

APROVECHAMIENTO DE CALORES RESIDUALES EN UNA CEMENTERA MEDIANTE CICLOS DE RANKINE ORGÁNICOS

Autor: Aranda Pérez, Diego

Directores: Linares Hurtado, José Ignacio
Moratilla Soria, Beatriz Yolanda

Entidad Colaboradora: Cátedra Rafael Mariño de Nuevas Tecnologías Energéticas

RESUMEN DEL PROYECTO

1. Introducción

En la industria cementera existe un elevado potencial para la generación eléctrica a partir de los calores residuales del proceso. Ese calor residual se puede convertir en energía eléctrica que cubra parcialmente la demanda a través de un ciclo de Rankine orgánico (ORC), constituyendo así una planta de cogeneración en ciclo de cola.

Los ciclos de Rankine orgánicos (ORC) son una tecnología conocida desde hace años para aplicaciones en las que se precisa transformar en energía eléctrica calor de media y baja temperatura (por debajo de 300°C). El uso como ciclos de cola para procesos industriales resulta especialmente atractivo.

Desde un punto de vista tecnológico los ciclos ORC presentan características específicas y diferenciadas respecto al ciclo de Rankine convencional que conducen a equipos mucho más compactos que los empleados en el ciclo con agua, permitiendo suprimir algunos elementos, como el desgasificador.

En este trabajo se analiza la viabilidad técnica de un ciclo ORC para una cementera de vía seca y horno de satélites. Para ello se explora tanto el fluido más adecuado como la configuración de ciclo que maximiza la energía eléctrica producida. El estudio de viabilidad técnica se completa con el análisis de la planta fuera del punto de diseño estudiando sus prestaciones según el excedente de calor del proceso de producción de cemento, así como las variaciones del foco frío a lo largo de un año tipo en Toledo.

El trabajo culmina analizando la viabilidad económica del proyecto.

2. Metodología

2.1. Ubicación de la planta

El estudio se ha desarrollado para una hipotética planta de tamaño medio situada en Toledo, dado que en dicha provincia proliferan las fábricas de cemento. A partir de la ubicación se determina un año climatológico tipo mediante el paquete METEONORM que permite obtener, entre otras variables, la temperatura seca ambiente hora por hora. La frecuencia de la misma a lo largo del año tipo, considerando las 24 horas del día pero excluyendo el mes de agosto, aparece representada en la Fig. 1, de donde se toma como temperatura de diseño 9°C.

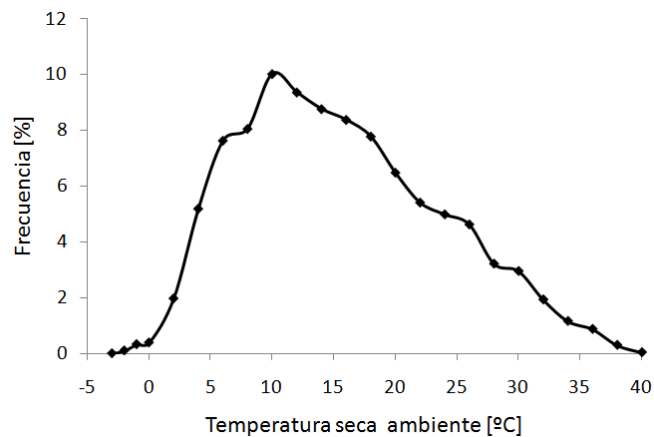


Figura 1: Frecuencia de la temperatura seca ambiente en un año tipo en Toledo.

2.2. Balance energético del proceso

El consumo medio de electricidad en la fabricación del clinker viene establecido en 50,6 kWh/ton. De ellos aproximadamente el 25% (12,5 kWh/ton) se produce durante la molienda de crudo, el 35% (17,5 kWh/ton) en la molienda del cemento y el 40% restante (20 kWh/ton) en actividades diversas. Puede estimarse que en un día tipo se dedican 12 horas a la molienda de crudo, 8 horas a la de cemento y durante las 4 horas restantes no hay consumo eléctrico para los molinos.

En cuanto a los calores excedentarios del proceso se establecen en 1.260 kJ/kg de clinker (medidos respecto a 20°C). Esa potencia térmica está disponible a 360°C y en la realidad puede ser enfriada hasta 130°C para evitar problemas de condensaciones ácidas. Dicho calor excedentario se obtiene de los gases del horno de clinker una vez han salido de los

ciclones. Cuando los molinos de crudo están operando el 20% de dichos gases se conduce a ellos para operaciones de sacado.

