
**UTILIZACIÓN DEL PAPEL RESIDUAL PARA LA
ELABORACIÓN DE PELLETS Y SU USO COMO
BIOCOMBUSTIBLE:
ESTUDIO DE LA COBERTURA ENERGÉTICA EN
INSTITUCIÓN LA SALLE**



10/01/2023

~ÍNDICE~

➤ Justificación e introducción	2
➤ Objetivos	2
➤ Marco teórico	
- Normativa sobre el uso de combustibles domésticos y papel residual	3
- Estimación del papel residual generado en el colegio y PCI	4
- Energía consumida en la sección de Bachillerato de Institución La Salle en forma de gas	5
➤ Marco práctico	
- Producción de pellets y maquinaria elegida. Características de la biomasa elaborada.	6
- Ahorro energético potencial por el uso de los pellets elaborados.	9
- Cantidad de CO2 no emitido a la atmósfera.	9
- Dimensionado y características de la caldera.	10
- Instalación de la caldera, cuarto de biomasa y circuito.	11
➤ Evaluación económica	
- Inversión	11
- Amortización y análisis de viabilidad económica	12
➤ Resolución del proyecto	
- Conclusiones	14
- Próximas líneas de actuación	15
➤ Bibliografía	16
➤ Anexos	18

~Justificación e introducción~

A lo largo de los últimos años, hemos podido observar cómo nos estamos acostumbrando a consumir energía sin control y sin darnos cuenta del verdadero desgaste que producimos al planeta con cada uno de nuestros actos.

Por esto mismo, desde Institución La Salle buscamos ideas que permitan mitigar estos daños sin dar de lado el criterio económico y cumpliendo la normativa española y comunitaria al respecto.

Nuestro proyecto consiste en aprovechar el potencial energético del papel para darle un segundo uso una vez que lo hemos empleado para el fin que ha sido comprado. El papel lo transformamos en pellets que podremos usar en una caldera de biomasa.

En este trabajo analizamos si el proyecto es viable a nivel técnico y económico teniendo en cuenta factores como el papel residual generado en el centro, poder calorífico del papel, módulos de calefacción, consumo de gas para el calentamiento de los espacios, gastos de instalación, cobertura energética generada por los pellets, etc.



~Objetivos~

1. Buscar formas de reducir las emisiones de CO₂ a la atmósfera, principal responsable del efecto invernadero.
2. Reducir los gastos del colegio derivados del consumo de calefacción.
3. Valorar el uso de un residuo como es el papel residual como combustible energético.
4. Buscar alternativas a los combustibles fósiles para la producción de energía calorífica desde el punto de vista de la sostenibilidad ambiental.

5. Acercar trabajos reales a los estudiantes de tal forma que aprendan las fases que tiene un proyecto, toma de datos, legislación vigente, análisis de resultados y dificultades encontradas en el desarrollo.
6. Que los estudiantes realicen un trabajo interdisciplinar trabajando en grupo y coordinado entre las asignaturas de Física, Tecnología Industrial, Economía y Ciencias de la Tierra.


~Marco Teórico~

Normativa sobre el uso de combustibles domésticos y papel residual.

Atendiendo al *BOE (Boletín Oficial del Estado)*, para el correcto desarrollo del proyecto y ser capaces de poner en práctica el aprovechamiento del papel residual para la elaboración de pellets con el fin de proporcionar una cobertura energética al centro escolar Institución la Salle.

En primer lugar, una de las normativas con las que debemos ajustar el marco práctico del proyecto sería la Ley 5/2003, de 20 de marzo, de Residuos de la Comunidad de Madrid. que implica el régimen jurídico de la producción y gestión de los residuos, fomentando la reducción, su reutilización, y reciclado. Concretamente, se aplica el objetivo ñ el cual es promover la iniciativa privada en la implantación de instalaciones para la gestión de residuos. Esto se consolida con una ley anterior, 10/1998, de 21 de abril, que identifica como residuos los generados en los domicilios particulares, comercios, oficinas y servicios como es el caso del papel empleado.

