

OPERACIÓN ÓPTIMA EN ECOSIMPRO[®] DE ESTACIONES DE REGULACIÓN Y MEDIDA DE LA RED DE GAS NATURAL

Mayko Rannany

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática. Escuela de Ingenierías Industriales. Universidad de Valladolid, maykorannany.santos@alumnos.uva.es

Tania Rodríguez-Blanco

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática. Escuela de Ingenierías Industriales. Universidad de Valladolid, tania.rodriguez@autom.uva.es

César de Prada

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática. Escuela de Ingenierías Industriales. Universidad de Valladolid, prada@autom.uva.es

Resumen

El presente artículo aborda el planteamiento y resolución del problema de optimización de la operación de una estación de regulación y medida de gas natural (ERM), minimizando los costes de diseño y operación de la ERM (diseño óptimo de los intercambiadores de calor, minimización del consumo de gas de la caldera y eléctrico de las bombas hidráulicas y compresores), con variables de decisión en la forma continuas y con parte de las restricciones dadas por ecuaciones diferenciales.

Para resolverlo se ha utilizado un algoritmo de programación cuadrática secuencial SQP llamado SNOPT implementado en EcosimPro[®].

Palabras Clave: estación de regulación y medida; programación no lineal; optimización; simulación dinámica.

1 INTRODUCCIÓN

Este artículo se enmarca dentro de un proyecto de investigación más amplio, desarrollado en el departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad de Valladolid, centrado en el desarrollo de diversas funcionalidades para una librería de redes de gas natural en el entorno de modelado y simulación EcosimPro[®]. Dicha librería fue diseñada para mejorar la supervisión, monitoreo y simulación de redes de gasoductos de gas natural [1,2].

En una estación de regulación y medida la misma se relaciona con la tubería anterior a través de la presión, temperatura, composiciones individuales de los componentes del gas, caudal volumétrico y densidad, es decir, recibe el valor de la presión, temperatura y composición individuales a la entrada

y caudal normalizado a la salida y calcula el caudal volumétrico y densidad a la entrada.

El problema de optimización de la estación de regulación y medida tratase un problema no lineal sujeto a restricciones de desigualdad $g_i = (x, y) \leq 0$, y algunas dadas por ecuaciones diferenciales $\frac{dy}{dx} = f(x, y)$, la figura 1 a presenta un esquema tipo de resolución de optimización de procesos a través de simulación dinámica.

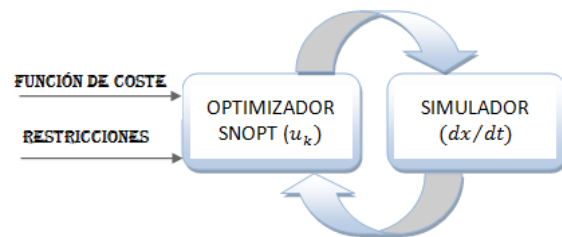


Figura 1 1 - Esquema de resolución de un problema de optimización de procesos.

2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

2.1 ESTACIÓN DE REGULACIÓN Y MEDIDA (ERM)

Se denomina estación de regulación y medida, el conjunto de elementos (válvula de corte de entrada, filtro, regulador de presión, tuberías, intercambiadores de calor, bomba hidráulica, medidores de caudal, controladores, contador, válvulas de seguridad y seccionamiento, manómetros, bridas etc.) para efectuar la regulación, control y medición del gas suministrado a la red secundarias [6,7,8]. El gas natural que es suministra a la red final de consumo ha de tener unas condiciones muy determinadas. Debe tener una presión en un rango concreto, debe llegar a una temperatura correcta y el grado de limpieza debe estar controlado. Además, la composición química del gas natural tiene que estar controlada. Por último,

debe conocerse la cantidad de gas que se consume y su poder calorífico, a efectos de facturación del combustible consumido. La estación de regulación y medida (ERM), ver figura 2, tendrá como función regular la presión y caudal del suministro de gas a los consumidores sean ellos industriales o domésticos, para mantener siempre una presión constante y medir la cantidad suministrada a la instalación. El sistema de medición debe cumplir con los requerimientos de la compañía suministradora.



Figura 2 - Estación de regulación y medición para Gas Natural (E.R.M.), aérea.

Por lo tanto las principales funciones de la estación de gas son: Que el gas que se reciba en la red final tenga una presión constante y dentro de unos rangos muy concretos ya que la presión del gas suministrado a la ERM puede variar dependiendo del gaseoducto que nos alimentemos. Que la temperatura sea la adecuada, para evitar la formación de hielo por la condensación del vapor de agua. Que el gas se reciba limpio, sin partículas que puedan ocasionar problemas. El caudal y la composición deben ser conocidos [8];

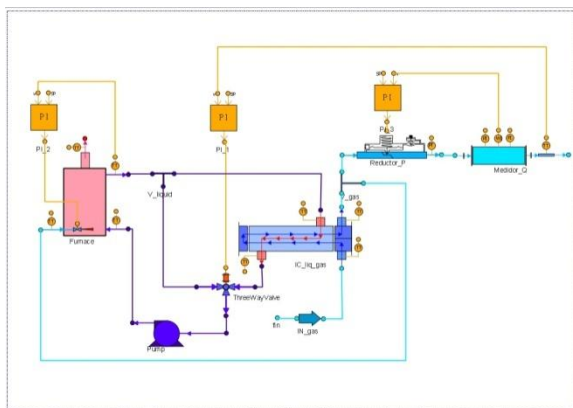


Figura 3 - Esquema del proceso realizado en la ERM implementado en EcosimPro®.