La operación de la fábrica se establece 24 horas al día durante todos los meses del año salvo agosto. La Tabla 1 recoge las cifras absolutas de los excedentes térmicos del proceso (entre 360°C y 130°C) y las demandas eléctricas para una producción de clinker de 550.000 ton/año. Como se aprecia, se ha supuesto que el mayor consumo eléctrico, correspondiente a la molienda de cemento, se realiza por la noche para aprovechar la tarifa nocturna mientras que la demanda valle (ningún molino en funcionamiento) se realiza en horario punta del mercado eléctrico. Finalmente, el consumo medio, correspondiente a la molienda de crudo, se realiza en horario mixto, entre las 12.00 y las 24.00 horas.

Tabla 1: Distribución horaria supuesta de la demanda eléctrica y el excedente térmico.

Horario	0.00 a 8.00	8.00 a 12.00	12.00 a 24.00
Demanda eléctrica [kW]	4.940	1.235	3.088
Excedente térmico [kW]	16.245	16.245	12.996

2.3. Viabilidad económica

Los ciclos de cola aparecen recogidos en el RD 661/2007 del Régimen Especial como cogeneraciones dentro del grupo a.2 que contempla “*Instalaciones que incluyan una central que utilice energías residuales procedentes de cualquier instalación, máquina o proceso industrial cuya finalidad no sea la producción de energía eléctrica y/o mecánica.*” Las tarifas son reducidas debido a que en este caso no existen gastos de combustible. Por esta razón la actualización de la tarifa eléctrica se efectúa anualmente con arreglo al IPC. Esto hace que resulte más atractiva la operación en modo de autoconsumo eléctrico que la evacuación a red, siempre que las demandas eléctricas del proceso lo permitan. En el caso analizado mayoritariamente se va a trabajar en régimen de autoconsumo, aunque como se verá más adelante durante el periodo de demanda mínima (8.00 a 12.00) la energía producida por el ORC excede a la demandada por la planta, siendo preciso entonces evacuar a red. Por tanto, se seguirá un esquema mixto, autoconsumiendo toda la energía eléctrica posible y evacuando a red la excedentaria.

La tarifa eléctrica de la energía evacuada a red para el año 2011 es de 50,168 €/MWh (Orden ITC/3355/2010). El precio de compra de la electricidad por la planta no está regulado, estableciendo los grandes consumidores acuerdos con las compañías suministradoras. En el segundo semestre de 2008 el precio industrial medio fue de 107 €/MWh por lo que de forma conservadora se asume un precio de compra de 60 €/MWh.

2.4. ORC en punto nominal

Dado que la temperatura de la fuente térmica es relativamente alta se opta por emplear un ciclo regenerativo para aprovechar la elevada temperatura a la salida de la turbina. Como además el gradiente de la fuente térmica (360°C a 130°C) es elevado se opta por un ciclo supercrítico escogiéndose la presión en la impulsión de la bomba por motivos prácticos en la selección de los intercambiadores de 38,5 bar. Como fluido se busca un hidrocarburo natural para evitar problemas de descomposición a alta temperatura, pudiendo así prescindir del aceite térmico como fluido intermedio en el recuperador. Se selecciona el isopentano por ser un fluido seco (pendiente positiva de la línea de vapor saturado en el diagrama T-s) y condensar a presión superior a la atmosférica a las temperaturas de condensación esperables.

Los intercambiadores se han modelado a partir del método ϵ -NTU como de flujos cruzados con un acercamiento mínimo de 10 K lo que conduce a unos tamaños relativos (NTUs) de 0,88 en el condensador, 12 en el recuperador y 31 en el regenerador. Se han incluido pérdidas de carga de 20 kPa en las tuberías de alta presión y 3 kPa en las de baja; 16 kPa en el lado de alta presión de los intercambiadores y 7 kPa en el lado de baja.

La turbina y la bomba se han modelado a partir del rendimiento isentrópico, tomando 85% para la turbina y 75% para la bomba. Los gases de combustión se han modelado como gases perfectos con 1,1 kJ/kg-K y un flujo másico máximo de 65 kg/s, correspondiente a los períodos en los que no operan los molinos de crudo. En operación de éstos el flujo de gases se reduce a 52 kg/s.

Con objeto de no demandar agua para el ciclo se ha empleado un aerocondensador con un salto térmico en el lado del aire de 14°C. El modelo ha sido implantado en EES de donde se han extraído también las propiedades del isopentano.

2.5. ORC fuera del punto nominal

El ciclo ha de funcionar fuera del punto de diseño tanto por variaciones del foco caliente como del foco frío. En el foco caliente el caudal de gases varía entre el de diseño (100%)

en ausencia de operación del molino de crudo y uno un 20% menor cuando dicho molino opera. En cuanto al foco frío, la variación de la temperatura ambiente hora por hora hace que la temperatura de condensación se vea modificada.