En segundo lugar, se debe tener en cuenta Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados que permite calificar como operación de valorización la incineración de residuos domésticos mezclados sólo cuando ésta se produce con un determinado nivel de eficiencia energética, precisando por ello de unos primeros estudios en los que se detallan los resultados obtenidos y un análisis del posible ahorro energético que suponga.



Una tercera ley que se debe acatar es 78/2021, de 23 de marzo, por el que se modifica el Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios y en el que se ha incorporado la biomasa como medio energético producto de dichas instalaciones térmicas. Este decreto abarca desde el aprovechamiento de esta energía, su contabilización hasta un posible inviabilidad técnica y económica y la evaluación documentada y facilitada al propietario del edificio.

La ley última ley importante y que afecta al devenir del trabajo es la Ley 7/2022, del 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular, proponiendo como objetivo la gestión de residuos. Incluye un artículo específico en el que se recogen las medidas de prevención procedentes de la Directiva (UE) 2018/851, entre las que destacan la promoción de modelos de producción y consumo sostenibles y el diseño de productos que sean eficientes y duraderos en términos de vida útil, así como la reducción de la generación de residuos en el sector industrial.

También se tendrán en cuenta los límites marcados en el anexo II del Real Decreto 1042/2017, de 22 de diciembre al respecto de las emisiones de gases a la atmósfera para instalaciones de combustión medianas.

Finalmente, cabe mencionar que dichas leyes son mencionadas en una guía de valoración de los residuos para la eficiencia y ahorro energético del gobierno de España, el ministerio de industria, turismo y comercio junto al Instituto para la diversificación y ahorro de energía.

Estimación del papel residual generado en el colegio y PCI.

Para estimar los kg de papel que podríamos convertir en pellet se ha estimado el papel procedente de dos fuentes. En primer lugar el papel comprado por el colegio que se empleará en la realización de actividades académicas y en segundo lugar el papel que usan los alumnos para la realización de exámenes, papel proporcionado por ellos que posteriormente se emplea para la realización de los ejercicios de evaluación.

El papel utilizado en los exámenes es recogido una vez al año por una empresa certificada para su tratamiento y destrucción.

La idea de este proyecto es que este papel y el utilizado en otras actividades académicas sea transformado en pellet para la producción de calor.

Así, para estimar el papel proporcionado por los alumnos se han pesado las actividades y exámenes de dos profesores y se ha hecho la media resultando 9,4 kg, como en educación secundaria (ESO y Bachillerato) hay 39 profesores tendríamos 366 kg proporcionados por los alumnos.

Por otra parte, el centro compra 120 paquetes de papel al año y cada paquete pesa 12,7 kg. Por lo tanto tenemos **1890,6 kg** para convertir en pellets.

Para calcular la energía que aporta el papel utilizamos el poder calorífico que es la cantidad total de calor desprendido en la combustión completa de un kilogramo de papel, **4000 kcal/kg**. Este dato lo hemos obtenido de la tabla 1.4. “poder calorífico de diversas sustancias” del Real Decreto 2267/2004, de 3 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento de seguridad contra incendios en los establecimientos industriales.

Teniendo en cuenta los kg de papel que utilizamos para los pellets, **1890,6 kg**, y el poder calorífico de estos pellets, **4000 kcal/kg**, para obtener las kcal que se generarían en la combustión de esos pellets serían $1890,6 \text{ kg} \cdot 4000 \text{ kcal/kg} = 7562400 \text{ kcal}$ que equivalen a **8789 kWh**.

Energía consumida en la sección de Bachillerato de Institución La Salle en forma de gas

Gracias a las facturas del gas del edificio de Bachillerato obtenemos los datos de consumo en todos los meses de noviembre a marzo (incluidos). Sumando el consumo de los mismos somos capaces de obtener el consumo total de energía de noviembre a marzo en el centro.

