidable

Radio del tanque teniendo en cuenta el recubrimiento de acero inoxidable: $R_{ext} = 3,335$ m; $R_{int} = 3,334$ m.

Altura del tanque: $L = 6$ m

Conductividad de la chapa de acero inoxidable: $16,3$ W/mK [22].

$$R_{cd,chapa} = \frac{\ln\left(\frac{3,335 \text{ (m)}}{3,334 \text{ (m)}}\right)}{2\pi * 6 \text{ (m)} * 16,3 \left(\frac{W}{m * K}\right)} = 4,88 \times 10^{-7} K/W = 0$$

Como vemos, la resistencia térmica debida a la chapa de acero inoxidable es muy baja debido a su espesor muy fino y a que la conductividad del material es alta. Por ello, y para simplificar los cálculos, vamos a despreciar dicha resistencia.

- Resistencia térmica por la convección entre la chapa de acero inoxidable y la biomasa

Radio interior del tanque: $3,334$ m

Coefficiente de convección entre el tanque y el biogás: 9 W/m²K

*$A = 2\pi * r * L = 2\pi * 3,334 * 6 = 125,69$ m²*

$$R_{cv \text{ int}} = \frac{1}{125,69 \text{ (m}^2\text{)} * 9 \left(\frac{W}{m^2 * K}\right)} = 8,84 \times 10^{-4} K/W$$

Entonces, retomando la ecuación 19, la resistencia térmica total que presentan las paredes del tanque es:

$$R_{T,paredes} = (2,754 \times 10^{-4} + 1,315 \times 10^{-5} + 0,0174 + 8,84 \times 10^{-4}) K/W = 0,0186 K/W$$

Empleando ahora la ecuación 18, calculamos ahora el coeficiente global de transferencia de calor:

$$U = \frac{1}{0,0186 \left(\frac{K}{W}\right) * 129,68 \text{ (m}^2\text{)}} = 0,4146 W * m^2 / K$$

Y, por último, la ecuación 17 nos dará la transferencia de calor que se produce a través de las paredes del tanque:

$$Q_{paredes} = 0,4146 \left(W * \frac{m^2}{K} \right) * 129,68(m^2) * (30 - 11,3)(^{\circ}C) = 1005,41 W = 1,005 kW$$

Suelo

El circuito de resistencias térmicas correspondientes al suelo del digestor es el siguiente:



Figura 3. Esquema de resistencias térmicas del suelo del tanque de digestión. Fuente: elaboración propia.

Como en el apartado anterior, hemos visto que podemos despreciar la resistencia térmica que produce la chapa de acero inoxidable del recubrimiento, tampoco se ha tenido en cuenta en este cálculo.

De manera similar que, para las paredes, calculamos cada resistencia térmica, teniendo en cuenta sus respectivos coeficientes, dimensiones y ecuaciones.

La ecuación de resistencia térmica de conducción para una pared plana es la siguiente:

$$R_{cond} = \frac{e}{A * k} \text{ (ec. 22)}$$

- Resistencia térmica de conducción del hormigón

Espesor de la base de hormigón: $e = 0,5 m$.

Conductividad del hormigón: $1,63 W/m * K$ [23]

Área del suelo del tanque: $A_{c\acute{r}c.} = \pi * R^2 = \pi * 3,44(m)^2 = 37,176 m^2$

$$R_{cd \text{ horm}} = \frac{0,5 (m)}{37,176 (m^2) * 1,63 \left(\frac{W}{m * K} \right)} = 8,25 * 10^{-3} K/W$$

- Resistencia térmica de conducción de la chapa de GFS

Espesor de la chapa de GFS: $e = 5 mm = 0,005 m$

$$R_{cd\ GFS} = \frac{0,005\ (m)}{37,176\ (m^2) * 2,94\ (\frac{W}{m * K})} = 4,575x10^{-5}\ K/W$$

- Resistencia térmica de conducción del aislamiento

Espesor de la chapa de GFS: $e = 100\ mm = 0,1\ m$

$$R_{cd\ aisl.} = \frac{0,1\ (m)}{37,176\ (m^2) * 0,045\ (\frac{W}{m * K})} = 0,0897\ K/W$$

- Resistencia térmica de convección entre el biogás y el tanque

Coefficiente de convección entre el digestato del fondo y el tanque: $150\ W/m^2K$ [7].

$$R_{cv\ int} = \frac{1}{37,176(m^2) * 150(\frac{W}{m^2 * K})} = 1,793x10^{-4}\ K/W$$

Empleando de nuevo la ecuación 19 obtenemos la resistencia térmica total del suelo del digestor:

$$R_{T,suelo} = (8,25x10^{-3} + 4,575x10^{-5} + 0,0897 + 1,793x10^{-4})K/W = 0,0982\ K/W$$

El coeficiente global de transferencia de calor para el suelo es:

$$U = \frac{1}{0,0982(\frac{K}{W}) * 37,176\ (m^2)} = 0,274\ W * m^2 / K$$

Por último, la transferencia de calor que se produce a través del suelo del biodigestor es:

$$Q_{suelo} = 0,274 \left(W * \frac{m^2}{K} \right) * 37,176(m^2) * (30 - 11,3)(^{\circ}C) = 190,48 W = 0,190 kW$$

Cubierta

Para el cálculo de la cubierta, consideraremos esta como una esfera completa, para luego calcular la transferencia de calor que tendría lugar por el volumen del casquete esférico que representa nuestra cubierta.

El circuito de resistencias térmicas de la cubierta del tanque es:

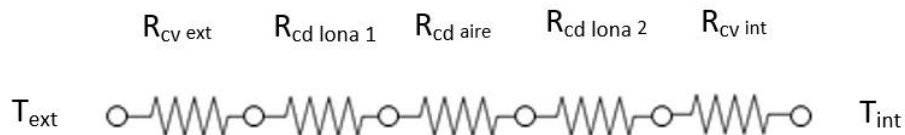


Figura 4. Esquema de resistencias térmicas de la cubierta del tanque de digestión. Fuente: elaboración propia.

Para la transferencia de calor a través de un cuerpo esférico, podemos emplear directamente la siguiente ecuación, tal y como se emplea en el libro de Transferencia de Calor y Masa de Yunus A. Çengel [24].

$$Q_{esfera} = \frac{T_{int} - T_{ext}}{R_{total}} \quad (ec. 23)$$

La ecuación de resistencia térmica de conducción a través de una superficie esférica es: [24]

$$R_{cond esf} = \frac{R_{ext} - R_{int}}{4\pi * R_{ext} * R_{int} * k} \quad (ec. 24)$$

Para el cálculo de la resistencia total tendremos en cuenta el circuito de resistencias térmicas. De manera que:

- Resistencia térmica por convección exterior

Coefficiente de convección entre el aire y el tanque: 28 W/m²K [7].

Área de la cubierta exterior:

$$A_{superf\ esfera} = 4\pi * r^2 = 4\pi * 3,44(m)^2 = 148,71 m^2$$

$$R_{cv\ ext} = \frac{1}{148,71 (m^2) * 28(\frac{W}{m^2 * K})} = 2,402x10^{-4}K/W$$

- Resistencia térmica por conducción en la primera lona de PVC

El espesor de la lona de PVC es: 1,3 mm

*La conductividad térmica del PVC: 0,16 W/m*K [25]*

$$R_{cd\ lona\ 1} = \frac{3,44 (m) - 3,4387(m)}{4\pi * 3,44(m) * 3,4387(m) * 0,16(W/mK)} = 5,466x10^{-5}K/W$$

- Resistencia térmica a través de la capa de aire

El espesor de la capa de aire es: 15 cm

*La conductividad térmica del aire es: 0,026 W/m*K [24]*

$$R_{aire} = \frac{3,4387 (m) - 3,2887(m)}{4\pi * 3,4387(m) * 3,2887(m) * 0,026 (W/mK)} = 0,0406 K/W$$

- Resistencia térmica por conducción a través de la segunda lona de PVC

La resistencia térmica de esta capa es exactamente igual a la de la primera capa.

$$R_{cd\ lona\ 1} = 5,466x10^{-5}K/W$$

- Resistencia térmica por convección interior.

El coeficiente de convección entre el tanque y el biogás es: 6,8 W/m2K [7].

Área de la cubierta interior:

$$A_{superf\ esfera} = 4\pi * r^2 = 4\pi * 3,2887(m)^2 = 135,91 m^2$$

$$R_{cv\ ext} = \frac{1}{135,91\ (m^2) * 6,8\ (\frac{W}{m^2 * K})} = 1,082x10^{-3}\ K/W$$

Entonces,

$$R_{total} = (2,402x10^{-4} + 2 * 5,466x10^{-5} + 0,0406 + 1,082x10^{-3}) \frac{K}{W} = 0,042\ K/W$$

La transferencia de calor a través de la cubierta de membrana doble es:

$$Q_{esfera} = \frac{(30 - 11,3)^{\circ}C}{0,042\ K/W} = 445,24\ W = 0,445\ kW$$

El área superficial total de la esfera sería:

$$A_{superf\ esfera} = 4\pi * r^2 = 4\pi * 3,44(m)^2 = 148,71\ m^2\ (ec. 25)$$

Mientras que el área superficial de nuestro casquete esférico es:

$$A_{casquete\ esf} = 2\pi * r * h = 2\pi * 3,44(m) * 1(m) = 21,61\ m^2\ (ec. 26)$$

Entonces el área del casquete representa un 14,53% del área superficial de la esfera. Por lo tanto, la transferencia de calor que se produce a través de nuestro casquete es:

$$Q_{esfera} = 0,445(kW) * 0,1453 = 0,065\ kW$$

En resumen, la transferencia de calor total que se produce desde el interior del tanque hacia el aire ambiente, es decir, el calor que se pierde en el digestor por transferencia de calor a través de medios físicos, es decir, las paredes, el suelo y la cubierta es de:

$$Q_{total\ medios\ físicos} = 1,005\ kW + 0,190\ kW + 0,065\ kW = 1,26\ kW$$

4.1.2 Pérdidas de calor por evaporación del agua

Esta pérdida de calor va asociada a la evaporación del agua que se introduce junto a la materia prima en el biodigestor. La determinación de esta pérdida de calor viene dada por la siguiente expresión:

$$Q_{evap.} = T_w * [r + Cp_v * (T_{int} - T_{ext})] \text{ (ec. 27) [7]}$$

*Donde T_w es la tasa de evaporación del agua,
 r es el calor latente de vaporización del agua
 Cp_v es el calor específico del vapor de agua.*

La tasa de evaporación del agua se calcula mediante la siguiente expresión [7]:

$$T_w = \frac{0,804 * PDM * x_w}{0,01 * PMB * (1 - x_w)} \text{ (ec. 28)}$$

*Donde PMB es el porcentaje de metano del biogás,
 PDM es la producción diaria de metano
 x_w es la fracción molar de agua en el biogás.*

Esta fracción molar de agua queda definida por [7]:

$$x_w = 1,27 * 10^6 * e^{\left(\frac{-5520}{T_{int}+273,15}\right)} = 1,27 * 10^6 * e^{\left(\frac{-5520}{30+273,15}\right)} = 0,0157 \text{ (ec. 29)}$$

Calculamos ahora la tasa de evaporación del agua:

$$T_w = \frac{0,804 * 132,19(m^3) * 0,0157}{0,01 * 60\% * (1 - 0,0157)} = 2,825 \text{ kg/día}$$

Por último, empleando la ecuación 27, calculamos la pérdida de calor que se produce por evaporación del agua.

