



PROYECTO FIN DE MÁSTER

**MÁSTER EN INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA DE PROCESOS Y
SISTEMAS INDUSTRIALES**

TÍTULO: Simulación y Operación Óptima en Ecosimpro[®] de Estaciones de Regulación y Medida de la Red de Gas Natural.

AUTOR: Mayko Rannany Santos Sousa

COORDINADORES: César de Prada Moraga, Tania Rodríguez Blanco

DEPARTAMENTO: Ingeniería de Sistemas y Automática

FECHA: 08-07-2015



Universidad de Valladolid
Dpto. de Ingeniería de Sistemas y Automática
ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES
C/ Real de Burgos s/n
47005 - Valladolid

D. CÉSAR DE PRADA MORAGA, Catedrático del Dpto. de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad de Valladolid y D^a. TANIA RODRÍGUEZ BLANCO, Maestría en Ingeniería de Procesos y Sistemas Industriales por la Universidad de Valladolid (estudiante del Programa de Doctorado en Ingeniería Industrial - Universidad de Valladolid), CERTIFICAN:

Que D. MAYKO RANNANY SANTOS SOUSA ha realizado bajo nuestra dirección el Proyecto Fin de Máster titulado Simulación y Operación Óptima en Ecosimpro® de Estaciones de Regulación y Medida de la Red de Gas Natural.

Valladolid, 08 de Julio de 2015.

D. César de Prada

D^a. Tania Rodríguez

ÍNDICE

| | |
|--|-----------|
| 1. INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1 Gas natural | 1 |
| 1.2 Matriz energética de gas natural (reservas, consumo y demanda)..... | 3 |
| 1.3 Estación de regulación y medición (ERM)..... | 5 |
| 1.4 Librería de redes de gas natural en EcosimPro®..... | 7 |
| 2. OBJETIVOS: | 10 |
| 3. MARCO TEÓRICO DEL TRABAJO | 11 |
| 3.1 Métodos numéricos de optimización | 11 |
| 3.2 Programación multi-objetivo (multiobjective programming)..... | 15 |
| 3.3 Simulación dinámica de procesos:..... | 17 |
| 3.4 Control de Procesos | 19 |
| 4. MODELADO DE LA ESTACIÓN DE REGULACIÓN Y MEDIDA | 22 |
| 4.1 Modelado matemático del intercambiador de calor de carcasa y tubos..... | 23 |
| 4.2 Modelado matemático de la bomba de agua..... | 27 |
| 4.3 Modelado matemático de la caldera | 28 |
| 4.4 Modelado matemático del reductor de presión..... | 31 |
| 4.5 Modelado matemático para del medidor de caudal y presión | 33 |
| 5. SIMULACIÓN DINÁMICA DE LA ERM | 35 |
| 5.1 Establecimiento de estrategias de control | 35 |
| 5.2 Simulación del modelo en EcosimPro® | 36 |
| 5.3 Resultado de la simulación dinámica..... | 40 |
| 6. OPTIMIZACIÓN DE LA ESTACIÓN DE REGULACIÓN Y MEDIDA | 46 |
| 6.1 Programación cuadrática secuencial SQP..... | 46 |
| 6.2 Modelado de optimización y evaluación económica de la estación de regulación y medida ERM | 49 |
| 6.3 Optimización diseño intercambiador de calor carcasa y tubos..... | 52 |
| 6.3.1 Resultado de la optimización Intercambiador de Calor carcasa y tubos | 53 |
| 6.4 Optimización de la operación ERM..... | 56 |
| 6.4.1 Planteamiento de la optimización de operación de los intercambiadores de calor..... | 57 |
| 6.4.2 Planteamiento de la optimización bomba hidráulica..... | 57 |

| | |
|---|-----------|
| 6.4.3 Planteamiento de la optimización de los costes con compresión de gas..... | 59 |
| 6.5 Resultado de la optimización de la operación ERM..... | 59 |
| 7. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO | 65 |
| 8. CONTRIBUCIONES REALIZADAS | 66 |
| 9. REFERENCIAS | 67 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Emisión de CO ₂ a la atmósfera al quemar gas natural..... | 3 |
| Figura 2 - Reservas Globales de Gas Natural..... | 4 |
| Figura 3 - Proporción de reservas, producción y consumo de gas natural por zona. | 4 |
| Figura 4 - Estación de regulación y medición para Gas Natural (E.R.M.). | 5 |
| Figura 5 - Esquema del proceso realizado en la ERM. | 6 |
| Figura 6 - Componentes de la librería de redes de gas natural EcosimPro® | 7 |
| Figura 7 - Tubería dividida en volúmenes finitos | 8 |
| Figura 8 - niveles funcionales de un entorno de simulación. | 18 |
| Figura 9 - Diagrama de bloque de un proceso de control en lazo abierto..... | 19 |
| Figura 10 - Diagrama de bloques de un proceso de control en lazo cerrado..... | 20 |
| Figura 11 - Proceso realizado en la ERM implementado en EcosimPro®. | 22 |
| Figura 12 - Intercambiador de calor cascara y tubos..... | 23 |
| Figura 13 - Bomba de la agua | 27 |
| Figura 14 - Caldera a gas..... | 28 |
| Figura 15 - Reductor de presión Reductor_P. | 31 |
| Figura 16 - Medidor de caudal y presión FT..... | 33 |
| Figura 18 - Esquemático de la red de distribución de gas con cuatro ERM en las salidas, conectadas a tramos de tuberías intermediarias inicial y con fuente de presión.37 | 37 |
| Figura 19 - Esquema de resolución de un problema de optimización de procesos. | 50 |
| Figura 20 - Algoritmo de lo método de optimización de la ERM | 51 |
| Figura 21 – Tres ERM independientes conectadas a una tubería inicial a la entrada con fuente de presión;..... | 53 |
| Figura 22 - Referencias del controlador de caudal a salida de la ERM. | 55 |
| Figura 23 - Referencias del controlador temperatura de gas a la salida ERM | 55 |
| Figura 24 – Esquemático para optimización de la operación ERM de dos ERM conectadas a tramos de tuberías intermedias, con una fuente de presión inicial..... | 60 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1 – Composición típica del gas natural (GN) | 2 |
| Tabla 2 - Tipos de problemas clásicos de optimización. | 12 |
| Tabla 3 – Características físicas de las tuberías | 36 |
| Tabla 4 - Datos de sintonía de los controladores y coeficientes de las válvulas | 40 |
| Tabla 5 – Resultados de la optimización (variables de decisión y restricciones de proceso) | 54 |
| Tabla 6 – Valor de la constante $C1$ en función de la potencia de la bomba. | 57 |
| Tabla 7 – Resultados óptimos de la operación para las variables de decisión (125 Nm^3/s , 150 Nm^3/s , 170 Nm^3/s)..... | 61 |
| Tabla 8 - Beneficio económico de la función objetivo..... | 64 |

LISTA DE GRAFICAS

Gráfica 1 – Perfil de presiones en la tubería P0, entrada de la red de gas..... 41

Gráfica 2 – Perfil de temperatura del flujo de gas al largo de la tubería P0 en la entrada de la red. 41

Gráfica 3– Perfil del Caudal masico de gas al largo de la tubería inicial P0 42

Gráfica 4– SetPoint.PI_1 (Temperatura de la salida del gas 268.15 K) ERM_1, ERM_2, ERM_3, ERM_4. 42

Gráfica 5 – SetPoint.PI_2 (Temperatura de salida del agua, de la caldera 90°C) ERM_1, ERM_2, ERM_3, ERM_4. 43

Gráfica 6 – Presión de entrada del gas natural en las ERM_1, ERM_2, ERM_3 y ERM_4. 44

Gráfica 7 – Sensor de temperatura del gas del intercambiador de calor en la ERM_1. 44

Gráfica 8– Sensor de temperatura del agua del intercambiador de calor en la ERM_1.45

Gráfica 9 – Monitoreo de la temperatura de entrada (línea roja), temperatura de salida (línea azul) y apertura de la válvula de entrada de gas de combustión (línea verde) de la caldera para las cuatro ERM. 45

Gráfica 11 - Flujo Volumétrico de salida del gas en el reductor,..... 61

Gráfica 12 - Temperatura de salida en el medidor de caudal (salida de la ERM)..... 62

Gráfica 13 – • Caudal de la agua que circula en el intercambiador de calor de carcasa y tubos.62

Gráfica 10 - Comparaciones de los costes de operación (diseño y óptimo) de la ERM: (a) caudal de alimentación 125Nm³/s; (B) caudal de alimentación 150 Nm³/s; (c) Caudal de alimentación 170 Nm³/s..... 63

NOMENCLATURA

$Q_{gin}(t), Q_{gout}(t)$ - caudal volumétrico del gas a la entrada y a la salida del intercambiador (m^3/s)

$\rho_{in}(t), \rho_{out}(t)$ - densidad a la entrada y a la salida (kg/m^3)

$W(t)$ - flujo másico del gas que atraviesa el intercambiador (kg/s)

$Y_{in,i}(t), Y_{out,i}(t)$ - composición de entrada y salida del componente i (%)

$T_{gin}(t), T_{gout}(t)$ - Temperatura del gas a la entrada y a la salida del intercambiador (K)

$Q_{gin}(t)$ - caudal volumétrico del gas a la entrada del intercambiador (m^3/s)

$Cp_{gin}(t)$ - capacidad calorífica a presión constante de la mezcla de gases a la entrada del intercambiador ($KJ kg^{-1} K^{-1}$)

V - volumen del tubo. Constante (m^3)

QtT - transferencia de calor real entre el líquido y el gas en el intercambiador ($KJ s^{-1}$)

$T_{lin}(t), T_{lout}(t)$ - Temperatura del líquido a la entrada y a la salida del intercambiador ($^{\circ}C$)

ρ_l - densidad del líquido a la entrada del intercambiador de calor. Constante ($kg m^{-3}$)

Cp_{lin} - capacidad calorífica a presión constante del líquido. Constante ($KJ kg^{-1} K^{-1}$)

V_{CAR} - volumen de la carcasa. Constante (m^3)

U - coeficiente global de transmisión de calor ($KW m^2 K^{-1}$)

As - sección de transferencia de calor. Constante (m^2)

h_o : Coeficiente individual del fluido en el exterior ($KW m^2 K^{-1}$)

h_i : Coeficiente individual del fluido en el interior ($KW m^2 K^{-1}$)

h_{od} : Coeficiente de ensuciamiento del fluido en el exterior ($h_{od} = 2900 KW m^2 K^{-1}$).
Constante

h_{id} : Coeficiente de ensuciamiento del fluido en el interior ($h_{id} = 2900 KW m^2 K^{-1}$).
Constante

k_w : Conductividad térmica del material del tubo ($KW m K^{-1}$)

d_o : Diámetro exterior del tubo (m)

d_{tub} : Diámetro del tubo (m)

$Nu(t)$ - número de Nusselt (adimensional)

k_{gn} - conductividad térmica del gas natural. Constante ($W m^{-1} K^{-1}$)

C_{gases} - coeficiente que para gases toma el valor de 0.021. Constante (adimensional).

$Re(t)$ - número de Reynolds (adimensional)

Pr(t) - número de Prandtl (adimensional)

A - sección de la tubería en dirección del flujo. Constante (m²)

Nu_o - número de Nusselt (adimensional)

d_{car} - diámetro interno de la carcasa (m)

k_l - conductividad térmica del líquido (W m⁻¹ K⁻¹)

C_l - coeficiente que para líquidos no viscosos toma el valor de 0.023 (adimensional).