Sabiendo que en todo el colegio se consumen **350404 kWh** y se corresponden a **5806** módulos de calefacción (dato proporcionado por la administración del centro) calculamos aquellos que forman parte de bachillerato. Teniendo en cuenta que esta sección tiene **1294** de los 5806 módulos totales del centro. $5806 \text{ módulos} / 350404 \text{ kWh} * 1294 \text{ módulos} = \mathbf{78095 \text{ kWh}}$.

Para comparar, recordamos que disponemos de 8789 kWh generados con el papel.

Ahora, calculamos el porcentaje que supone esta energía generada en la caldera respecto a la energía consumida por el edificio de bachillerato en total $\rightarrow x/100 *$
 $8789/78095 = \mathbf{11,25\%}$

Para saber cuántas clases seríamos capaces de suplir energéticamente con la estufa, utilizamos el porcentaje calculado anteriormente respecto a los módulos de calefacción que se encuentran en bachillerato $\rightarrow 1294 \text{ módulos} \cdot 11,25\% = \mathbf{145,6 \text{ módulos}}$ calentamos con el papel.

Ahora, sabiendo que cada clase de bachillerato tiene **72** módulos de calefacción, calculamos cuántas clases se podrían cubrir gracias al proceso calefacción mediante las estufas $\rightarrow 145,6 \text{ módulos de bach} / 72 \text{ módulos/clase} = \mathbf{2,02 \text{ clases}}$.

~Marco Práctico~

Producción de pellets y maquinaria elegida. Características de la biomasa elaborada.

Los pellets son pequeños cilindros elaborados a partir de serrín natural seco que actúan como un biocombustible generando energía. Destacan por su gran poder calorífico gracias a su densa composición. Se consideran una fuente de energía renovable porque el CO₂ emitido en su combustión será absorbido nuevamente por las plantas a través de la fotosíntesis.

Para su producción, el primer paso es reducir el tamaño del papel para introducirlo en la peletizadora. Para ello, se necesita una trituradora, que es una máquina destinada al proceso de molienda, y mediante la cual, al introducir los trozos de papel, obtenemos el

serrín de papel. Teniendo en cuenta la cantidad de papel que debemos tratar hemos seleccionado la trituradora *Geotech ESB 2801 Roller* con un precio de 177,83€ y cuyas características se pueden consultar en el anexo.



trituradora Geotech ESB 2801 Roller

Las peletizadoras son máquinas que realizan un proceso de compactado a partir de una materia prima seca. Para ello, hemos elegido la peletizadora *WIE- PM-500*, con un precio de 1879 € y cuyas características se pueden consultar en el anexo. Con un caudal de trabajo de 60 kg/h tardaríamos unas 30h en elaborar el biocombustible necesario para el funcionamiento de la caldera durante un curso académico.

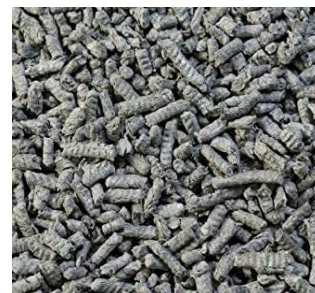


Peletizadora WIE PM 500

También necesitamos un aglutinante, para mejorar la calidad de los pellets, evitando que se rompan durante su almacenamiento. Pensamos que nuestra mejor opción es usar la lignina como aglutinante, que ha sido eliminada en el proceso de blanqueamiento del papel y que actuará como pegamento natural. El fabricante de la peletizadora también recomienda usar como aglutinante almidón de maíz al 2%.

Los pellets de papel reciclado actualmente son muy utilizados como lechos para pequeñas mascotas aplicando una base de 2-3 cm en jaulas de distintos tamaños. Se utiliza este material porque poseen las siguientes características:

- Absorben el olor.
- Están libres de aditivos químicos
- Son muy absorbentes, duraderos, resistentes y de fácil manipulación.
- Están libres de polvo que pueda provocar afecciones alérgicas a la mascota.



En nuestro caso los pellets de papel los usaremos como combustible.

