

TECNOLOGÍA AMBIENTAL

Grupo de extracción de biogás

FUNDACIÓN MAYELA

ASOCIACIÓN PRODELVU

Autores:

Doña Fernández, Javier.
Santos Ruiz, Manuel.
Suárez Campos, Ramón.
Villalba, Patricio.

Tutor:

Lebrato, Julián.
Pérez Elvira, Sara.

Grupo TAR

Escuela Politécnica Superior

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2020



Grupo TAR.



Índice

Introducción	3
Biodigestor	3
Cálculos Biodigestor	5
Cálculos Purín	5
Cálculos Digestión Anaerobia	7
Pozo Digestor	8
Secadero.....	9
Molino Eólico.....	9
Creación del Molino.....	9
Datos técnicos.....	10
Diseño del rotor.....	13
Agitador	15
Dimensión Agitador	15
Diseño del Impulsor y Eje del Agitador.....	15
Diámetro del eje	17
Potencia Requerida para Agitación	18
Cálculos de Potencia para el Diseño de Julián.....	20
Acoplamiento de Bicicleta al Molino.....	20
Electricidad a partir del Molino.....	22
Referencias Bibliográficas	24

Introducción

A lo largo de este curso hemos estado trabajando en el desarrollo de un biodigestor para su posterior implantación en Kimpese, para la obtención de energía a partir del metano generado, en paralelo también hemos desarrollado la obtención de energía a partir de un molino eólico.

Como inicio, las primeras cuatro sesiones de prácticas fueron sesiones teóricas en las que fuimos aprendiendo lo que era un digestor, como funcionaba, los parámetros en los que nos íbamos a basar y por último, los cálculos.

Biodigestor

El biodigestor consta de varias partes, las cuales iremos desarrollando a lo largo de su lectura, primeramente cuenta con un canal para la entrada de aguas residuales en la que se colocará una raqueta para retirar sólidos que pudiesen atascar el sistema, posteriormente se dejará una longitud de canal que funcionará como desarenador y justo antes de la alimentación al pozo digestor colocaremos una pletina metálica que funcionará de desengrasador, posteriormente tendremos el pozo digestor con un agitador impulsado por la fuerza del viento y finalmente tenemos un secadero para que se puedan manipular los fangos.

En primer lugar, partimos de un ganado que, inicialmente, iba a estar compuesto por unos 125 animales aproximadamente (cerdos, vacas, cabras, etc.). Esos animales generarían unos 500 kg de purín al día, que mezclándolo con el agua residual de la residencia Kimpese (se ha estimado que unos 2000 litros de agua) nos darían unos 2500 kg de purín al día que entran al biodigestor. Antes de entrar al biodigestor el purín pasará por una rejilla que realizará la función de filtro para que no entren sólidos no deseados al biodigestor.

Una vez el purín ya está introducido en el biodigestor lo siguiente que hemos calculado es la digestión anaerobia, que nos sirve para determinar el volumen del digestor y para obtener la cantidad de biogás y de metano que podemos obtener. Los parámetros de la digestión anaerobia en los que nos hemos basado han sido:

- Tiempo de residencia: 30 días.
- Tipo de digestor: CSTR.
- Relación altura/diámetro: 1.5.
- Porcentaje de metano en el biogás: 65%.
- Porcentaje de DQO eliminada: 30%.

A partir de estos datos hemos obtenido la altura y el diámetro del digestor, el volumen y la cantidad de metano y biogás que podemos producir al día. Los cálculos obtenidos son:

- Altura del digestor: 6 metros.
- Diámetro del digestor: 4 metros.
- Volumen del digestor: 75 metros cúbicos aproximadamente.
- Metano generado: 3833.55 litros/día.
- Biogás generado: 5897.77 l/día.

Tras realizar cálculos y analizarlos, las dimensiones del biodigestor eran muy grandes y, debido a que tampoco se preveía tener tantos animales como se pensó en un principio, decidimos volver a dimensionar el digestor. Los nuevos datos de altura y diámetro serían:

- Altura digestor: 7 metros. 6 metros serían ocupados por el purín y se dejaría 1 metro libre para que lo ocupe el gas generado en la digestión anaerobia.
- Diámetro digestor: 2 metros.
- Relación altura/diámetro: 3.5.

Una vez calculada la digestión anaerobia, lo único que quedaba por calcular era el motor de combustión a partir del cual íbamos a obtener la energía eléctrica mediante el biogás producido en el digestor. La idea era reutilizar un motor de un coche antiguo que estuviese en buen estado y que, a partir del biogás producido y acoplándole un alternador, obtener electricidad. También se pensó que, el agua que se utilizaría como refrigerante del motor podría reutilizarse puesto que, al refrigerar el motor que funciona a altas temperaturas, se obtiene agua caliente que puede utilizarse para diversas funciones. Como primera idea, pensamos en un motor diésel, pero descubrimos al poco tiempo que los motores diésel no se pueden adaptar para biogás, así que tuvimos que optar por buscar un motor de gasolina. Estos motores son más fáciles de reparar y de mantener que un motor diésel y se pueden adaptar a biogás, aunque no tendría el mismo rendimiento que con gasolina. Los cálculos del motor de combustión los hemos realizado basándonos en los siguientes parámetros:

- PCI metano: 10.34378 kWh/m³.
- Flujo de combustible que demanda el motor: 0.6 Kg biogás/h.

Con estos parámetros hemos podido calcular la electricidad y el calor que podemos obtener del motor a partir del biogás:

- Electricidad: 193.63 kWh/día; 8.07 kW.
- Calor: 322.73 kWh/día; 13.45kW.

Con esto terminarían los cálculos del biodigestor.