Constante

Re_o(t) - número de Reynolds (adimensional)

Pr_o(t) - número de Prandtl (adimensional)

A_{car} - sección de la carcasa en dirección del flujo. Constante (m²)

L_{tub} - longitud del tubo. Constante (m)

esp - espesor del tubo. Constante (m)

P_{gin}(t), P_{gout}(t) - presión del gas a la entrada y a la salida del intercambiador (Pa)

pd_{gas}(t) - caída de presión en la tubería (Pa)

L_{codo}: Longitud equivalente de un codo (m)

L_{salida}: Longitud equivalente de una salida de tubería (m)

L_{entrada}: Longitud equivalente de una entrada de tubería (m)

L_{medidor}: Longitud equivalente de un medidor de temperatura (m)

Cp_{gin}(t) - capacidad calorífica a presión constante de la mezcla de gases a la entrada del intercambiador (KJ kg⁻¹ K⁻¹)

Cp_i(t) - capacidad calorífica a presión constante de cada componente de la mezcla (KJ Kmol⁻¹ K⁻¹)

μ_{gin}(t) - viscosidad de la mezcla de gases a la entrada del intercambiador (kg m⁻¹ s⁻¹)

μ_i - viscosidad de cada componente de la mezcla (kg m⁻¹ s⁻¹)

R - constante universal de los gases. Constante (kJ Kmol⁻¹ K⁻¹)

Z_{in}(t), Z_{out}(t) - factor de compresibilidad del gas a la entrada y salida del intercambiador de calor (adimensional). Se calcula a partir del método de Sarem

Cv: Coeficiente de flujo de la válvula (adimensional)

Ng: Constante numérica basada en las unidades (adimensional)

Fp: Factor de corrección de la geometría de la tubería. Los diámetros de entrada y salida de la válvula de control son los mismos, por lo que este parámetro toma el valor de 1 (adimensional)

Yf: Factor de expansión del gas (adimensional)

$Z_{int}(t)$ - factor de compresibilidad del gas a la entrada y salida del reductor (adimensional). Se calcula a partir del método de Sarem

x_p : Relación de la caída de presión (adimensional)

y_{valve} - apertura de la válvula (%)

Fk - factor de la relación de calores específicos (adimensional)

xf - factor de la relación de la caída de presión. Constante (adimensional)

$Q_{normal}(t)$ - flujo másico normalizado que atraviesa el reductor($N\ m^3\ s^{-1}$)

P_{normal} - presión normalizada (Pa). Constante

T_{normal} - temperatura normalizada (K). Constante

$Z_{out}(t)$, $Z_{normal}(t)$ - factor de compresibilidad del gas a la salida y en condiciones normales. Se calcula a partir del método de Sarem

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

Mayko Rannany Santos Sousa

RESUMEN

Este trabajo de fin de máster que ha sido presentado para la obtención del título de máster en ingeniería de procesos y sistemas industriales 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.

El presente proyecto aborda la simulación dinámica de estaciones de regulación y medida presentes en las redes de distribución de gas natural y que sirven como elemento de conexión entre la red y el consumidor final, adaptando las condiciones del gas a las adecuadas para el suministro.

Sin embargo el principal objetivo de este proyecto es el planteamiento y resolución del problema de optimización de programación no lineal (NLP), 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, transferencia de fluido y eléctrico de las bombas hidráulicas y compresores), con variables de decisión en la forma continua y con parte de las restricciones dadas por ecuaciones diferenciales.

Para resolver el problema de optimización se ha utilizado un algoritmo de programación cuadrática secuencial SQP llamado SNOPT implementado en EcosimPro®.

1. INTRODUCCIÓN

En el primer capítulo de este trabajo se realiza un breve recorrido sobre las consideraciones generales del empleo de gas natural en el mundo, tales como: concepto de gas natural, matriz energética (reservas, consumo y demanda), aplicaciones a nivel doméstico e industrial, aspectos ambientales, perspectivas futuras del gas natural, características relacionadas con la distribución y diseños de red de gas natural, además de la presentación de la librería de redes de gas natural en EcosimPro®.

Posteriormente en el marco teórico del trabajo se dan informaciones sobre los métodos numéricos de optimización, sobre simulación dinámica de procesos y estrategias de control. El tercer capítulo plantea el modelado de la estación de regulación y medida (ERM) con sus principales equipos y las respectivas ecuaciones de balances de masa y energía.

El cuarto capítulo presenta un ejemplo de una simulación dinámica hecha en EcosimPro®, para una red de gas natural con una entrada de gas y cuatro salidas -ERM, abordando aspectos relacionados con las variables de contorno, condiciones del experimento, estrategia de control en lazo cerrado para la simulación (controladores PI).

En el capítulo cinco se presenta la principal sección de ese trabajo, el desarrollo de la metodología de resolución del problema de optimización no lineal (NLP), el planteamiento de la función objetivo se basan en la optimización económica minimizando los costes de diseño y operación de la ERM. Para resolverlo se ha utilizado un algoritmo de programación cuadrática secuencial SQP llamado SNOPT implementado en EcosimPro®.

1.1 Gas natural

El gas natural es una fuente de energía no renovable formada por una mezcla de gases ligeros que se encuentra frecuentemente en yacimientos de petróleo, disuelto o asociado con el petróleo o en depósitos de carbón [17]. Aunque su composición varía en función del yacimiento del que se saca, está compuesto principalmente por metano en cantidades que comúnmente pueden superar el 90 ó 95%, en general el gas natural tiene la siguiente composición presentada en la tabla 1:

Tabla 1 – Composición típica del gas natural (GN)

| Componente | Composición (%) | Estado natural |
|---|-----------------|----------------|
| Metano (CH ₄) | 95,08 | Gas |
| Etano (C ₂ H ₆) | 2,14 | Gas |
| Propano (C ₃ H ₈) | 0,29 | gas licuable |
| Butano (C ₄ H ₁₀) | 0,11 | gas licuable |
| Pentano (C ₅ H ₁₂) | 0,04 | Líquido |
| Hexano (C ₆ H ₁₄) | 0,01 | Líquido |
| Nitrógeno (N ₂) | 1,94 | Gas |
| Gas carbónico (CO ₂) | 0,39 | Gas |

(*) Además, tiene impurezas como helio, oxígeno y vapor de agua.

El gas natural es una fuente de energía versátil que puede ser utilizada en ámbitos muy variados. Aplicaciones domésticas, comerciales e industriales en la producción de calefacción y calor junto con la generación de electricidad, cocción de productos cerámicos, alimentarios, tratamientos térmicos, procesos de secado directo, sistema de calefacción, generación electrónica y hornos de fusión son sus principales usos tradicionales y así como carburante en transporte. Las reservas mundiales de gas natural, aunque limitadas, son muy importantes y las estimaciones de su dimensión continúan progresando a medida que las nuevas técnicas de explotación, de exploración y de extracción son descubiertas [17].

Aspectos ambientales

El gas natural es el combustible fósil que menos CO₂ emite a la atmósfera al ser quemado, para producir la misma cantidad de electricidad, el gas natural emite menos de la mitad de CO₂ que el petróleo y el carbón. Además, el gas natural ha sido la fuente de energía fósil que mayor crecimiento ha experimentado durante las dos últimas décadas. Las emisiones de CO₂ provenientes de la combustión del gas natural, representaron el 19% de las emisiones globales en 1990, aumentaron a un 20% en 2004 y se prevé que ascenderán al 21% en 2030, [18].

Las emisiones de CO₂ que provienen de la combustión del gas natural se prevé que aumenten en todo el mundo un promedio de 1,9% cada año, y que pasen a ser 9.000 millones de toneladas métricas en 2030.



Fuente: <http://www.greenpeace.org/>

Figura 1 - Emisión de CO₂ a la atmósfera al quemar gas natural

Por su rendimiento y baja emisión de contaminantes, el gas natural es especialmente apropiado para la generación de electricidad y cogeneración, uso de calderas y hornos industriales, automoción, climatización y otros usos en los sectores comercial y doméstico. El gas natural es un combustible que tiene un impacto medioambiental mínimo comparado con el resto de los combustibles fósiles y cuya utilización contribuye a reducir la emisión de gases de efecto invernadero.

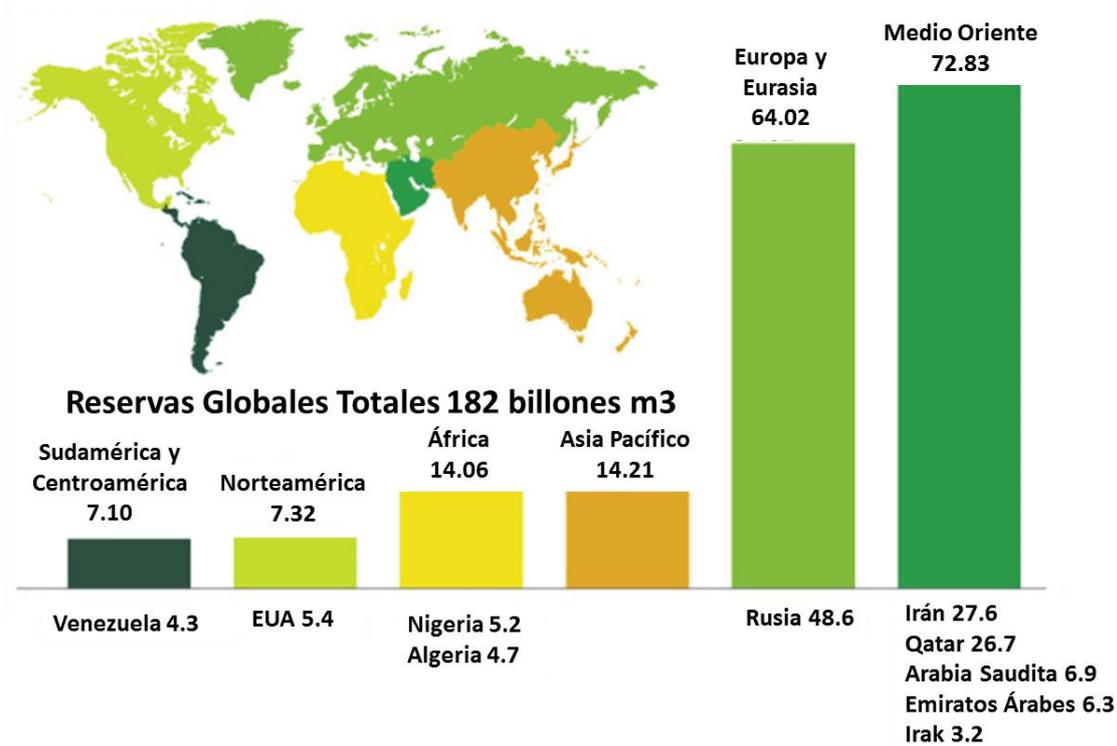
1.2 Matriz energética de gas natural (reservas, consumo y demanda)

Las reservas de gas natural son abundantes y ampliamente distribuidas por el mundo. Se estima que una cantidad significativa de gas natural queda aún por descubrir.

Las reservas probadas son aquellas que podrían ser producidas con la tecnología actual. Las reservas probadas de gas natural en el mundo están alrededor de 182 billones de m³ suficientes para abastecer al consumo mundial durante 65 años, ubicadas principalmente en el Medio Oriente 41%, donde Irán y Qatar en conjunto tienen 30% de las reservas mundiales, Europa y Eurasia 36%, donde Rusia tiene 27% de las reservas mundiales y en Asia Pacífico 8%, y África 8%, [4].

No obstante, hay que señalar que el crecimiento de la producción comercializada en los últimos años se está produciendo principalmente en las zonas de Asia-Oceanía y Oriente Medio, acompañadas en menor medida de África y América del Sur. Mientras que en América del Norte y la antigua Unión Soviética se mantiene en los mismos niveles que en años anteriores.