Los niveles de emisión de CO₂ producidos en la combustión de los pellets son muy bajos, lo que contribuye en la reducción de gases de efecto invernadero, que causan diversos efectos perjudiciales como el aumento de la temperatura. Además gracias a los pellets, al ser uno de los combustibles con menor impacto ambiental y al elaborarlos con papel reciclado, se genera un ahorro en recursos naturales.

Igualmente aportan un elevado poder calorífico y un bajo contenido en cenizas, lo que reduce la cantidad de cargas y la necesidad de su constante mantenimiento.

Por último, la quema de los pellets no genera olores, no son tóxicos, y son de almacenaje y transporte sencillos pues no necesitan mucho espacio para su almacenaje y resisten casi de por vida.

Ahorro energético potencial por el uso de los pellets elaborados.

Con la combustión de los pellets de papel generamos 8789 kWh. Teniendo en cuenta los siguientes datos, obtenidos de las facturas de gas del invierno de 2021, tendríamos un ahorro de 863€ cada temporada invernal.

Término fijo: 1,31€/día x 150 días ⇒ **196,5 €**

Término variable de conducción: 8789 kWh x 0,01223 €/kWh ⇒ **107,5€**

Consumo gas precio indexado: 8789 kWh x 0,0636* €/kWh ⇒ **559€**

TOTAL: 863 €/año

* Precio TUR noviembre 2022

Cantidad de CO₂ no emitido a la atmósfera.

El CO₂ (dióxido de carbono) es un gas muy importante en la atmósfera de la Tierra, un gas invernadero necesario para regular la temperatura de nuestro planeta.

Con el uso de la biomasa de papel generamos 8789 kWh, mediante los factores de conversión (10,65 kWh/m³ de Gas Natural) calculamos la cantidad de gas natural que no hemos quemado, 825,26 m³.

Ahora, con la utilización de otro factor de conversión (2,15 kg CO₂/m³) calculamos la cantidad de CO₂ no emitida a la atmósfera durante cada curso académico 1774 kg de CO₂.

UNIDADES	CONSUMO / EMISIONES
8789 kWh x 10,65 kWh/m ³ (Gas Natural)	825,26 m ³
825, 26 m ³ x 2,15 kg CO ₂ /m ³	1774 kg de CO ₂



Los factores de emisión y conversión se han tomado de “*Guía práctica para el cálculo de emisión de gases de efecto invernadero*” de la Generalitat de Cataluña.

Dimensionado y características de la caldera.

Para el dimensionado de la caldera hemos tenido en cuenta que tenemos que ser capaces de producir 8789 kWh desde el 1 de noviembre al 31 de marzo, es decir, 100 días lectivos, durante 6,5 horas al día.

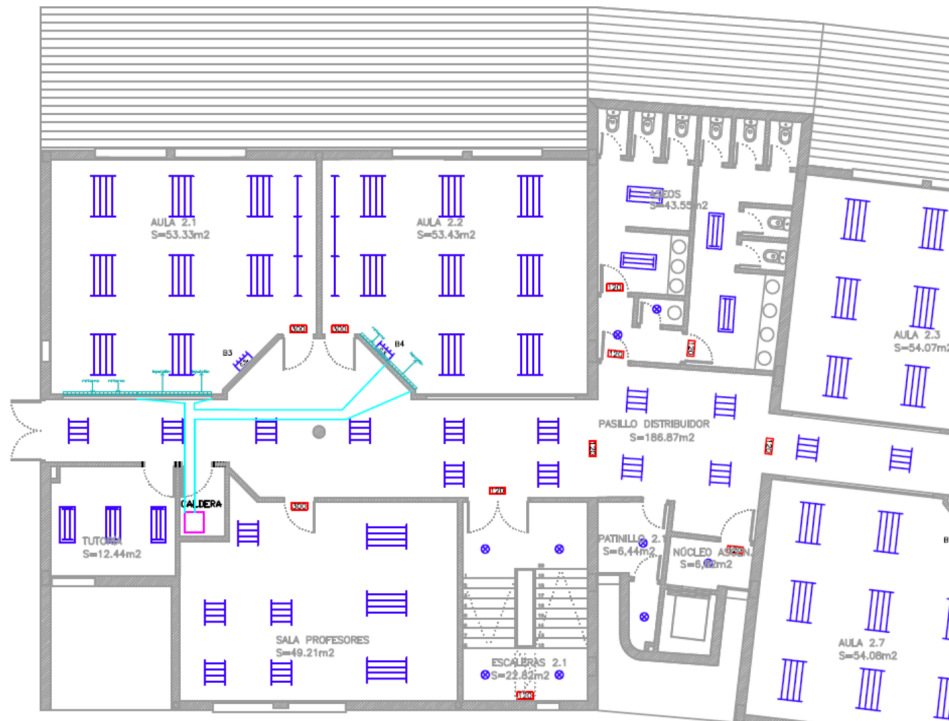
El cálculo sería el siguiente: $8789 \text{ kWh} / (6,5 \text{ h/d} \times 100 \text{ d}) \Rightarrow 13,5 \text{ kW}$ como mínimo.