El calor latente de vaporización del agua es: $r = 2261 \text{ kJ/kg}$ [26]

El calor específico del vapor de agua es: $C_{p_w} = 1,93 \text{ kJ/kgK}$ [27]

$$Q_{evap.} = 2,825 \left(\frac{kg}{día} \right) * \left[2261 \left(\frac{kJ}{kg} \right) + 1,93 \left(\frac{kJ}{kg} \right) * (30 - 11,3)^{\circ}C \right] = 6489,28 \frac{kJ}{día}$$

$$= 0,075 \frac{kJ}{s} = 0,075 \text{ kW}$$

4.1.3 Pérdidas en el biogás que sale del biodigestor

Estas pérdidas vienen dadas por la expresión siguiente [7]:

$$Q_{biogás} = \left(1,676 + \frac{1,722 * (100 - PMB)}{PMB} \right) * PDM * (T_{int} - T_{ext}) =$$

$$= \left(1,626 + \frac{1,722 * (100 - 60\%)}{60\%} \right) \left(\frac{kJ}{K * m^3} \right) * \frac{132,19 \text{ m}^3}{día} * (30 - 11,3)^{\circ}C = 6857,2 \frac{kJ}{día}$$

$$= 0,079 \text{ kW} (ec. 30)$$

4.2 Demanda total de calor del biodigestor

En total, la demanda de calor por parte del biodigestor tendrá en cuenta, tanto la demanda propia de potencia calorífica para su calentamiento, como las pérdidas de calor que se producen en este, para así poder mantener la temperatura de trabajo de manera constante.

Esta demanda total de energía calorífica es:

$$Q = Q_{calentamiento} + Q_{total \text{ medios físicos}} + Q_{evap} + Q_{biogás} (ec. 31)$$

$$Q = (3,67 + 1,26 + 0,075 + 0,079) \text{ kW} = 5,084 \text{ kW}$$

Esto significa que nuestro sistema de cogeneración debe estar capacitado para transmitir una potencia calorífica de 5,084 kW.

5. Módulo de microgeneración

En este apartado se exponen todos los cálculos relacionados con el módulo de microgeneración.

5.1 Ajuste de potencia eléctrica y térmica

La potencia eléctrica de salida del grupo motogenerador seleccionado es de 30 kWe, mientras que la demandada por la granja es de 25,91 kWe. Esto significa que el motor no va a trabajar al 100% de su capacidad.

La capacidad de funcionamiento del motor se halla de la siguiente manera: [28]

$$\begin{aligned} \text{capacidad de funcionamiento (\%)} &= \frac{P_{\text{eléctrica necesaria}}}{P_{\text{eléctrica de salida del motor}}} * 100 \\ &= \frac{25,91(kW)}{30(kW)} * 100 = 86,37\% \text{ (ec. 32)} \end{aligned}$$

Esto significa, por lo tanto, que el módulo de microgeneración trabajará al 86,37% de su capacidad para generar la potencia eléctrica que precisa la granja.

A continuación, se procede a calcular la potencia térmica que se generará en el módulo de microgeneración, si este trabaja al 86,37% de su capacidad:

$$\text{Potencia térmica generada trabajando al } 86,37\% = 62(kWt) * 0,8637 = 53,55 \text{ kWt}$$

Es decir, durante el funcionamiento del grupo motogenerador, se generarán 53,55 kWt.

Teniendo en cuenta que el biodigestor tan solo precisa de 5,084 kWt para su correcto funcionamiento, se genera un 90,51% más de la energía térmica que necesitamos.

Para finalizar este apartado, consideramos que, si el motor va a trabajar al 86,37% de su capacidad, la potencia de entrada necesaria se verá disminuida:

$$\text{Potencia de entrada trabajando al } 86,37\% = 103(\text{kW}) * 0,8637 = 88,96 \text{ kW}$$

En resumen, el grupo motogenerador precisará de una potencia de entrada suministrada por el combustible de 88,96 kW para producir 25,91 kWe y 53,55 kWt.

5.2 Caudal de gas necesario

El gas que se obtiene del proceso de digestión anaeróbica (biogás) es el encargado de suministrar la potencia de entrada al grupo motogenerador. Anteriormente, se calculó que el PCI del biogás obtenido era de 37571,27 kJ/kg, y la potencia de entrada necesaria para el funcionamiento del motor es de 88,96 kW.

Por lo tanto, el consumo de gas necesario para que el grupo motogenerador actúe en los parámetros de funcionamiento necesarios es: [28]

$$\begin{aligned} \text{Potencia del gas} &= PCI_{\text{combustible}} * \dot{m}_{\text{combustible}} \\ \dot{m}_{\text{combustible}} &= \frac{\text{Potencia del gas}}{PCI_{\text{combustible}}} = \frac{88,96 \text{ (kJ/s)}}{37571,27 \text{ (kJ/kg)}} = 2,37 \times 10^{-3} \text{ kg/s} \end{aligned}$$

Esto nos indica que el caudal másico de combustible que requiere el motor es de $2,37 \times 10^{-3}$ kg/s.

En valores de caudal volumétrico sería:

$$V_{\text{combustible}} = \frac{2,37 \times 10^{-3} \text{ (kg/s)}}{0,947 \text{ (kg/m}^3\text{)}} = 2,5 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} = 9 \text{ m}^3/\text{h}$$

5.3 Caudal de gas a almacenar

Como vemos en los resultados obtenidos, el caudal másico que necesita el motor para su funcionamiento es de $2,37 \times 10^{-3}$ kg/s y la producción de biogás por parte del biodigestor es de $2,41 \times 10^{-3}$ kg/s. Esto significa que la demanda de combustible es inferior a la producción de este,

por lo que habrá un excedente que tendremos que almacenar en la cúpula de doble membrana del tanque o en un gasómetro, tal y como habíamos planeado.

$$\begin{aligned}\dot{m}_{almacenar} &= \dot{m}_{biogás\ producido} - \dot{m}_{combustible} = (2,41 \times 10^{-3} - 2,37 \times 10^{-3}) \left(\frac{kg}{s}\right) \\ &= 4 \times 10^{-5} kg/s\end{aligned}$$

Calculamos el caudal volumétrico a almacenar:

$$V_{almacenar} = \frac{4 \times 10^{-5} \left(\frac{kg}{s}\right)}{0,947 \left(\frac{kg}{m^3}\right)} = 4,22 \times 10^{-5} m^3/s$$

Esto supone que diariamente se almacenarán:

$$4,22 \times 10^{-5} \left(\frac{m^3}{s}\right) * \frac{3600 s}{1 h} * \frac{24 h}{1 día} = 3,65 \frac{m^3}{día}$$

Se almacenarán 3,65 m³ diarios.

6. Intercambio de calor (serpentín)

En este apartado se exponen todos los cálculos relacionados con el serpentín encargado de calentar el interior del tanque de digestión.

6.1 Dimensiones del serpentín

Para el análisis de este intercambio de calor se asume el digestor como un intercambiador de calor de carcasa y tubos. [7]

En el cálculo de intercambiadores de calor existen dos métodos comúnmente diferenciados para su análisis: el método de la efectividad-NTU y el método de la diferencia media logarítmica de temperatura (LMTD). Este último método es el empleado para los casos en los que las temperaturas de entrada y salida de los fluidos frío y caliente son conocidas, como es nuestro caso.

Estas temperaturas son:

- Temperatura de entrada del fluido caliente (agua): $T_{h,ent} = 60^{\circ}\text{C}$
- Temperatura de salida del fluido caliente (agua): $T_{h,sal} = 45^{\circ}\text{C}$

Estas temperaturas son proporcionadas por el catálogo del fabricante del módulo de cogeneración empleado. [29]

- Temperatura de entrada del fluido frío (biomasa): $T_{c,ent} = 11,3^{\circ}\text{C}$
- Temperatura de salida del fluido caliente (biomasa): $T_{c,sal} = 30^{\circ}\text{C}$

Estas temperaturas son la temperatura del residuo antes de su entrada en el biodigestor, el cual se considera que está a la temperatura del aire ambiente y la temperatura objetivo de operación del biodigestor.

El método de la LMTD define la transferencia de calor como:

$$Q = U * A_s * \Delta T_{ml}$$

*Donde Q es la transferencia de calor que ocurre en el intercambiador,
U es el coeficiente global de transferencia de calor,
A_s es el área de la superficie por la cual tiene lugar la transferencia de calor
Y ΔT_{ml} es la diferencia de temperatura media logarítmica.*

La transferencia de calor que ocurre en el intercambiador tendrá el mismo valor que el calor de cogeneración producido, es decir, que el calor que transfiere el motor a su sistema de refrigeración.