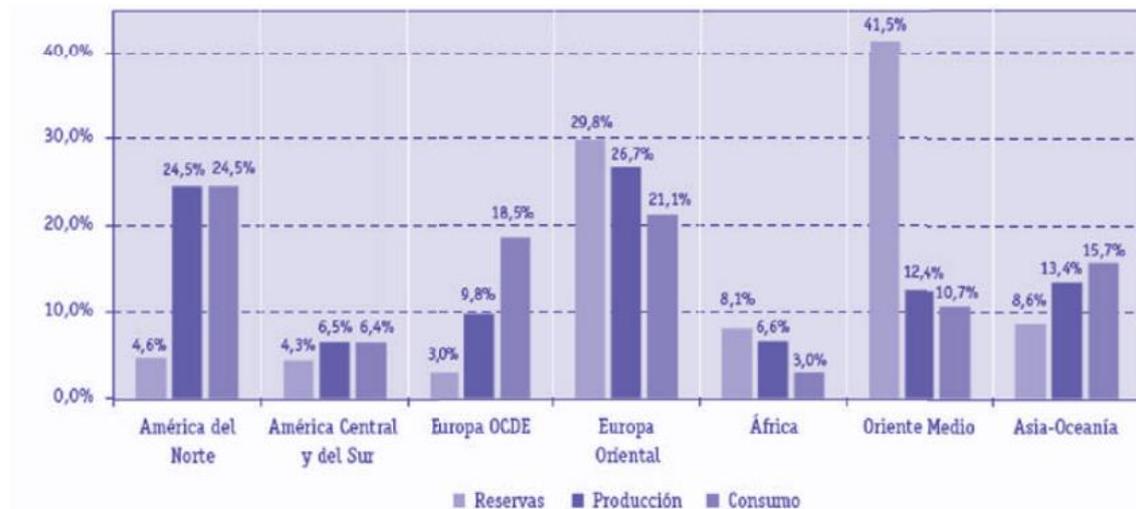
Cifras en billones (1 x 10¹²) de metros cúbicos de gas natural



Fuente: <http://www.artinaid.com/>

Figura 2 - Reservas Globales de Gas Natural

EE.UU. además de ser el mayor consumidor de petróleo, es también el mayor consumidor de gas natural en el mundo, con el 21,3%. Le siguen en el ranking Rusia (12,9%), Irán (4,6%), China (4,3%) y Japón (3,8%).



Fuente: Cedigaz

Figura 3 - Proporción de reservas, producción y consumo de gas natural por zona.

1.3 Estación de regulación y medición (ERM)

Se denomina estación de regulación y medida, al 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 instalación interna industrial (gas natural fenosa).



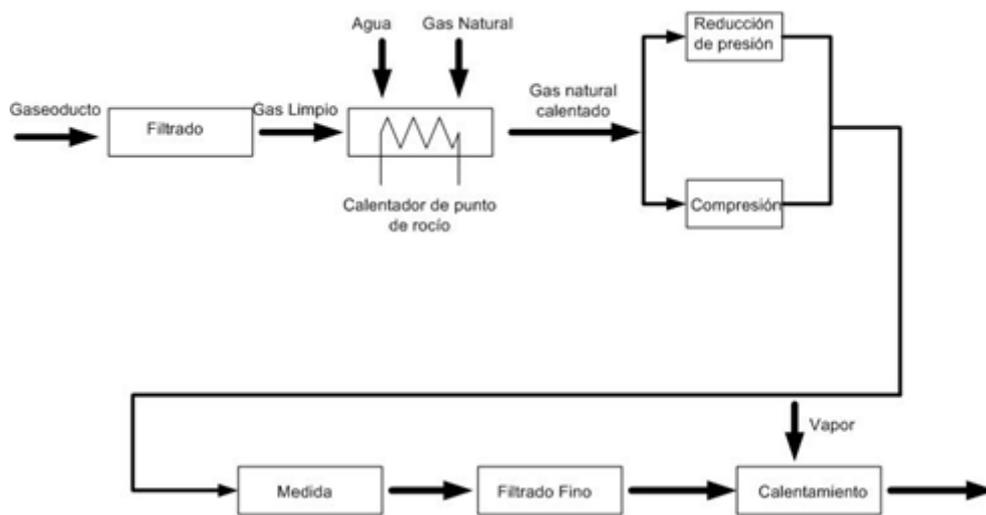
Fuente: INDISA S.A

Figura 4 - Estación de regulación y medición para Gas Natural (E.R.M.).

El gas natural que se 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 ERM 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.

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.



Fuente: <http://opex-energy.com/>

Figura 5 - Esquema del proceso realizado en la ERM.

Los elementos más importantes representados en la figura 5 son [8]:

Filtros: limpian el gas de las posibles impurezas sólidas que se pudiesen arrastrar. Pueden ser de varios tipos: de cartucho, ciclónicos, etc.

Válvulas reductoras de presión: si el gas tiene más presión de la que se necesita a la red final (consumidores), tendrá que atravesar unas válvulas reductoras de presión hasta ajustarse a la necesaria.

Compresor para el aumento de presión: si por el contrario el gas de la línea de suministro tiene una presión inferior a la necesaria, será necesario comprimirlo. Es posible que subsistan los dos sistemas (compresión y expansión) en la misma ERM, ya que la presión del gas puede fluctuar, por efectos sobre el suministro de otros consumidores.

Sistema de precalentamiento para elevar el punto de rocío, debe disponerse de un sistema de calefacción para evitar congelaciones del agua que pudiera contener el gas. Hay que tener en cuenta que ante una expansión, el gas pierde temperatura. Si como

efecto de una expansión la temperatura bajara por debajo del punto de rocío, el agua contenida podría congelarse, provocando la formación de hielo. . El sistema de regulación de temperatura será tal, que la temperatura del gas caliente no supere los $33 \pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ y después de la expansión producida por la reducción de presión en el regulador, sea de $-5 \pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$.

Cromatógrafo y Caudalímetro: la compañía suministradora necesita, para facturar, que se instalen caudalímetros para saber el caudal de gas consumido. Habitualmente, caudalímetros y cromatógrafos pueden estar duplicados, pues las cantidades de dinero que se facturan a través de ellos justifican sobradamente la instalación de equipos de reserva.

1.4 Librería de redes de gas natural en EcosimPro®

Se trata de una librería con componentes dinámicos desarrollada en el entorno de modelado y simulación EcosimPro®, resultado de la colaboración entre el departamento de ingeniería de sistemas y automática da Universidad de Valladolid con Intergeo Tecnología. Dicha librería fue diseñada para mejorar la supervisión, monitoreo y simulación de redes típicas de gasoductos de gas natural [1,2].

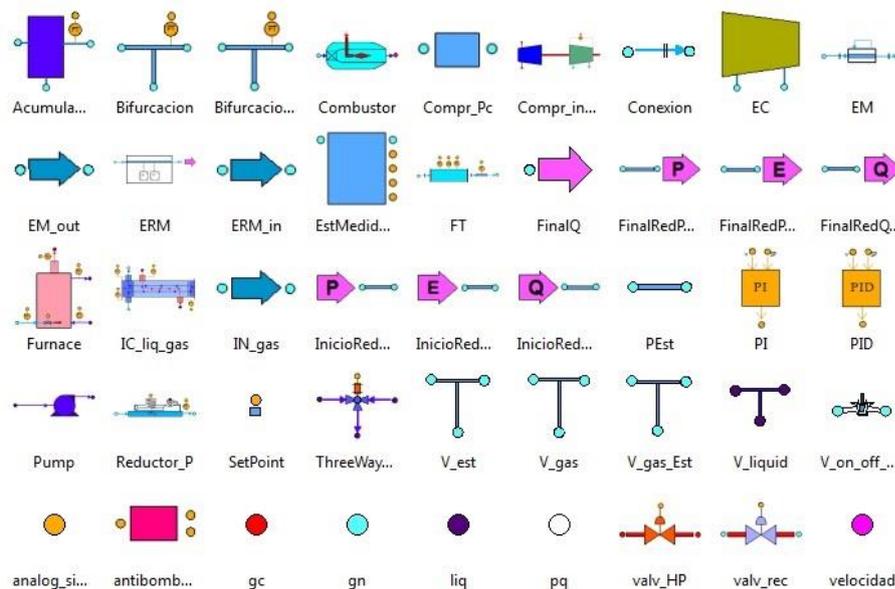


Figura 6 – Símbolos de los componentes de la Librería GAS Versión 3.12 EcosimPro®

Estas herramientas están diseñadas para aumentar la calidad de la gestión de operación y procesos de una red de distribución y transporte de gas natural a través de la mejora de información sobre el proceso que se puede obtener mediante el uso de

técnicas de simulación, métodos de estimación, algoritmos y optimización [1]. Es importante destacar que el método empleado para la discretización de los gasoductos ha sido el método de volúmenes finitos. Ésta técnica integra las ecuaciones diferenciales originales sobre un volumen finito obteniendo un balance (entrada+aportación =salida) en cada una de las zonas discretas en las que se subdivide el tramo de tubería [1] y [3].

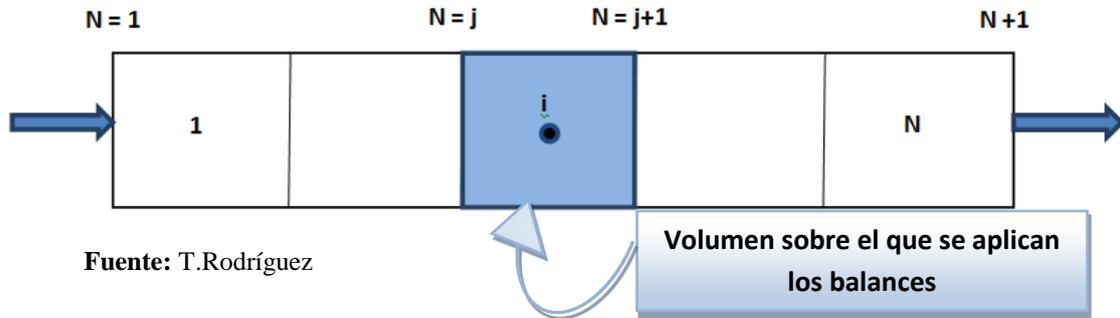


Figura 7 - Tubería dividida en volúmenes finitos

- Variables calculadas en los extremos del volumen: $x [j]$
- Variables calculadas en el centro del volumen: $x [i]$

Balance de materia global:

Se aplica a cada nodo de la tubería y calcula la acumulación de masa de gas en cada nodo a partir de la diferencia de flujos másicos de entrada y salida en cada volumen finito.

$$\frac{dm[i]}{dt} = W[j] - W[j + 1] \tag{1.1}$$

Siendo :

$m[i]$: Masa de gas (kg)

t : tiempo (s)

$W[j]$: Flujo másico de gas (kg/s)

Flujo másico que atraviesa la tubería

Para el cálculo de flujo másico de gas que circula por la tubería se ha empleado la ecuación fundamental del flujo de fluidos compresibles en una sola dimensión y en estado estacionario [3] y [22] , ver ecuación (1.2)

$$W[j] = C \cdot \frac{T_{base}}{P_{base}} \cdot D^{2.5} \cdot e \cdot \left(\frac{P[i - 1]^2 - P[i]^2 - H_c}{L \cdot G \cdot T_a[j] \cdot Z_a[j] \cdot phi[j]} \right)^{0.5} \tag{1.2}$$

C: Constante; 0.011493 (unidades métricas)

D: Diámetro de la tubería (m)

e: eficiencia de la tubería (adim.)

$\phi_{[j]}$: Factor de fricción (adim.)

