

Acumulación y transporte de calor higroscópico

Modelo de negocio



Eficiencia & Sostenibilidad S.L.U.

Enero 2015

Concepto y oportunidades

- Existen procesos industriales que generan ingentes flujos de calor que son evacuados a la atmósfera (Ej. Gases de chimenea en hornos de industria cerámica)
- Existen a su vez industrias que precisan de calor higroscópico de secado para sus productos (Ej. Secaderos en industria de la madera) consumiendo combustibles fósiles o renovables (biomasa)
- Existe la oportunidad de unir demanda de calor higroscópico de secado con oferta de calor residual (despilfarrado) empleando instalaciones móviles de alta densidad de acumulación energética empleando adsorción de vapor de agua en sólidos higroscópicos como zeolitas

Referencia - Instalación móvil

- Instalación móvil de almacenamiento y transporte de calor higroscópico mediante adsorción en un lecho fijo de zeolitas (contenedor cilíndrico) de la iniciativa para el almacenamiento de energía térmica del Ministerio Federal de Asuntos Económicos y Energía (BMWi), el Ministerio Federal de Medio Ambiente, Conservación de la Naturaleza, Construcción y Seguridad Nuclear (BMUB) y el Ministerio Federal de Educación e Investigación (BMBF) de Alemania



Referencia - Caldera de gas

- Tecnología pionera que incluye un sistema de combustión de gas natural convencional junto con un novedoso sistema de acumulación de calor de adsorción empleando tubos revestidos de zeolita con rendimientos instantáneos del 135%



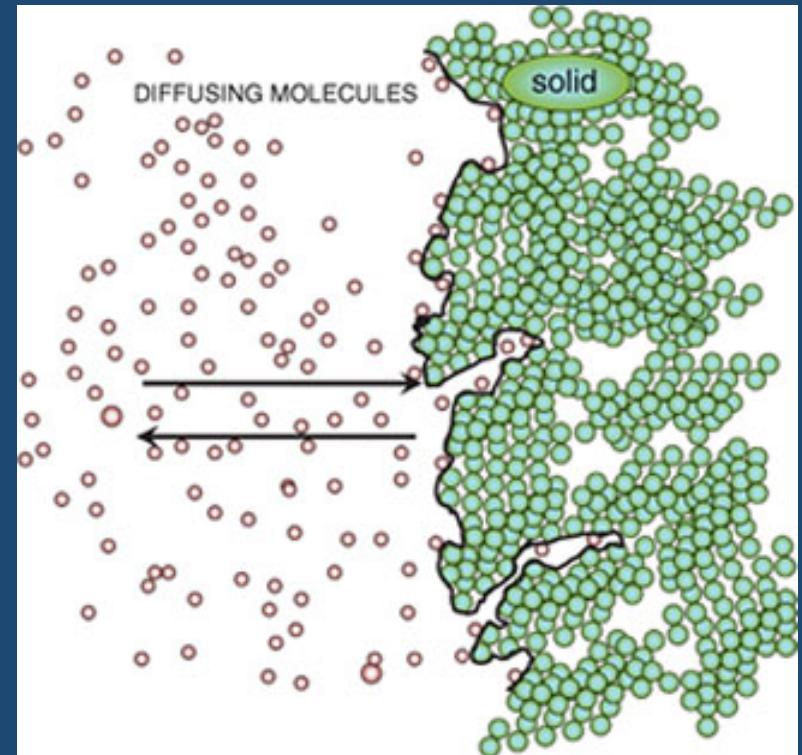
Referencia – Recuperadores de calor

- Se emplea un lecho de zeolitas en un recuperador entálpico de disco rotativo (habitual en sistemas de climatización aire-aire), para intercambiar no sólo calor sensible, sino también latente, muy necesario en climas húmedos en verano, como forma de deshumidificar el aire entrante con la corriente seca de aire de extracción