Los elementos o componentes en EcosimPro representados en la figura 3 son : (entrada de gas, intercambiador de calor, caldera, reductor de presión,

salida de gas de la ERM , elementos auxiliares como reguladores PI, bifurcaciones de agua y gas, bomba de agua y medidores de caudal y temperature[3].

2.2 SIMULACIÓN DINÁMICA DE PROCESOS:

Mientras que la simulación en estado estacionario se utiliza fundamentalmente para diseñar equipos, las aplicaciones de la simulación dinámica son más amplias. En procesos discontinuos se utiliza para evaluar la eficiencia y estabilidad de un proceso frente a las perturbaciones de operación típicas, mientras que en procesos continuos su función es mejorar la operación durante la puesta en marcha e parada. Una aplicación cada vez más frecuente es utilizar el modelo dinámico como planta “virtual” e implementar estrategias de control inferencial [9]. La solución del problema de diseño óptimo, para unas variables conocidas cuyo valor especifica las condiciones de operación para las que se efectúa el diseño, permite calcular los valores de variables de diseño óptimo. El resultante tendrá un determinado comportamiento dinámico, en cual vendrá dado por un conjunto de ecuaciones diferenciales y algébricas de distintos tipos que corresponde al formato:

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= f(x, u, v, p) \\ y &= g(x, u, v, p) \end{aligned} \quad (1)$$

Donde las variables bajo el operador derivada , x , representan los estados del modelo , u , son las variables manipuladas , esto es , aquellas susceptibles a ser fijadas libremente (o por el sistema de control) dentro de un rango durante la operación del procesos , v , son las denominadas perturbaciones , esto es, variables cuyo el valor viene impuesto de forma externa y de naturaleza más o menos aleatoria , e y las variables controladas , variables medidas cuyo valor se quiere mantener en valores prefijados para la correcta operación del proceso.[9].

2.5 PROBLEMAS DE OPTIMIZACIÓN

Un problema de optimización se puede expresar de la forma:

$$\begin{aligned} \text{Mín } f(x, y) \text{ o Max } f(x, y) \\ g_j = (x, y) \leq 0 \\ h_i = (x, y) = 0 \\ x \in R^n , y \in Z \end{aligned} \quad (2)$$

Donde la función objetivo/función de costo $f(x, y)$ está sujeta a un cierto número de restricciones expresadas en forma de desigualdad $g_j(x, y)$ con $j = 1, 2, \dots, m$ o igualdad $h_i(x, y)$ con $i = 1, 2, \dots, l$, una observación importante es que si no existe $g_j(x, y)$ y $h_i(x, y)$ el problema se denomina sin restricciones. [9]

El problema de optimización se plantea de forma que algunas de las variables se pueda modificar (variables independientes o grados de libertad), mientras que el resto de variables (variables dependientes) se calculan a partir de esas hasta lograr el objetivo (maximizar o minimizar). Las variables (x, y) , como mencionado antes pueden ser continuas o discretas (que a su vez, pueden ser binarias o enteras). En la mayoría de ocasiones las variables binarias se asocian a decisiones (1=sí, 0=no) [10]. En la optimización de problemas dinámicos parte de las restricciones vienen dadas por ecuaciones diferenciales y puede ser expresado de la forma:

$$\begin{aligned} \min_x f(x, y) \text{ o } \text{Max } f(x, y) \\ \frac{dy}{dx} = f(x, y) \\ g_j = (x) \leq 0 \\ h_i = (y) \leq 0 \end{aligned} \quad (3)$$

En la literatura sobre optimización se puede encontrar dos enfoques clásicos para resolver un problema de optimización dinámica denominados como métodos indirectos y métodos directos [10],[9]. Método indirectos: basados en la teoría clásica de control óptimo en la cual la derivación de las condiciones de optimalidad se realiza vía cálculo variacional, finaliza en un problema de condición de contorno en múltiples puntos, complicado de resolver en muchos casos [11,12] y Métodos directos: que buscan una solución aproximada mediante métodos de cálculo numérico, que se traduce en la resolución de un problema de programación no lineal que, con la potencia de cómputo disponible en las CPUs actuales, resulta más asequible en cuanto a complejidad [11,12].

3. MODELADO DE LA ESTACIÓN DE REGULACIÓN Y MEDIDA

En esta sección se describirá el modelado de los principales equipos de la estación de regulación y medida.