G: Gravedad específica

L: Longitud de la tubería (m)

$P_{\text{base(normal)}}$: Presión normal (105 Pa)

$T_{\text{base(normal)}}$: Temperatura normal (273.15 KK)

P [i]: Presión del gas en cada nodo (Pa)

$T_a[j]$: Temperatura media (K)

$Z_a[i]$: Factor de compresibilidad medio

H_c : Factor de corrección

El término H_c es un factor de corrección para la variación de la carga estática para el caso en el que existe diferencia de cotas entre la entrada y la salida en un tramo de tubería o sea tuberías no horizontales,

$$H_c = \frac{0.06835 \cdot (h_{out} - h_{in}) \cdot P_a[j]^2}{T_a[j] \cdot Z_a[j]} \quad (1.3)$$

h_{out} : Cota final del tramo de tubería (m)

h_{in} : Cota inicial del tramo de tubería (m)

$P_a[j]$: Presión media (Pa)

La presión en cada nodo P[i] y la presión medida se calcula a partir de la ecuación de estado de los gases reales:

$$P[i] = \frac{Z_c[i] \cdot \rho[i] \cdot R \cdot T[i]}{Pm[i]} \quad (1.4)$$

$$P_a[j] = \frac{2}{3} \left[P[i-1] + P[i] - \frac{P[i-1]P[i]}{P[i-1] + P[i]} \right] \quad (1.5)$$

$Z_c[i]$: Factor de compresibilidad en cada nodo (adim.)

$\rho[i]$: Densidad en cada nodo (kg/m^3)

R: Constante universal gases ideales (kJ /kmol K)

$T[i]$: Temperatura en cada nodo (K)

$Pm[i]$: Peso molecular del gas en cada nodo (kg/kmol)

2. OBJETIVOS:

Los objetivos del proyecto son los siguientes:

- Revisar el modelado de la estación de regulación y medida de la librería de redes de gas natural en EcosimPro® y añadir nuevas ecuaciones para los diferentes equipos de proceso (intercambiador de calor, caldera a gas, bomba hidráulica y reductor de presión) ;
- Ejecutar y evaluar la simulación dinámica en el entorno de simulación EcosimPro®, de estaciones de regulación y medida de gas natural conectadas a gaseoductos;
- Proponer funciones objetivo basadas en minimización de costes económicos que involucren variables de diseño y/o parámetros de operación para los diferentes equipos que componen la ERM y consecuentemente optimizarlos para obtener los mejores costos de inversión y proceso;
- Plantear un problema de optimización no lineal con parte de las restricciones en ecuaciones diferenciales, y resolverlo a través del algoritmos de optimización SNOPT un algoritmo de programación cuadrática secuencial (SQP) implementado en EcosimPro®, ideal para resolver problemas a gran escala.

3. MARCO TEÓRICO DEL TRABAJO

3.1 Métodos numéricos de optimización

Los problemas de optimización vienen definidos generalmente por estos tres componentes

Función objetivo:

Es la medida cuantitativa del funcionamiento del sistema que se desea optimizar (maximizar o minimizar). Como ejemplo de función objetivo se puede mencionar, la minimización de los costes variables de operación de un sistema eléctrico, la maximización de los beneficios netos de venta de ciertos productos, la minimización del cuadrado de las desviaciones con respecto a unos valores observados, la minimización del material utilizado en la fábrica de un producto, etc [12].

Variables de decisión:

Representa las decisiones que se pueden tomar para modificar el valor de la función objetivo. Desde un punto de vista funcional se pueden clasificar en variables independientes o principales o de control y variables dependientes o auxiliares o de estado, aunque matemáticamente todas son iguales. Por ejemplo en el caso de un sistema eléctrico serán los valores de producción de los grupos de generación o los flujos por las líneas. En el caso de la venta, la cantidad de cada producto fabricado y vendido. En el caso de la fabricación de un producto, sus dimensiones físicas [12].

Restricciones:

Representa el conjunto de relaciones (expresadas mediante ecuaciones e inecuaciones) que ciertas variables están obligadas a satisfacer. Por ejemplo las potencias máximas y mínimas de un grupo de generación, la capacidad de producción de la fábrica para los diferentes productos, las dimensiones del material bruto del producto, etc [12].

Sin embargo resolver un problema de optimización consiste en encontrar el valor que deben tomar las variables para hacer óptimas la función objetivo satisfaciendo el conjunto de restricciones. Un problema de optimización se puede expresar de la forma:

$$\begin{aligned}
 & \text{Mín } f(x, y) \text{ o Max } f(x, y) \\
 & g_j = (x, y) \leq 0 \\
 & h_i = (x, y) = 0 \\
 & x \in R^n, y \in Z
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

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.

Es importante destacar que los problemas de optimización se distinguen por el carácter de las funciones que intervienen, o sea, programación lineal (LP) o programación no lineal (NLP), optimización sin restricciones o optimización con restricciones y de las variables reales/continuas o enteras/discretas.

En la siguiente tabla 2 se muestra los tipos de problemas de optimización con sus expresiones matemáticas generales para algunos métodos clásicos.

Tabla 2 - Tipos de problemas clásicos de optimización.

| | |
|--|--|
| Optimización sin restricciones. | $ \begin{aligned} & \min_x J(x) \\ & x \in R^n \end{aligned} $ |
| Optimización con restricciones de igualdad .Multiplicadores de Lagrange. | $ \begin{aligned} & \min_x J(x) \\ & h_i(x) = 0 \end{aligned} $ |
| Programación lineal (LP) función de coste y restricciones lineales. | $ \begin{aligned} & \min_x b'x \\ & Ax \leq c \\ & x \geq 0 \end{aligned} $ |
| Programación cuadrática (QP) función de coste cuadrática y restricciones lineales. | $ \begin{aligned} & \min_x x'Hx + b'x \\ & Ax \leq c \\ & x \geq 0 \end{aligned} $ |
| Programación no lineal (NLP) función de coste y / o restricciones no-lineales. | $ \begin{aligned} & \min_x J(x) \\ & h_i(x) = 0 \\ & g_j(x) \leq 0 \end{aligned} $ |
| Programación mixta entera (MINLP) algunas de las variables son reales y otras enteras. | $ \begin{aligned} & \min_x J(x, y) \\ & h_i(x, y) = 0 \\ & g_j(x, y) \leq 0 \\ & x \in R^n, y \in Z \end{aligned} $ |

| | |
|--|--|
| Optimización dinámica. Parte de las restricciones vienen dadas por ecuaciones diferenciales. | $\min_x J(x, z)$ $\frac{dz}{dt} = f(z, x)$ $g_j(x) \leq 0$ $h_i(z) \leq 0$ |
| Optimización multiobjetivo. Hay varias funciones de costo a minimizar simultáneamente. | $\min_x \{J_1(x), J_2(x), \dots, J_s(x)\}$ $x \in \Omega$ |

Fuente: Prof.Dr. Cesar de Prada. Conceptos básicos de optimización. Dpt. Ingeniería de sistemas y automática uva.

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 se ha 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).

La optimización de procesos presenta algunos inconvenientes en su desarrollo, pues no existe ningún método que garantice a priori la solución de un problema de optimización, por lo que se aprovecha la estructura del problema (tipo de función objetivo, restricciones y variables de decisiones) y utiliza métodos específicos para cada caso (LP, MILP, NLP, MINLP, SQP y otros). De todas formas, incluso seleccionando un algoritmo de cálculo la convergencia y la robustez serán aspectos clave. Un problema planteado de una forma puede no converger, mientras que planteado de otra forma su resolución puede ser trivial (en muchas ocasiones basta como plantear una restricción con forma equivalente $A-B=0$ o $A/B=1$).

Lamentablemente no existe ningún protocolo que garantice la convergencia ni ningún algoritmo intrínsecamente robusto dado la enorme casuística de problemas que se puede encontrar en ingeniería de procesos industriales.

Los algoritmos de optimización no lineales sin restricciones se pueden clasificar en función de la necesidad de calcular las derivadas de las funciones, un aspecto que está directamente relacionado con la potencia de cálculo necesaria para resolver un problema [10]:

- Búsqueda sin utilizar derivadas: los más comunes son los métodos simplex, el método de Powell, el algoritmo de Hooke y Jeeves, el método de Rosenbrock y el método de las direcciones conjugadas.
- Búsqueda usando la primera derivada: los más importantes son el método del gradiente (busca en las direcciones opuestas al gradiente), el método del gradiente conjugado (combina la información del último gradiente con la información de gradientes de interacciones previstas) y los métodos cuasi newtonianos (aproximan la curvatura de la función a partir del gradiente).
- Búsqueda usando la segunda derivadas: sin lugar a dudas, el método de Newton (la inversa de la matriz hessiana multiplica la dirección del máximo descenso. la dirección de búsqueda se obtiene con una aproximación cuadrática de la función objetivo).

En la optimización de problemas no lineales con restricciones, los diferentes métodos pueden clasificarse en [10]:

- Método de penalización exterior: se añade un término de penalización para cada violación de las restricciones, lo que debe resolver una sucesión de problemas sin restricciones. Los parámetros de penalización debe ser suficiente grandes como para generar una secuencia que se aproxime al óptimo. A medida que a solución se acerca al óptimo, se desarrollan las funciones de penalización exterior exacta, que utilizan valores finitos del parámetro de penalización.
- Método de penalización interior (o de barrera): transforman el problema original con restricciones en una sucesión de problemas sin restricciones, introduciendo una función de barrera que evita la generación de valores situados fuera de la región factible. Estos métodos tienen problemas de convergencia en las regiones cercanas al óptimo.
- Métodos de proyección de gradientes: proyecta el gradiente de la función objetivo en el espacio formado por las restricciones activas, buscando mejora en la dirección factible.
- Método del gradiente reducido generalizado (GRG, generalized reduced gradient): El proceso de solución del GRG, al igual que otros muchos algoritmos de programación no lineal, calcula valores de la primera derivada parcial de la función objetivo y de las restricciones en cada iteración. Realiza asimismo una reducción del problema original a otro sin restricciones resolviendo un sistema

de ecuaciones para ciertas variables básicas en términos del resto no básicas. Entonces, se elige una dirección de búsqueda (un vector n-dimensional donde n es el número de variables no básicas) a lo largo de la cual se establece una mejora de la función objetivo. Tanto el gradiente como la dirección de búsqueda se expresa en función de las variables independientes.

- Programación lineal sucesiva: en cada interacción, se linealiza la función objetivo y las restricciones, cuya solución proporciona la nueva dirección de búsqueda. Para aceptar o rechazar la nueva solución se utiliza función de penalización exacta, que evitan la violación de las restricciones. Está especialmente aconsejada cuando la mayoría de las restricciones son lineales.
- Programación cuadrática sucesiva (SPQ, successive quadrática programming): trata en mejora la convergencia del método de programación lineal sucesiva. La nueva dirección de búsqueda se obtiene a partir de un problema cuya función objetivo es una función cuadrática y cuya las restricciones se han linealizado. Las condiciones de optimalidad de Karush-Kuhn-Tucker se resuelven mediante el método de Newton (o cuasi Newton).

3.2 Programación multi-objetivo (multiobjective programming)

La optimización multi-objetivo (OMO), también conocida como optimización multi-criterio, tiene un papel importante en el campo del diseño en ingeniería, gestión y toma de decisiones. Prácticamente en cualquier área y en gran variedad de contextos existen problemas con diversos objetivos que deben ser considerados simultáneamente y que se contraponen entre sí. Esto significa que existe un compromiso entre ellos y alcanzar el óptimo para un objetivo requiere comprometer el valor de uno o más de los objetivos.

Como se ha mencionado anteriormente los problemas de programación multi-objetivo existe más de una función objetivo y el problema que se plantea es cómo tratar varias funciones a la vez, teniendo en cuenta que el óptimo para un objetivo no lo es para otro, son objetivos en conflicto entre sí [12].