El coeficiente global de transferencia de calor se puede aproximar al considerado para la transferencia de calor entre agua caliente y agua a convección natural, debido al alto porcentaje de humedad que presenta la biomasa. Este rango está entre 200 y 370 W/m²°C. Se empleará un valor de 200 W/m²°C por ser el más desfavorable. [7]

La ΔT_{ml} viene dada para los intercambiadores a contraflujo de pasos múltiples como es, nuestro caso, por la siguiente expresión:

$$\Delta T_{ml} = F * \Delta T_{ml_{CF}} \text{ (ec. 33)}$$

Donde F es un factor de corrección que se calculará a continuación
Y $\Delta T_{ml_{CF}}$ es la diferencia de temperatura media logarítmica a contraflujo, que se calcula empleando la expresión siguiente:

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} \text{ (ec. 34)}$$

Cuyos valores son:

$$\Delta T_1 = T_{h,sal} - T_{c,ent} = (45 - 11,3)^\circ\text{C} = 33,7^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_2 = T_{h,ent} - T_{c,sal} = (60 - 30)^\circ\text{C} = 30^\circ\text{C}$$

Volviendo a la ecuación 34:

$$\Delta T_{ml} = \frac{(33,7 - 30)^\circ\text{C}}{\ln\left(\frac{33,7^\circ\text{C}}{30^\circ\text{C}}\right)} = 31,81^\circ\text{C}$$

Por otro lado, el factor de corrección F se calcula a partir de las gráficas proporcionadas por el libro de *Transferencia de calor y masa* [24], para nuestro caso de estudio un paso por la coraza y cualquier múltiplo de 2 pasos por los tubos:

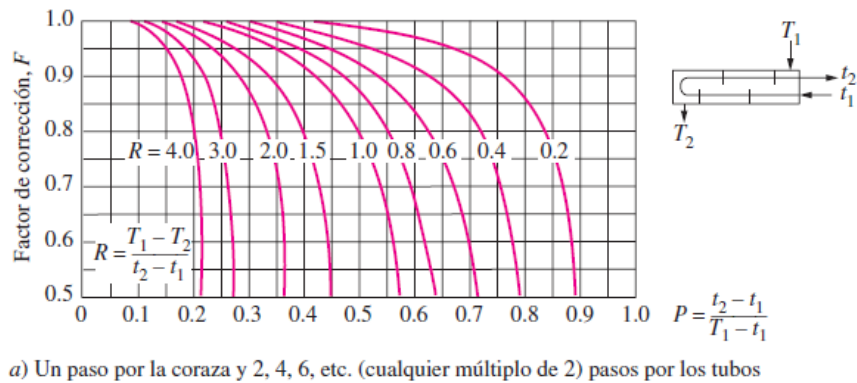


Figura 5. Gráfica para la determinación del factor de corrección (F) en intercambiadores de calor de un paso por la coraza y cualquiera múltiplo de 2 pasos por los tubos. Fuente: Transferencia de calor y masa.

Calculamos los valores de P y R:

$$P = \frac{(45 - 60)^{\circ}\text{C}}{(11,3 - 60)^{\circ}\text{C}} = 0,31$$

$$R = \frac{(11,3 - 30)^{\circ}\text{C}}{(45 - 60)^{\circ}\text{C}} = 1,25$$

Teniendo en cuenta estos valores en la gráfica de la figura 6:

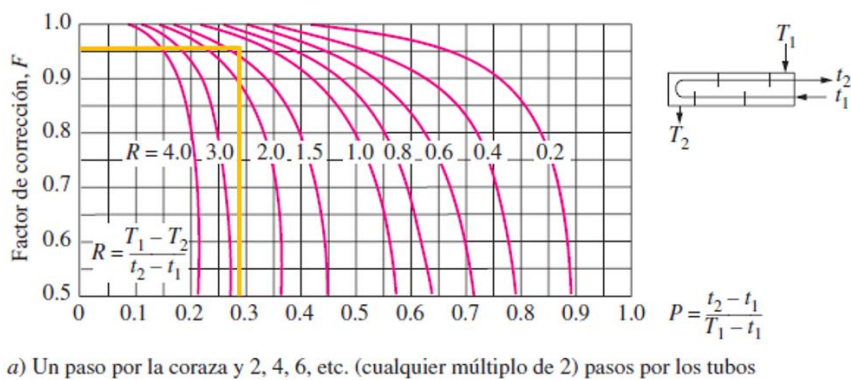


Figura 6. Factor de corrección (F) para el intercambiador estudiado. Fuente Transferencia de calor y masa.

Como podemos observar en la gráfica de la figura 6, nuestro factor de corrección F es de 0,96.

Entonces,

$$\Delta T_{ml} = 0,96 * 31,81 \text{ }^{\circ}\text{C} = 30,54^{\circ}\text{C}$$

Retomando la ecuación 39, calculamos el área de la superficie de transferencia de calor, es decir el área superficial del serpentín:

$$5084(W) = 200 \left(\frac{W}{m^2 * ^\circ C} \right) * A_s * 30,54(^{\circ}C); A_s = 0,83 m^2$$

Es decir, el área superficial de los tubos del serpentín deberá ser de $0,83 m^2$ para el correcto intercambio de calor en el biodigestor.

Tomando un diámetro de tubería de 1 pulgada, es decir, 2,54 cm, podemos calcular la longitud de estos tubos aplicando la fórmula para el área superficial de un cilindro: [7]

$$A_s = \pi * D * L$$

$$L = \frac{A_s}{\pi * D} = \frac{0,83(m^2)}{\pi * 0,0254(m)} = 10,40 m$$

La longitud total de los tubos del serpentín deberá ser de 10,40 m con un diámetro de 1 pulgada.

6.2 Caudal másico de agua para el intercambio de calor

El caudal másico de agua de refrigeración se puede calcular de manera sencilla si se conoce el valor cuantitativo de la transferencia de calor, así como las temperaturas de entrada y salida del fluido.

Para su determinación, se plantea un balance de energía tomando el sistema de refrigeración como volumen de control:

VC: sistema de refrigeración

$$\dot{m}_{agua} * h_1 - \dot{m}_{agua} * h_2 + Q = 0 \text{ (ec. 35)}$$

Donde \dot{m}_{agua} es el caudal másico de agua de refrigeración,
 h_1 es la entalpía del agua subenfriada a la entrada del sistema de refrigeración,

h_2 es la entalpía del agua subenfriada a la salida del sistema de refrigeración
y Q es el calor transferido por el motor al sistema de refrigeración.

Para la determinación de las entalpías de entrada y salida, podemos realizar una aproximación que consiste en considerar que las propiedades del líquido subenfriado son similares a las del líquido saturado a la misma temperatura:

- $h_1 \approx h_f(T = 45^\circ\text{C}) = 188,45 \text{ kJ/kg}$
- $h_2 \approx h_f(T = 60^\circ\text{C}) = 251,13 \text{ kJ/kg}$

Valores obtenidos a partir de las tablas y diagramas del libro *Fundamentos de termodinámica técnica*, de Moran-Shapiro.

Retomando la ecuación 43,

$$Q = \dot{m}_{\text{agua}}(h_2 - h_1); \dot{m}_{\text{agua}} = \frac{Q}{h_2 - h_1} = \frac{5,084(\text{kW})}{(251,13 - 188,45)(\text{kJ/kg})} = 0,081 \text{ kg/s}$$

El caudal másico de agua de refrigeración necesario para la transferencia de calor en el serpentín es de 0,081 kg/s. Considerando que la densidad del agua es 997 kg/m³, esto es:

$$V = \frac{0,081(\text{kg/s})}{997(\text{kg/m}^3)} = 8,12 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s} = 0,29 \text{ m}^3/\text{h}$$

El caudal de agua de refrigeración es de 0,29 m³/h.

7. Equipo auxiliar de emergencia

En este apartado se exponen los cálculos de producción de potencia y consumo relacionados con el equipo auxiliar diésel de emergencia.

De manera similar a lo que sucedía en el módulo de microgeneración, la potencia eléctrica nominal a plena carga que produce el grupo electrógeno es de 26,4 kWe, mientras que la demanda eléctrica de la granja es de 25,91 kWe. Esto significa que el motor no va a trabajar a máxima capacidad. A continuación, calculamos la capacidad de trabajo de este equipo, aplicando la ecuación 33:

$$\begin{aligned} \text{capacidad de funcionamiento (\%)} &= \frac{P_{\text{eléctrica necesaria}}}{P_{\text{eléctrica de salida del motor}}} * 100 \\ &= \frac{25,91(kW)}{26,4(kW)} * 100 = 98,14\% \end{aligned}$$

Es decir, el grupo electrógeno trabajará al 98,14 % de su capacidad para generar la potencia eléctrica requerida. Esto significa que el consumo de combustible será muy similar al determinado por el fabricante trabajando a plena carga. Con una simple regla de tres podemos obtener el consumo exacto:

Si a plena carga, el motor consume 8,12 l/h de combustible, al 98,14% de capacidad consumirá:

$$\text{consumo al 98,14\% de capacidad: } \frac{98,14\% * 8,12(l/h)}{100\%} = 7,97 \text{ l/h}$$

El motor consumirá 7,97 l/h de combustible para producir los 25,91 kWe que demanda la granja.



ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

TRABAJO DE FIN DE GRADO

ANEXO II. TECNOLOGÍA CHP (COGENERACIÓN)

Titulación

Grado en Ingeniería Mecánica

Autor

Rubén Rodríguez Medina

Tutor

Agustín Manuel Delgado Torres

La Laguna, septiembre de 2018

Índice del Anexo II

1. Introducción.....	5
1.1 Energía.....	5
1.2 Trabajo y potencia.....	5
1.3 Calor.....	6
1.4 Termodinámica.....	6
2. Cogeneración.....	7
2.1 Clasificación de los sistemas de cogeneración.....	8
2.2 Módulos de cogeneración.....	8
2.2.1 Cogeneración con motor alternativo.....	9
2.2.2 Cogeneración con turbina de gas.....	10
2.2.3 Cogeneración con turbina de vapor.....	12
2.2.4 Cogeneración en ciclo combinado con turbina de gas.....	13
2.2.5 Trigeneración.....	15
3. Combustibles para cogeneración.....	15
4. Rendimientos en una planta de cogeneración.....	16

Índice de figuras.

Figura 1. Ahorro energético de energía primaria.....	7
Figura 2. Planta de cogeneración con motor alternativo.....	9
Figura 3. Diagrama de Sankey de planta de cogeneración con motor de gas.....	10
Figura 4. Planta de cogeneración con turbina de gas.....	11
Figura 5. Diagrama de Sankey de planta de cogeneración con turbina de gas.....	12
Figura 6. Planta de cogeneración con turbina de vapor.....	13
Figura 7. Planta de cogeneración en ciclo combinado con turbina de gas.....	14
Figura 8. Diagrama de Sankey de planta de cogeneración en ciclo combinado con turbina de gas.....	14

1. Introducción.

En este anexo se pretende ofrecer una base general sobre los aspectos técnicos más relevantes ligados a la cogeneración, con el objetivo de entender y conocer en mayor profundidad la tecnología empleada en el presente proyecto.