Cálculos Biodigestor

Cálculos Purín

En los cálculos del purín hemos empezado por establecer nuestros parámetros de diseño, que vienen indicados en la siguiente tabla:

Parámetros de Diseño Purín Generado			
	Cerdo	Cabra	Unidades
Animales	125	0	animales
Producción purín	4	1	kg purín/animal*día
sólidos volátiles en purín	0,5	0,5	kg SV/kg purín
DQO en purín	0,07302	0,14505	kg DQO/kg purín
Ratio orgánico/total	65	90,04	%SV/ST
Agua residual	100		L/personas*día
Población equivalente	20		personas
Concentración deseada en alimentación	0,1		kg SV/kg purín

Estimamos el número de animales en 125 cerdos y 0 cabras para obtener aproximadamente 500 kg de purín animal al día, pero podría equilibrarse de cualquier otra manera. Según bibliografía consultada, los cerdos producen 4 kg de purín al día, con una concentración de 0.5 kg de sólidos volátiles por kg de purín generado. La DQO en el purín y el ratio orgánico/total lo obtenemos consultando bibliografía (indicada en la última página). Julián nos dio el dato de que se produciría un agua residual de 100 litros por persona al día y que la población de la academia es de unas 20 personas, por lo que tendremos 2000 litros de agua residual al día, que se mezclará con el purín generados por los animales, limpiando el establo y conformando el purín que va a entrar en el digestor. Este purín será ya de una concentración menor ya que está mezclado con agua. Los cálculos de purín generado serían:

$$\begin{aligned}
 \text{Purín Generado} &= \left(n^{\circ} \text{cerdos} * \frac{\text{kg purín}}{\text{cerdo} * \text{día}} \right) + \left(n^{\circ} \text{cabras} * \frac{\text{kg purín}}{\text{cabra} * \text{día}} \right) \\
 &= \left(125 \text{ cerdos} * \frac{4 \text{ kg purín}}{\text{cerdo} * \text{día}} \right) + \left(0 \text{ cabras} * \frac{1 \text{ kg purín}}{\text{cabra} * \text{día}} \right) = 500 \frac{\text{kg purín}}{\text{día}}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{SV Generado} &= \left(n^{\circ} \text{cerdos} * \frac{\text{kg purín}}{\text{cerdo} * \text{día}} * \frac{\text{kg SV}}{\text{kg purín}} \right) \\
 &+ \left(n^{\circ} \text{cabras} * \frac{\text{kg purín}}{\text{cabra} * \text{día}} * \frac{\text{kg SV}}{\text{kg purín}} \right) \\
 &= \left(125 \text{ cerdos} * \frac{4 \text{ kg purín}}{\text{cerdo} * \text{día}} * \frac{0.5 \text{ kg SV}}{\text{kg purín}} \right) \\
 &+ \left(0 \text{ cabras} * \frac{1 \text{ kg purín}}{\text{cabra} * \text{día}} * \frac{0.5 \text{ kg SV}}{\text{kg purín}} \right) = 250 \frac{\text{kg SV}}{\text{día}}
 \end{aligned}$$

DQO Generado

$$\begin{aligned}
 &= \left(n^{\circ} \text{ cerdos} * \frac{\text{kg purín}}{\text{cerdo} * \text{día}} * \frac{\text{kg DQO}}{\text{kg purín}} \right) \\
 &+ \left(n^{\circ} \text{ cabras} * \frac{\text{kg purín}}{\text{cabra} * \text{día}} * \frac{\text{kg DQO}}{\text{kg purín}} \right) \\
 &= \left(125 \text{ cerdos} * \frac{4 \text{ kg purín}}{\text{cerdo} * \text{día}} * \frac{0.07302 \text{ kg DQO}}{\text{kg purín}} \right) \\
 &+ \left(0 \text{ cabras} * \frac{1 \text{ kg purín}}{\text{cabra} * \text{día}} * \frac{0.14505 \text{ kg DQO}}{\text{kg purín}} \right) = 36.51 \frac{\text{kg SV}}{\text{día}}
 \end{aligned}$$

Con esto terminaríamos los cálculos del purín. Indicamos los resultados obtenidos en una tabla:

Cálculos de Purín Generado

	Valor	Unidades
Purín Generado	500	kg purin/día
SV generado por animal	2	kg SV/día*animal
SV generado total	250	kg SV/día
DQO generado	36,51	kg DQO/día
Agua residual necesaria	2000	L/día
Ratio agua/purín	4	L agua/kg purín
Alimentación de purin	2500	kg purin/día
Alimentación de SV	250	kg SV/día

Cálculos Digestión Anaerobia

A continuación, continuaríamos con los cálculos de la digestión anaerobia. Comenzamos estableciendo en indicando en una tabla los datos que hemos seleccionado como parámetros de digestión anaerobia:

	Valor	Unidades
Tiempo de Residencia	30	días
Carga Orgánica Aceptable	6	kg SV/m ³ *día
Tipo de Digestor	CSTR	
Relación Altura/Diámetro	1,5	
Producción de metano	0,28	m ³ CH ₄ /kg SV
% CH ₄ en el biogás	65	% CH ₄
Caudal	2,5	m ³ /día
SV Generado	250,0000	Kg SV/día
% DQO Eliminada	30	%
DQO Generado	36,51	Kg DQO/día
DQO Eliminado	10,9530	Kg DQO eliminado

El tiempo de residencia lo hemos establecido en 30 días a partir de bibliografía consultada, así como la carga orgánica aceptable (6 kg SV/m³ día), el tipo de digestor que vamos a utilizar será un digestor CSTR. Hemos establecido una relación de altura/diámetro igual a 1.5 tras consultarlo con Sara y Julián. La producción de metano la hemos establecido en 0.28 m³ CH₄/kg SV, teniendo una concentración de 0.65 m³ de metano por cada m³ de biogás. El caudal está calculado en la parte del purín, siendo 2.5 m³ purín/día y por último, hemos establecido un porcentaje de DQO eliminada de un 30% tras consultar bibliografía. Comenzamos ahora con los cálculos realizados de la digestión anaerobia:

$$Volumen = THR * Q = 30 \text{ días} * 2.5 \frac{m^3}{\text{día}} = 75 m^3$$

Hemos establecido una altura de 6 metros y, mediante la relación altura/diámetro hemos obtenido un diámetro de 4 metros.

$$Volumen = \frac{\pi}{4} * altura * diámetro^2 = \frac{\pi}{4} * 6 m * 4^2 m^2 = 75.3982 m^3$$

Que da un valor aproximadamente igual al calculado mediante el THR y el caudal. Como explicamos anteriormente, el diámetro, la altura y la relación altura/diámetro la tuvimos que cambiar, adoptando los siguientes valores:

- Altura = 7 metros.
- Diámetro = 2 metros.
- Relación altura/diámetro = 3.5.

Los últimos cálculos que hemos realizado en este apartado han sido el metano y el biogás generado en el digester por día:

$$\begin{aligned}
 CH_4 \text{ Generado} &= DQO \text{ Eliminado} * 350 \frac{L CH_4}{kg DQO \text{ Eliminado}} \\
 &= (36.51 \frac{kg DQO}{dia} * \frac{0.30(kg DQO \text{ eliminado})}{kg DQO} * 350 \frac{L CH_4}{kg DQO \text{ Eliminado}} \\
 &= 3833.55 \frac{L CH_4}{día} \\
 Biogás \text{ Generado} &= \frac{CH_4 \text{ Generado}}{0.65} = \frac{3833.55 L CH_4}{0.65} = 5897.7692 \frac{L \text{ biogás}}{día}
 \end{aligned}$$

Con estos cálculos terminamos la parte de la digestión anaerobia.