A continuación se muestra la representación matemática de un problema de optimización multi-objetivo:

$$\min_x \{f_1(x), f_2, \dots, f_p(x)\} \quad (P \geq 2) \quad (3.2)$$

Sujeto, a.

$$g_j = (x) \leq 0 \quad j = 1, 2, \dots, m$$

$$h_i = (x) = 0 \quad i = 1, 2, \dots, p$$

Donde:

$$x \in X \subset \mathbb{R}^n, f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$$

$$h: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^l, g: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$$

Cuando $P = 2$, se conoce como optimización bi-objetivo. Si los dos objetivos, $f_1(x)$ y $f_2(x)$ son conflictivos entre sí, existirán varias soluciones óptimas para el problema de OMO de la Ec (3.2). Todas esas soluciones son igualmente buenas en el sentido que cada una de ellas es mejor que el resto en al menos un objetivo. Esto implica que la mejora en un objetivo solo puede tener lugar a costa de un empeoramiento del otro objetivo

Para poder determinar qué tan “buena” es una cierta solución, es necesario contar con algún criterio para evaluarla. Estos criterios se expresan como funciones computables de las variables de decisión a las que se denomina funciones objetivo. En problemas del mundo real, algunas de estas funciones objetivo suelen estar en conflicto entre sí, y algunas deben minimizarse mientras otras han de maximizarse. Las funciones objetivo pueden ser conmesurables (medidas en las mismas unidades) o no conmesurables (medidas en unidades distintas) [23].

Tipos de Problemas Multiobjetivo

Existen tres tipos de situaciones que pueden presentarse en un problema multiobjetivo:

- Minimizar todas las funciones objetivo ;
- Maximizar todas las funciones objetivo ;
- Minimizar algunas funciones y maximizar otras.

Por cuestiones de simplicidad, normalmente todas las funciones se convierten ya sea a un problema de maximización o a uno de minimización. Se puede usar la siguiente identidad para convertir todas las funciones a maximizarse de manera que correspondan a un problema de minimización:

$$\max f_p(\bar{x}) = \min(-f_p(\bar{x})) \quad (3.3)$$

3.3 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.

Es importante destacar que la simulación dinámica es mucho más compleja matemáticamente, puesto que se debe resolver el modelo en estado estacionario a lo largo del tiempo, lo que supone la aparición de un gran número de ecuaciones diferenciales. Por ese motivo, normalmente se llega a un compromiso entre usar un valor pequeño del intervalo de integración (que favorece la convergencia) y el tiempo de resolución.

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:

$$\begin{aligned}\frac{dx}{dt} &= f(x, u, v, p) \\ y &= g(x, u, v, p)\end{aligned}\tag{3.4}$$

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 variables de perturbación , esto es, variables cuyo valor viene impuesto de forma externa y de naturaleza más o menos aleatoria , e y p son las variables controladas , variables medidas cuyo valor se quiere mantener en valores prefijados para la correcta operación del procesos.

Un entorno de simulación dinámica, conocido como lenguaje de simulación, es un conjunto de herramientas de software que facilita:

- La descripción del sistema que se quiere simular ;

- La descripción de los experimentos a realizar sobre el mismo;
- La resolución numérica del sistema de ecuaciones resultante;
- La visualización de los resultados y la ejecución de otras funciones.

De esta manera proporciona indudables ventajas sobre otras posibles alternativas para la resolución de un modelo en particular todas aquellas basadas en la programación de algoritmos por el usuario. En concreto:

- Dan fiabilidad a los resultados ;
- Permite a ahorrar tiempo ;
- Permite concentrarse en el problema y no en la programación;
- Abren el campo a no experto en informática.

El sistema vendrá representado, en general por un conjunto de ecuaciones algebrao –diferenciales, y en, algunos casos por ecuaciones en derivadas parciales. En general el entorno de simulación debe proporcionar soporte para todo los usuarios sea usuarios que quieran desarrollar sus propios modelos, el que constituyen sus simulaciones con modelos escrito por otros usuarios y finalmente, el que se limita a ejecución y exploración de modelos y simulaciones previamente desarrolladas, la figura 8, representa los niveles funcionales de un entorno de simulación .

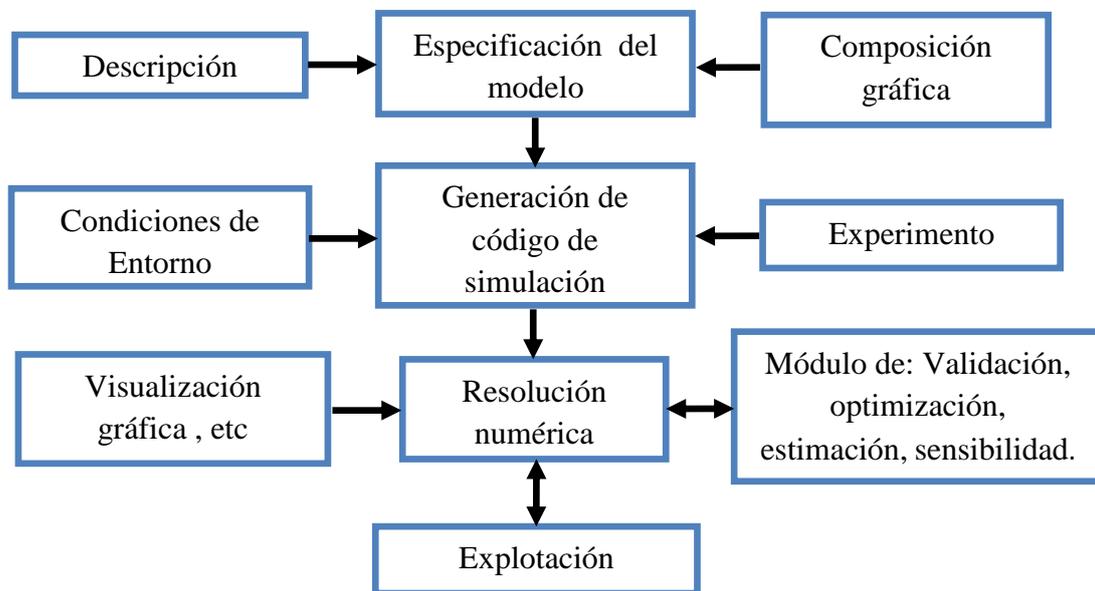


Figura 8 - niveles funcionales de un entorno de simulación.

3.4 Control de Procesos

Los objetivos básicos de cualquier sistema de control son satisfacer los criterios de seguridad y estabilidad de un proceso industrial con diferentes criterios de operación de modo que no violen las restricciones del proceso, ajustar la calidad y la cantidad de producción demandada, suprimir la influencia de perturbaciones externas (variaciones en la temperatura, presión, caudal y otros), minimizar los costes y maximizar los beneficios, además de cumplimiento de normativas ambientales.

Es importante seleccionar la estrategia de control adecuada para alcanzar el objetivo específico (proporcional, proporcional integral, proporcional integral y derivativo, PID), puesto que no siempre es necesario utilizar la estrategia más compleja para lograr un objetivo sencillo.

Dependiendo de la manera en que se relacionan los diferentes elementos de un sistema de control se clasifican en dos tipos [19]:

Sistemas de control en lazo abierto: denominado también control en lazo abierto o bucle abierto, se trata de un tipo de control en que la salida del sistema depende de la señal de entrada, pero el sistema no comprueba si la señal de salida es igual a la deseada. En este caso el sistema es incapaz de corregir errores no esperados a la salida. A cada entrada de referencia le corresponde una condición de operación fija, se muestra en la 9 su diagrama de bloque



Figura 9- Diagrama de bloque de un proceso de control en lazo abierto.

Sistemas de control en lazo cerrado: el control en lazo cerrado o en bucle cerrado es un tipo de control en el que se comprueba la señal de salida y se decide si el nivel de la señal real de salida corresponde con el de la señal deseada o si el nivel real de la señal ha de ser modificado para conseguir el valor objetivo. También se les denomina sistemas retroalimentados o realimentados, ver Figura 10. El sistema tiende a mantener una relación preestablecida entre la salida y una entrada de referencia. Se comparan estas dos señales y la diferencia (señal de error) sirve de medida de control.

Cuando existen perturbaciones, este tipo de control tiende a reducir la diferencia entre el valor deseado y el valor real de salida. Por ejemplo, un sistema de control en lazo cerrado podría ser un sistema de regulación de estaciones de bombeo [19].

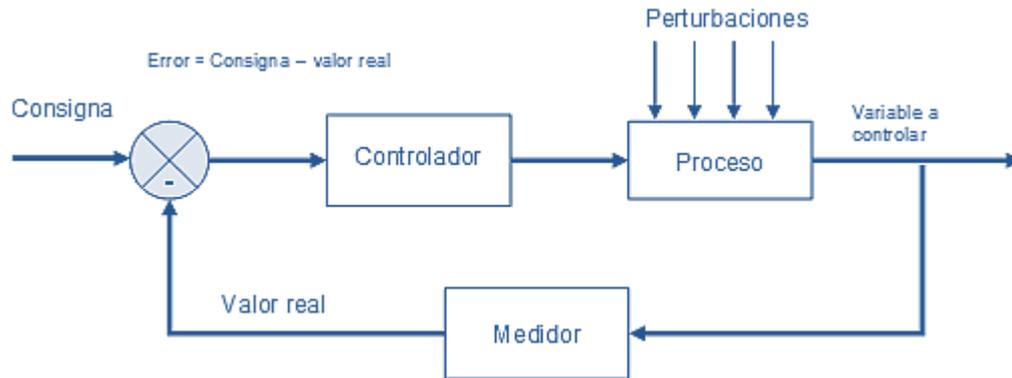


Figura 10 - Diagrama de bloques de un proceso de control en lazo cerrado.

Los controladores más empleados son los denominados PID por sus tres acciones: proporcional (P), integral (I) y derivativo (D). Estos controladores son los denominados P, PI, y PID.

P: acción de control proporcional, da una salida del controlador que es proporcional al error, es decir: $u(t) = K_p \cdot e(t)$ y su función transferencia queda:

$$C_p(s) = K_p \tag{3.3}$$

Donde K_p es una ganancia proporcional ajustable. Un controlador proporcional puede controlar cualquier planta estable, pero con desempeño limitado y error en régimen permanente (off-set).

PI: acción de control proporcional-integral, se define mediante la expresión

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau \tag{3.4}$$

Donde T_i se denomina tiempo integral y es quien ajusta la acción integral, controlador que es proporcional al error acumulado, lo que implica que es una acción lenta.

La función de transferencia resulta:

$$C_{PI}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \tag{3.5}$$

Con un control proporcional, es necesario que exista error para tener una acción de control distinta de cero. Con acción integral, un error pequeño positivo siempre nos

dará una acción de control creciente, y si fuera negativo la señal de control será decreciente. Este razonamiento sencillo nos muestra que el error en régimen permanente será siempre cero. Muchos controladores industriales tienen solo acción PI. Se puede demostrar que un control PI es adecuado para todos los procesos donde la dinámica es esencialmente de primer orden. Lo que puede demostrarse en forma sencilla, por ejemplo, mediante un ensayo al escalón.

PID: acción de control proporcional-integral-derivativa, esta acción combinada reúne las ventajas de cada una de las tres acciones de control individuales. La ecuación de un controlador con esta acción combinada se obtiene mediante:

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (3.6)$$

$$e(t) = w(t) - y(t) \quad (3.7)$$

Y su función transferencia resulta:

$$C_{PID}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + dS \right) \quad (3.8)$$

Los reguladores PID calculan el valor de la señal de control o variable manipulada del proceso $u(t)$ en el instante de tiempo t de acuerdo a una expresión del tipo:

Aunque en la práctica se implementan otras variables en la función descrita (3.6) para un controlador PID. La elección de los parámetros K_p (constante proporcional), T_i (tiempo de integral), y T_d (tiempo derivativo) se denomina sintonía del controlador, existiendo para ellos diversas reglas y procedimientos.

Una adecuada sintonía es esencial para obtener unas buenas prestaciones dinámicas en lazo cerrado, esto es, comportamiento estable en un determinado rango de operación, con un correcto seguimiento de la referencia por la variable controlada, reducida variabilidad a pesar de la existencia de perturbaciones y moderadas ocasiones de control.