1.1 Energía.

Conocemos como energía de un sistema a la capacidad de dicho sistema para realizar un trabajo. Esta energía se halla en muy diversas formas más o menos fáciles de observar. Puede estar ligada a la materia de los cuerpos, como es el caso de las energías cinéticas y potencia, la energía química, nuclear, térmica, etc., o puede ser independiente de los cuerpos como las radiaciones térmicas o electromagnéticas.

La verdadera naturaleza de la energía no se conoce, sino que se distingue por sus efectos. La energía se mide por la cantidad de trabajo que puede proporcionar, es por ello que sus unidades de medida son las mismas que las del trabajo. [13]

1.2 Trabajo y potencia.

Decimos que se realiza un trabajo físico cuando una fuerza actúa sobre un cuerpo y ejerce un desplazamiento del mismo. El valor del trabajo realizado por la fuerza se obtiene multiplicando el espacio recorrido por el cuerpo por la magnitud de la fuerza en la dirección de desplazamiento.

$$W = F * e$$

Por tanto, para realizar un trabajo es necesario tanto que exista una fuerza, como que se origine un desplazamiento en la dirección de esa fuerza. Por ejemplo, si mantenemos un objeto colgado no realizamos ningún trabajo físico, aunque nos suponga un gran esfuerzo.

La unidad de trabajo en el sistema internacional de unidades es el julio (J) que es el trabajo realizado al mover un objeto un metro de distancia, con una fuerza de 1 N. [13]

El trabajo realizado en una unidad de tiempo determinada recibe el nombre de potencia. Y su unidad de medida es el vatio, que es equivalente a un julio por segundo (J/s).

$$P = \frac{W}{t}$$

1.3 Calor

En la naturaleza se observa con frecuencia que determinados cuerpos llamados vulgarmente cuerpos calientes ejercen cierta influencia sobre otros, llamados fríos, variando alguna de sus características, como la forma, el volumen, color o energía. Se observa que esta influencia puede originar un trabajo, es decir, que tiene carácter energético.

Se conoce como calor a la influencia que se transmite de un cuerpo a otro al ponerse en contacto, por el hecho de poseer diferente temperatura, es decir, debido al gradiente de temperaturas que presentan ambos.

Como el calor es una manifestación de la energía, también se mide en julios. [13]

1.4 Termodinámica

La termodinámica es la ciencia experimental que estudia las transformaciones energéticas, en que intervienen el trabajo y/o el calor. Es la disciplina que rige todos los principios básicos de las plantas energéticas y en concreto de la cogeneración.

La entalpía se puede definir como la suma de la energía interna de un cuerpo y de la energía de presión del mismo. En los líquidos y sólidos, que son prácticamente incompresibles, es aproximadamente igual a la energía interna.

La termodinámica se rige por dos leyes fundamentales:

- La primera ley de la termodinámica, también conocida como ley de conservación de la energía, responde al convencimiento de que la energía ni se crea ni se destruye, es decir, la energía al final de una transformación es igual a la que había antes de la misma más la aportada desde el exterior y menos la cedida al exterior. De esta ley se deduce que cuando cedemos calor o trabajo a un sistema, éste aumenta su energía en esa magnitud.
- La segunda ley de la termodinámica postula que en una transformación se puede transformar todo el trabajo en calor, pero nunca todo el calor en trabajo. Esto es que es imposible hacer pasar calor espontáneamente de un cuerpo frío a otro caliente sin haber aportado trabajo para ello. Esta ley supone que no es posible crear una máquina térmica que tenga una eficiencia del 100%.

2. Cogeneración.

La cogeneración, o tecnología CHP por sus siglas en inglés (Combined Heat and Power), significa la producción simultánea de dos o más tipos de energía, aunque principalmente son dos: la electricidad y el calor.

Esta producción simultánea supone que la energía producida puede ser utilizada a la vez que se sigue produciendo más energía. Esto implica proximidad entre la planta generadora y el consumo. Este consumo está referido principalmente al calor, ya que la base de la cogeneración es el aprovechamiento de dicha energía.

La diferencia entre este tipo de tecnología y los sistemas convencionales de producción de electricidad es que en las convencionales no se aprovecha el calor generado y se elimina al ambiente, con lo que la eficiencia global del proceso es menor. Este mayor rendimiento de las centrales de cogeneración origina tres de sus mayores ventajas: menor dependencia de los combustibles, coste de producción menor y menor impacto ambiental.

Además, como hemos mencionado, la energía se produce donde se consume, por lo que hay menores pérdidas por transporte y aumenta la autonomía de las fábricas. [13]

Ahorro energético de energía primaria

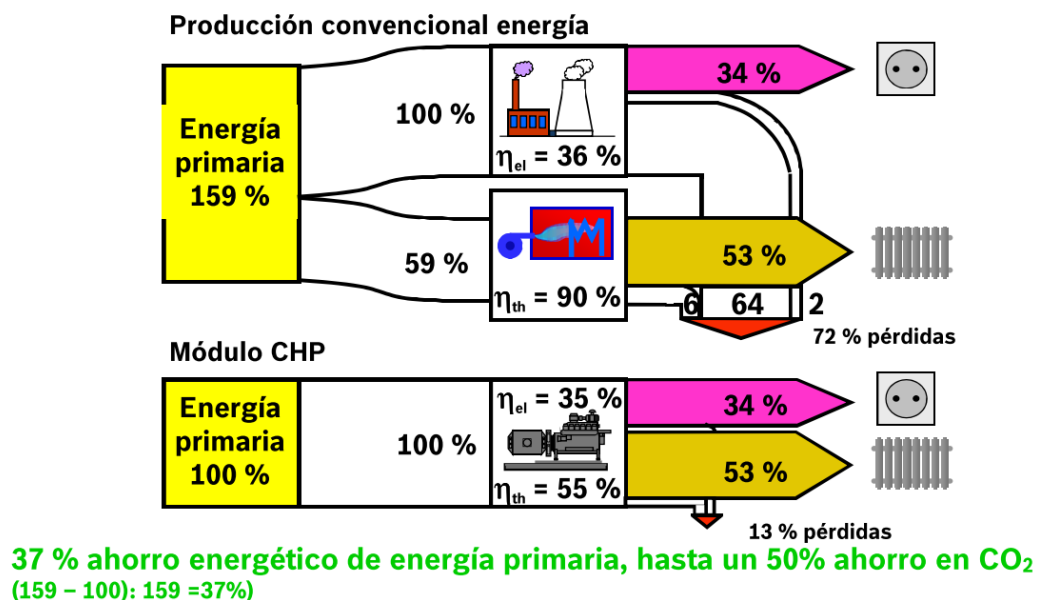


Figura 1. Ahorro energético de energía primaria. Fuente: BOSCH.

Como podemos observar, el ahorro energético de energía primaria por parte de los sistemas de cogeneración es del 37%.

Además, esta tecnología también se traduce en un ahorro de emisiones de CO₂ de hasta el 50%.

2.1 Clasificación de los sistemas de cogeneración

Según la directiva 8/EC/2004, los sistemas de cogeneración se deben clasificar en tres tipos:

- Microcogeneración: cuando la producción de electricidad de la instalación no supera los 50 kWe.
- Cogeneración de pequeña escala: cuando dicha producción es mayor de 50 kWe e inferior de 1 MWe. Es decir, cuando se encuentra en el rango [0,05-1 MWe].
- Cogeneración propiamente dicha: cuando la producción de electricidad es superior a 1 MWe.

2.2 Módulos de cogeneración

Una planta de cogeneración es un sistema complejo, donde hay una entrada fundamental de combustible, y varias energías salientes. Para ello hay una serie de equipos principales y otros auxiliares.

Los equipos principales definen el tipo de ciclo, los productos del mismo, el rendimiento y todas las características principales del mismo. Por otro lado, los equipos auxiliares sirven para asegurar las necesidades de los equipos principales. Por ejemplo, bombean el agua a la caldera, comprimen el gas para la turbina, refrigeran el aceite o los alternadores, etc.

Existe otro término que interesa definir, es el “prime mover” o motor primario, que podríamos decir que es la máquina térmica básica que da origen al proceso. Es en función de los equipos primarios y principales como se definen los tipos de ciclos: [13]

- Turbina de gas en ciclo simple para secado o con caldera
- Motor de gas en ciclo simple para secado o con caldera
- Caldera con turbina de vapor
- Ciclo combinado con turbina de gas
- Ciclo combinado de motores

En resumen, un módulo de cogeneración básicamente comprende una máquina térmica, un generador trifásico y varios sistemas de intercambio de calor integrados en el mismo aparato. La máquina térmica mueve al generador para la producción de electricidad. Los generadores síncronos o asíncronos son usados para la producción de potencia eléctrica.

2.2.1 Cogeneración con motor alternativo

Los motores alternativos utilizan gas, gasóleo o fuel-oil como combustible. Son la máquina térmica más eficientes eléctricamente, pero no son tan eficientes térmicamente.

El sistema de recuperación térmica se diseña en función de los requisitos de la industria y en general se basan en la producción de vapor de baja presión (hasta 10 bares), aceite térmico y en el aprovechamiento del circuito de alta temperatura del agua de refrigeración del motor. Son también adecuados para la producción de frío por absorción, bien a través del vapor generado con los gases en máquinas de doble efecto, o utilizando directamente el calor del agua de refrigeración en máquinas de simple efecto. [30]

Este tipo de máquina térmica es conveniente para potencias bajas (hasta 15 MW), en las que la generación eléctrica tiene mucha importancia en el peso del plan de negocio.