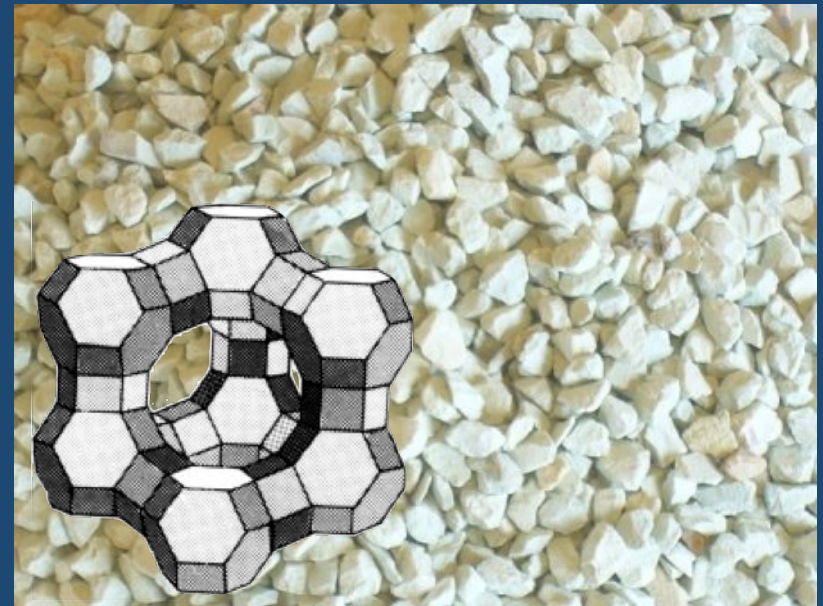
Qué es la adsorción

- Es un proceso físico-químico reversible mediante el cual un sólido poroso a nivel microscópico (adsorbente) es capaz de retener partículas de un fluido (adsorbato) en su superficie
- La naturaleza de la interacción adsorbente-adsorbato en la adsorción física es de carácter electrostático (Van der Waals)
- La adsorción implica la liberación de calor (es exotérmica) mientras que su inversa (o desorción) implica la captación de calor (es endotérmica)
- Pares adsorbentes-adsorbatos de uso común son: metanol-carbón activo, gel de sílice-agua y zeolitas-agua



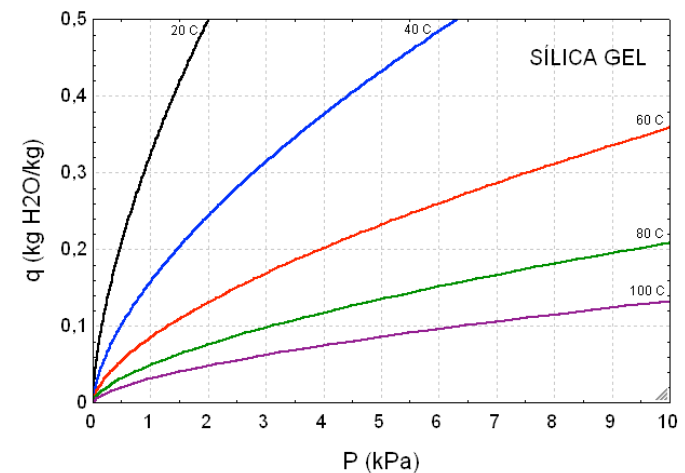
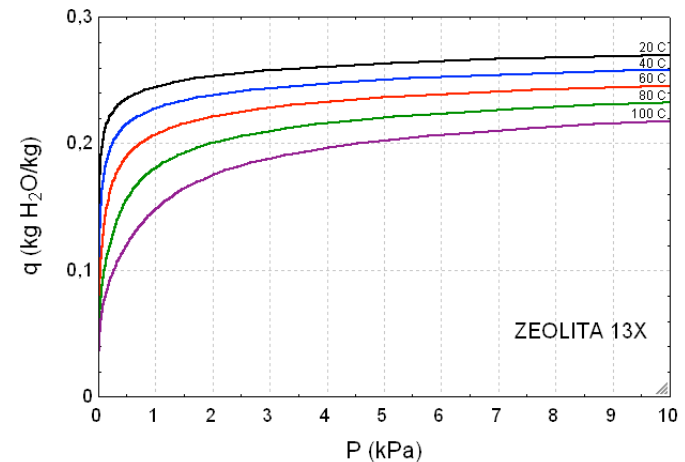
Que son las zeolitas

- Son minerales aluminosilicatos microporosos que destacan por su capacidad de hidratarse y deshidratarse reversiblemente
- Existen unos 200 tipos según su estructura, de los cuales unos 40 son naturales y los restantes sintéticos
- Poseen un tamaño de microporo muy regular (del orden de 8 Å para la zeolita 13X / faujasita) constituyendo filtros moleculares
- Tienen múltiples usos, especialmente como catalizadores en petroquímica (craqueo de hidrocarburos pesados)
- Precio en torno a 1000-1200 EUR/Tm para zeolitas sintéticas (13X)