4. MODELADO DE LA ESTACIÓN DE REGULACIÓN Y MEDIDA

Como se ha mencionado anteriormente las ERM se encuentran ubicadas en los puntos de entrega (salidas) de los gasoductos y en ellas se reduce la presión del gas hasta que tenga una presión constante y dentro de unos rangos muy concretos, como iniciación del proceso de adaptación a la presión final a la que se utiliza por empresas y particulares, que puede bajar hasta 20 milibar [1].

El sistema de calentamiento de una ERM se debe instalar con el fin de evitar bajas temperaturas y formación de hielo y/o hidratos debido a las expansiones del gas en el regulador, que podrían perturbar el buen funcionamiento del regulador y los aparatos situados a continuación del mismo, y básicamente consiste en la instalación de un intercambiador de calor carcasa y tubos en U, donde el gas circula por el interior de los tubos el agua por el exterior, y una caldera (horno) que calienta el agua que va a entrar al intercambiador de calor se debe instalar al aire libre o en local separado de la ERM con paredes estancas. Se deben instalar en la caldera y en el intercambiador los dispositivos de seguridad necesarios de acuerdo con la legislación vigente.

Los elementos que componen la estación de regulación y medida modelada en EcosimPro® son (ver figura 11): 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].

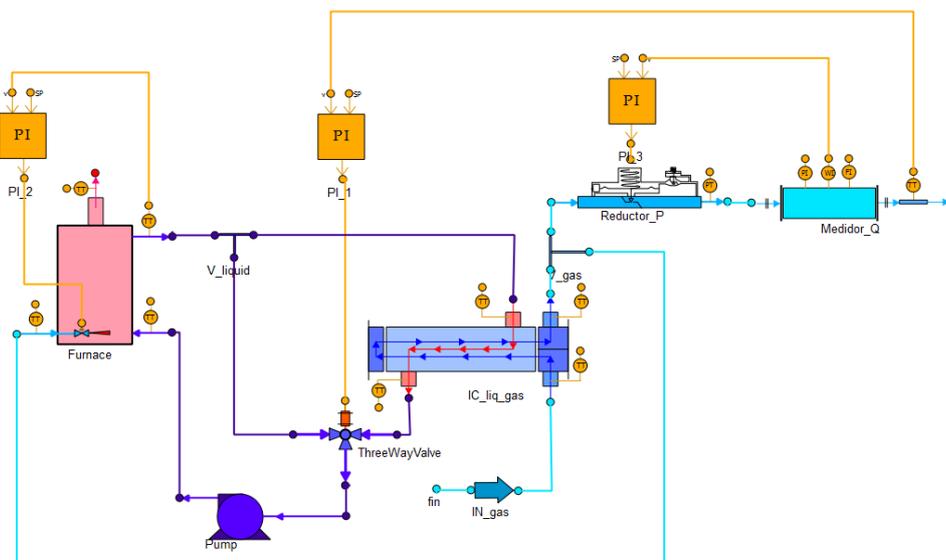


Figura 11 - Proceso realizado en la ERM implementado en EcosimPro®.

A continuación se describirá el modelado de los principales equipos de la estación de regulación y medida.

4.1 Modelado matemático del intercambiador de calor de carcasa y tubos

Uno de los equipos más importantes es el intercambiador de calor de carcasa y tubos cuya misión es que el gas natural alcance la temperatura de suministro fijada. En este intercambiador el gas natural circula por el interior de los tubos y el agua por el exterior, tiene dos pasos por el tubo y uno paso por la carcasa ver figura 12.

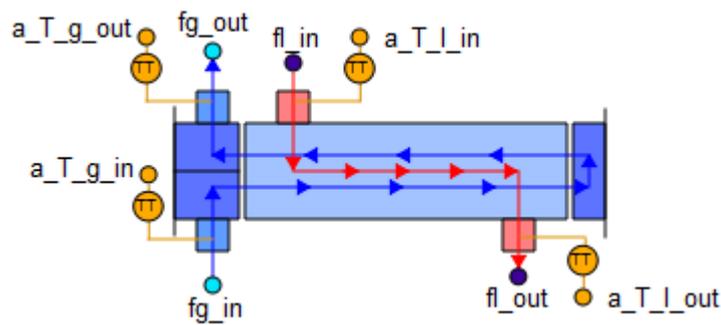


Figura 12 - Intercambiador de calor cascara y tubos

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

- Balance de materia del gas y del líquido:

$$Q_{gin} \cdot \rho_{gin} = Q_{out} \cdot \rho_{out} \quad (4.1)$$

$$W_{lin} = W_{lout} \quad (4.2)$$

$$W_{gin} = Q_{gin} \cdot \rho_{gin} \quad (4.3)$$

Las ecuaciones para los balances de materia para el líquido y el gas en el intercambiador de calor no tienen en cuenta el término de acumulación y ni el término de generación luego lo caudal de entrada es igual a la salida.

- Balance de materia individual gas:

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.

$$y_{gin,i} = y_{gout,i} \quad \forall_i = 1 \dots M \quad (4.4)$$

i – componente de la mezcla

M – número de componentes presentes en la mezcla de gas natural.

M = 12. Constante

- Balance de energía del gas y del líquido

Las ecuaciones (4.5 y 4.6) presentan los balances de energía global para las corrientes de líquido y del gas:

$$\rho_{gin} \cdot V_{tub} \cdot Cp_{gin} \frac{dT_{gout}}{dt} = \rho_{in} \cdot Q_{gin} \cdot Cp_{gin} (T_{gin} - T_{gout}) + Q \quad (4.5)$$

$$\rho_l \cdot V_{car} \cdot Cp_{lin} \frac{dT_{lout}}{dt} = Cp_{lin} \cdot W_{lin} (T_{lin} - T_{lout}) - Q \quad (4.6)$$

Donde Q es la carga térmica, Q_{gin} y W_{lin} son las tasas de flujos de volumétrico y másico respectivamente, Cp es la capacidad calorífica, T es la temperatura.

- Diferencia media logarítmica de temperatura:

$$Diflog_T = \frac{(T_{lin} - T_{gout}) - (T_{lout} - T_{gin})}{\ln\left(\frac{(T_{lin} - T_{gout})}{(T_{lout} - T_{gin})}\right)} \quad (4.7)$$

- Transferencia de Calor real

$$Q = A_s \cdot U \cdot \Delta T_{ML} \cdot \varepsilon \quad (4.8)$$

- Coeficiente global de transmisión de calor:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_0} + \frac{1}{h_{od}} + \frac{d_0 \cdot \ln\left(\frac{d_0}{d_{tub}}\right)}{2 \cdot K_W} + \frac{d_0}{d_{tub}} \cdot \frac{1}{h_{id}} + \frac{d_0}{d_{tub}} \cdot \frac{1}{h_i} \quad (4.9)$$

- Eficiencia para un intercambiador de calor carcasa y tubos:

$$\varepsilon = 0.95 \quad (4.10)$$

- Número de Reynolds , Número de Prandt y Nusselt para el gas :

$$Re = \frac{d_{tub} \cdot \rho_{in} \cdot Q_{gin} / A_{tub}}{\mu_{gin}} \quad (4.11)$$

$$Pr = \frac{Cp_{gin} \cdot \mu_{gin}}{k_{gn}} \quad (4.12)$$

$$Nu = C_{gases} \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.33} \cdot \left(\frac{\mu_{gin}}{\mu_{gTw}} \right)^{0.14} \quad (4.13)$$

- Coeficiente individual de transmisión de calor para el interior de los y para la carcasa:

$$h_o = \frac{Nu_o}{d_o k_l} \quad (4.14)$$

$$h_i = \frac{Nu_o}{d_{tub} k_{gni}} \quad (4.15)$$

- Número de Reynolds , Número de Prandt y Nusselt para el lado de la carcasa :

$$Re_o = \frac{d_o \cdot W_{lin} / A_{car}}{\mu_l} \quad (4.16)$$

$$Pr_o = \frac{Cp_{lin} \cdot \mu_l}{k_l} \quad (4.17)$$

$$Nu_o = C_l \cdot Re_o^{0.8} Pr_o^{0.33} \left(\frac{\mu_l}{\mu_{lTw}} \right)^{0.14} \quad (4.18)$$

- Sección de transferencia de calor:

$$A_s = \frac{Q}{U \cdot \Delta T_{ML} \cdot \varepsilon} \quad (4.19)$$

- Diámetro Hidráulico de la Carcasa:

$$D_e = \frac{(4P_t^2 - (0.25\pi d_o^2))}{\pi d_o} \quad (4.20)$$

D_e – para una configuración cuadrada de los tubos

- Volumen y sección de la carcasa

$$V_{car} = A_{car} \cdot L_{tub} \quad (4.21)$$

$$A_{car} = \frac{\pi}{4} (d_{car}^2 - d_{tub}^2) \quad (4.22)$$

- Longitud del tubo :

$$L_{tub} = \frac{A_s}{\pi \cdot d_o \cdot N_{tub}} \quad (4.23)$$

- Diámetro interior del tubo:

$$d_o = d_{tub} + 2 \cdot esp \quad (4.24)$$

- Numero de tubos en el intercambiador de calor:

$$N_{tub} = K_1 \left(\frac{D_{car}}{d_o} \right)^{n_1} \quad (4.25)$$

- Sección y Volumen del tubo y de la carcasa

$$A_{tub} = n_{tub} \cdot \pi \cdot d_{tub}^2 \quad (4.26)$$

$$V_{tub} = A_{tub} \cdot L_{tub} \cdot L_{tub} \quad (4.27)$$

$$A_{car} = \frac{\pi}{4} (d_{car}^2 - n_{tub} \cdot d_0^2 \cdot n_{pasos}) \quad (4.28)$$

$$V_{car} = A_{car} \cdot L_{tub} \quad (4.29)$$

- Longitud equivalente:

$$L_{eq} = L_{tub} \cdot n_{pasos} + L_{codo} + L_{entrada} + L_{salida} + 2 \cdot L_{medidorT} \quad (4.30)$$

- Velocidad del gas en la tubería y del líquido en la carcasa:

$$v_{tub} = \frac{Q_{gin} \cdot \rho_{gin}}{\frac{\pi d_0^2}{4} \cdot \rho_{gin}} \cdot \frac{n}{N_{tub}} \quad (4.31)$$

$$v_{car} = \frac{m_s}{A_{car} \cdot \rho_l} \quad (4.32)$$

- Caída de presión en el gas en el intercambiador de calor:

$$pd_{gas} = \left[8 \cdot \lambda \cdot \left(\frac{L_{eq}}{d_{tub}} \right) + 1.5 \cdot (n - 1) \right] \frac{\rho_{gin} \cdot \left(\frac{Q_{gin}}{A} \right)^2}{2} \quad (4.33)$$

$$\frac{d}{dt} pd_{gas} = \left[8 \cdot \lambda \cdot \left(\frac{L_{eq}}{d_{tub}} \right) + 1.5(n - 1) \right] \cdot \frac{\rho_{gin} \cdot \left(\frac{Q_{gin}}{A} \right)^2}{2} - pd_{gas} \quad (4.334)$$

λ – factor de fricción de la tubería, se calcula con la ecuación de Chen (adim)

- Presión en la salida del intercambiador de calor por el interior de los tubos :

$$P_{gout} = P_{gin} - pd_{gas} \quad (4.34)$$

- Caída de Presión en el lado de la carcasa :

$$pd_{liq} = f_s \left(\frac{\rho_l v_l^2}{2} \right) \left(\frac{L}{B} \right) \left(\frac{D_{car}}{D_e} \right) \quad (4.35)$$

- Factor de fricción de la Carcasa :

$$f_s = 2b_o Re_0^{-0.15}, \text{ siendo } b_o = 0.72 \quad (4.36)$$

- Potencia de la bomba hidráulica

$$P = \frac{1}{\eta} \left(\frac{m_t}{\rho_t} \cdot \Delta P_t + \frac{m_s}{\rho_s} \cdot \Delta P_s \right) \quad (4.37)$$

- Peso molecular de la mezcla de gases:

$$PM = \sum_{i=1}^M y_{gin,i} \cdot PM_i \quad (4.38)$$

Se supone que el gas está formado por una mezcla de M componentes, cada uno de ellos con un peso molecular PM_i y una fracción molar y_i ($i = 1, \dots, M$).