Pozo Digestor

Hemos decidido realizar el digester mediante un pozo, así el gasto de material será menor y será más fácil ejecutar dicho digester cavando en la tierra que haciendo la estructura, ya que sería más complicado realizar una estructura de 7 metros de alto y 2 metros de diámetro en vertical hacia arriba. De los 7 metros de profundidad que tiene el pozo, 6 metros estarán ocupados por el purín y 1 metro se usará como cámara de aire para los gases producidos. Los purines de los animales se mezclarán con agua residual de la residencia y se mezclará todo formando 2500 de purín diario de muy alta concentración debido a la poca disponibilidad de agua en la zona. La introducción de estos residuos se hará por la parte baja del pozo digestor, a unos 6.6 metros de profundidad aproximadamente y en dirección perpendicular a la altura del pozo, que favorezca la agitación del biodigestor.

Como hemos explicado en el apartado anterior, el tiempo de residencia del purín en el digester será de 30 días. Este pozo digestor está agitado mediante un molino eólico el cual se detallará más adelante, durante la digestión anaerobia se produce dióxido de carbono y metano, este último es de gran interés y es un combustible usado en Europa bajo el nombre de gas ciudad o gas natural, este gas será extraído del pozo digestor y alimentado a las viviendas de la vecindad.

La salida del gas se producirá en la misma tapa del pozo y la otra salida que tendrá el pozo será por la que saldrán los desechos de la digestión anaerobia, esta salida se realizará a una profundidad aproximada de 1.2 metros, situándose un poco por debajo del límite a donde llega el purín.

Los residuos saldrán a un secadero cuyo objetivo será transformar los desechos de la digestión anaerobia en abono, como explicaremos más adelante. Aquí

finalizaría el apartado del pozo digestor, en el siguiente apartado se explicará el diseño del secadero.

Secadero

El secadero será una superficie que estará a posteriori del pozo digestor que servirá para eliminar el excedente de agua (para riego) y posibilitar la manipulación de los fangos, el secadero se hará ensanchando el canal de salida del digestor hasta 1 metro y a los 3 metros de longitud se colocaran piedras de tamaño medio y tras estas piedras otros áridos de menor tamaño, estos áridos servirán de filtro para los fangos, luego se extienden los fangos para mejorar su secado y una vez secos, están listo para su manipulación (compostaje), este secadero necesitará un techo para que los días de lluvia también pueda funcionar, el techo será una capa de hojas impermeables con 3 metros de ancho y 5 metros de largo.

Molino Eólico

Creación del Molino

Como acordamos al principio de la asignatura hemos buscado trabajar con la ingeniería más económica posible debido a las dificultades presentes en la zona que estamos trabajando (KIMPESE), por tanto, hemos optado por realizar un molino con la mayor cantidad de materiales reciclados.

Para la creación del molino se ha pensado en un soporte de unos 2 metros de altura realizados con madera o bambú, materiales fáciles de encontrar en el poblado. Por otro lado, como Julián nos pidió que reutilizásemos bidones típicos para almacenar petróleo o aceite, hemos optado por la realización de un molino tipo Savonius.

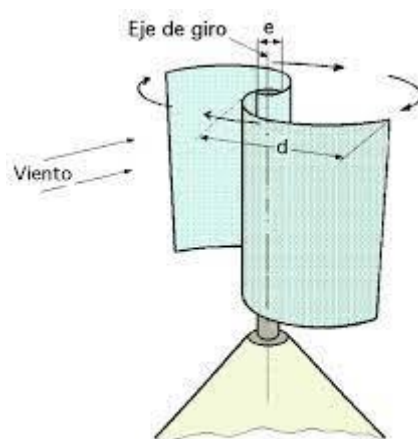


Fig IV.16.- Aerogenerador Savonius

Hemos preguntado sobre las posibles dimensiones de los bidones para la creación del molino, pero no hemos obtenido respuesta así que hemos cogido los datos de unos bidones genéricos de dimensiones bastante comunes. Los

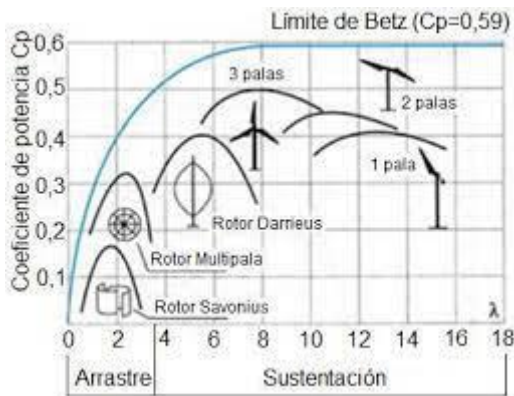
cálculos del molino se pueden cambiar fácilmente en un futuro puesto que los hemos realizado en Excel.

Datos técnicos

Homologación	UN
Certificado 1	1H2/X318/S/...
Volumen (l)	220
Material	HDPE
Altura exterior (mm)	978
Diámetro exterior (mm)	590
Rango térmico de empleo máx. (°C)	70
Peso (kg)	7.5

Para elegir el diseño de nuestro molino hemos considerado que lo más importante va a ser la potencia que podemos sacar de este y como afecta esto en el diseño, así que un parámetro que influye directamente sobre todo esto es la velocidad específica del viento λ . Esta variable sirve para indicar la velocidad de rotación de las palas respecto a la velocidad del viento, dado que la

velocidad angular del rotor no aporta la suficiente información por sí sola al no tener en cuenta la velocidad del viento que impulsa al rotor.



En cuanto al rotor Savonius, es conocida su menor eficiencia respecto a otros tipos de rotores. Su mayor eficiencia varía según los estudios realizados con este tipo de rotores entre el 10% y el 30%, y esta eficiencia se alcanza con velocidades específicas entre 0,5 y 1. Estos rangos de velocidades específicas y eficiencias son muy amplios debido a que no existe un consenso firme en estos valores, ya que existen diferentes rotores Savonius, como por ejemplo el tradicional de 2 palas, con 3 palas, el multipala, con 2 o más pisos de orientación angular diferente y helicoidales, etcétera. Además, sus coeficientes de potencia pueden variar según el diámetro D del rotor, la altura H , la relación entre ambos y el espaciado entre palas.