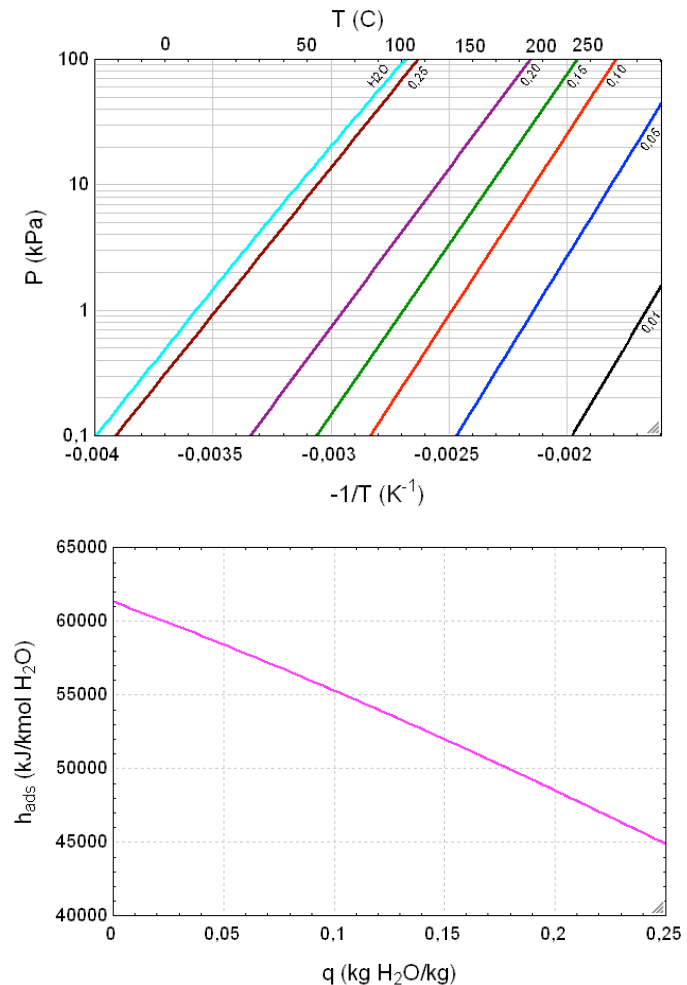
Zeolita 13X - Curvas Isotermas

- Representación de la cantidad de agua adsorbida q (kg H₂O/kg ZEO) respecto a la presión parcial P (kPa) del vapor de agua en equilibrio a temperatura T (C) constante
- Correlación matemática según una expresión del tipo Clausius-Clapeyron:
 - $\ln P = a + b / T$
 - $a = a_0 + a_1 \cdot q + a_2 \cdot q^2 + a_3 \cdot q^3$
 - $b = b_0 + b_1 \cdot q + b_2 \cdot q^2 + b_3 \cdot q^3$
- Se puede apreciar la enorme avidéz de la zeolita por el agua, ya que incluso a presiones parciales muy bajas (poca fuerza motriz) la zeolita es capaz de adsorber agua hasta valores próximos a saturación (*comparar con sílica gel*)



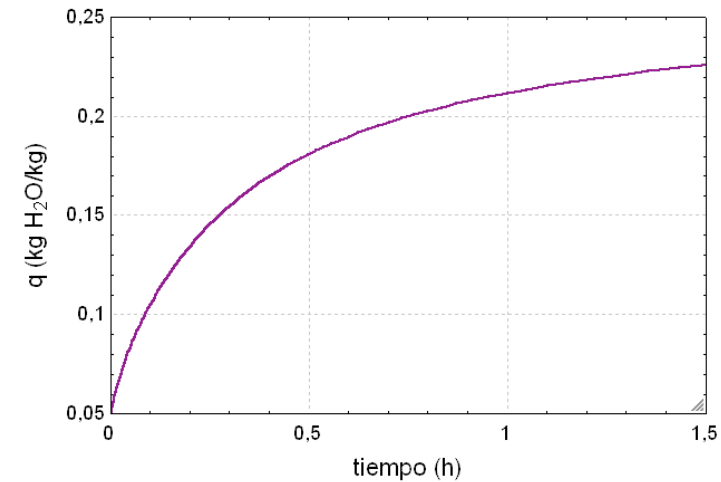
Zeolita 13X - Rectas Isosteras

- Representación de la presión parcial P (kPa) del vapor de agua en equilibrio respecto a la temperatura T (C) a cantidad de agua adsorbida q (kg H_2O /kg ZEO) constante
- Según la expresión de Clausius-Clapeyron, la representación de $\ln P$ frente a $-1/T$ (K) es una línea recta cuya pendiente es h_{ads}/R (K) el cociente entre la entalpía de adsorción y la constante de los gases
- La entalpía o calor de adsorción h_{ads} (kJ/kmol H_2O) depende de la cantidad de agua adsorbida q (kg H_2O /kg ZEO), decreciendo conforme más se aproxima la zeolita a saturación