- Calculo de la capacidad calorífica a presión constante de la mezcla de gases y del líquido :

$$Cp_{in} = \frac{1}{PM} \sum_{i=1}^M y_i \cdot Cp_i \quad (4.39)$$

$$Cp_i = cp_g_a_i + cp_g_b_i T_{gin} + cp_g_c_i T_{gin}^2 + cp_g_d_i T_{gin}^3 \quad \forall_i = 1., M \quad (4.40)$$

$$Cpl_in = 4.187 \quad (4.41)$$

- Cálculo de la viscosidad de la mezcla de gases y de la viscosidad del líquido:

$$\mu_{gin} = \sum_{i=1}^M y_{gin,i} \cdot (vis_g_a_i + vis_g_b_i T_{gin} + vis_g_c_i T_{gin}^2 + vis_g_d_i T_{gin}^3) \quad (4.42)$$

$$\forall_i = 1, \dots, M$$

$$\mu_{gTw} = \sum_{i=1}^M y_{gin,i} \cdot (vis_g_a_i + vis_g_b_i T_{Tw} + vis_g_c_i T_{Tw}^2 + vis_g_d_i T_{Tw}^3) \quad (4.43)$$

$$\mu_l = 0.1 \quad (4.44)$$

$$\mu_{lTw} = 0.1 \quad (4.45)$$

- Densidad de la mezcla de gases a la entrada y a la salida y Densidad del líquido:

$$\rho_{gin} = \frac{P_{gin}}{Z_{in} \cdot R \cdot T_{gin}} \frac{Pm}{1000} \quad (4.46)$$

$$\rho_{gout} = \frac{P_{out}}{Z_{out} \cdot R \cdot T_{gout}} \frac{Pm}{1000} \quad (4.47)$$

$$\rho_l = 997.63 \quad (4.48)$$

Se obtiene de la ecuación de estado de los gases reales $PV = ZnRT$

4.2 Modelado matemático de la bomba de agua

A continuación se presenta el modelo de la bomba de agua de entrada al intercambiador de calor. Se considera que hay caída de presión solamente 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.

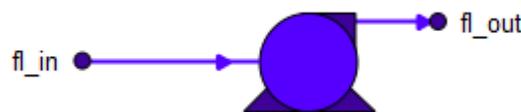


Figura 13 - Bomba de la agua

En la bomba se asigna un valor fijo al caudal másico de agua que va a circular por el circuito de agua de la ERM 0, siendo que lo mismo tiene que ser suficientemente grande para asegurar el calentamiento de lo gas y garantizar el mismo tenga una temperatura de 268,5 K en la salida de la ERM

- Balance de materia del agua

$$W_{lin} = W \quad (4.49)$$

$$W_{lout} = W \quad (4.50)$$

W_{lin}, W_{lout} - flujo másico de líquido. Constantes (kg s^{-1})

- Balance de energía

$$T_{lin} = T_{lout} > 70^{\circ}\text{C} \quad (4.51)$$

$T_{lin}(t), T_{lout}(t)$ - Temperatura de líquido ($^{\circ}\text{C}$)

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

4.3 Modelado matemático de la caldera

Otro de los equipos más importantes es la caldera ver figura 14 que se utiliza para calentar el agua va a entrar al intercambiador de calor. 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.

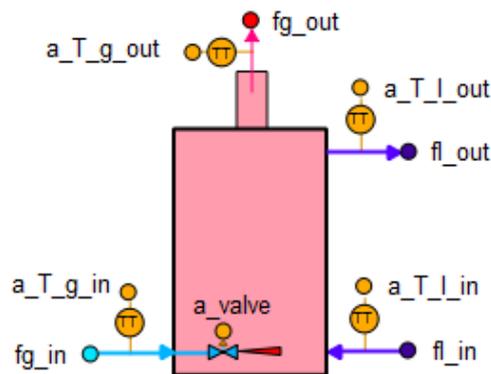


Figura 14 - Caldera a gas

Los balances de materia tanto para la corriente líquida como para el gas son presentados en las ecuaciones 4.53, 4.54, 4.55 y 4.56:

- Balance de materia del gas y del líquido :

$$W_{lin} = W_{lout} \quad (4.52)$$

$$Q_{gin} \cdot \rho_{gin} = Q_{gout} \cdot \rho_{gout} \quad (4.53)$$

$$W_{gin} = Q_{gin} \cdot \rho_{gin} \quad (4.54)$$

Siendo:

- Balance de materia individual gas

$$y_{in,i} = y_{out,i} \quad \forall_i = 1 \dots M_{gc} \quad (4.55)$$

i – componente de la mezcla

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

- Balance de Energía del líquido:

$$\rho_l \cdot V_{horno} \cdot C_{p_{lin}} \frac{dT_{lout}}{dt} = C_{p_{lin}} \cdot W_{lin} (T_{lin} - T_{lout}) + Q_{horno} \quad (4.56)$$

- Calor intercambiado en el horno

$$Q_{horno} = PCI \cdot cte_cal_para_J \cdot Q_{normal} \quad (4.57)$$

- Poder Calorífico inferior de la mezcla de gases :

$$PCI = 1000 \cdot \text{Sum}(i \text{ in natural_gas2} ; f_{gin} \cdot y_i [= 1, \dots M] \cdot PCI_i [1, \dots M]) \quad (4.58)$$

- Volumen y sección de la caldera :

$$A_{horno} = \frac{\pi}{4} d_{horno}^2 \quad (4.59)$$

$$V_{horno} = A_{horno} \cdot L_{horno} \quad (4.60)$$

- Flujo Volumétrico de salida del gas (Gas de Combustión)

$$Q_{out} = \frac{C_v \cdot y_{valve} \cdot N_g \cdot F_p \left(\frac{P_{gin}}{100000} \right) \cdot Y_f}{\sqrt{\frac{(PM/1000) \cdot T_{gin} \cdot Z_{in}}{x_p}}} \quad (4.61)$$

Esta ecuación se emplea para flujo de gas y vapor se ha obtenido a partir del manual “Control Valve sizing Handbook”, de Dresser Masoneilan.[20].

- Flujo normalizado :

$$Q_{\text{normal}} = \frac{Q_{\text{gin}} \cdot P_{\text{gin}} \cdot Z_{\text{normal}} \cdot T_{\text{normal}}}{P_{\text{normal}} \cdot Z_{\text{in}} \cdot T_{\text{gin}}} \quad (4.62)$$

- Relación de la caída de presión:

$$\text{si } P_{\text{gin}} > P_{\text{gout}} \quad \square$$

$$x_p = \frac{(P_{\text{in}}/100000) - (P_{\text{out}}/100000)}{(P_{\text{in}}/100000)} \quad (4.63)$$

$$\text{si } P_{\text{in}} \leq P_{\text{out}}$$

$$x_p = Fk \cdot x_f$$

Existe un límite para ese parámetro y se produce cuando no hay expansión, es decir, cuando la presión de salida del reductor es igual a la presión de entrada.

- Factor de expansión del gas :

$$Y_f = 1 - \frac{x_p}{3.Fk.x_f} \quad (4.64)$$

- Relación de calores específicos del gas:

$$k_f = \frac{Cp_{\text{gin}}}{Cv_{\text{gin}}} \quad (4.65)$$

- Factor de la relación de calores específicos:

$$F_k = \frac{k_f}{1.40} \quad (4.66)$$

- Temperatura de salida los gases de combustión :

$$T_{\text{gout}} = T_{\text{gc_out}} \quad (4.67)$$

- Densidad de los gases de combustión :

$$\rho_{\text{gout}} = \rho_{\text{gc_out}} \quad (4.68)$$

- Presión de salida de los gases de combustión

$$P_{\text{gout}} = P_{\text{atm}} \quad (4.69)$$

- Peso molecular de gas :

$$PM = \sum_{i=1}^M y_{\text{gin},i} \cdot PM_i \quad (4.70)$$

Se supone que el gas está formado por una mezcla de M componentes, cada uno de ellos con un peso molecular PM_i y una fracción molar y_i ($i = 1, \dots, M$).

- Cálculo de la capacidad calorífica a presión y a volumen constante de la mezcla de gases:

$$Cp_{in} = \frac{1}{P_M} \sum_{i=1}^M y_i \cdot Cp_i \quad (4.71)$$

$$Cp_i = cp_g_a_i + cp_g_b_i T_{in} + cp_g_c_i T_{in}^2 + cp_g_d_i T_{in}^3 \quad \forall_i, 1, \dots, M \quad (4.72)$$

$$Cv_{gin} = Cp_{gin} - R/P_M \quad (4.73)$$

4.4 Modelado matemático del reductor de presión

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

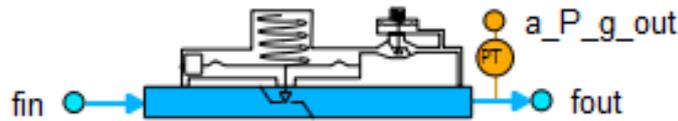


Figura 15 - Reductor de presión Reductor_P.

Las ecuaciones que expresan los balances de materia global e individual en el reductor de presión, son (4.75, 4.76, 4.77 y 4.78), siendo en lo mismo no lleva en cuenta el término de acumulación y ni el término de generación pues no hay reacción química luego el caudal de entrada y salida son iguales.

- Balance de materia del gas y del líquido :

$$W_{in} = W_{out} \quad (4.74)$$

$$Q_{gin} \cdot \rho_{gin} = Q_{gout} \cdot \rho_{gout} \quad (4.75)$$

$$W_{gin} = Q_{gin} \cdot \rho_{gin} \quad (4.76)$$

Siendo:

$W(t)_{gin}$ - flujo másico del gas que se quema en la caldera (kg/s)

- Balance de materia individual gas

$$y_{in,i} = y_{out,i} \quad \forall_i = 1 \dots M_{gc} \quad (4.77)$$

i – componente de la mezcla

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

- Balance de energía del gas:

$$T_{gout} = T_{gin} - \frac{(P_{gin} - P_{gout})}{100000} \cdot 0,5 \quad (4.78)$$

- Flujo Volumétrico de salida del gas (Gas de Combustión)

$$Q_{out} = \frac{y_{valve} \cdot C_v \cdot N_g \cdot F_p \left(\frac{P_{gin}}{100000} \right) Y_f}{\sqrt{\frac{(PM/1000) T_{gin} \cdot Z_{in}}{x_p}}} \quad (4.79)$$

- Relación de la caída de presión:

Existe un límite para ese parámetro y se produce cuando no hay expansión, es decir, cuando la presión de salida del reductor es igual a la presión de entrada:

$$x_p = \frac{\left(\frac{P_{in}}{100000} \right) - \left(\frac{P_{out}}{100000} \right)}{\left(\frac{P_{in}}{100000} \right)} \quad \text{si } P_{in} \leq P_{out} \quad (4.80)$$

$$\text{si } P_{in} \leq P_{out}$$

$$x_p = Fk \cdot x_f$$

“Control Valve sizing Handbook , de Dresser Masoneilan.[20].