A continuación, se muestra una imagen con diferentes tipos de rotores Savonius:

A continuación, se muestra una imagen con diferentes tipos de rotores Savonius:

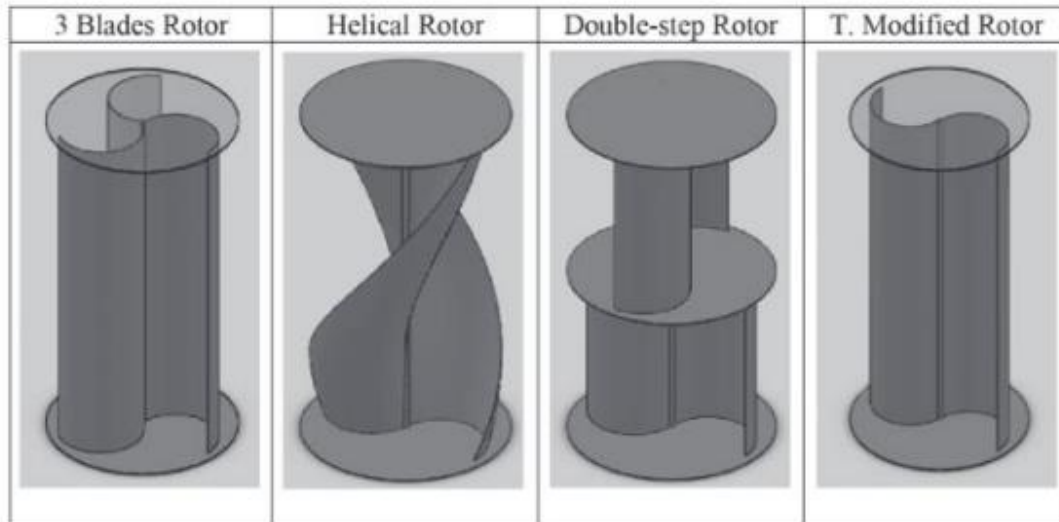
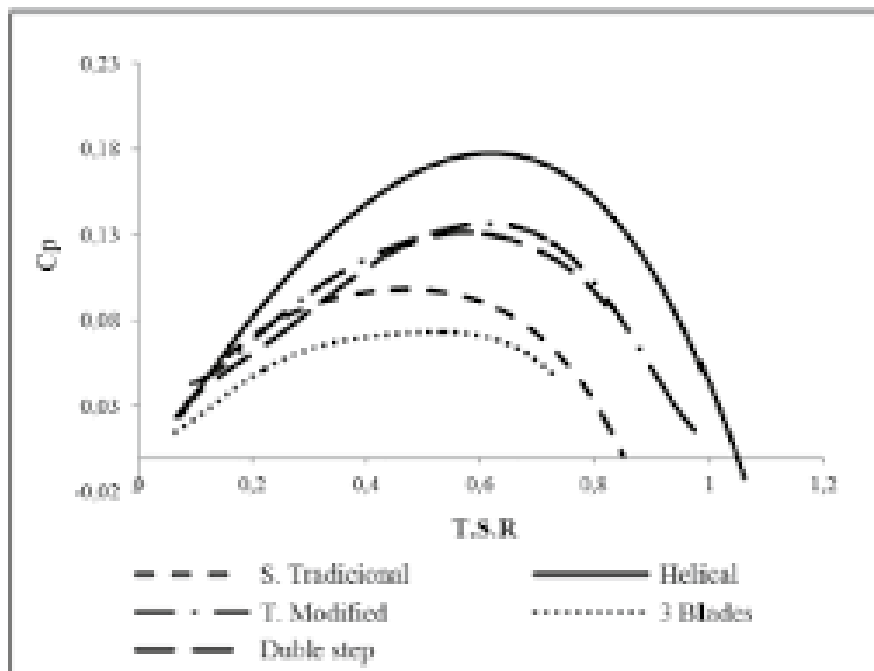


Ilustración 10 - Diferentes tipos de rotores Savonius

Según un estudio realizado con modelos computacionales de diferentes rotores Savonius (Argemiro Palencia Díaz, 2014), el coeficiente de potencia C_p dependiendo de la velocidad específica del rotor (TSR) se puede extraer de la gráfica que se indica a continuación:



Se puede observar que el tipo de rotor más eficiente es el helicoidal, siendo éste el más complejo de fabricar por la forma ondulada de las palas. El rotor con dos pisos ("double step") presenta un coeficiente de potencia mayor que

los rotores tradicionales de 2 y 3 palas. Este coeficiente es de 0,13 con una velocidad específica de 0,6. La ilustración anterior indica que es más recomendable para este proyecto diseñar un rotor de dos pisos que uno tradicional o uno de 3 palas.

Diseño del rotor

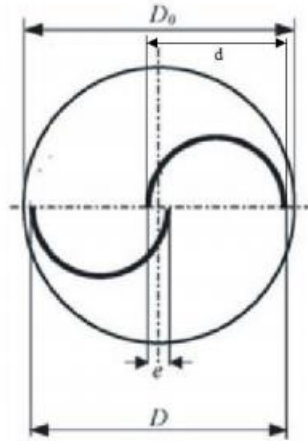


Ilustración 20 - Vista desde arriba de un rotor Savonius

Donde D_0 es el diámetro del rotor, d es el diámetro del barril y e es el espaciado entre las palas. Existe un valor óptimo para el espaciado e entre palas que maximice la potencia del rotor Savonius. Este valor debe ser una sexta parte del diámetro d de una pala.

Una vez establecido el tipo de molino y su diseño vamos a buscar los vientos que existen en esas zonas y posteriormente empezaremos a calcular la potencia y las revoluciones por minuto que podemos sacar.

Hemos observado que la velocidad del viento más común es de 1,6 m/s.

Por otro lado, hemos calculado la posible densidad del aire en aquella zona mediante una calculadora psicrométrica

<https://personal.us.es/jfc/PropiedadesDeFluidos/>

En ella hemos introducido la temperatura más habitual y la humedad relativa más habitual de Kimpese y nos ha salido una densidad del aire de unos 1,143 kg/m³.