Uno de los equipos más importantes es el intercambiador de calor de carcasa y tubos donde el gas natural circula por el interior de los tubos y el agua por el exterior, tiene dos pasos por el tubo y uno por la carcasa ver figura 4

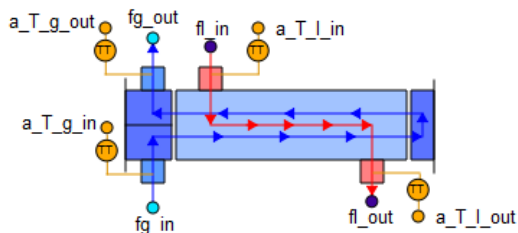


Figura 4 - Intercambiador de calor carcasa y tubos IC_liq_gas

Las ecuaciones que expresan los balances de materia en el intercambiador, tanto global como individuales, son:

$$\begin{aligned} Q_{gin} \cdot \rho_{gin} &= Q_{gout} \cdot \rho_{gout} \\ W_{lin} &= W_{lout} \\ W_{gin} &= Q_{gin} \cdot \rho_{gin} \end{aligned} \quad (4)$$

Balance de materia individual gas:

$$y_{gin,i} = y_{gout,i} \quad \forall i = 1 \dots M \quad (5)$$

i – componente de la mezcla

M - número de componentes en la mezcla de gas natural, $M = 12$. Constante.

Las ecuaciones que representan los balances de energía en el intercambiador son:

$$\begin{aligned} \rho_{gin} \cdot V_{tub} \cdot Cp_{gin} \frac{dT_{gout}}{dt} = \\ \rho_{in} \cdot Q_{gin} \cdot Cp_{gin} (T_{gin} - T_{gout}) + Q \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \rho_l \cdot V_{car} \cdot Cp_{lin} \frac{dT_{lout}}{dt} = \\ Cp_{lin} \cdot W_{lin} (T_{lin} - T_{lout}) - Q \end{aligned} \quad (7)$$

Transferencia de Calor real

$$Q = A_s \cdot U \cdot \Delta T_{ML} \cdot \varepsilon \quad (8)$$

$\varepsilon = 0.95$. Eficiencia para un intercambiador

A continuación se presenta el modelo de la bomba de agua de entrada al intercambiador de calor. Se considera que hay caída de presión en el intercambiador y en la válvula reductora de presión. Por otro lado en el circuito de agua no se ha modelado la presión del agua.

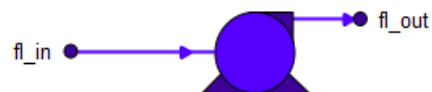


Figura 5 - Bomba de agua .

El balance de materia de la bomba es el siguiente

$$\begin{aligned} W_{lin} &= W \\ W_{lout} &= W \\ T_{lin} &= T_{lout} > 70^\circ\text{C} \end{aligned} \quad (9)$$

Se asigna un valor fijo al caudal másico de agua que va a circular por el circuito de agua de la ERM

Otro de los equipos más importante es la caldera ver figura 6 que se utiliza para calienta el agua va a entrar al intercambiador de cal. Como corrientes de entrada se tienen el gas natural y el agua

fría. Dentro del horno se produce la combustión del gas natural. El calor que genera el gas natural cuando se quema es el que se emplea para calentar la corriente de agua que lo atraviesa.

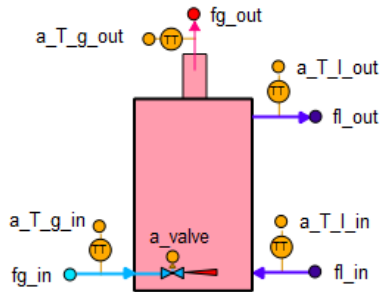


Figura 6 - Caldera a gas

Los balances de materia tanto para la corriente líquida como para el gas son:

$$\begin{aligned} W_{lin} &= W_{lout} \\ Q_{gin} \cdot \rho_{gin} &= Q_{gout} \cdot \rho_{gout} \\ W_{gin} &= Q_{gin} \cdot \rho_{gin} \end{aligned} \quad (10)$$

No existe mezcla con otra corriente, ni reacciones químicas, por lo que las composiciones del gas a la entrada y a la salida son iguales.

$$\begin{aligned} y_{gin,i} &= y_{gout,i} \\ \forall_i &= 1 \dots M \quad \forall_i = \\ &1 \dots M_{gc} \end{aligned} \quad (11)$$

i – componente de la mezcla
 M – número de componentes presentes en la mezcla de gas natural. $M=12$ constante.
 Balance de Energía del líquido:

$$\begin{aligned} \rho_l \cdot V_{horno} \cdot C_{p_{lin}} \frac{dT_{lout}}{dt} = \\ C_{p_{lin}} \cdot W_{lin} (T_{lin} - T_{lout}) + Q_{horno} \end{aligned} \quad (12)$$

Calor intercambiado en el horno

$$\begin{aligned} Q_{horno} \\ = PCI \cdot cte_cal_para_J \cdot Q_{normal} \end{aligned} \quad (13)$$

El reductor de presión figura 7 es el equipo encargado de adaptar la presión del gas de la presión de distribución a la presión requerida por el consumidor.