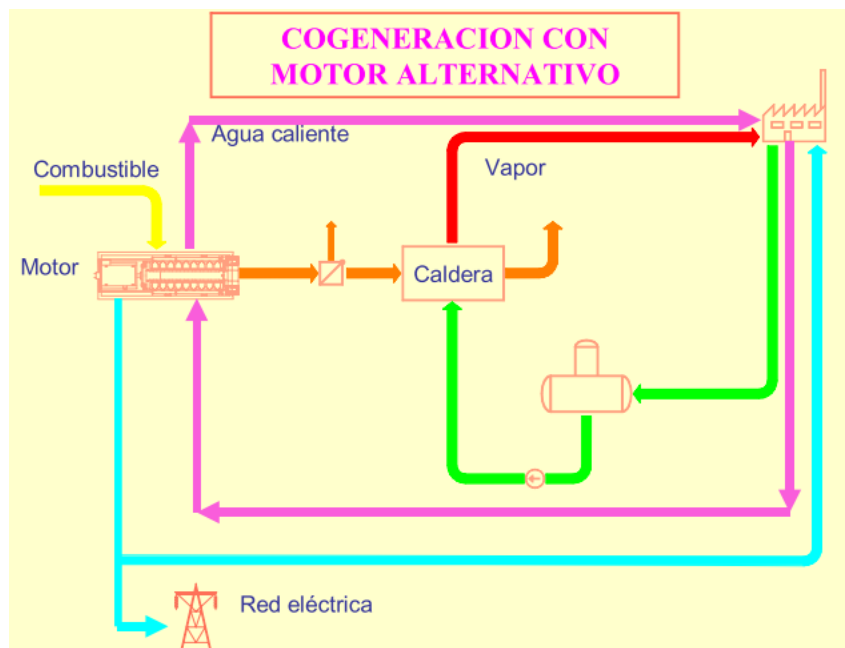


Figura 2. Planta de cogeneración con motor alternativo. Fuente: eoi.

El reparto de energía en una planta con motor alternativo es aproximadamente como se muestra en el siguiente diagrama de Sankey.



Figura 3. Diagrama de Sankey de planta de cogeneración con motor de gas. Fuente: eoi

Para estudiar el diagrama de Sankey de la figura 3, se escogió un motor de gas del orden de unos 3-4 MW. Como podemos observar, el porcentaje de energía eléctrica que se produce a partir del 100% de la energía del combustible es del 42%. Un 21% de la energía se aprovecha en la producción de vapor y otro 22% en agua caliente (14% en agua caliente a alta temperatura y 8% en agua caliente a baja temperatura). Las pérdidas de energía globales del sistema son del 15%.

2.2.2 Cogeneración con turbina de gas

En las plantas con turbina de gas se quema combustible en un turbogenerador. Parte de la energía se transforma en energía mecánica, que se transformará con la ayuda de un alternador en energía eléctrica. El rendimiento eléctrico de estas máquinas térmicas es normalmente inferior al de las plantas con motores alternativos, pero presentan la ventaja de que permiten una recuperación fácil del calor, que se encuentra concentrado en su práctica totalidad en los gases de escape, que pueden estar a una temperatura de unos 500 °C, temperatura idónea para producir vapor en una caldera de recuperación.

Cuando se presenta en el denominado ciclo simple, el sistema consta de una turbina de gas y una caldera de recuperación, generándose vapor directamente a la presión de utilización en la planta de proceso asociada a la cogeneración. Su aplicación es adecuada cuando las necesidades de vapor son importantes (>10 t/h), situación que se encuentra fácilmente en numerosas industrias como la alimentación, química, papelera, etc.). Son plantas de gran fiabilidad y económicamente rentables a partir de un determinado tamaño y si tienen un importante número de horas de funcionamiento con demanda de calor continua.

Si la demanda de vapor (o calor de una forma más general) es mayor que la que pueden proporcionar los gases de escape, puede producirse una cantidad adicional utilizando un quemador de postcombustión, introduciendo combustible directamente a un quemador especial, con el que cuenta la caldera. Esto puede hacerse porque los gases de escape son aún suficientemente ricos en oxígeno. Por el contrario, el escape de un motor alternativo tiene un contenido en oxígeno menor del que permite una combustión segura, por lo que sería necesario enriquecerlo previamente en oxígeno, si se quisiera hacer la postcombustión, y ante esta dificultad, se suele optar por mantener calderas auxiliares de reserva para el caso de necesidades suplementarias de calor.

El diseño del sistema de recuperación de calor en las plantas con turbinas de gas es fundamental, pues su economía está directamente ligada al mismo ya que el peso del mismo es mayor que en las plantas con motores alternativos. [13]

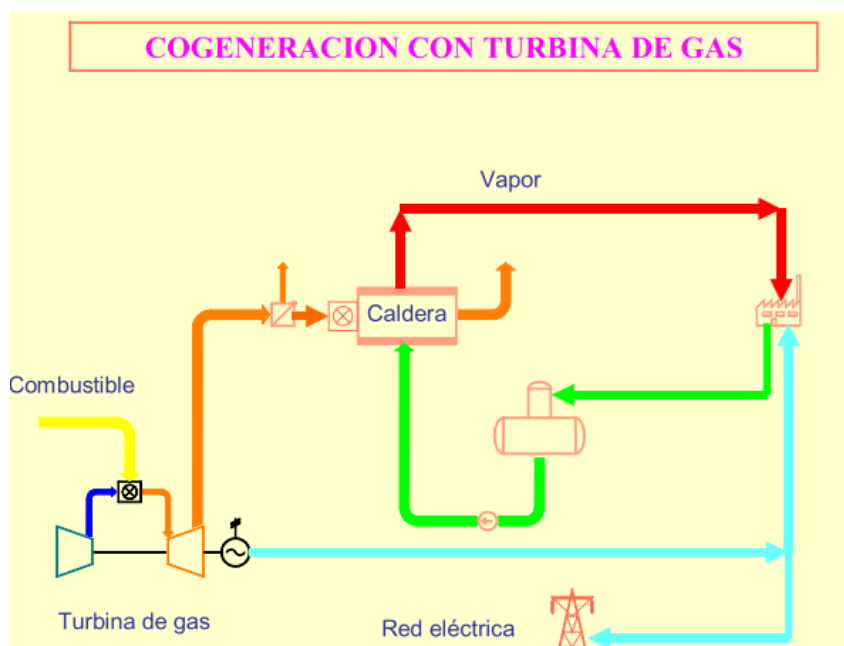


Figura 4. Planta de cogeneración con turbina de gas. Fuente: eoi.

El diagrama de Sankey para este tipo de instalaciones podría ser el siguiente:

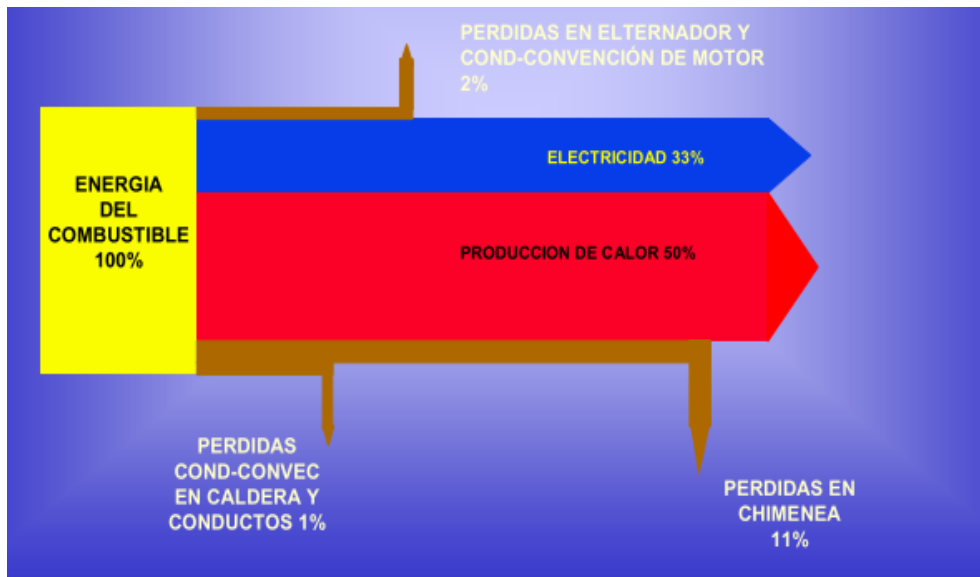


Figura 5. Diagrama de Sankey de planta de cogeneración con turbina de gas. Fuente: eoi

Como podemos observar en la figura 5, la producción de energía eléctrica a partir del 100% de la energía del combustible es del 33%, esto demuestra que su rendimiento eléctrico es menor que el del motor alternativo. Por el contrario, la producción de calor es del 50% lo que demuestra que tiene una mayor eficiencia térmica que el motor alternativo. Las pérdidas globales son del 14%.

2.2.3 Cogeneración con turbina de vapor

En estos sistemas, la energía mecánica se produce por la expansión del vapor de alta presión procedente de una caldera convencional. El uso de este ciclo fue el primero en cogeneración. Actualmente su aplicación ha quedado prácticamente limitada a complemento para ciclos combinados o en instalaciones que utilizan combustibles residuales, como biomasa y residuos.

Dependiendo de la presión de salida del vapor de la turbina se clasifican en turbinas a contrapresión, en donde esta presión está por encima de la atmosférica, y las turbinas a condensación, en las cuales ésta está por debajo de la atmosférica y han de estar provistas de un condensador. [30]

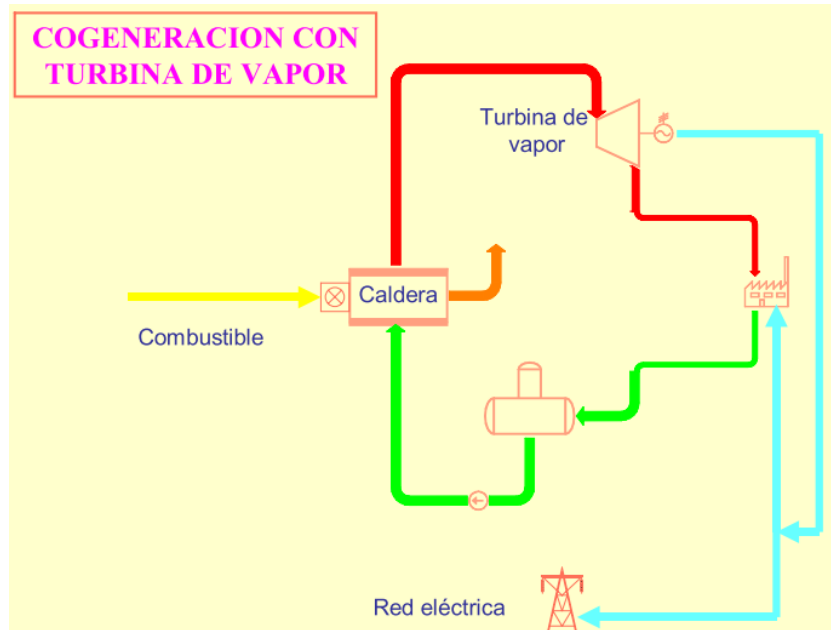


Figura 6. Planta de cogeneración con turbina de vapor. Fuente: eoi

2.2.4 Cogeneración en ciclo combinado con turbina de gas

La aplicación conjunta de una turbina de gas y una turbina de vapor es lo que se denomina “Ciclo Combinado”.