Ahora mostramos las fórmulas utilizadas:

- e (espacio entre palas) = $d/6$
- D (diámetro rotor) = $2d - e$
- A (área de barrido) = $d \cdot H$
- T_v (par viento) = $(\rho \cdot A \cdot D \cdot v^2) / 4$

- $Tr \text{ (par rotor)} = 0,22 \cdot Tv$
- $w \text{ rotor} = (2 \cdot \lambda \cdot v) / D$
- $\text{Fuerza en rotor} = (\rho \cdot A \cdot v^2) / 2$
- $\text{Potencia mecánica} = (\rho \cdot \text{Coeficiente Betz} \cdot 2(\text{plantas}) \cdot A \cdot r^2 \cdot v^3) / 2$
- El límite de Betz indica que una turbina no puede aprovechar más de un 59.3 % de la energía cinética del viento
- $\text{Coeficiente Betz} = 0,593$

Excel con cálculos:

	DATOS DE ENTRADA	Unidades			DATOS DE SALIDA			
Diámetro barril (d)	0,59	m			Espacio entre aspas (e)	0,098333	m	
Altura barril (H)	0,978	m			Diámetro rotor (D)	1,081667	m	
Velocidad específica (λ)	0,6				Área de barrido (A)	1,05787	m ²	
Densidad aire	1,143	kg/m ³			Par viento (Tv)	0,837051	Nm	
Velocidad viento (V)	1,6	m/s			Par rotor (Tr)	0,184151	Nm	
Velocidad máxima	5,5	m/s				rad/s	rev/s	rpm
Coeficiente de Betz	0,593				velocidad w rotor	1,775039	0,282505	16,95033
					potencia del viento	1,468464		
					Par viento máximo	9,890935	Nm	
					Par rotor máximo	2,176006	Nm	
					Fuerza en el rotor	1,547706	N	
					Fuerza máxima en el rotor	9,890935	N	
					potencia del viento	2,56949	W	

Una vez realizado el diseño del molino y los cálculos correspondientes pasamos a la creación del sistema de agitación.

Agitador

Dimensión Agitador

Hemos estado indagando sobre la relación entre los pozos digestores y los agitadores, pero solo encontramos estas relaciones para pozos donde el diámetro del pozo es igual a la altura del líquido (H/D), así que hemos decidido que vamos a coger las relaciones que más coincidían de todos los diseños que hemos visto. Estas dimensiones son:

-Separación del impulsor con respecto del fondo(C): Diámetro pozo/3

-Separación entre impulsores: $H/3$

-Debido a que la relación $H/D = 6/2 = 3 > 2$, se recomienda que se utilicen más de 1 impulsor. Lo he visto en varios documentos, pero no lo encuentro, se puede ver algo sobre esta decisión en la página 28 de 76 de este TFG:

https://ddd.uab.cat/pub/tfg/2016/168452/TFG_AFOR_v11.pdf

En él dice: “En un principio, como la relación entre diámetro y altura del reactor es inferior a 2, solo habría un agitador, sin embargo, como se trata de un reactor bifásico, la necesidad de una buena mezcla es sumamente importante”.

Diseño del Impulsor y Eje del Agitador

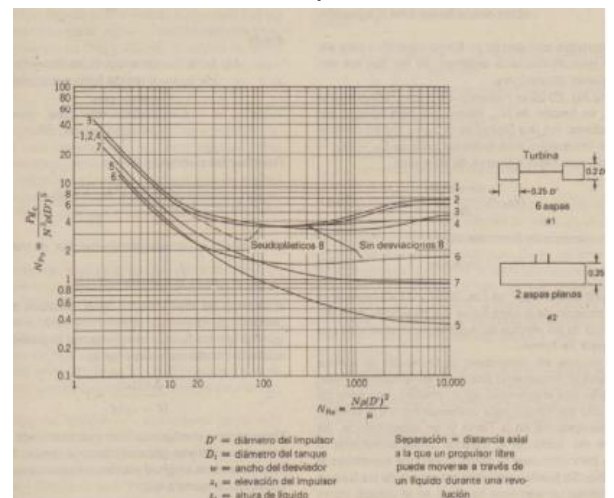
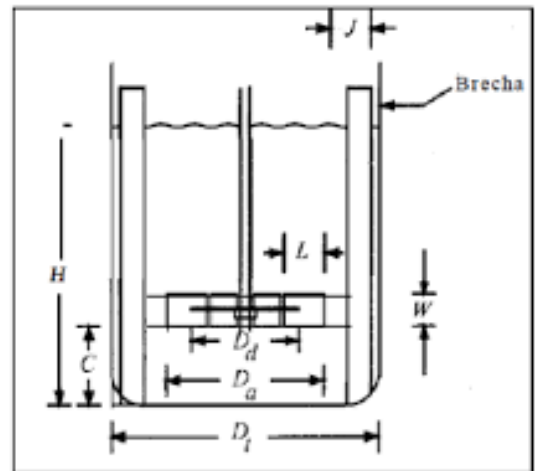
Se ha optado por un impulsor de palas rectas.

Diámetro del impulsor: El diámetro del impulsor de turbina de disco de aspas planas se encuentra normalmente entre 0.3 y 0.6 del diámetro del tanque.

Debido a que entre la potencia consumida por el impulsor y el diámetro de éste existe una proporción a la quinta potencia, se escoge el menor diámetro posible (multiplicamos por 0.3).

Altura aspas: Altura palas rectas = $0.25 \cdot \text{diámetro impulsor}$ (foto de la derecha).

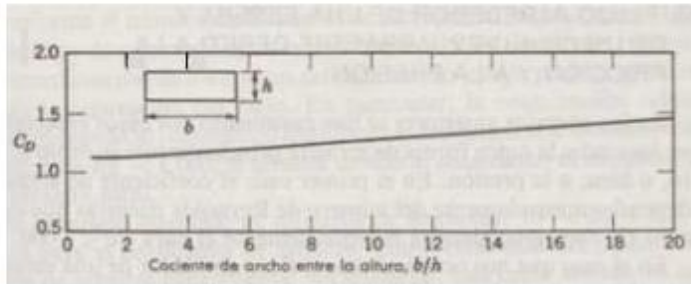
Espesor de la pala: Vamos a diseñarlo en función de las fuerzas que actúan sobre la pala. Se toma en cuenta la fuerza que ejerce el fluido sobre la zona de contacto del fluido y aspa, se utiliza la siguiente fórmula:



$$F_D = \frac{1}{2} * C_D * \rho * v^2$$

Donde C_D se denomina coeficiente de arrastre y es una fracción de las dimensiones del aspa, V es la velocidad lineal del aspa y A es el área de contacto entre la pala y el fluido.

Para determinar C_D , primeramente, se debe calcular la relación entre el largo y el alto del aspa, y utilizar la siguiente gráfica.



Para una relación de $b/h = 0.6/0.15 = 4$, tenemos que $C_D = 1.3$.