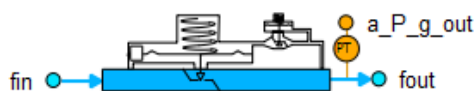


Figura 7 - Reductor de presión.

Balance de materia del gas y del líquido :

$$W_{lin} = W_{lout} \quad (14)$$

$$Q_{gin} \cdot \rho_{gin} = Q_{gout} \cdot \rho_{gout}$$

$$W_{gin} = Q_{gin} \cdot \rho_{gin}$$

Balance de materia individual gas

$$y_{in,i} = y_{out,i} \quad \forall_i = 1 \dots M_{gc} \quad (15)$$

i – componente de la mezcla

M – número de componentes presentes en la mezcla de gas natural. $M=12$ constante.

Balance de energía del gas

$$T_{gout} = T_{gin} - \frac{(P_{gin} - P_{gout})}{100000} \cdot 0,5 \quad (16)$$

Flujo Volumétrico de salida del gas (Gas de Combustión)

$$\begin{aligned} Q_{out} \\ = \frac{y_{valve} \cdot C_v \cdot N_g \cdot F_p \left(\frac{P_{gin}}{100000} \right) Y_f}{\sqrt{\frac{(PM/1000) T_{gin} \cdot Z_{in}}{x_p}}} \end{aligned} \quad (17)$$

En la ERM existen diversos medidores figura 8 por ejemplo, de caudal y presión, que miden las condiciones del gas suministrado al consumidor. Se supone que no hay acumulación de materia, no hay cambios en las propiedades del gas (densidad y temperatura) y no hay caída de presión.

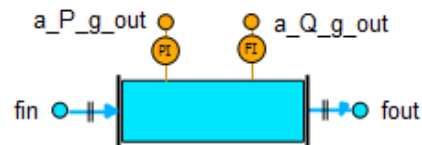


Figura 8 - Medidor de caudal y presión FT.

No hay cambio de propiedades por lo que el caudal volumétrico y las densidades de la entrada y de la salida son iguales.

$$Q_{gin} = Q_{gout} \quad (18)$$

$$\rho_{gout} = \rho_{gin}$$

Balance de energía

$$T_{gin} = T_{gout} \quad (19)$$

La temperatura de entrada y salida son la misma. No hay variación de temperaturas. Normalmente el caudal volumétrico se expresa como flujo normalizado obtenido a partir de la siguiente expresión:

$$Q_{normal} = \frac{Q_{gin} \cdot P_{gin} \cdot Z_{normal} \cdot T_{normal}}{P_{normal} \cdot Z_{in} \cdot T_{gin}} \quad (20)$$

Cálculo de las presiones de entrada y salida, se supone que no hay caída de presión.

$$P_{gin} = P_{gout} \quad (21)$$

4. ESTABLECIMIENTO DE ESTRATEGIAS DE CONTROL

La simulación de procesos dinámica se utiliza de forma extensiva a la hora de comprobar el comportamiento dinámico de los equipos y evaluar la eficiencia de un sistema de control. El establecimiento adecuado de una estrategia de control es indispensable para alcanzar una operación segura y estable de la planta. En la ERM existen varios controladores PI para el control de las variables más importantes.

- Controlador de la temperatura de gas a la salida de la ERM.
- Controlador de la temperatura de agua a la salida de la caldera
- Controlador del caudal normalizado de gas a la salida de la ERM.

Las variables manipuladas por los controladores son:

La apertura de la válvula reductora de presión;

La apertura de la válvula de tres vías para controlar la temperatura que tiene el gas natural haciendo pasar más o menos agua al intercambiador mediante un bypass;

La apertura de la válvula de gas de la caldera para que entre más o menor caudal de gas natural al horno para su combustión.

La ley de control aplicado en esa simulación corresponde a un controlador P.I típico, que viene dada por la ecuación 22 y 23.

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau \right] \quad (23)$$

$$e(t) = w(t) - y(t) \quad (223)$$

5. OPTIMIZACIÓN DE LA ESTACIÓN DE REGULACIÓN Y MEDIDA (ERM)

Para resolver el problema de optimización planteado se utilizó un algoritmo de optimización

llamado SNOPT adecuado para resolver problemas de programación cuadrática secuencial – SQP, a gran escala. El procedimiento seguido para llevar a cabo la optimización de la operación de la estación de regulación y medida incluye los siguientes pasos ver figura :

1. Estimación del área de transferencia de calor del intercambiador carcasa y tubos basado en el calor requerido por los procesos de calentamiento del gas, además de especificaciones tales como variables de diseño y condiciones de contorno;
2. Optimización del coste anual de operación de los intercambiadores de calor basados en de la pérdida de presión causada por la fricción en los tubos y en la carcasa.
3. Optimización económica de la caldera basada en la minimización de los costes de consumo de combustibles e inversión del equipo;
4. Estimación de las condiciones óptimas de operación de la bomba hidráulica y de la potencia requerida para la compresión del gas que entra en la ERM;
5. Utilización de un algoritmo de optimización SNOPT (Programación cuadrática secuencial SQP) con objetivo de obtener valores óptimos de las funciones objetivos de minimización de costes de capital de investimentos, costes de operación y coste energéticos.