Hemos seleccionado la siguiente caldera de 15 kW que cumple con nuestras necesidades en lo referido a potencia, consumo y volumen a calentar:



- Clasificación energética: A+
- Tipo de calefacción: Estufas canalizables de pellets
- Volumen a calentar: 260 m³
- Medidas: 55,3 x 114,6 x 53,6 cm
- Peso: 120 kg
- Autonomía: 13,6 horas
- Consumo medio: 1,85 kg / hora
- Tamaño de combustible: 6 mm
- Rendimiento: 90 %
- Diámetro salida humos: 8 cm
- Potencia: 15 kW
- Alimentación: Pellets

Instalación de la caldera, cuarto de biomasa y circuito.



Se destinará un cuarto al lado de la sala de profesores, con ventilación forzada y puerta RF. La instalación de canalización se hará por conductos por el falso techo existente. Las clases a las que se impulsa el aire caliente son las dos más próximas (1ª y 2ª) al cuarto de la caldera y el retorno se hará también por el falso techo.

~Evaluación económica~

Inversión

El desembolso económico inicial sería el siguiente:

- Precio de la caldera: 1995 €
- Precio trituradora: 177 €
- Precio peletizadora: 1879 €
- Aglutinante: 110€
- Material canalizaciones: 1500 €
- Mano de obra: 4000 €

Total inversión: **9661 €**

Amortización y análisis de viabilidad económica

Para el siguiente análisis se han tenido en cuenta como costes la inversión económica inicial, el primer año, y los años sucesivos el coste del aglutinante tomando una tasa de actualización de precios del 5%. No hemos tenido en cuenta el coste de la limpieza diaria de la caldera porque suponemos que sería una tarea que puede asumir el responsable de mantenimiento del centro.

Los ingresos son los proporcionados por la combustión de papel, es decir, la cantidad de gas que no consumimos por emplear los pellets de papel. En los últimos diez años el precio del gas ha sido muy estable, rondando una variación del 2% anual, pero en el último año ha sufrido variaciones de hasta el 60%, por lo que no es fácil tomar una tasa de actualización para los próximos veinte años. Hemos decidido tomar un 5% *apoyándonos en el Real Decreto Ley 18/2022*, de 18 de Octubre, que limita la subida del precio del gas un 5% por lo que la tasa estaría justificada.

Tomando estos datos de partida hemos elaborado la siguiente tabla para calcular la tasa de retorno (TIR) y el tiempo de amortización.

Año	Costes (€)	Ingresos (€)	Beneficios (€)	Amortización (€)
1	9661	863	-8798	863
2	116	906	791	1654
3	121	951	830	2484
4	127	999	872	3356
5	134	1049	915	4271
6	140	1101	961	5232
7	147	1157	1009	6241
8	155	1214	1060	7300
9	163	1275	1113	8413
10	171	1339	1168	9581
11	179	1406	1227	
12	188	1476	1288	
13	198	1550	1352	

14	207	1627	1420	
15	218	1709	1491	
16	229	1794	1565	
17	240	1884	1644	
18	252	1978	1726	
19	265	2077	1812	
20	278	2181	1903	

Para calcular la TIR, en nuestro análisis, hemos tomado un período de 20 años ya que creemos que es un tiempo mínimo en el que la infraestructura energética de Bachillerato no va a cambiar.