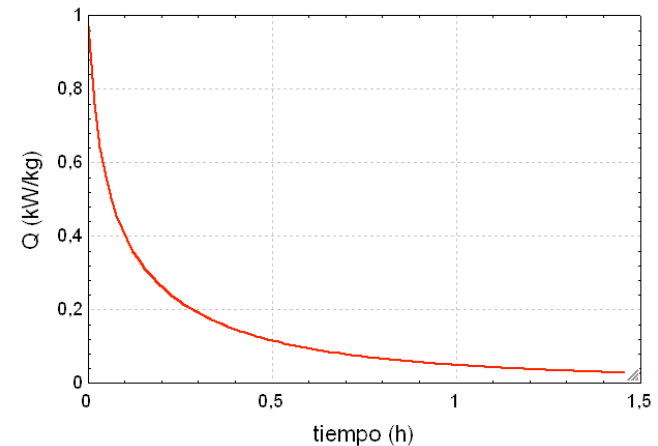
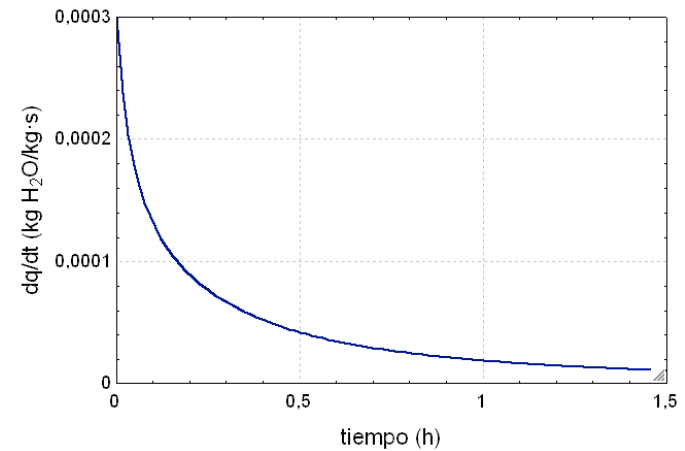
Zeolita 13X - Curva Cinética

- Representación de la cantidad máxima de agua adsorbida q (kg H₂O/kg ZEO) respecto al tiempo (horas) siguiendo una línea de operación
- Correlación matemática según una expresión del tipo potencial motriz lineal controlado por difusión intraparticular con variación del coeficiente global de transferencia (difusividad efectiva), respecto a la temperatura, según expresión tipo Arrhenius:
 - $\ln (q_{eq} - q_{ini}) / (q_{eq} - q(t)) = IK \cdot tiempo$
 - $IK(T) = k_1 \cdot \exp (-k_2/R \cdot T)$



Zeolita 13X - Curvas de Potencia

- (Curva *azul*) Representación de la velocidad máxima instantánea de adsorción de agua dq/dt (kg H₂O/kg ZEO·s) respecto al tiempo (horas) siguiendo una línea de operación, obtenida por diferenciación de la curva cinética
- (Curva *roja*) Representación de la potencia térmica máxima unitaria Q (kW/kg ZEO) liberada durante la adsorción de agua siguiendo una línea de operación, obtenida aplicando el valor instantáneo de entalpía de adsorción sobre la curva instantánea de velocidad

