

Este trabajo está bajo una licencia de [Creative Commons Licencia Reconocimiento-No-Comercial- Compartirigual 3.0 España](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/).

Instrucciones: En las preguntas de test añadida entre los paréntesis V, F o deje en blanco según proceda, no tache ni agregue comentarios, salvo que se le solicite expresamente en el enunciado. Para que un enunciado sea verdadero, debe serlo en su totalidad. No se evaluará el texto fuera del espacio reservado para las contestaciones. Use el anverso o los márgenes para borrador o cálculos. El examen es sin ayuda de textos u otro material informativo, a excepción de una calculadora simple sin información. Las preguntas acertadas cuentan como +1/n hasta alcanzar los puntos indicados y las falladas como -1/2n en la parte tipo test o solo positivamente en los problemas, siendo n el número de cuestiones bajo un mismo encabezado. En la parte tipo test cualquier opción es posible, todas verdaderas, todas falsas o cualquier combinación de verdaderas y falsas. Lo no contestado cuenta como 0. Escriba los desarrollos matemáticos y cálculos donde se indica, de manera clara y concisa, pueden contribuir a la calificación. La comprensión de los enunciados forma parte del propio examen.

Capítulo 13: Biomasa.

- (F) Las emisiones de CO₂ asociadas a la quema de bio combustible se pueden considerar neutras.
- (V) La energía renovable más usada actualmente en España es la biomasa.
- (F) La mayor aplicación de la biomasa en España es la generación de electricidad en redes aisladas
- (V) La biomasa constituye la primera fuente de energía renovable en el mundo.
- (F) La producción de electricidad a partir de biomasa es muy relevante en España
- (V) En general, el poder calorífico de la biomasa sólida es inferior al del carbón de alto rango (hulla)
- (F) Comparado al carbón, la biomasa sólida tiene un alto contenido en cenizas
- (F) La producción de electricidad a partir de biomasa es poco costosa comparada a otras tecnologías convencionales
- (V) En aplicaciones de generación de electricidad con biomasa, la más usada actualmente es la de co-combustión con carbón.
- (V) El elemento más abundante (en peso) en la biomasa vegetal es el carbono
- (F) El poder calorífico del etanol es del orden del 120 % del de la gasolina convencional
- (F) La combustión de los biomasa solida no produce cenizas

Una biomasa sólida tiene un precio p de 192 €/tonelada métrica húmedo. Su contenido en humedad y_h es el 17% en masa y en base seca. Su poder calorífico L en base seca es 12,4 MJ/kg. Ese combustible se quema en una caldera de biomasa con un rendimiento η de 72%. Se pide:

Obtener una expresión analítica del coste c del combustible por unidad de energía (€/kWh). Calcular ese coste.

$$c = \frac{p(1 + y_h)}{\eta L} = \frac{192 \frac{\text{€}}{\text{Tm}} \cdot 3,6 \frac{\text{MJ}}{\text{kWh}} \times 1,17 \frac{\text{g de comb. húmedo}}{\text{g de comb. seco}}}{0,72 \times 1.000 \frac{\text{kg}}{\text{Tm}} \times 12,4 \frac{\text{MJ}}{\text{kg seco}}} = 9,06 \frac{\text{céntimos €}}{\text{kWh}}$$

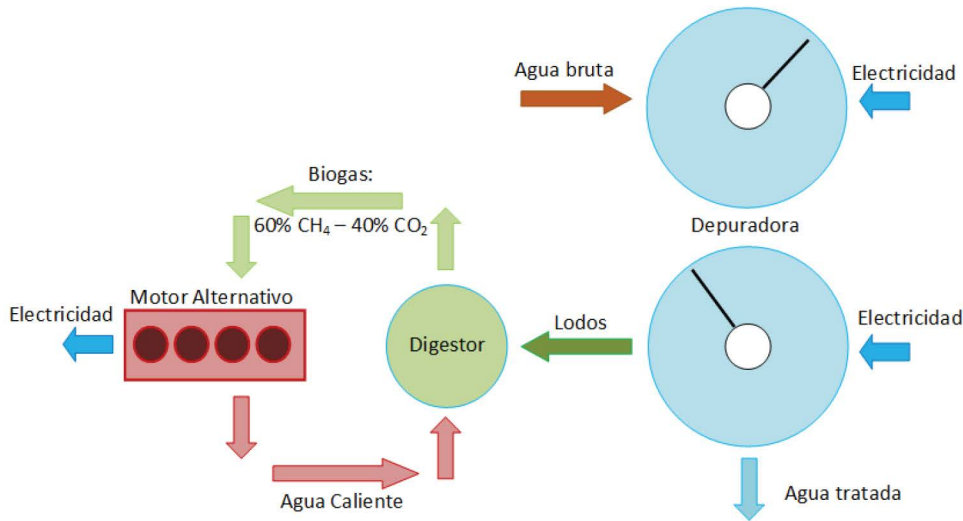
Una planta de tratamiento de agua residuales tiene una demanda anual de 1280 MWhe de electricidad (bombas, motores de los mezcladores, elementos auxiliares,...). Por otro lado, el tratamiento de los lodos de depuradora y su gestión (obligatoria) conllevan una demanda de calor de 1780 MWht (hipotéticamente con caldera de gas natural y $\eta_q = 0,9$).