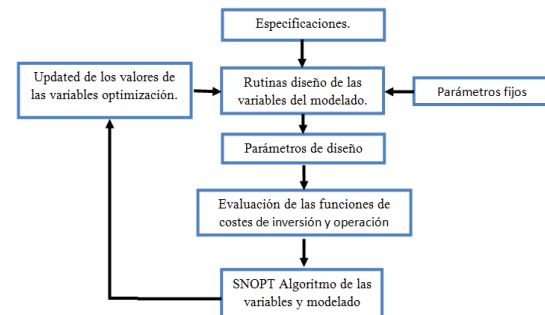


Figura 9 - Algoritmo de lo método de optimización de la ERM.

5.1 DISEÑO ÓPTIMO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR CARCASA Y TUBOS

Para llevar a cabo el diseño óptimo del intercambiador de calor de la ERM, se plantea un problema de optimización económica cuyo objetivo es minimizar una función de costo de inversión que se calcula en función de la superficie de transferencia de calor del intercambiador de acuerdo con Hall's[13], puede ser calculada por la ecuación 24 .

$$C_{iic} = a_1 + a_2 S^{a_3} \quad (24)$$

Siendo, $a_1 = 7000$, $a_2 = 360$ y $a_3 = 0.80$, coeficientes para intercambiadores de calor carcasa y tubos fabricados de acero carbono[13].

C_{iic} – El capital de inversión en el intercambiador de calor carcasa y tubos en (€)

$$J = \min_{\{d_{tub}, n_{tubos}, L_{tubos}\}} \sum_{i=1}^n (a_1 + a_2 S^{a_3}) \quad (25)$$

S.t. : Variables de decisión del problema de optimización

$$0.02 \leq d_{tub} \leq 0.055$$

$$710 \leq n_{tubos} \leq 800$$

$$7.0 \leq L_{tubos} \leq 12.0$$

Para resolver adecuadamente el problema de optimización del intercambiador de calor es necesario incluir las siguientes restricciones de proceso:

- Temperatura de salida en el medidor de caudal (salida de la ERM).

$$267.5 \leq T_{in} - \frac{(P_{in} - P_{out})}{100000} \cdot 0,5 \leq 268.5$$

- Diferencia media logarítmica de temperatura para de lo intercambiado de calor:

$$30 \leq \frac{(T_{lin} - T_{gout}) - (T_{lout} - T_{gin})}{\ln\left(\frac{(T_{lin} - T_{gout})}{(T_{lout} - T_{gin})}\right)} \leq 50$$

5.2 OPTIMIZACIÓN DE LA OPERACIÓN DE LA ERM.

La optimización de la operación de la estación de regulación y medida es función de los costes de operación considerando la vida útil en años y tasa de descuento anual para los intercambiadores de calor, coste de inversión y de operación relacionados al bombeo de líquido, la suma del coste de inversión de la caldera y el de consumo de combustible y los coste de compresión del gas natural necesario para mantener la presión en la entrada, a lo largo de la red de gas y en la salida. El problema de optimización económica trata de minimizar los costes de operación de la ERM, que serán calculados mediante la función objetivo presentado en la ecuación 26.

$$J = \min_{\{W_{lout}, P_{in}, T_{outgc}, T_{inicial liq}, PI_2.set_signal [1]\}} \sum_{i=1}^n (\beta_1 C_0 + C_{iB} + \beta_2 C_{ic} + \beta_3 C_{comb} + C_{icompr}) \quad (26)$$

S.t. : Variables de decisión del problema de optimización

$$50 \leq W_{lout} \leq 100$$

$$69 \leq P_{in} \leq 76$$

S.a. : Variables de decisión del problema de optimización

$$450 \leq T_{outgc} \leq 650$$

$$80 \leq T_{inicial liq} \leq 95$$

$$85 \leq PI_2.set_signal[1] \leq 90$$

Restricciones de Proceso:

- Temperatura de salida en el medidor de caudal (salida de la ERM).

$$267.5 \leq T_{in} - \frac{(P_{in} - P_{out})}{100000} \cdot 0,5 \leq 268.5 \quad (27)$$

Caudal de la agua en el agua que circula en el intercambiador de calor

$$70 \leq W_{lin} = W_{out} \leq 100 \quad (28)$$

De acuerdo con [14], el coste anual de operación es una función de las pérdidas de presión causadas por la fricción en los tubos y en la carcasa y se evalúa utilizando la siguiente ecuación 29

$$C_0 = P \cdot C_e \cdot H \quad (29)$$

Siendo el costo total de operación con descuento C_{oD} , es obtenido a través de la ecuación 30.

$$C_{oD} = \sum_{k=1}^{ny} \frac{C_0}{(1+i)^k} \quad (30)$$

C_0 – Coste anual de operación (€/years);

C_e – Coste de la energía (€/kWh);

C_{oD} – Coste total de operación con descuento(€).