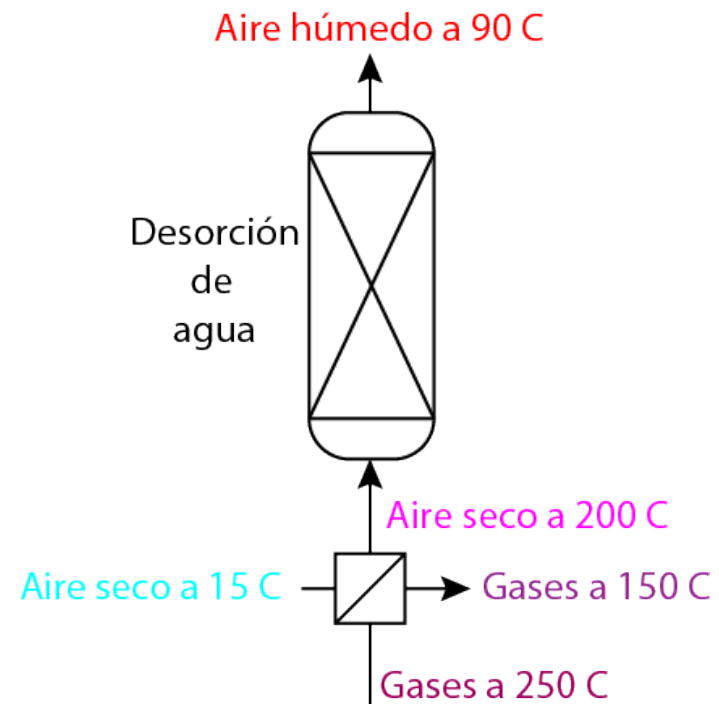


Ciclo de adsorción abierto

- Emplea aire a presión atmosférica como vector de proceso, mediante ciclos alternativos de carga y descarga del lecho de zeolita
- En el ciclo de carga, la zeolita húmeda (descargada) se seca (carga) mediante un flujo de aire ambiente calentado por el calor de gases residuales, obteniendo aire caliente y húmedo que es desechado (no útil)
- En el ciclo de descarga, la zeolita seca (cargada) se humedece (descarga) mediante un flujo de aire húmedo procedente del proceso de secado, obteniendo aire caliente y seco que se recircula de nuevo al proceso de secado (útil)

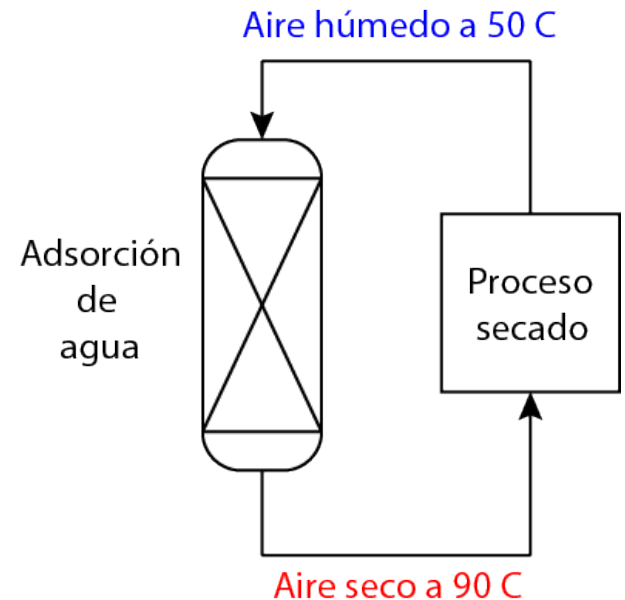
Esquema del ciclo de carga

- Gases de chimenea a 250 C son enfriados hasta 150 C en un intercambiador de calor sensible, calentando aire ambiental de 15 C a 200 C que fluye por el lecho calentándolo y desorbiendo el agua higroscópica de las zeolitas quedando estas secas (cargadas)



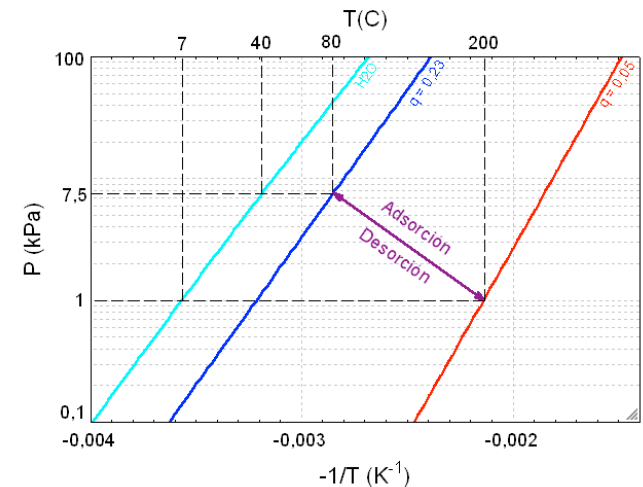
Esquema del ciclo de descarga

- Aire húmedo procedente del secadero se hace circular por el lecho de zeolitas “cargadas”, adsorbiendo estas su humedad y liberando el calor de adsorción por lo que se obtiene un efecto combinado de aire caliente y seco que se emplea en circuito cerrado en el proceso de secado, quedando las zeolitas húmedas (descargadas)



Representación en diagrama isostérico

- Línea de operación de adsorción/desorción (línea violeta):
- T. desorción = 200 C
- P. desorción = 1 kPa
- q. desorción = 0,05 kg H₂O/kg ZEO
- T. adsorción = 80 C
- P. adsorción = 7,5 kPa
- q. adsorción = 0,23 kg H₂O/kg ZEO
- Densidad (vol.) = 141 kWh/m³ ZEO
- Energía (25 m³ ZEO) = 3525 kWh
- COP = 1