Para suplir parcialmente a dicha demanda de electricidad, se instala un digestor de lodos para generación de biogas. El coste de inversión del digestor es de 178.000 €. El biogas se almacena en un depósito de doble membraba para su posterior suministro a un motor alternativo de una potencia de 110 kWe aproximadamente. El coste del depósito de doble membraba y del motor son de 97.000 € y 113.000 € respectivamente. Los costes de operación y mantenimiento del motor representan 1,7 c€/kWhe, mientras el del digestor y suministro de biogas se eleva al 120% de este valor.

Para el correcto funcionamiento del digestor, resulta necesario un suministro de calor anual de 1780 MWht (calentamiento de los lodos para el proceso de digestión anaeróbica).

Este trabajo está bajo una licencia de [Creative Commons Licencia Reconocimiento-No-Comercial- Compartirigual 3.0 España](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/es/).

Instrucciones: En las preguntas de test añada entre los paréntesis V, F o deje en blanco según proceda, no tache ni agregue comentarios, salvo que se le solicite expresamente en el enunciado. Para que un enunciado sea verdadero, debe serlo en su totalidad. No se evaluará el texto fuera del espacio reservado para las contestaciones. Use el anverso o los márgenes para borrador o cálculos. El examen es sin ayuda de textos u otro material informativo, a excepción de una calculadora simple sin información. Las preguntas acertadas cuentan como +1/n hasta alcanzar los puntos indicados y las falladas como -1/2n en la parte tipo test o solo positivamente en los problemas, siendo n el número de cuestiones bajo un mismo encabezado. En la parte tipo test cualquier opción es posible, todas verdaderas, todas falsas o cualquier combinación de verdaderas y falsas. Lo no contestado cuenta como 0. Escriba los desarrollos matemáticos y cálculos donde se indica, de manera clara y concisa, pueden contribuir a la calificación. La comprensión de los enunciados forma parte del propio examen.



El motor alternativo quema el biogás así generado (60% CH₄ y 40% CO₂ en vol.), teniendo un rendimiento de un 33%. Un 58% del poder calorífico del combustible se recupera en forma de calor (gases de escape del motor, agua de refrigeración, lubricante, etc...), supliendo integralmente a la demanda de calor, sin excedente. Las pérdidas térmicas del motor representan un 9%, siendo este calor no recuperable.

Para beneficiar de la tarifa regulada para la cogeneración, el rendimiento eléctrico equivalente (REE) ha de ser superior a un 50%. El REE de la planta se define como:

$$REE = \frac{W_{elec,prod} + W_{elec,comprado}}{Q_{motor} - \frac{Q_{aprovechado}}{\eta_q} + \frac{W_{elec,comprado}}{\eta_{red}}}$$

Donde Q_{motor} es el calor suministrado al motor. $Q_{aprovechado}$ es el calor residual del motor aprovechado para suministrar calor. η_q es el rendimiento de la caldera que se baría de emplear si la demanda de calor fuese suministrado por ella. Se considera $\eta_q = 0,9$. η_{red} es el rendimiento global de la red eléctrica española. Su valor es $\eta_{red} = 0,45$.

Caso de beneficiar de dicha tarifa regulada, y a la vista del tamaño de la instalación de cogeneración, las tarifas son:

| | Precios en c€/kWh |
|-----------------------------------|-------------------|
| Venta Elec (Instalación <10 años) | 12,0400 |
| Venta Elec (Instalación >10 años) | 9,9932 |
| Compra Electricidad | 9,2523 |
| Compra Gas Natural | 4,8099 |

Se decide vender toda la electricidad producida a la red eléctrica, mientras se compra toda la necesaria para el funcionamiento de la planta de tratamiento de aguas residuales.