3. Resultados

3.1. Punto nominal

El punto nominal se ha diseñado para el 100% de gases (65 kg/s) y una temperatura de entrada del aire al condensador de 9°C, obteniéndose una potencia eléctrica neta de 4MW con una eficiencia del ciclo de 26,67%. El caudal de aire requerido es de 783 kg/s.

3.2. Operación anual

La energía eléctrica producida por el ORC durante un año de trabajo asciende a 28.163 MWh, de los que 24.328 MWh se han autoconsumido y 3.835 MWh se han evacuado a red.

3.3. Viabilidad económica

Con las hipótesis económicas fijadas se obtiene una tasa interna de rentabilidad (TIR) superior al 29%, un período de retorno inferior a 7 años (35% de la vida del proyecto) y un valor actual neto de (VAN) de 7,4 M€

La estimación de la inversión está sujeta a cierta incertidumbre. Para valorar la sensibilidad de la viabilidad económica se ha calculado la inversión que podría soportar el proyecto para tener un retorno en el 75% de la vida del mismo, resultando de 2.150 €/kW (el doble de la estimada).

En cuanto a la estructura de ingresos se aprecia que los debidos a la energía reemplazada (autoconsumo) suponen más del 88% del total.

USE OF RESIDUAL HEAT IN THE CEMENT INDUSTRY BY ORGANIC RANKINE CYCLES

Author: Aranda Pérez, Diego

Directors: Linares Hurtado, José Ignacio
Moratilla Soria, Beatriz Yolanda

Collaborating Organization: Cátedra Rafael Mariño de Nuevas Tecnologías
Energéticas

PROJECT SUMMARY

1. Introduction

In the cement industry there is a large potential for electricity generation from residual heat of the process. This waste heat can be converted into electrical energy that partially cover the demand through an organic Rankine cycle (ORC), providing a cycle cogeneration plant in queue.

The organic Rankine cycle (ORC) is a technology known for years for applications is needed to transform heat into electric power medium and low temperature (below 300° C). The cycles used as glue for industrial processes is particularly attractive. From a technological standpoint ORC cycles specific and different characteristics compared to conventional Rankine cycle leading to much more compact equipment that employees in the water cycle, allowing to delete some items, such as the degasser.

This paper analyzes the technical feasibility of an ORC cycle for cement kiln dry and satellites. For this purpose, explores both the fluid best suited as the cycle configuration that maximizes power output. The feasibility study is completed with the analysis of the plant out of studying their design point performance as the excess heat of cement production process, as well as variations of the cold during a typical year in Toledo. The paper concludes by analyzing the economic viability of the project.

2. Methodology

2.1. Plant Location

The study has been developed for a hypothetical medium-sized plant in Toledo, in the province since cement plants proliferate. From the location of one year is determined by weather type METEONORM package that allows for, among other variables, the ambient dry bulb temperature hour by hour. The frequency of the same throughout the typical year, taking 24 hours a day, but excluding the month of August, is depicted in Figure 1, where it is taken as design temperature 9 ° C.

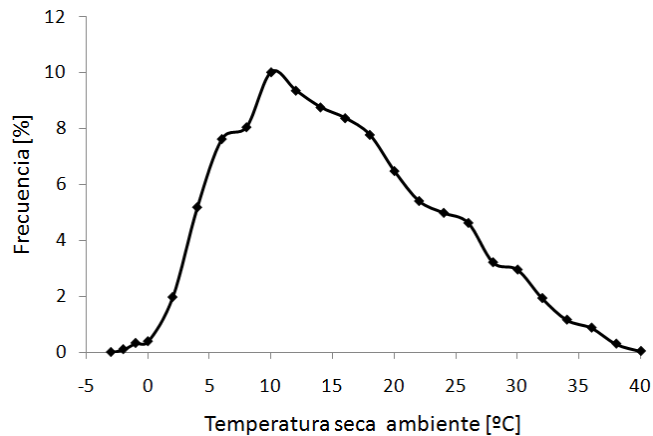


Figure 1: Frequency of dry ambient temperature in a typical year in Toledo.

2.2. Process energy balance

The average electricity consumption in the production of clinker is set at 50.6 kWh / ton. Of these approximately 25% (12.5 kWh / ton) is produced during the milling of oil, 35% (17.5 kWh / ton) in the grinding of cement and 40% (20 kWh / ton) in various activities. Can be estimated that a typical day 12 hours devoted to grinding oil, 8 hours of cement and for the remaining 4 hours no electricity consumption for the mills.