Prestaciones térmicas

- Potencia térmica disponible en función del tiempo de descarga:
 - » 3525 kW → 1 hora
 - » 1762 kW → 2 horas
 - » 880 kW → 4 horas
 - » 440 kW → 8 horas
 - » 220 kW → 16 horas
 - » 110 kW → 32 horas
 - » 55 kW → 64 horas

Coste de la energía convencional

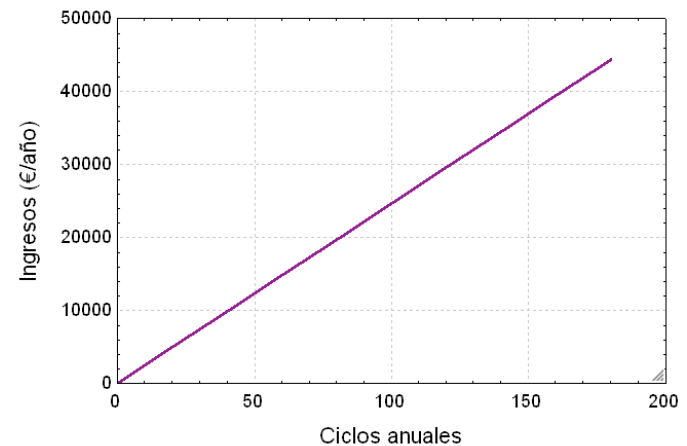
- Gasóleo C:
 - Precio (Dic-14): 1,05 €/kg
 - PCI: 11,86 kWh/kg
 - Eficiencia: 90 %
 - Coste: 0,10 €/kWh
- Gas licuado de petróleo (GLP):
 - Precio (Dic-14): 1,20 €/kg
 - PCI: 12,78 kWh/kg
 - Eficiencia: 90 %
 - Coste: 0,10 €/kWh
- Gas natural licuado (GNL):
 - Precio (Dic-14): 0,80 €/kg
 - PCI: 13,53 kWh/kg
 - Eficiencia: 90 %
 - Coste: 0,07 €/kWh
- Biomasa (astillas – 15% humedad):
 - Precio (Dic-14): 0,06 €/kg
 - PCI: 4,41 kWh/kg
 - Eficiencia: 90 %
 - Coste: 0,02 €/kWh

Modelo de negocio

- La oportunidad de negocio se sitúa en la compra de calor residual que es despilfarrado a la atmósfera por una empresa ofertante y la venta del mismo a otra empresa que demanda calor, especialmente de secado dada la naturaleza higroscópica del soporte (zeolita), mediante el uso de tecnología de adsorción de vapor de agua
- La oferta de calor no es restrictiva (vale cualquiera), ya que podemos ofrecer un valor añadido a algo que es desechado y tiene un coste nulo, pero para la demanda de calor seleccionaremos aquellas que lo hacen empleando combustibles fósiles tipo gasóleo o GLP (propano) ya que el coste que aplican a su producto es superior y posibilita un margen de explotación superior
- Como análisis inicial, podemos considerar un precio del calor residual comprado de 0,02 €/kWh (similar al coste de biomasa) y un precio del calor vendido de 0,07 €/kWh (similar al coste del GNL)

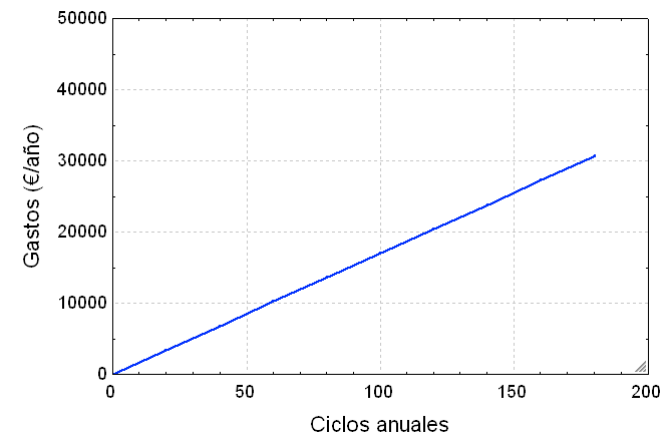
Valoración económica - Ingresos

- Vendrán dados por la venta de calor a un precio unitario de 0,07 €/kWh y serán lineales con el número de ciclos de descarga anuales satisfechos (cada uno de 3525 kWh), tomando un límite superior de 180 ciclos/año (un día de carga y otro de descarga durante 365 días)