Este trabajo está bajo una licencia de [Creative Commons Licencia Reconocimiento-No-Comercial- Compartirigual 3.0 España](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/es/).

Instrucciones: En las preguntas de test añada entre los paréntesis V, F o deje en blanco según proceda, no tache ni agregue comentarios, salvo que se le solicite expresamente en el enunciado. Para que un enunciado sea verdadero, debe serlo en su totalidad. No se evaluará el texto fuera del espacio reservado para las contestaciones. Use el anverso o los márgenes para borrador o cálculos. El examen es sin ayuda de textos u otro material informativo, a excepción de una calculadora simple sin información. Las preguntas acertadas cuentan como +1/n hasta alcanzar los puntos indicados y las falladas como -1/2n en la parte tipo test o solo positivamente en los problemas, siendo n el número de cuestiones bajo un mismo encabezado. En la parte tipo test cualquier opción es posible, todas verdaderas, todas falsas o cualquier combinación de verdaderas y falsas. Lo no contestado cuenta como 0. Escriba los desarrollos matemáticos y cálculos donde se indica, de manera clara y concisa, pueden contribuir a la calificación. La comprensión de los enunciados forma parte del propio examen.

El poder calorífico del metano es 55 MJ/kg. El factor de emisiones de la red eléctrica española es $E_{red} = 0,39 \text{ kgCO}_2/\text{kWh}_e$.

- 1) Determinar el REE de la planta.
- 2) Determinar el tiempo de amortización de la instalación de cogeneración (despreciar la tasa de inflación).
- 3) Determinar la tasa de ahorro de emisiones de CO_2 de la planta ($T\Delta\text{CO}_2$).
- 4) Realizar los cálculos anteriores en caso de no vender la electricidad a la red eléctrica. Concluir sobre la opción más adecuada.

SOLUCIÓN:

- 1) REE: sí se puede aplicar la tarifa reguladora

$$REE = \frac{W_{elec,prod} + W_{elec,comprado}}{Q_{motor} - \frac{Q_{aprovechado}}{\eta_q} + \frac{W_{elec,comprado}}{\eta_{red}}} = \frac{970 + 1280}{\frac{970 + 1780}{1 - 0,09} - \frac{1780}{0,9} + \frac{1280}{0,45}} = 57,9\%$$

- 2) Coste inversión: $-178.000 - 97.000 - 113.000 = -388.000 \text{ €}$

| | | | |
|------------------------------|--------------|--|-------------------|
| Costes anuales Cogeneración: | Venta elec: | $970 \text{ MWh} \cdot 120,4 \text{ €/MWh}$ | +116.788 € |
| | Compra elec | $1280 \text{ MWh} \cdot 92,523 \text{ €/MWh}$ | -118.429 € |
| | O & M | $970 \text{ MWh} \cdot (1 + 1,2) \cdot 17,0 \text{ €/MWh}$ | - 36.278 € |
| | Total | | - 37.919 € |
| Costes an. sin Cogen: | Compra gas | $1780 \text{ MWh} \cdot 48,099 \text{ €/MWh}$ | - 85.616 € |
| | Compra Elec | $1280 \text{ MWh} \cdot 92,523 \text{ €/MWh}$ | -118.429 € |
| | Total | | -204.045 € |
| Diferencia | | | -166.126 € |

$$Amortización = \frac{388.000 \text{ €}}{166.126 \frac{\text{€}}{\text{años}}} = 2,3 \text{ años}$$

- 3) Factor de emisión del metano (gas natural): $E_{GN} = \frac{44/16 \cdot 3,6 \text{ MJ/kWh}_t}{55 \text{ MJ/kg}} = 0,18 \text{ kgCO}_2/\text{kWh}_t$

Factor de emisión del biogas:

Este trabajo está bajo una licencia de [Creative Commons Licencia Reconocimiento-No-Comercial- Compartirigual 3.0 España](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/es/).