Obtenemos una TIR del 11%. Por lo tanto desde el punto de vista económico tendríamos una rentabilidad anual de 1062€.

Hay que tener en cuenta que esta rentabilidad se cumple si las tasas no se disparan y el precio del gas no disminuya su valor. En el caso de que el precio del gas subiera más del 5% cumplido el año 2023 la rentabilidad de la inversión sería aún mayor.

Por otra parte, según vemos en la tabla, la inversión quedaría amortizada a los diez años.

~Resolución del proyecto~

Conclusiones

- En el año 2022 el precio del gas subió mas de un 50%, se trata de un recurso no renovable, por lo que surge la necesidad de encontrar fuentes de energía alternativas a los recursos no renovables.
- En este trabajo se ha valorado la posibilidad de transformar el papel residual generado en el centro en energía calorífica para calentar distintos espacios y disminuir la dependencia de combustibles fósiles como es el gas natural.
- Se ha calculado la cantidad de CO₂ que no se emite a la atmósfera si empleamos el papel residual en lugar de gas para la producción de energía calorífica.
- La forma que hemos pensado para transformar el papel en energía es mediante la elaboración de pellets de papel, previa trituración del residuo, y usándolos como combustible en una caldera de biomasa que, después de quemarlos, desprende un flujo de aire caliente que es dirigido hacia los espacios que se quieren calentar.
- El criterio para el desarrollo del trabajo no solo ha sido el técnico sino también el económico, y se ha realizado un plan de amortización de la inversión y análisis de retorno en veinte años.
- La energía calorífica bruta que se puede extraer del papel residual generado por el centro es suficiente para calentar dos aulas de Bachillerato de **55 m²** durante todo el invierno.
- Si se emplea el papel como fuente de combustión dejan de emitirse **1774 kg** de CO₂ cada año a la atmósfera, ya que como este CO₂ entra en un ciclo en el que la emisión procede de la combustión y la absorción de la fijación del carbono por parte de los organismos fotosintéticos, la biomasa del papel es considerada fuente de energía renovable y no contaminante para dicho gas.
- Realizando una inversión de **9661€** se obtiene una tasa de retorno del **11%** quedando el coste inicial amortizado en el décimo año.

Próximas líneas de actuación.

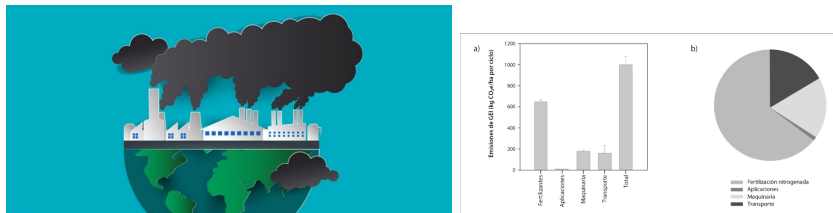
En este trabajo se ha realizado un primer análisis de la situación inicial llegando a la conclusión de que el proyecto es viable desde el punto de vista teórico pero para aplicarlo necesitamos investigar otros aspectos que serían los siguientes:

- **Análisis riguroso del papel generado.** En este estudio se ha realizado una estimación de los kg de papel residual generado atendiendo al papel comprado por el centro y el generado en trabajos y exámenes realizados por los alumnos de ESO y Bachillerato pero no se ha tenido en cuenta el generado en las secciones de FP, Infantil y Primaria. La forma correcta de saber los kg de papel generados a lo largo de un curso escolar es pesando el papel que nos recoge la empresa certificada en destruir el papel. De esta forma los datos dejarían de ser una estimación para ser reales. Esto no lo hemos podido hacer por la falta de tiempo.