Los gases de escape de la turbina atraviesan la caldera de recuperación, donde se produce vapor de alta presión. Este vapor se expande en una turbina de vapor produciendo una energía eléctrica adicional. El escape de la turbina será vapor de baja presión, que puede aprovecharse como tal o condensarse en un condensador presurizado, produciendo agua caliente o agua sobrecalentada, que será utilizado en la industria asociada. En este tipo de ciclo, si la demanda de calor disminuye, el vapor sobrante en el escape de la turbina puede condensarse, con lo que toda la energía de los gases no se pierde, sino que al menos se produce una cierta cantidad de electricidad.

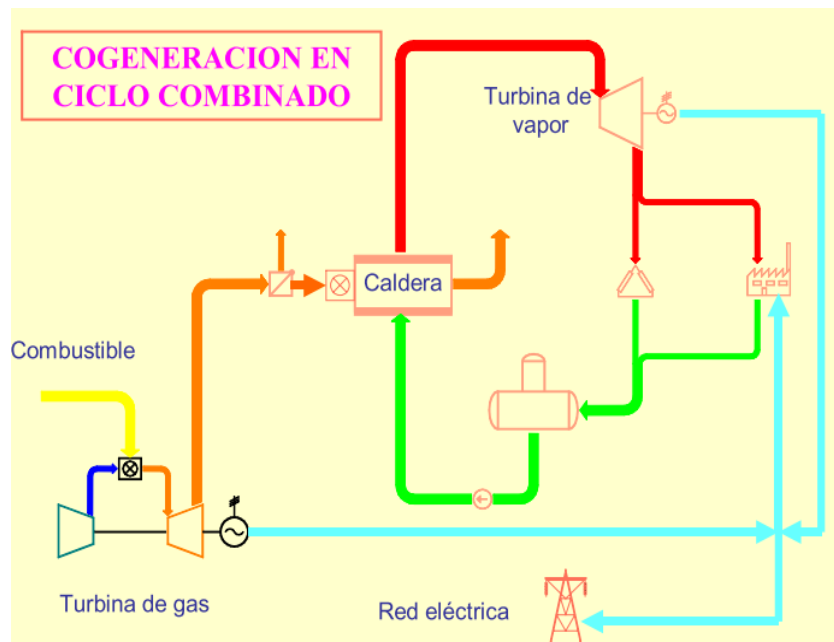


Figura 7. Planta de cogeneración en ciclo combinado con turbina de gas. Fuente: eoi.

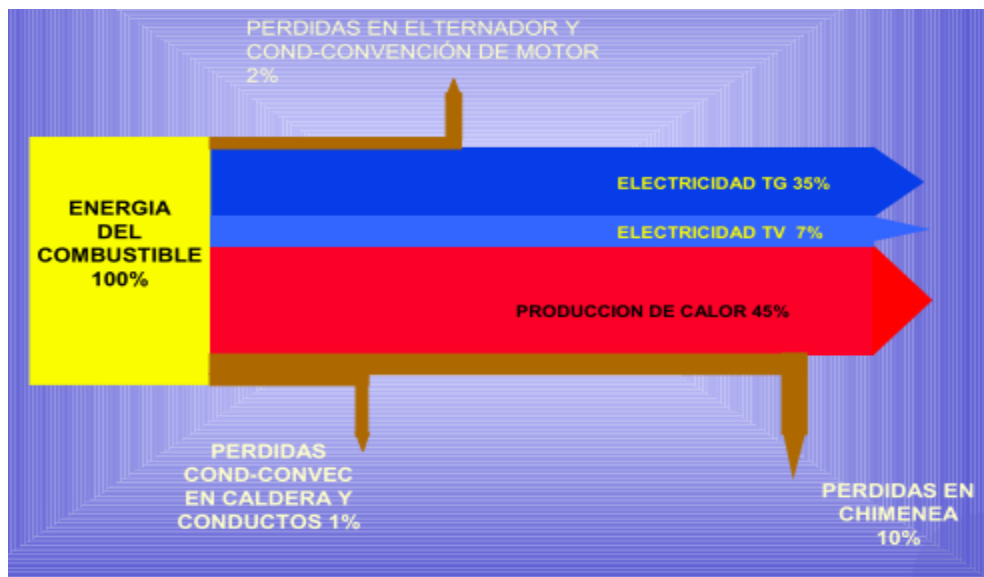


Figura 8. Diagrama de Sankey de planta de cogeneración en ciclo combinado con turbina de gas. Fuente: eoi

Como podemos observar, el rendimiento eléctrico de los ciclos combinados se acerca más al rendimiento de un motor alternativo. Este rendimiento total es del 42% (35% procedente de la turbina de gas y 7% de la turbina de vapor). En cuanto al rendimiento térmico, este es del 45% y las pérdidas globales son del 13%.

2.2.5 Trigeneración

La trigeneración suele referirse a la generación simultánea de tres tipos de energía: energía eléctrica, energía térmica en forma de “calor” (agua sobrecalentada o vapor) y energía térmica en forma de “frío”, transformando posteriormente parte de esa agua sobrecalentada o vapor en agua fría utilizando equipos de absorción (de amoníaco o de bromuro de litio), que tienen un ciclo térmico sencillo, pero bastante ingenioso.

La trigeneración, permite a la cogeneración, que inicialmente, no era económicamente viable en centros que no consumieran calor, acceder a centros que precisen frío que se produzca con electricidad. Facilita a la industria del sector alimentario ser cogeneradores potenciales. Asimismo, permite la utilización de cogeneración en el sector terciario (hoteles, hospitales, centros educativos, etc.) donde además de calor se requiere frío para climatización, y que debido a la estacionalidad de estos consumos (calor en invierno, frío en verano) impedía la normal operación de una planta de cogeneración clásica. Al aprovecharse el calor también para la producción de frío, permite una mayor estabilidad en el aprovechamiento del calor [13].

Otra variante más de esta opción, en la que además de electricidad, calor y frío, se produce energía mecánica en una turbina para el accionamiento de bombas o para producir aire comprimido es la denominada tetrageneración.

3. Combustibles para cogeneración

Las turbinas de gas pueden utilizar hidrógeno, gas natural, GNL, gas de refinería u otros procesos, GLP, naftas y gasóleo. Los motores además pueden utilizar fuelóleo y gas de coque o gas procedentes de procesos siderúrgicos o ganaderos.

El efecto del combustible a utilizar sobre el rendimiento no es importante. La mayor diferencia reside en el precio y el efecto sobre el medio ambiente.

Parece claro que, en caso de existir gas natural en las proximidades, éste es el combustible mejor, sobre todo en el caso de turbinas de gas. El único combustible que compite, con ventaja, en precio con el gas natural es el fuelóleo para motores diésel, pero tienen la

desventaja de limitar el rendimiento, originar mayor coste de mantenimiento y producir mayor contaminación.

4. Rendimientos en una planta de cogeneración

El rendimiento eléctrico es el cociente entre la energía eléctrica generada por la planta y la energía aportada por el combustible. Para calcular el dato, es necesario convertir la cantidad de combustible en energía, para lo cual hay que multiplicar la masa o el volumen de combustible por el poder calorífico inferior (PCI) de éste.

El rendimiento eléctrico se define a partir de la siguiente expresión:

$$\eta_e = \frac{E}{Q}$$

Donde E es la energía eléctrica generada en un período, medida en los bornes del generador (Kwh) y Q es el combustible consumido por la planta, en kWh PCI.

Junto a este valor se utiliza el Rendimiento Global:

$$\eta_g = \frac{V + E}{Q}$$

Donde V es el calor útil producido, en kWh de PCI.

En las plantas de cogeneración se define además el Rendimiento Eléctrico Equivalente según la siguiente fórmula:

$$\eta_{ee} = \frac{E}{Q - \frac{V}{0,9}}$$

Donde el término divisor es el combustible atribuible a la generación de electricidad en una planta de cogeneración.

Estas fórmulas ya fueron empleadas en la memoria del presente proyecto para su respectivo análisis.

Este índice es uno de los principales parámetros de una planta de cogeneración. En España, para tener acceso al cobro de primas por generación eléctrica es necesario demostrar

que la planta tiene un Rendimiento Eléctrico Equivalente mínimo, dependiendo del combustible y la tecnología aplicada.

También hay que destacar en España, de acuerdo con la actual normativa vigente (RD 661/2007) que el rendimiento eléctrico equivalente está relacionado con la prima eléctrica a percibir por el promotor, de forma que el aumento de ese rendimiento hace aumentar la prima a percibir y mejora la rentabilidad global del proyecto.



ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

TRABAJO DE FIN DE GRADO

ANEXO III. CATÁLOGOS, FICHAS TÉCNICAS Y PRESUPUESTOS

Titulación

Grado en Ingeniería Mecánica

Autor

Rubén Rodríguez Medina

Tutor

Agustín Manuel Delgado Torres

La Laguna, septiembre de 2018

Índice Anexo III

1. Catálogos y fichas técnicas.....	5
1.1 Dimensiones disponibles para el tanque de digestión (CEC Tanks).....	5
1.2 Módulo de microgeneración (Grupo Casli)	6
1.3 Equipo auxiliar de emergencia (Tecnicos Carpi Grupos Electrógenos).....	7
2. Presupuestos	9
2.1 Presupuesto del tanque (CEC Tanks)	9
2.2 Presupuesto del grupo electrógeno (Tecnicos Carpi Grupos Electrógenos).....	10

1.2 Módulo de microgeneración (Grupo Casli)

FICHA TÉCNICA DEL EQUIPO

MC 30-60 GN



C.H.P (Combined heat and power)		ESPECIFICACIONES TÉCNICAS Y CONEXIONES	
Potencia eléctrica (kW)	30	Índice sonoro aproximado dB(A)	70
Potencia térmica (kW)	62	Peso aproximado (Kg)	-
Rendimiento eléctrico	29%	Conexión combustible (")	1" 1/4
Rendimiento térmico	60%	Conexión agua caliente	Brida PN 10/16 de 35 mm.
Rendimiento total	89%	Diametro salida gases (mm)	82
Caudal agua l/m	50	Temperatura gases escape (°C)	120
Temperatura máxima de salida ° C	85		
Salto de temperatura ° C	15		

ELEMENTOS PRINCIPALES

MOTOR		GENERADOR	
Marca y modelo	PSI GM 4.3 L	Marca	LEROY SOMER
Velocidad de trabajo rpm	1500	Modelo	42.3 S5
Nº Cilindros	6 en V	Sistema	Sincrono
Cilindrada Cm3	4294	Potencia (kW)	32
Tipo arranque	Eléctrico a 12V	Tensión (V)	400
Combustible	Gas Natural	Fases	3
Compresión	9,4:1	Factor de potencia	0,90
Avance chispa	Electrónico	Nº de polos	4
Aire admisión	Aspiración natural	Frecuencia (Hz)	50
Tipo aceite	15W40 Low Ash API CD	Aislamiento	CLASE H
Consumo kg/h	8,30	Protección	IP23

Medidas (altoXlargoXancho) (mm)	
Cerrado	1900x2000x1000
Abierto	-

1.3 Equipo auxiliar de emergencia (Tecnicos Carpi Grupos Electrógenos)

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

MOTOR	TECNICS YD	Y4102D
POTENCIA EN EMERGENCIA (ESP) <small>EMERGENCY STANDBY POWER norma ISO 8528</small>	KVA	35
POTENCIA PRIME POWER (PRP) <small>PRIME POWER norma ISO 8528</small>	KVA	31
TARJETA DE CONTROL		HGM 410
MAGNETOTERMICO DE PROTECCIÓN	AMP	60
CONMUTACIÓN MOTORIZADA (opcional)	AMP	60
Nivel sonoro medio a 7m a carga 75%	versión insonorizada	68 dBa

DIMENSIONES

ABIERTO - ESTANDAR		INSONORIZADO	
<small>largo x ancho x alto</small>		<small>largo x ancho x alto</small>	50 hz
1.860 x 750 x 1.380	mm	2.000 x 840 x 1.130	400 / 230 V
610	Kg	860	

ESPECIFICACIONES MOTOR

MARCA		TECNICS YD
Modelo		Y4102D
Potencia mecánica (LTP)	KW	33
Ciclo		4 Tiempos Inyección Diesel
Numero cilindros		4
Disposición		en línea
Diámetro cilindros	mm	102
Carrera pistón	mm	118
Cilindrada	c.c	3.875
Relación compresión		19:1
Regulador velocidad		Mecánico
Aspiración		Natural
Temperatura gases escape	°C	540
Sistema de refrigeración		Agua con glicol
Capacidad radiador	L	
Capacidad aceite	L	10
Peso en seco	Kg	240
Sistema eléctrico	V	12
Caudal entrada aire	m3/min	32
Caudal gases de escape	m3/min	5.3
Revoluciones por minuto	r.p.m.	1.500

CONSUMO

Específico	l/kw-h	0.28
a 50% de carga	l/h	3.9
a 75% de carga	l/h	5.9
a 100% de carga	l/h	8.12

2. Presupuestos

2.1 Presupuesto del tanque (CEC Tanks)

The quotation is based on the following:					
Term of quotation	CIF Spain			Quote valid time	90 days
Lead time	Approx. 60 days after received down payment and drawing confirmation, either delay will be automatically added to lead time				
Terms of payment	30%TT deposit, 70% balance to be paid before delivery				
Warranty	Under proper use, 5 years free warranty after installation; tank service life is more than 30 years				
Concrete foundation, pipework, valves and instruments, waterproof treatment and water test are by others (by customer or a third party)					
Design Criteria: comply with American standard AWWA D-103 and OSHA, NSF/ANSI 61					
Freeboard (min.0.3m)	0.3 m	Wind load	100 MPH		
Location of erection	Spain	Seismic Zone	0		
Fluid Temperature	up to 75°C	PH Range	3~11		
Specific Gravity	1.0	Design Pressure	-500 pa ~800 pa		
Stored media	organic liquid	Operation Pressure	-500 pa ~ 500 pa		
Panel Bolts	galvanized steel / with plastic protective c	Accessories material	hot dip galvanized steel material		
Tank color	standard dark green	Bottom connection	Above ground		
Coating thickness	260micron ~380 micron	Coating layer	2 coating and 2 fired internal and external		
Product Price Details					
Description	QTY	G.W.(kg)	Container QT.	Unit Price (USD)	Total Cost (USD)
Glass Fused to Steel Tank without roof for Biogas Project Tank Size: Ø6.88*6.0m Tank Capacity: 223m3	1pc	8800KG	1 x 20GP or LCL shipment	\$18,153.85	\$18,153.85
Double Membrane Roof Roof Size: Ø6.88 Roof Capacity: 80m3	1pc			\$10,000.00	\$10,000.00
Sea Freight from XinGang Port To main port in Spain	/	/	1	\$1,831.50	\$1,831.50
Sub Total	1pc	8800KG	1 X 20GP	CIF	\$29,985.35
Included Accessories per Tank :					
HDG (Hot-Dip-Galvanized steel material) self locking bolts & silicon sealant external HDG (Hot-Dip-Galvanized steel material) ladder with platform 1 set of HDG (Hot-Dip-Galvanized steel material) manway					
Installation&Tools Cost					
Item	Days	Cost/day/person	Number of people	Total	
Tank Installation Supervising: 1 supervisor consist of 1 team	19	\$180.00	1	\$3,040.00	
Cost of installation tools	9 pcs of lifting steel pole, 9 pcs of chain block, whole set other electrical tools like electric wrenches, electrical drills, angle grinders, etc.			\$2,673.85	
6 or 8 local helpers (workers)				by client	
One coordinator for site management (It would be better be able to speak Chinese)				by client	

Flight Ticket, Local Travel, Hotel and Board for instalaltion supervisors	by client
Costs to be allowed to erect on jobsite	by client
Client's scope of supply : rent a crane to take out material from container ; some scaffolds to assit installation of tank roof ; water resource for commissioning ; electricity supply	by client
Sub Total	\$5,713.85

2.2 Presupuesto del grupo electrógeno (Tecnicos Carpi Grupos Electrógenos)



OFERTA

		Nº:	7681
EMPRESA:	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		
A/AT:	Rubén Rodríguez	FECHA:	24/08/2018
DIRECCIÓN:	[38292] Santa Cruz de Tenerife	OBRA:	C.C. ANCORA
TELF:	626179311		663 809 447
E-MAIL:	rubenrmt6@gmail.com	AGENTE:	Domingo Mas

Atendiendo su amable solicitud, le ofrecemos nuestra mejor oferta para el grupo electrógeno solicitado, según detalle siguiente:

Grupo electrógeno	TYD35E
Motor / KVA máx. en trifásico	TECNICS / 35 KVA
Modelo estándar-abierto	5.460,00 € <input type="checkbox"/>
OPCIONES:	
Versión insonorizada	6.653,00 € <input type="checkbox"/>
Magnetotérmico de protección frente a cortocircuitos	INCLUIDO <input checked="" type="checkbox"/>
Pack Conmutación¹ (cuadro, conmutador motorizado, config. FTR y mant.r baterías)	410,00 € <input type="checkbox"/>
Porte a Arguineguin (no incluye descarga, despacho aduana ni impuestos locales)	INCLUIDO <input checked="" type="checkbox"/>



ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

TRABAJO DE FIN DE GRADO

PLANOS

Titulación

Grado en Ingeniería Mecánica

Autor

Rubén Rodríguez Medina

Tutor

Agustín Manuel Delgado Torres

La Laguna, septiembre de 2018

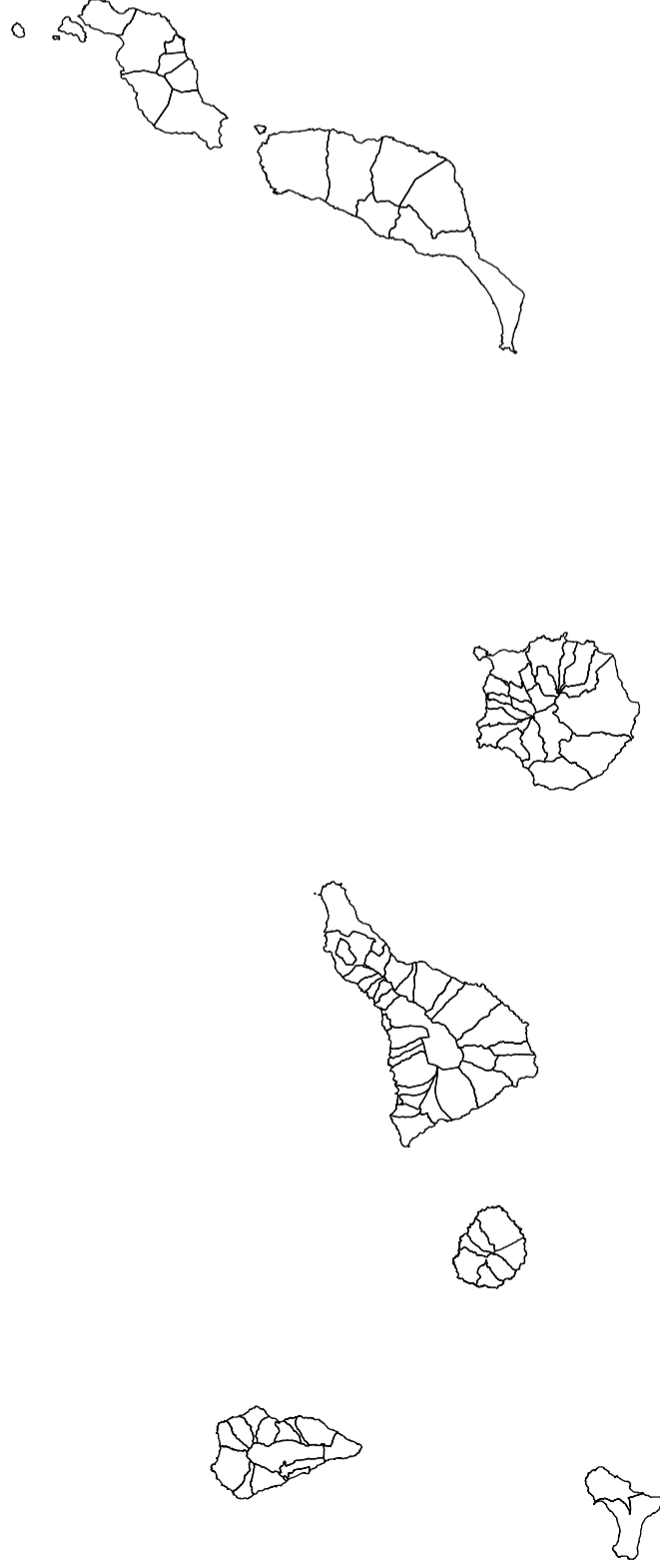
Índice de planos

Plano 1. Plano de situación.....	5
Plano 2. Plano de emplazamiento.....	6
Plano 3. Esquema general de la instalación.....	7