Vamos a suponer que el impulsor gira con velocidad angular constante $w = 16\text{rpm}$, la velocidad lineal de un diferencial de área varía con el radio, entonces es necesario replantear la ecuación en función del radio:

$$F_D = \frac{1}{2} * C_D * \rho * (r^2 * w^2) * (0,082r)$$

Si se multiplica a ambos lados de la ecuación por dr y se integra entre los límites $r_1=0$ (eje del agitador) y $r_2 = \text{diámetro impulsor}/2$, se obtiene el valor del momento con respecto al eje del agitador.

$$\int_{r_1}^{r_2} F_D * dr = \int_{r_1}^{r_2} \frac{1}{2} * C_D * \rho * (r^2 * w^2) * (0,082r) * dr$$

$$M_o = \frac{1}{2} * C_D * \rho * w^2 * 0,082 * \int_{r_1}^{r_2} r^3 dr$$

$$M_o = 0,5 * 1,3 * \left(\frac{1020\text{kg}}{\text{m}^3}\right) * (16,9\text{rpm})^2 * 0,082 * 0,002025\text{m}^4$$

$$M_o = 31,63\text{Nm}$$

Se reemplaza este momento en la fórmula de la flexión, considerando un factor de seguridad $n=2$.

$$S_y = \frac{n * M_o * y}{I} = \frac{n * M_o * \frac{e}{2}}{\frac{W * e^3}{12}}$$

$$e = \sqrt{\frac{6n * M_o}{S_y * W}}$$

$$e = 0,001125 \text{ m}$$

Para facilitar la fabricación buscaremos que las palas tengan un espesor de unos 2cm.

Hemos buscado el límite elástico del bambú:

Tenemos que $S_y = 203.87 \text{ Kg/cm}^2 = 1999,28 \text{ MPa}$

Diámetro del eje

Vamos a considerar que el eje del agitador solo está sometido a torsión y en este caso el esfuerzo cortante por torsión es casi uniforme. Utilizamos la siguiente ecuación del eje:

$$D_e = \left[\frac{32n}{\pi} \sqrt{\frac{3}{4} \left[\frac{T}{S_y} \right]^2} \right]^{\frac{1}{3}}$$

$$D_e = 0,00267 \text{ m}$$

Vemos que para el eje es válido cualquier diámetro mayor de 2,67 cm, así que cualquier bambú que tenga un diámetro mayor que este será válido.

EXCEL RESUMEN DE TODO LO CÁLCULADO

DATOS DE ENTRADA		UNIDADES			DIMENSIONADO AGITADOR		UNIDADES
Diámetro pozo (Dp)	2	m			Diámetro impulsor (di)	0,6	m
Altura agua pozo	6	m			Altura aspas relacion ancho y largo de la pala	4	
material del agitador	bambú				CD(tabla)	1,3	
número de impulsore	3				Momento generado por la fuerza de arrastre	31,630693	Nm
Módulo de fluencia	1999,282	Mpa			espesor impulsor (e)	0,001125	m
Coefficient e de seguridad (n)	2				Diámetro del eje (de)	0,0026778	m
Densidad del fluido	1020	kg/m ³			separación del impulsor y fondo del pozo	0,6666667	m
Integral	0,002025				Separación entre impulsore s (H3)	2	m
$\int_0^{0,3} r^3 dr$							
Par	2,176006	Nm					

Potencia Requerida para Agitación

En estos cálculos lo que vamos a comprobar si la potencia obtenida en el molino es suficiente para la agitación.

Primero vamos a realizar los cálculos para las dimensiones generales que habíamos encontrado del agitador, que en nuestro caso sería un diámetro del impulsor D=0,6m ya que así nos sale una potencia para agitar menor y luego calculamos la potencia necesaria para poder agitar con las dimensiones que nos dijo Sara y Julián que sería un diámetro del impulsor D=1m.

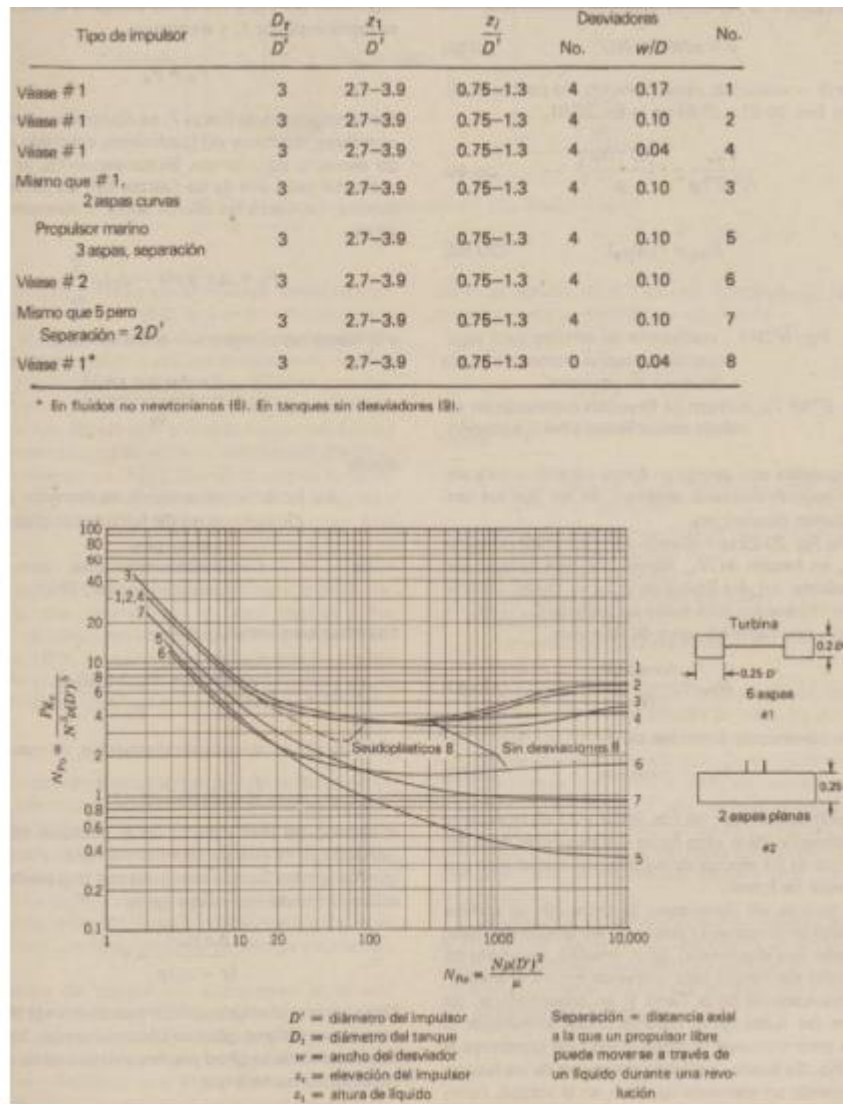
Vamos a suponer que las revoluciones necesarias para la agitación son algo menores a las obtenidas gracias a la fuerza del viento $w_{rotor} = 15 \text{ rpm} = 0.25 \text{ rev/s}$.