- **Fabricación de pellets.** Para la fabricación del biocombustible necesitamos la maquinaria mencionada en el trabajo que sería la trituradora de papel, para convertirlo en material más pequeño, y la peletizadora, para la obtención de los pellets. Una vez obtenidos necesitamos un horno para analizar el poder calorífico real del biocombustible generado ya que el empleado en este trabajo ha sido obtenido del Real Decreto 2267/2004 acerca de la seguridad contra incendios. Esto no lo hemos podido realizar porque es necesario un desembolso económico importante y enviar las muestras obtenidas a un laboratorio que determine el poder calorífico real de los pellets fabricados.
- **Análisis de gases de emisión:** el CO₂ no es el único gas desprendido de la caldera, según la bibliografía consultada otros gases que aparecen en la combustión serían el CO, debido a la combustión incompleta del papel, y los NOx. Para ello necesitaríamos tomar muestras de los humos emitidos por la

cadena y enviarlo a un análisis de laboratorio que revele si las concentraciones de dichos gases son relevantes a nivel ambiental.



~Bibliografía~

Real Decreto 2267/2004, de 3 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento de seguridad contra incendios en los establecimientos industriales. *Boletín Oficial del Estado*, 303, de 17 de diciembre de 2004. <https://www.boe.es/eli/es/rd/2004/12/03/2267>


Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados. *Boletín Oficial del Estado*, 181, de 29 de julio de 2011. <https://www.boe.es/eli/es/l/2011/07/28/22>

Real Decreto 178/2001, de 23 de marzo, por el que se modifica el Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios. *Boletín Oficial del Estado*, 71, de 24 de marzo de 2021. <https://www.boe.es/eli/es/rd/2021/03/23/178>.

Ley 5/2003, de 20 de marzo, de Residuos de la Comunidad de Madrid. *Boletín Oficial de la Comunidad de Madrid*, 76, de 31 de marzo de 2003. Texto Consolidado 31 de diciembre de 2015.

<https://www.boe.es/buscar/pdf/2003/BOE-A-2003-10725-consolidado.pdf>

Real Decreto 1042/2017, de 22 de diciembre, sobre la limitación de las emisiones a la atmósfera de determinados agentes contaminantes procedentes de las instalaciones de combustión medianas y por el que se actualiza el anexo IV de la Ley 34/2007, de 15 de noviembre, de calidad del aire y protección de la atmósfera. *Boletín Oficial del Estado*, 311, de 23 de diciembre de 2017. <https://www.boe.es/eli/es/rd/2017/12/22/1042>.



Rodrigo, R. Centeno, L. M. Muruais, J. Maíllo, A. Ramirez, M. J. Vallina, D. Tolosa, E.
(2010) *Guía de valorización energética de residuos. Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid.*

~Anexos~

Anexo 1. Características trituradora de papel:



Modelo: ESB 2801 roller

Potencia: 2800 w

Caudal:

Dimensión triturado: 4-5 cm

Velocidad de giro: 44 rpm.

Dimensiones: 50 x 62 x 90 cm (LxAxAI).

Precio: 177,83 €

Anexo 2. Características peletizadora:



Modelo: WIE- PM-500

Potencia: 3000 w.

Caudal: 40-100 kg/h

Diámetro pellets: 6 mm.

Velocidad de giro: 1430 rpm.

Dimensiones: 88,50 x 35,50 x 73,00 cm (LxAxAI)

Precio: 1879 €.

Anexo 3. Consumo de gas natural curso 21/22.

fecha inicial	fecha final	m3	conversión	Total colegio	Extrapolación Bachillerato
				kWh	kWh
1/11/21	1/12/21	55018	0,429	23614	5261
1/12/21	1/1/22	2293	10,649	24418	5440
1/1/22	1/2/22	7970	10,54	84005	18716
1/2/22	1/3/22	10138	10,534	106796	23794
1/3/22	31/3/22	9637	11,57	111571	24858
				350404	78070