Instrucciones: En las preguntas de test añada entre los paréntesis V, F o deje en blanco según proceda, no tache ni agregue comentarios, salvo que se le solicite expresamente en el enunciado. Para que un enunciado sea verdadero, debe serlo en su totalidad. No se evaluará el texto fuera del espacio reservado para las contestaciones. Use el anverso o los márgenes para borrador o cálculos. El examen es sin ayuda de textos u otro material informativo, a excepción de una calculadora simple sin información. Las preguntas acertadas cuentan como $+1/n$ hasta alcanzar los puntos indicados y las falladas como $-1/2n$ en la parte tipo test o solo positivamente en los problemas, siendo n el número de cuestiones bajo un mismo encabezado. En la parte tipo test cualquier opción es posible, todas verdaderas, todas falsas o cualquier combinación de verdaderas y falsas. Lo no contestado cuenta como 0. Escriba los desarrollos matemáticos y cálculos donde se indica, de manera clara y concisa, pueden contribuir a la calificación. La comprensión de los enunciados forma parte del propio examen.

$$E_{bio} = \frac{\left(\frac{\overbrace{44}^{CO_2 \text{ combustion}}}{16} + \frac{\overbrace{0,4 \cdot 44}^{CO_2 \text{ combustible}}}{0,6 \cdot 16} \right) \cdot 3,6 \text{ MJ/kWh}}{55 \text{ MJ/kg}} = 0,30 \text{ kgCO}_2/\text{kWh}$$

$$\text{Emisiones Cogeneración: } E_{CHP} = \frac{970+1780}{1-0,09} E_{bio} + 1280 E_{red} = 3022 \text{ MWh} \cdot \frac{0,30 \text{ TmCO}_2}{\text{MWh}} + 1280 \cdot \frac{0,39 \text{ TmCO}_2}{\text{kWh}} = 1405 \text{ TmCO}_2$$

$$\text{Emisiones Convencional: } E_{Conv} = \frac{1780}{\eta_q} E_{GN} + 1280 E_{red} = 1978 \text{ MWh} \cdot \frac{0,18 \text{ TmCO}_2}{\text{MWh}} + 1280 \cdot \frac{0,39 \text{ TmCO}_2}{\text{kWh}} = 855 \text{ TmCO}_2$$

$$T\Delta CO_2 = \frac{1405 - 855}{855} = +64\% \text{ Emisiones}$$

$$\text{Y por kWh útil de energía empleada: } e_{CHP} = \frac{1405 \text{ TmCO}_2}{(970+1280+1780) \text{ MWh}} = 0,349 \text{ kgCO}_2/\text{kWh}$$

$$e_{Conv} = \frac{855 \text{ TmCO}_2}{(1280 + 1780) \text{ MWh}} = 0,279 \text{ kgCO}_2/\text{kWh}$$

Si no se tiene en cuenta CO_2 del combustible (no contabilizado ya que la fermentación de los lodos lo emitirían igual¹):

$$\text{Emisiones Cogeneración: } E_{CHP} = \frac{970+1780}{1-0,09} E_{GN} + 1280 E_{red} = 3022 \text{ MWh} \cdot \frac{0,18 \text{ TmCO}_2}{\text{MWh}} + 1280 \cdot \frac{0,39 \text{ TmCO}_2}{\text{kWh}} = 1043 \text{ TmCO}_2$$

$$\text{Emisiones Convencional: } E_{Conv} = \frac{1780}{\eta_q} E_{GN} + 1280 E_{red} = 1978 \text{ MWh} \cdot \frac{0,18 \text{ TmCO}_2}{\text{MWh}} + 1280 \cdot \frac{0,39 \text{ TmCO}_2}{\text{kWh}} = 855 \text{ TmCO}_2$$

$$T\Delta CO_2 = \frac{1043 - 855}{855} = +22\% \text{ Emisiones}$$

$$\text{Y por kWh útil de energía empleada: } e'_{CHP} = \frac{1043 \text{ TmCO}_2}{(970+1280+1780) \text{ MWh}} = 0,259 \text{ kgCO}_2/\text{kWh}$$

$$e'_{Conv} = \frac{855 \text{ TmCO}_2}{(1280 + 1780) \text{ MWh}} = 0,279 \text{ kgCO}_2/\text{kWh}$$

- 4) Sale más rentable la primera opción (vendiendo toda la electricidad producida), pero las emisiones de CO_2 son menores ($T\Delta CO_2 = -20\%$).

¹ En realidad, la fermentación de los lodos, emitirían también metano, con un poder de efecto invernadero del orden de 25 veces superior al de CO_2 .