Como dijo Sara en temas de reología el lodo es pseudoplástico, su viscosidad dinámica se puede considerar de 0,0046kg/ms y su densidad es del orden de 1020 kg/m³. Calculamos el número de Reynolds:

$$N_{RE} = \frac{D^2 * N * \rho}{\mu} = \frac{0.6^2 m * \frac{0.25 rev}{s} * 1020 kg/m^3}{0.0046 Kg/ms} = 19956,52$$

Siendo D el diámetro del impulsor, N el número de revoluciones, ρ la densidad del fluido y μ la viscosidad dinámica.

Con esto sacamos el número de potencia de la siguiente gráfica:



Hemos supuesto 2 palas planas para el diseño del agitador, por tanto, la curva que debemos de mirar en la gráfica es la 6, obteniendo un $N_{PO} = 1,8$

Con el nº de potencia podemos sacar la potencia necesaria para agitación.

$$N_{PO} = \frac{P \cdot gc}{N^3 \cdot \rho \cdot D^5} \rightarrow$$

$$\rightarrow P = \frac{N_{PO} \cdot N^3 \cdot \rho \cdot D^5}{gc} = \frac{1,8 \cdot \left(\frac{0,25 \text{ rev}}{s}\right)^3 \cdot 1020 \text{ kg/m}^3 \cdot (0,6 \text{ m})^5}{1 \text{ kgm/Ns}^2} = 2,23 \text{ W}$$

$$P_{\text{diseño}} = \frac{P}{0,99 \cdot 0,83} = 2,71 \text{ W}$$

Vemos que la potencia de diseño necesaria para agitar $P_{\text{diseño}}=2,71 \text{ W}$ es muy similar a la potencia obtenida debida a la energía cinética del viento $P_{\text{viento}}=2,56 \text{ W}$. Por tanto, con la pequeña ayuda del mecanismo de la bici para

que los impulsores comiencen a girar y también a la ayuda del flujo que entra por debajo del pozo biodigestor se puede realizar agitación.

Cálculos de Potencia para el Diseño de Julián

Hacemos lo mismo, pero en este caso lo que varía es que el diámetro del impulsor $D=1\text{m}$.

Calculamos el número de Reynolds:

$$N_{RE} = \frac{D^2 * N * \rho}{\mu} = \frac{1^2 \text{m} * \frac{0.25 \text{rev}}{\text{s}} * 1020 \text{kg/m}^3}{0.0046 \text{Kg/ms}} = 55434,78$$

Miramos la gráfica para sacar el Número de potencia y obtenemos $N_{PO} = 1,8$

$$N_{PO} = \frac{P * gc}{N^3 * \rho * D^5} \rightarrow$$

$$\rightarrow P = \frac{N_{PO} * N^3 * \rho * D^5}{gc} = \frac{1,8 * \left(\frac{0.25 \text{rev}}{\text{s}}\right)^3 * 1020 \text{kg/m}^3 * (1\text{m})^5}{1 \text{kgm/Ns}^2} = 28,68\text{W}$$

$$P_{\text{diseño}} = \frac{P}{0,99 * 0,83} = 34,91 \text{KW}$$

En este caso la potencia necesaria para agitar $P_{\text{diseño}} = 34,91\text{KW}$, es mucho mayor que la potencia obtenida por la energía cinética del viento $P_{\text{viento}} = 2.54\text{KW}$, por lo que con este diseño no serviría de nada el molino.

Acoplamiento de Bicicleta al Molino

En este apartado vamos a calcular la fuerza necesaria para mover las palas del biodigestor acoplado una bicicleta al eje del molino para que, a falta de viento, se pueda seguir agitando el digestor. Para comenzar vamos a establecer los datos de partida:

- Velocidad de rotación de las palas del biodigestor: $n_3 = 20 \text{rpm} = 2,094 \text{rad/s}$.
- Número de dientes del engranaje del eje: $Z_3 = 24$ dientes.
- Diámetro del engranaje del eje: $d_3 = 2,20 \text{m}$.
- Número de dientes del engranaje de la rueda vertical: $Z_2 = 10$ dientes.
- Diámetro de la rueda vertical: $d_2 = 0,50 \text{m}$.

Mediante la ecuación de relación de engranajes:

$$n_2 Z_2 = n_3 Z_3$$

Se obtiene que la velocidad de rotación de la rueda vertical es: $n_2 = 48 \text{rpm} = 5,027 \text{rad/s}$.

La rueda vertical está unida a otra rueda en forma de corona circular, la cual va a su vez conectada mediante una correa a otra rueda vertical, que se hará girar mediante unos pedales, como el mecanismo de una bicicleta convencional.

Diámetro de la rueda de la bicicleta: $d_1 = 0,40 \text{ m}$

Velocidad lineal de la bicicleta: $v = 5 \text{ km/h}$

Relación entre la velocidad angular y la lineal:

$$w = v/R$$

Se obtiene una velocidad angular: $w = n_1 = 3,47 \text{ rad/s} = 33,15 \text{ rpm}$

Usando la ecuación de relación de las correas:

$$n_2 d_2 = n_1 d_1$$

Se obtiene el diámetro de la rueda de la corona circular: $d_2 = 0,28 \text{ m}$

Potencia necesaria para rotar el eje del biodigestor: $P_3 = 34,91 \text{ W}$

Relación entre potencia y momento de inercia:

$$P_3 = M_3 w_3$$

Se obtiene un momento: $M_3 = 16,67 \text{ N/m}$

Relación entre el momento de inercia y la fuerza tangencial:

$$M_3 = F_3 R_3$$

Se obtiene una fuerza en el punto de contacto entre ambos engranajes de $F_3 = F_2 = 7,58 \text{ N}$

$$M_2 = F_2 R_2$$

Se obtiene un momento de la corona circular: $M_2 = 1,895 \text{ N/m}$

Ecuación de conservación de la potencia en correas:

$$P_2 = P_1$$

$$M_2 w_2 = M_1 w_1$$

Y sabiendo que $M_1 = F_1 R_1$

Se obtiene una fuerza en la rueda de la bicicleta de $F_1 = 13,726 \text{ N}$

La fuerza necesaria que se ha de aplicar en la rueda de la bicicleta es asumible para una persona que se ponga a pedalear, por lo que se podrá instalar este sistema como complemento a la instalación para que no se deje de agitar el biodigestor en el caso de que no haya viento suficiente para mover el molino.