Siendo “ny” es la vida del equipo en años (intercambiador de calor) y se establece como 10 años, “i” es la tasa de descuento anual de 10 %. El costo de la energía C_e es de 0.12 €/kWh y una carga de trabajo anual “H” de 7000 h/year.

Los costes de inversión y de operación relacionados al bombeo tienen en cuenta la potencia requerida y el tipo de bomba, mediante la siguiente correlación propuesta por el método de Happel de coste del equipo[15], que permite calcular el valor del mismo mediante su parámetro característico. Vale la pena mencionar que el valor del equipo esta expresado en dólares estadounidenses del año 1970 y hacemos la conversión mediante los índices de actualización de costos de equipos Mashallan Swift (M&S) al año de 2014 y al cambio actual del euro con el dólar.[16]

Tabla 1 – Valor de la constante C_1 en función de la potencia de la bomba.

Potencia del motor (Hp) / (W)	C_1 (\$)
1 / 745,7	600
10 / 7457	1400
100 / 74569,99	6000

Siendo:

$$C_{TB} = C_{iB} + C_0 \quad (31)$$

$$C_{TB}(\text{€}, 2014) = C_1 \cdot \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\text{exp}} \cdot \frac{M\&S(2014)}{M\&S(1970)} \cdot \frac{0,911296 \text{ €}}{1 \$} + P_2 \cdot C_e \cdot H \quad (32)$$

C_{iB} - Coste de inversión (€) ;
 C_0 - Coste relacionados al bombeo (€ . years⁻¹) ;
 C_1 - Coste de la bomba de ref., tabla anterior (\$) ;
 P_2 - Potencia de la bomba a instalar (W) ;
 P_1 - Potencia de la bomba de referencia , ;
 exp - (vacío = 0,41; centrifugas = 0,52 ; rotatorias = 0,65);
 C_e - Costo de la energía eléctrica en la Europa año de 2014 (0.12 €/kWh);

H - carga de trabajo anual de 7000 h/year.
 $M\&S(1970) = 303,3$ y $M\&S(2014) = 1.521,0$ [16].
 El precio de una caldera depende mucho de la complejidad de este equipo y de los materiales utilizados en su construcción. Así para la optimización económico de la caldera utilizada en el modelado de la estación de regulación y medida (ERM) la función objetivo es expresada en función de la suma de los costo asociado al consumo de combustible C_{comb} (€/kWh), y del costo asociado a inversión de la caldera C_{ic} (€) , obtenido a través de la ecuación 33.

$$C_{Tc} = C_{ic} + C_{comb} \quad (33)$$

La ecuación 34, para lo costo de inversión de la caldera C_{ic} obtenido de la regla de Williams, consiste en calcula lo costo de inversión de un equipo mediante una regla que relaciona la magnitudes características del equipo y el coste del equipo conocido.

$$C_{ic} = C_1 \cdot \left(\frac{Q_2}{Q_1}\right)^b \quad (34)$$

C_{ic} - Coste de la inversión (€);
 C_1 - Coste del equipo conocido (€);
 Q_1 - Potencia de la caldera conocida (€);
 Q_2 - Potencia de la caldera deseada (€).
 b - Exponente de Williams para superficie de calefacción
 Siendo:

$$C_{comb} = \dot{m}_{(gas_natural)} \cdot C_{p(gas_natural)} \cdot \Delta T \cdot C_{gas} \cdot H$$

$$C_{gas} = 0.055 \text{ €/kWh [7].}$$

6. RESULTADOS

Para la optimización de los intercambiadores de calor carcasa y tubos, se ha simulado un experimento realizado sobre el esquemático de la figura 10, compuesta por tres red de gas independiente, cada una con su respectiva ERM y fuente de presión en la entrada.

Se especifican un rango de operación con tres valores distintos de caudal normalizado (P0 - 125

Nm³/s , P1- 150 Nm³/s y P2- 175 Nm³/s) ver figura, lo objetivo es encuentra un valor de diseño óptimo en función de las variables de decisión , basado en la minimización de la función de coste de inversión y que sea óptimo cumpliendo las restricciones de proceso para cualquier valor de caudal de alimentación entre los intervalos de 125 Nm³/s a 175 Nm³/s;
 Inicialización de las variables de decisión con $d_{tub} = 0,030 \text{ m}$, $N_{tub} = 780$ $L_{tub} = 10 \text{ m}$;

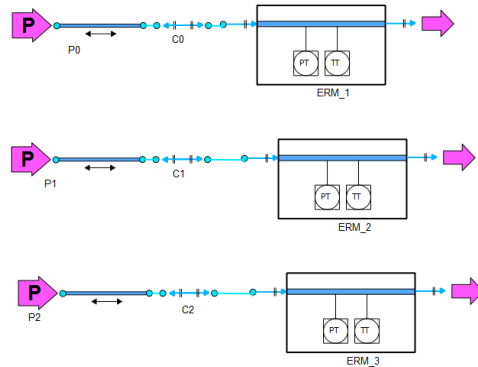


Figura 10 – Tres ERM independientes conectadas a una tubería inicial a la entrada con fuente de presión.