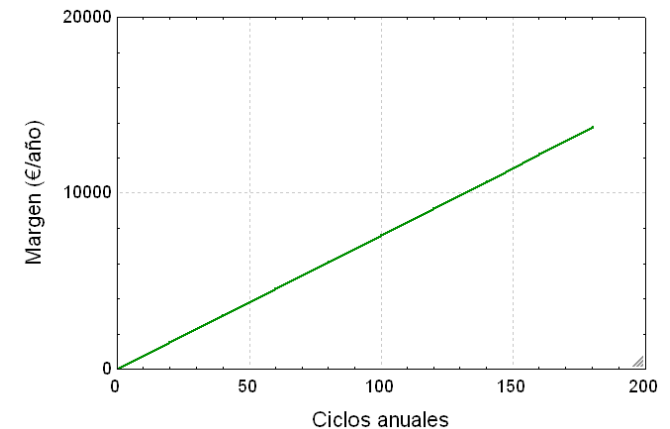
Valoración económica - Gastos

- Vendrán dados por la compra de calor a un precio unitario de 0,02 €/kWh adicionando el coste directo e indirecto del transporte subcontratado entre oferta y demanda (se tomará una distancia de 100 km I/V a un coste de 100 €) y serán lineales con el número de ciclos de carga anuales satisfechos (máx.. 180 ciclos/año)

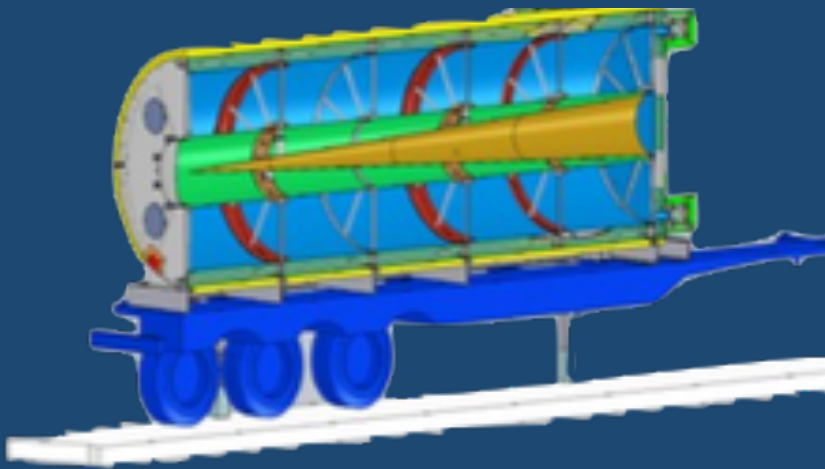


Valoración económica - Margen

- Vendrá dado por la diferencia entre los ingresos por venta de calor a 0,07 €/kWh y gastos por compra de calor a 0,02 €/kWh y costes de transporte (100 km I/V estimados en 100 €) y serán lineales con el número de ciclos de carga anuales (máx.. 180 ciclos/año)



Valoración económica - Inversión



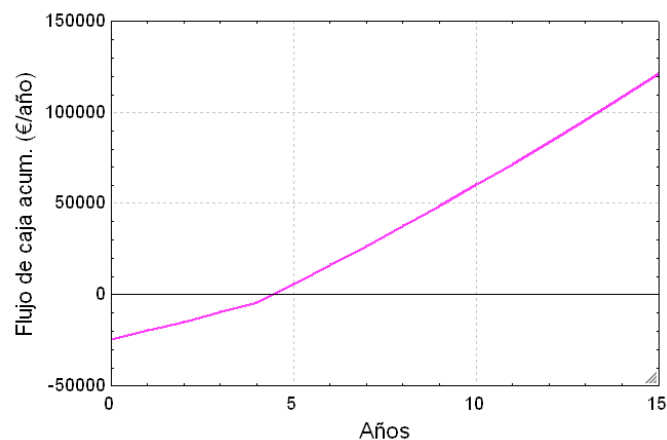
Zeolita (pellet 2,5 - 5 mm)	17,500 kg	17,500 €
Reactor contenedor 25 m ³	1 Ud.	12,000 €
Intercambiador aire-aire	1 Ud.	6,000 €
Instrumentación y control	1 Ud.	2,000 €
Imprevistos	-	2,500 €
Inversión		40,000 €