As for the surplus heat of the process down by 1,260 kJ / kg of clinker (measured from 20 ° C). This thermal power is available to 360 ° C and in reality can be cooled to 130 ° C to prevent condensation problems acidic. This excess heat is obtained from clinker kiln gases after they have left of cyclones. When the oil mills are operating on 20% of

these gases is driven out of them for operations. The operation of the factory set 24 hours a day for every month of the year except August. Table 1 shows the absolute numbers of excess heat in the process (between 360 ° C and 130 ° C) and the electrical requirements for clinker production of 550,000 ton / year. As shown, it is assumed that the largest electricity consumption for cement grinding is done at night to take advantage of the nightly rate as demand valley (no mill in operation) is performed in peak time electricity market. Finally, the average consumption for raw grinding is done in mixed schedule, between 12.00 and 24.00.

Table 1: Distribution of time alleged in electricity demand and the excess heat.

Horario	0.00 a 8.00	8.00 a 12.00	12.00 a 24.00
Demanda eléctrica [kW]	4.940	1.235	3.088
Excedente térmico [kW]	16.245	16.245	12.996

2.3. Economic viability

Tail cycles they are listed in Royal Decree 661/2007 of specialized subjects such as cogeneration in a.2 group that includes "facilities that include an energy plant using waste from any facility, machine or industrial process whose purpose is not production electricity and / or mechanics." Rates are low because in this case there are no fuel costs. For this reason the upgrade of the electricity tariff is made annually according to CPI. This makes it more attractive mode operation power consumption that the evacuation network, provided that the electrical requirements of the permit process. In the present case goes to work mostly in solitary self, but as we shall see later in the period of minimum demand (8.00 to 12.00) the energy produced by the ORC exceeds the demand of the plant, being then necessary to evacuate network. Therefore, it is still a mixed scheme, all power consumption possible and evacuating the excess network. The electricity tariff evacuated energy network for the year 2011 is €50.168 / MWh (Order ITC/3355/2010). The purchase price of electricity for the plant is not regulated, large consumers establishing agreements with utility companies. In the second half of 2008 the average industrial price was 107 € / MWh so conservatively assumes a purchase price of 60€/MWh.

2.4. ORC at nominal point

Since the heat source temperature is relatively high you choose to use a regenerative cycle to take advantage of the high temperature at the exit of the turbine. As well the gradient of the heat source (360 ° C to 130 ° C) is high you opt for a supercritical cycle whichever is the pressure at the outlet of the pump for practical reasons in the selection of the heat exchangers of 38.5 bar. As fluid is looking for a natural hydrocarbon decomposition to avoid problems of high temperature, thus being able to dispense with thermal oil as a fluid medium in stove. Isopentane is selected to be a dry flowable (positive slope of the saturated vapor line on the Ts diagram) and condense to above atmospheric pressure at condensation temperatures expected.

Exchangers have been modeled on the ϵ -NTU method for cross-flow as a minimum of 10 K approach leading to a relative sizes (NTUs) of 0.88 in the condenser 12 in the stove and 31 in the regenerator . We have included pressure drop of 20 kPa in the high-pressure pipes and 3 kPa for the low, 16 kPa in the high-pressure side heat exchangers and 7 kPa on the low side.

The turbine and the pump has been modeled after isentropic performance, taking 85% to 75% for turbine and pump. The combustion gases are modeled as perfect gases with 1.1 kJ / kg-K and a mass flow of up to 65 kg / s, corresponding to the periods in which no oil mills operating. In operation of these gas flow is reduced to 52 kg / s. In order not to sue water cycle has been used an air cooled condenser with a temperature drop in the air side of 14 ° C. The model has been implemented in ESS which have also drawn the properties of isopentane.

2.5. ORC outside the nominal point

The cycle must work outside the point of design changes both the hot and the cold source. In the hot gas flow ranges from design (100%) in the absence of raw mill operation and a 20% lower when the mill operates. As to the cold, the temperature variation by hour ago that the condensing temperature is falsified.

3. Results

3.1. Nominal point

The nominal point is designed for 100% gas (65 kg / s) and air inlet temperature to condenser 9 ° C, yielding a net electrical power 4MW with an efficiency of 26.67% cycle. The air flow required is 783 kg / s.

3.2. Annual operating

The electricity produced by the ORC for a year of work amounts to 28,163 MWh, of which 24,328 MWh consumption and 3,835 have been evacuated MWh network.

3.3. Economic viability

With the economic assumptions set you get an internal rate of return (IRR) exceeding 29%, a payback period of less than 7 years (35% of the life of the project) and a net present value (NPV) of 7.4M€

The estimated investment is subject to some uncertainty. To evaluate the sensitivity of the economic viability was calculated investment that could support the project for a return in 75% of its lifetime, resulting in €2,150 / kW (double the estimate).

As for the income structure shows that the energy displaced due to (self) is over 88% of the total.