Se aumenta el valor de referencia del regulador PI_3.set_signal responsable por el control del caudal normalizado de gas a la salida de la ERM (Nm³/s), afin de observar lo correcto funcionamiento de los intercambiadores con los valores óptimos de diseño.

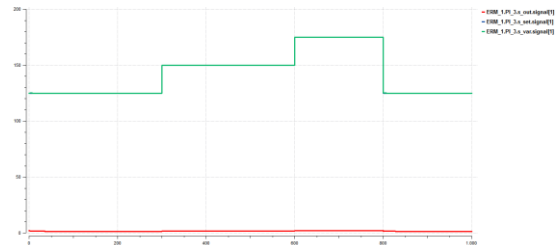


Figura 11 - Referencias del controlador de caudal a salida de la ERM

La figura 11, a presenta el Setpoint con cambios en rampa de caudal normalizado de gas a la salida de la ERM.

$$PI_3.s_set_signal [1] = Q_reductor + 25*\text{step}(\text{TIME}, 300) + 25*\text{step}(\text{TIME}, 600)-50*\text{step}(\text{TIME}, 800).$$

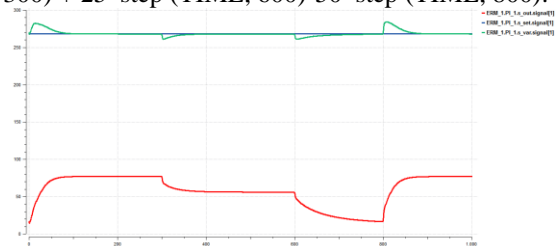


Figura 12 - Referencias del controlador temperatura de gas a la salida ERM

En la figura 12, se observa la respuesta del regulador PI_1 para el control de la temperatura de gas a la salida de la ERM (Setpoint 273.15 K), para los parámetros óptimos de diseño de los intercambiadores.

Tabla 2 - Respuesta de la optimización (variables de decisión y restricciones de proceso)

Variables de decisión	X_{low}	X_0	X_{up}
var_dec[1] $d_{tub} (m)$	0,025	0,03101	0,05
var_dec[2] $n_{tub} (adim)$	710	753,828	800
var_dec[3] $L_{tub} (m)$	7.0	8,129	12
Función objetivo y restricciones	F_{low}	Función objetivo y restricciones	F_{up}
F_optim[1] (€)	1e-06	296.757,319	1e+06
F_optim[2] (K)	267.5	268,170	268.5
F_optim[3] (K)	267.5	268,437	268.5
F_optim[4] (K)	267.5	268,163	267.5
F_optim[5] (°C)	30	32,3260	50
F_optim[6] (°C)	30	36,7945	50
F_optim[7] (°C)	30	40,0431	50

Para probar lo desarrollado optimización de la operación de la estación de regulación y medida se ha hecho un experimento sobre el esquemático de la figura13, compuesta por una red de gas natural con una tubería fuente de presión en la entrada y dos estaciones de regulación y medida en las respectivas salidas de la red

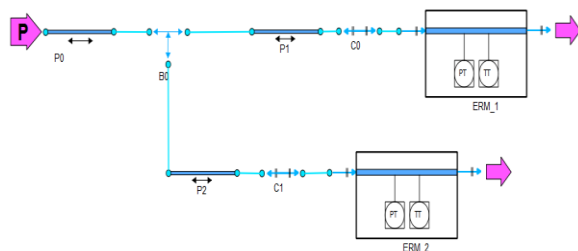


Figura 13 – Dos ERM conectadas a tramos de tuberías intermedias, con una fuente de presión inicial.

Los valores de inicialización de las variables de decisión son: $Pump.W_{lin} = 100 (Kg/s)$, para la ERM_1 y ERM_2, $P_{gin} = 72(Bar)$ $T_{gc} = 573(K)$ para la ERM_1 y ERM_2, $T_{liq} = 90(°C)$ para la ERM_1 y ERM_2 y, $PI_1.set_signal [1]$ y $PI_2.set_signal [1]$.

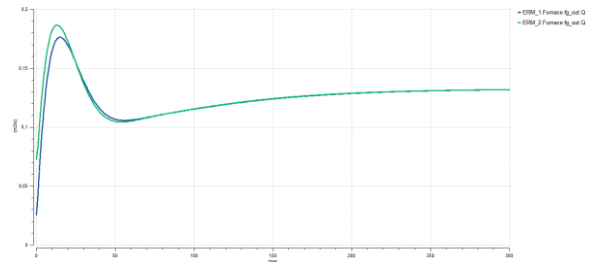


Figura 14 – Alimentación de gas de combustión a la caldera después a la optimización.

La tabla 3, a presenta los resultados óptimos para las variables de decisión para los tres valores de caudal normalizado de alimentación 125 Nm³/s, 150 Nm³/s, 170 Nm³/s encontrados a través algoritmo de optimización SNOPT.