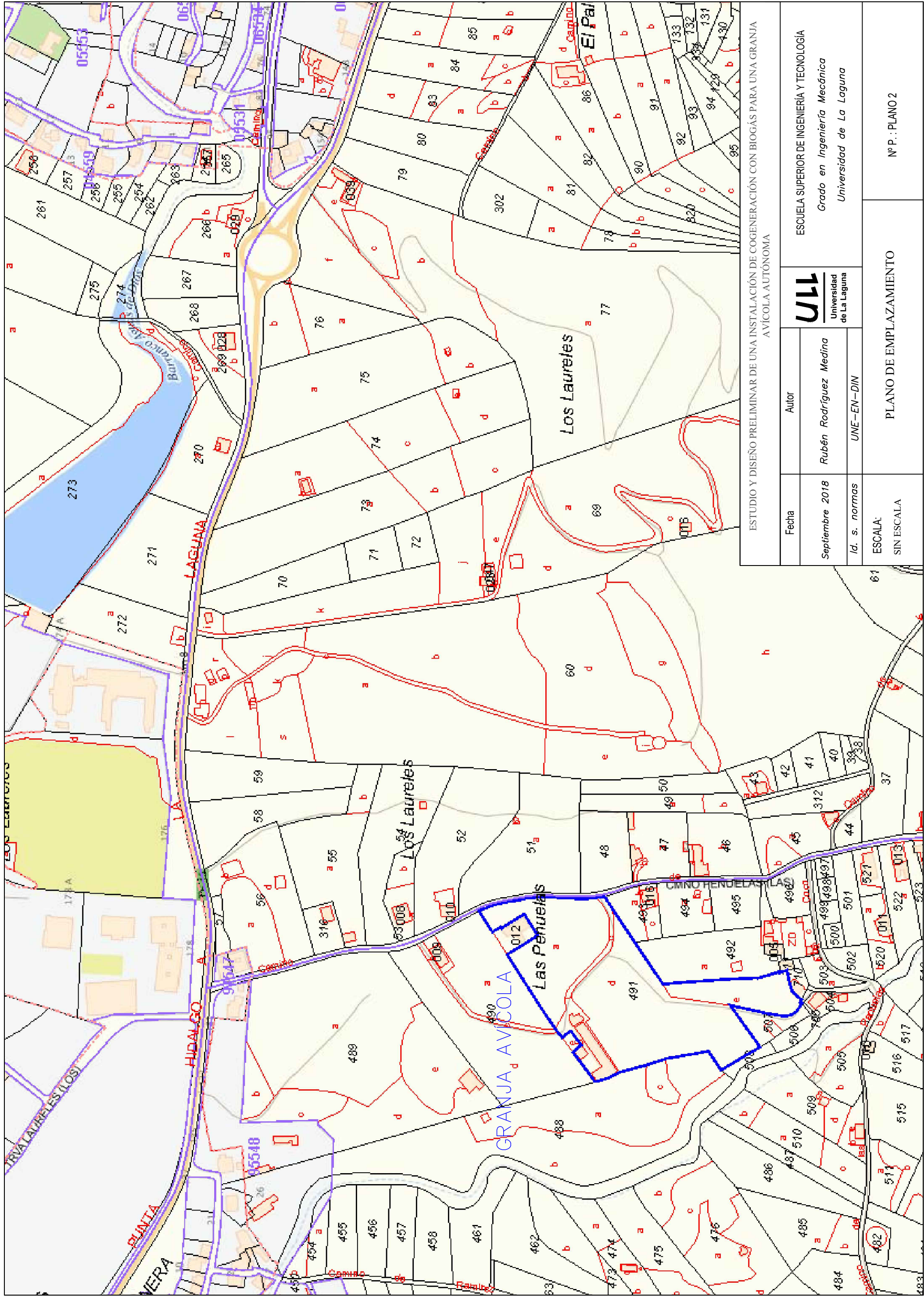
Municipio de Tegueste.
 El Palomar.
 TF-13. Camino de Las Peñuelas, 14

TENERIFE




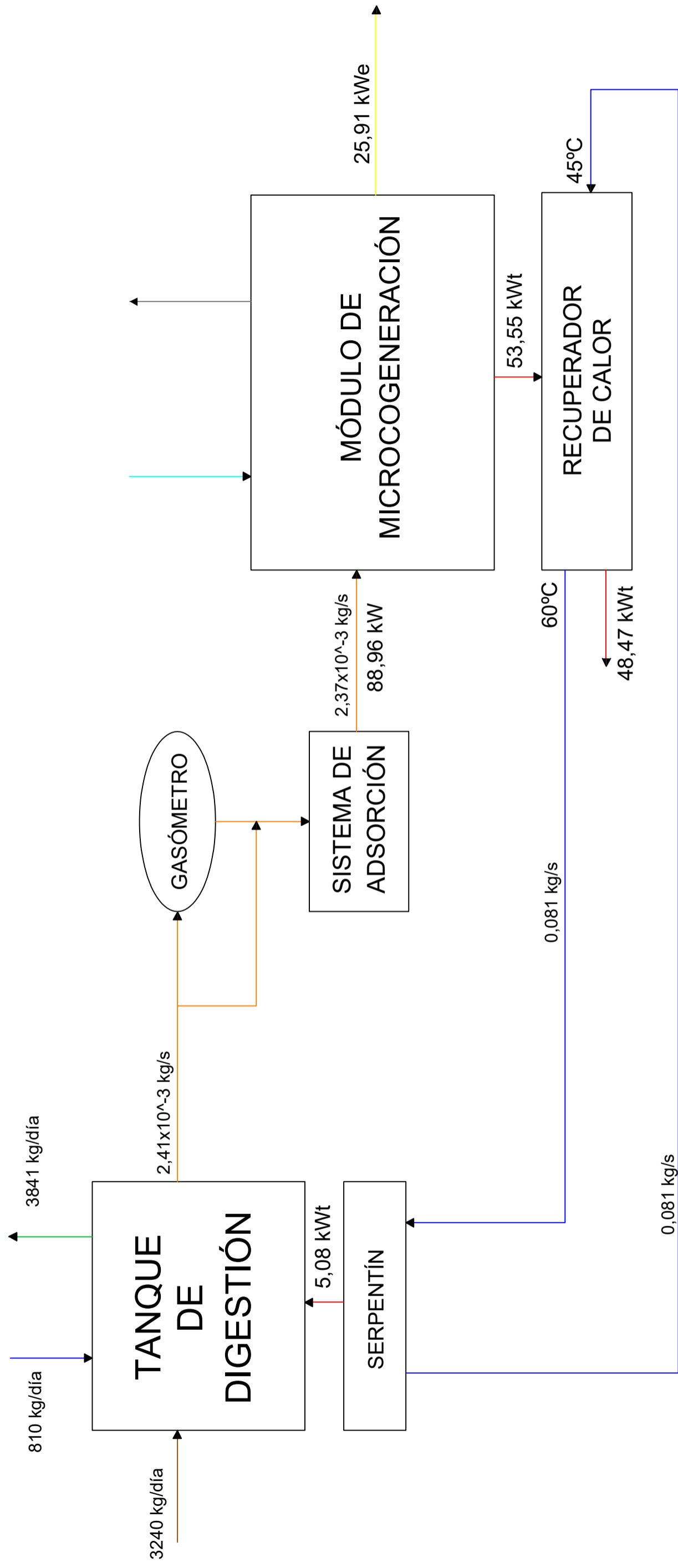
ISLAS CANARIAS

ESTUDIO Y DISEÑO PRELIMINAR DE UNA INSTALACIÓN DE COGENERACIÓN CON BIOGÁS PARA UNA GRANJA AVÍCOLA AUTÓNOMA			
Fecha	Autor		 ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA <i>Grado en Ingeniería Mecánica</i> <i>Universidad de La Laguna</i>
	Septiembre 2018	Rubén Rodríguez Medina	
ESCALA: SIN ESCALA	Id. s. normas	UNE-EN-DIN	PLANO DE SITUACIÓN Nº P.: PLANO 1



ESTUDIO Y DISEÑO PRELIMINAR DE UNA INSTALACIÓN DE COGENERACIÓN CON BIOGAS PARA UNA GRANJA AVÍCOLA AUTÓNOMA

Fecha	Autor	 Universidad de La Laguna	ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA Grado en Ingeniería Mecánica Universidad de La Laguna
Septiembre 2018	Rubén Rodríguez Medina		
Id. s. normas	UNE-EN-DIN		
ESCALA: SIN ESCALA	PLANO DE EMPLAZAMIENTO		Nº P.: PLANO 2



BIOMASA	—
AGUA	—
BIOGÁS	—
AIRE	—
CALOR	—
ELECTRICIDAD	—
DIGESTATO	—
GASES DE ESCAPE	—

ESTUDIO Y DISEÑO PRELIMINAR DE UNA INSTALACIÓN DE COGENERACIÓN CON BIOGÁS PARA UNA GRANJA AVÍCOLA AUTÓNOMA			
Fecha	Autor	E.S.I.C.I.	
Septiembre 2018	Rubén Rodríguez Medina	Grado Ingeniería Mecánica Industrial Universidad de La Laguna	
Id. s. normas	UNE-EN-DIN	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	
ESCALA: SIN ESCALA	ESQUEMA GENERAL DE LA INSTALACIÓN	Nº P.: PLANO 3	