Análisis económico - Consideraciones

- El margen bruto se actualizará según un ratio IPC-0.5%, a efectos de cálculo se tomará un +2.5% anual
- La vida útil de la instalación es de 15 años
- Se aplicará una amortización lineal durante los 15 años
- Se aplicará una financiación ajena (préstamo) del 50 % (20,000 €) a devolver en 5 años con un TIN del 5%
- El impuesto sobre beneficio será del 25% (PYME)
- Se valorará la inversión en términos del periodo de amortización (ROI) y de la tasa interna de rendimiento (TIR)

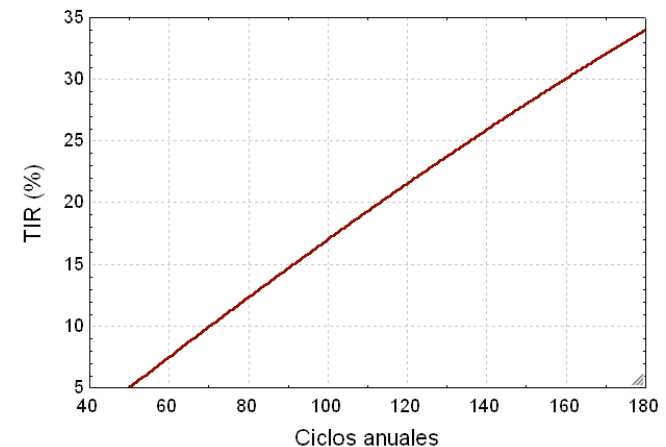
Cuenta de tesorería (150 ciclos/año)

150 CICLOS - AÑOS	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
BAAIT	0	11,438	11,724	12,017	12,317	12,625	12,941	13,265	13,596	13,936	14,284	14,642	15,008	15,383	15,767	16,162
Amortización	0	2,667	2,667	2,667	2,667	2,667	2,667	2,667	2,667	2,667	2,667	2,667	2,667	2,667	2,667	2,667
BAIT	0	8,771	9,057	9,350	9,651	9,959	10,274	10,598	10,930	11,269	11,618	11,975	12,341	12,716	13,101	13,495
Intereses	1,000	819	629	429	220	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BAT	-1,000	7,952	8,428	8,921	9,431	9,959	10,274	10,598	10,930	11,269	11,618	11,975	12,341	12,716	13,101	13,495
Impuestos (25%)	0	1,988	2,107	2,230	2,358	2,490	2,569	2,649	2,732	2,817	2,904	2,994	3,085	3,179	3,275	3,374
BDT	-1,000	5,964	6,321	6,691	7,073	7,469	7,706	7,948	8,197	8,452	8,713	8,981	9,256	9,537	9,826	10,121
COBROS	20,000	11,438	11,724	12,017	12,317	12,625	12,941	13,265	13,596	13,936	14,284	14,642	15,008	15,383	15,767	16,162
BAAIT	0	11,438	11,724	12,017	12,317	12,625	12,941	13,265	13,596	13,936	14,284	14,642	15,008	15,383	15,767	16,162
Financiación	20,000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PAGOS	44,619	6,608	6,727	6,850	6,977	2,490	2,569	2,649	2,732	2,817	2,904	2,994	3,085	3,179	3,275	3,374
Préstamo	4,619	4,619	4,619	4,619	4,619	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Inversión	40,000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Impuestos	0	1,988	2,107	2,230	2,358	2,490	2,569	2,649	2,732	2,817	2,904	2,994	3,085	3,179	3,275	3,374
CASH-FLOW	-24,619	4,830	4,997	5,167	5,340	10,136	10,372	10,615	10,864	11,119	11,380	11,648	11,922	12,204	12,492	12,788
CASH-FLOW. ACUM.	-24,619	-19,789	-14,792	-9,624	-4,284	5,852	16,224	26,839	37,703	48,822	60,202	71,850	83,772	95,976	108,468	121,256



Análisis económico - TIR

- La representación de la rentabilidad intrínseca de la inversión dada por el TIR muestra una dependencia aproximadamente lineal con el número de ciclos desde un mínimo del 5% (igual al TIN del préstamo) para 50 ciclos anuales, subiendo hasta el 34% para el máximo de 180 ciclos/año



Análisis económico - Amortización

- La representación de la amortización de la inversión dada por el ROI muestra una dependencia de tipo monótona decreciente con el número de ciclos desde un máximo de 11 años para 50 ciclos anuales (TIR mínimo del 5%), bajando hasta un mínimo de 4 años para el máximo de 180 ciclos/año (TIR máximo del 34%)