Tabla 3 – Resultados óptimos de la operación para las variables de decisión (125 Nm³/s, 150 Nm³/s, 170 Nm³/s)

Resultados	125 Nm ³ /s	150 Nm ³ /s	170 Nm ³ /s
ERM_1.Pump.W	89.20		90.10
P_{in}	71.3 e5	71.4e5	71.7 e5
ERM_1.Tout_{gc}	584.6	570.0	571.1
ERM_1.Tinicial_{liq}	87.2	89.51	89.0
ERM_1.PI_2.set	87.31	87.42	88.74
ERM_2.Pump.W	90	89.15	89.61
ERM_2.Tout_{gc}	564.72	569.23	572.23
ERM_2.Tinicial_{liq}	88.0	89.90	88.99
ERM_2.PI_2.set	89.50	90.173	91.17

La tabla 4, a presenta los beneficio económico de la función objetivo después de la optimización para los caudal normalizado 125 Nm³/s, 150 Nm³/s, 170 Nm³/s

Tabla 4- Beneficio económico de la función objetivo.

Caudal de alimentación Nm ³ /s	Coste inicial / diseño (€)	Coste óptimo de operación (€)	Porcentaje de ahorro económico (%)
125	11819.87	9426.066	20.252
150	23966.14	16971.645	29.184
170	53293.69	44362.819	16.757

7. CONCLUSIONES

En ese trabajo se ha mostrado una metodología de optimización económica de la operación de una ERM de gas natural minimizando los costes de diseño y proceso. Utilizó se como algoritmo para resolución de lo problema de optimización la herramienta SNOPT implementada en *EcosimPro*®. A partir de las respuestas obtenidas se ha llegado a la conclusión que la metodología de optimización

(elección de las funciones objetivo, variables de decisión, restricciones y algoritmo de optimización) se ha hecho eficiente, puesto que se obtuvieron beneficio económico de la función objetivo, alcanzando valores **de ahorro económico de 20.25% 29.18% y 16.75%** para los caudales 125 Nm³/s, 150 Nm³/s, 170 Nm³/s respectivamente, además lo algoritmo SNOPT no presentó dificultades de convergencia para el óptimo para las condiciones evaluadas en ese trabajo.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer al Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad de Valladolid.

Al programa Erasmus Mundus – proyecto BABEL por haber financiado la estancia del Mayko Rannany S. Sousa en la Universidad de Valladolid al largo de todo su máster en ingeniería de procesos y sistemas industriales

Referencias

- [1] Rodríguez T., Sarabia D., Valbuena M., Prada C., Morales J.L., (2013) “Modelling and monitoring of natural gas network”. European Gas Technology Conference. EGATEC 2013, Paris.
- [2] EcosimPro®, (2013) “Empresarios Agrupados”. Versión 5.0.6, <http://www.ecosimpro.com/>.
- [3] Rodríguez T., Prada C., (2013) “Modelado y simulación de redes de gas natural”, Proyecto fin de Máster, Universidad de Valladolid, España.
- [4] Natividad C., (2008) “El mercado de gas natural”, Fundación de Estudios Financieros .España
- [5] Estefani G., Veziroglu T.N., (2013) “Gas Natural”, artinaid.com.U.S.A.
- [6] Ben G., (2011) “Network Pressure Regulation in Network Pressure Regulation in Natural Gas Distribution,” *Tenix Networks (Gas)*.U.S.A
- [7] Norma Española, (2005) “Estación de Regulación y medida,” *Instalaciones receptoras de gas natural suministrada a presiones superiores a 5 bar*, 5-26.España
- [8] Opex-Energy, (2013) “Elementos constitutivos de una ERM.” *Ciclos Combinados*, España. <http://opex-energy.com/>

- [9] Luis P., Pedro O., César P., Laureano J.(2006), “*Estrategias de Modelado, Simulación y Optimización de Procesos Químicos*” . Editorial Síntesis .España
- [10] Caballero J., L.Puigjaner et, al., (2013) “*Rigorous Design of Distillation Columns: Integration of Disjunctive Programming and Process Simulators*” , *Ind. Eng. Chem. Res.* (2005), 44, 6760-6775
- [11] L. T. Biegler and I. E. Grossmann, “*Retrospective on optimization,*” *Computers & Chemical Engineering*, vol. 28, no. 8, pp. 1169–1192, Jul. 2004.
- [12] R. F. Hartl, S. P. Sethi, and R. G. Vickson, “*A Survey of the Maximum Principles for Optimal Control Problems with State Constraints,*” *SIAM Review*, vol. 37, no. 2, pp. 181–218, Jun. 1995.
- [13] Taal M, Bulatov I, Klemes P, Stehlik P. “*Cost estimation and energy price forecast for economic evaluation of retrofit project*”. *Appl Therm Eng* 2003;23:1819–35.
- [14] Caputo AC, Pelagagge PM, Salini P. “*Heat exchanger design based on economic optimization*”. *Appl Therm Eng* 2008;28:1151–9.
- [15] Pujadas M., Et.al.(2012) “*Planta de producción de caprolactama*”. Proyecto de final de carrera Universitat Autònoma de Barcelona .España
- [16] The Building Cost People. “*Marshall Valuation Service*” (2014) sección 98, page 02, January 2014. //www.marshallswift.com