Electricidad a partir del Molino

A partir de la idea de construir un molino con la función de agitar el contenido del biodigestor surgió la idea de obtener electricidad a partir del movimiento de las aspas de dicho molino. Se puede obtener electricidad del molino de diferentes formas:

La primera es conectando el eje de un motor de corriente continua al eje de las aspas del molino y, mediante el movimiento de estas, se produciría el movimiento del eje del motor de corriente continua, lo que produciría electricidad a partir de ciertas revoluciones por minuto.

La segunda es conectando un alternador de un coche que esté en una chatarrería, obteniendo dicha pieza de manera barata y reutilizándola. El acoplamiento del alternador al eje del molino se debería realizar mediante una cadena de engranajes o poleas que transformen las revoluciones de las aspas del molino en una cantidad mayor para obtener electricidad en el alternador, ya que el alternador no produce corriente eléctrica hasta que no se superan ciertas revoluciones por minuto.

Explicadas las dos formas de obtener electricidad a partir del movimiento de las aspas del molino surge el problema de que, en la República del Congo, donde se sitúa Kimpese, la velocidad del viento no es la suficiente como para mover las aspas del molino y obtener velocidad suficiente como para producir energía eléctrica. Una posible solución que se ha pensado es acoplar una bicicleta estática al eje del molino para que, en ausencia de viento, una persona pueda subirse y pedalear para obtener las revoluciones por minuto necesarias para producir electricidad, ya sea por un método o por otro.

Tras obtener la energía eléctrica hay dos opciones, una es conectar el alternador o el motor de corriente continua a una batería y almacenar la energía en dicha batería y la otra sería conectar el motor o el alternador directamente a la red de la academia para que la energía que se produzca se consuma directamente.

Aunque a priori la opción de almacenar la energía eléctrica producida en una batería puede parecer la más adecuada ya que se puede pensar que lo más cómodo y lo más útil es almacenar la energía que se produzca e ir consumiéndola conforme la vas necesitando, en nuestra opinión no sería la mejor ya que para ello se necesitaría una buena batería capaz de almacenar la energía que se produzca, que no tenga muchas pérdidas y eso podría resultar costoso y difícil de adquirir y además, en el montaje de la conexión, se requeriría un convertidor para transformar la corriente alterna que se produce en el motor o en el alternador en corriente continua ya que la batería se carga a través de corriente continua. Esto añadiría una mayor complejidad al montaje ya que hay que tener en cuenta que al principio, la idea era tan simple como aprovechar el movimiento de las aspas de un molino para generar energía eléctrica y al final

estamos construyendo un molino con una bicicleta acoplada al eje de las aspas para producir movimiento en caso de que no haya viento suficiente y en el conexionado necesitamos un convertidor de corriente alterna a corriente continua además de una batería. En nuestra opinión pensamos que sería mejor conectar directamente el alternador o el motor a la red de la academia e ir utilizando la energía eléctrica conforme se va produciendo, ya que además de simplificar el montaje, si no se genera suficiente electricidad con un alternador se podrían conectar más alternadores al eje del molino. Como no se espera que haya mucho viento por la zona tampoco se va a perder gran cantidad de energía eléctrica y cuando sea necesaria puede estar una persona pedaleando para obtener energía e ir consumiendo conforme se va produciendo. Es algo más tedioso que estar pedaleando un tiempo determinado y almacenar la energía en la batería, pero es mucho más simple y menos complejo de adquirir y mantener.

El problema que hemos encontrado con la solución del alternador de un coche antiguo es que puede dar una potencia de 12 vatios, lo que hace difícil la viabilidad del proyecto ya que con 12 vatios apenas alcanza para mantener encendido un alumbrado.

Referencias Bibliográficas

- Purín generado:

<https://www.gipuzkoa.eus/documents/2227195/2229002/ProyectoAnexo1.pdf/cb1c9e26-1d42-6af4-a694-2d765b627827>

- Cálculo de producción de metano y carga orgánica aceptable:

https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10737_Biomasa_digestores_07_a996b846.pdf

- Ratio orgánico:

https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/71857/48587893W_TFG_1473386_7190452810241282594269288.pdf?sequence=3

<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/11960/vero%20tesina.pdf?sequence=1>

http://oa.upm.es/45229/1/PFC_JOSE_IGNACIO_GIL_CORNIDE.pdf

- Purín ovejas:

<http://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>

<https://www.agenex.net/images/stories/deptos/los-residuos-ganaderos.pdf>

file:///C:/Users/ramon/Downloads/1243-Texto%20del%20art%C3%83_culo-2834-3-10-20210212.pdf

- Sólidos volátiles, sólidos totales, DQO:

http://www.ategrus.org/images/stories/energia/valorizacion/mgarcia_jpfsantos_Ir odriguez_12_MAY_2011.pdf

- Electricidad a partir del motor:

https://www.mapa.gob.es/es/ganaderia/temas/requisitos-y-condicionantes-de-la-produccion-ganadera/DOCBIOGASVersion21-09-2010_tcm30-110139.pdf

- Eficiencia térmica y demanda de combustible:

http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-56092008000200016

- Para la parte del alternador en el eje del molino hemos mirado muchos foros ya que hay muchas personas que tienen hecha la misma instalación que nosotros queremos hacer:

<https://debates.coches.net/discussion/36079/puede-un-alternador-servir-para-generar-corriente-para-la-casa>

<https://www.solarweb.net/forosolar/eficiencia-energetica/13116-ver-que-os-parece-mi-locura.html>

<http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/2152/P06-C118-T.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Dimensión de los bidones:

https://www.denios.es/tienda-online/bidon-de-plastico-azul-con-tapa-negra-ballesta-y-valvula-de-desgasificacion-220-litros/?gclid=Cj0KCQjwna2FBhDPArisACAEC_ViMI3CWSyyCaiy7Z5ZFQwsSxEHPpqS8rUKZ13ftYW5CXKo3XTLTV0aAo82EALw_wcB

- Cálculos del molino:

<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/131197/Diago%20-%20Dise%C3%B1o%20de%20un%20aerogenerador%20Savonius%20para%20uso%20dom%C3%A9stico.pdf?sequence=1>

- Vientos modelo Savonius:

https://www.meteoblue.com/es/tiempo/historyclimate/climatemodelled/kimpese-congo-democr%C3%A1tico_2314523

- Calculadora psicométrica:

<https://personal.us.es/jfc/PropiedadesDeFluidos/>

- Para diseñar los impulsores y el eje hemos utilizado el siguiente TFG:

<file:///C:/Users/ramon/Downloads/tesisagitador-160825021009.pdf>

- Límite elástico del bambú:

<https://huellasdearquitectura.wordpress.com/2015/10/14/las-propiedades-mecanicas-del-bambu/>