- Factor de expansión del gas:

$$Y_f = 1 - \frac{x_p}{3 \cdot Fk \cdot x_f} \quad (4.81)$$

- Factor de la relación de calores específicos:

$$F_k = \frac{k_f}{1.40} \quad (4.82)$$

- Relación de calores del gas (adimensional)

$$k_f = \frac{Cp_{in}}{Cv_{in}} \quad (4.83)$$

- Cálculo de la capacidad calorífica a presión y a volumen constante de la mezcla de gases:

$$Cp_{gin} = \frac{1}{PM} \sum_{i=1}^M y_i \cdot (cp_g_a_i + cp_g_b_i T_{in} + cp_g_c_i T_{in}^2 + cp_g_d_i T_{in}^3) \quad (4.84)$$

$$\forall_i = 1, \dots, M$$

$$Cv_{gin} = Cp_{gin} - R/PM \quad (4.85)$$

- Densidad de la mezcla de gases a la salida

Se obtiene de la ecuación de estado de los gases reales $PV = ZnRT$

$$\rho_{gout} = \frac{P_{out}}{Z_{out} \cdot R \cdot T_{gout}} \frac{Pm}{1000} \quad (4.86)$$

4.5 Modelado matemático para del medidor de caudal y presión

Se mide el caudal y la presión del gas de suministro. 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.

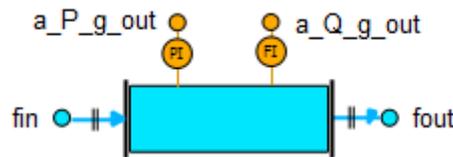


Figura 16 - Medidor de caudal y presión FT.

- Balance de materia

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

$$Q_{gin} = Q_{gout} \quad (4.87)$$

$$\rho_{gout} = \rho_{gin} \quad (4.88)$$

- Balance de energía

$$T_{gin} = T_{gout} \quad (4.89)$$

$T_{gin}(t), T_{gout}(t)$ – Temperatura de entrada y salida (°K)

La temperatura de entrada y salida son la misma. No hay variación de temperaturas.

- Flujo normalizado :

$$Q_{normal} = \frac{Q_{gin} \cdot P_{gin} \cdot Z_{normal} \cdot T_{normal}}{P_{normal} \cdot Z_{in} \cdot T_{gin}} \quad (4.90)$$

- Cálculo de las presiones de entrada y salida

Se supone que no hay caída de presión.

$$P_{gin} = P_{gout} \quad (4.91)$$

$P_{in}(t)$, $P_{out}(t)$ - presión de entrada y salida (Pa)

5 SIMULACIÓN DINÁMICA DE LA ERM

En este apartado se presentan los resultados obtenidos a partir de la simulación dinámica de una red de gas natural compuesta por una entrada (tubería inicial bidireccional con fuente de presión) y cuatro salidas contando cada una de ellas con una ERM, como ya se ha mencionado anteriormente en el simulador EcosimPro®. Además la estrategia de control, la descripción del experimento y las condiciones de contorno de la simulación también se muestran en este apartado

5.1 Establecimiento de estrategias de control

La simulación de procesos dinámica se utiliza de forma extensiva para comprobar el comportamiento dinámico de los equipos y evaluar la eficiencia de la estrategia de control. Para lo esquema tipo de la estación de regulación y medida de gas natural – ERM implementada en EcosimPro®, las variables de control más importantes son:

1. La presión de salida de gas natural que es disminuida de un rango de 69-76 bar a un valor 10-59 bar necesario para la distribución a las redes finales de consumo. Para realizar dicho control se utiliza un regulador PI que recibe el valor de la variable a controlar (presión de salida) y del Set Point (presión deseada) y envía una señal a la válvula reductora para variar la apertura de la misma.
2. La temperatura del gas natural a la salida de la ERM pues al pasar por el regulador de presión el mismo sufre una expansión producida por la reducción de presión en el regulador siendo necesario su calentamiento para mantener la temperatura en $-5\text{ °C} \pm 0.5\text{ °C}$ (Por cada reducción de la presión del gas en $1\text{ kg/cm}^2 - 0.98066\text{ bar}$, disminuye la temperatura en 0.5 °C) .Para realizar dicho control se utiliza un PI que recibe el valor de la variable a controlar (temperatura de salida) y del Set Point (temperatura deseada) y envía una señal a la válvula de tres vías para variar la apertura de la misma.
3. El control de temperatura que se realiza teniendo en cuenta la cantidad de gas de combustión que se quema en el horno, la cantidad y temperatura de agua que

sale del horno y entra al intercambiador de calor . Para realizar dicho control se utiliza un PI, que recibe el valor de la variable a controlar (temperatura de agua de entrada al intercambiador de calor) y del Set Point (temperatura deseada) y envía una señal a la válvula modificando su apertura para que entre más o menor caudal de gas natural al horno para su combustión.

5.2 Simulación del modelo en EcosimPro®

El experimento realizado en EcosimPro®, para probar la simulación dinámica de la Estación de regulación y medida fue hecho sobre el esquemático de la figura 18, compuesta por cuatro ERM conectadas a tramos de tuberías intermediarias bidireccionales y un tramo de tubería inicial bidireccional con fuente de presión, en la tabla 4 se presentan algunos parámetros físicos de diseño de las tuberías utilizados en la simulación.

Tabla 3– Características físicas de las tuberías

| TAG de la tubería | Clasificación | <i>Longitud de la tubería</i> (m) | <i>Diámetro de la tubería</i> (m) | Cota Entrada (m) | Cota Salida (m) |
|--------------------------|----------------------|---|---|-------------------------|------------------------|
| P0 | Inicial | 12.000 | 1.00 | 0.00 | 100 |
| P1 | Intermediaria | 12.000 | 1.00 | 100 | 200 |
| P2 | Intermediaria | 10.000 | 1.25 | 100 | 200 |
| P3 | Intermediaria | 30.000 | 1.50 | 200 | 350 |
| P4 | Intermediaria | 18.000 | 1.22 | 350 | 450 |
| P5 | Intermediaria | 10.000 | 1.22 | 450 | 350 |
| P6 | Intermediaria | 10.000 | 1.22 | 350 | 200 |
| P7 | Intermediaria | 20.000 | 1.00 | 200 | 350 |

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

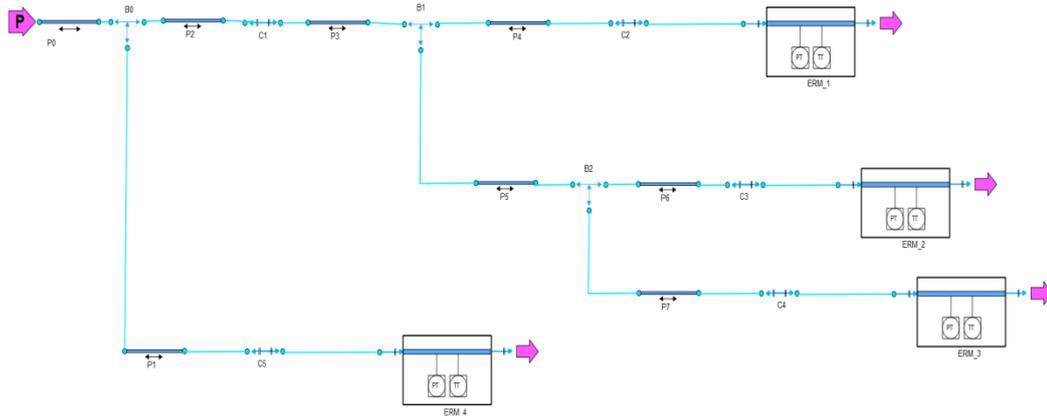


Figura 17 - Esquemático de la red de distribución de gas con cuatro ERM en las salidas, conectadas a tramos de tuberías intermediarias inicial y con fuente de presión.

Experimento y condiciones de contorno en EcosimPro®:

En el bloque **DECLS** es donde se declaran las variables propias del proceso (experimento) tales como: la presión de entrada (**Pin**) y de salida (**Pout**) de la red de gas natural respectivamente en los valores de 72 bar y 68 bar, temperatura a la entrada (**Tin**) 286,45 K y composición de gas natural en la entrada de la red (**yIn**) [0.033, 0.0558, 0.025, 0.82, 0.05, 0.005, 0.0001, 0.0001, 0.001, 0.001, 0.001, 0.008]. Todas definidas como variables reales.

Además se declaran como variables **DECLS** en lo experimento en EcosimPro , los valores de SetPoint inicial para los controladores de:

- Caudal normalizado de salida del gas (Nm³/s) **REAL** Q_reductor = 125
- Temperatura de salida del gas (K) **REAL** Tout_g = 260
- Temperatura de salida de agua (°C) **REAL** Tin_w = 90

En el bloque **INIT** se propone valores inicialización para la apertura de la válvula reductora de presión ($v_i = 2\%$), la válvula de tres vías ($v_i = 15\%$) y la válvula modificando de caudal de gas natural al horno para su combustión ($v_i = 20\%$).

En el bloque **BOUNDS** se define las condiciones de contorno físicas de presión, temperatura y composición para la entrada de la red de gas natural y en sus respectivas estación de regulación y medida (ERM) , además de las consignas de los controladores PID presentes en las ERM).

ERM_1.Medidor_Q.fout.P = Pout

ERM_1.Medidor_Q.fout.Ts = Tin+15 -- Temperatura en la salida (en caso de flujo inverso)

ERM_1.Medidor_Q.fout.yie[C1] = yIn[C1]

ERM_1.Medidor_Q.fout.yie[C2] = yIn[C2]

ERM_1.Medidor_Q.fout.yie[C3] = yIn[C3]

ERM_1.Medidor_Q.fout.yie[C6] = yIn[C6]

Hasta.

ERM_1.Medidor_Q.fout.yie[nC5] = yIn[nC5]

ERM_1.PI_1.s_set.signal[1] = Tout_g

ERM_1.PI_2.s_set.signal[1] = Tin_w

ERM_1.PI_3.s_set.signal[1] = Q_reductor

Es digno de mención que las condiciones de contorno para las cuatro estaciones de regulación y medida son iguales, siendo presentada en ese informe solamente la referente a la ERM_1.

Además al largo de la simulación se aplicó saltos tipo escalón en la presión de entrada de la red (P0.Pcc), en la temperatura de entrada de la ERM (P0.Tcc) y variaciones en el valor de Setpoint inicial de caudal normalizado de salida del gas en la ERM para observar lo funcionamiento y evolución de la ERM (intercambiador, caldera, reductor de presión y demás equipos)

P0.Pcc = Pin + 2.0e05*step(TIME,1500) - 2.0e05*step(TIME,2500)

P0.Tcc = Tin - 2.5*step(TIME,3500) + 2.5*step(TIME,4500)

Q_reductor = 125 Nm³/s + 25.0*step(TIME,500) - 25.0*step(TIME,1000)

En el bloque **BODY** se define la inicialización de todos los componentes de la red, siendo de gran importancia para tener un arranque de la red de gas de manera coherente. Para inicializar la simulación la misma parte (start-up) con un perfil de presiones inicial calculado de manera lineal a partir de las diferencias entre la presión de entrada y salida de cada tramo de tubería inicial y intermedia, además de la presión de entrada y salida para los componentes conexión y bifurcación de gas, siendo que para ambos 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.

P0.Pin = Pin

P0.Pout = Pin - (Pin-Pout)/3

P0.Tinicial = Tin

```

FOR (j IN natural_gas2)
P0.yinicial[j] = yIn[j]
END FOR
B0.Pinicial = Pin - (Pin-Pout)/3
    B0.Tinicial = Tin
FOR (j IN natural_gas2)
B0.yinicial[j] = yIn[j]
END FOR
C1.Pinicial = Pin - 1.5*(Pin-Pout)/3
    
```

Valor de las cotas inicial y final para cada tramo de tubería de gas. Es de notar que se debe especificar la cota inicial de una tubería como la cota final de la tubería anterior.

| | |
|----------------|----------------|
| P0.h_in = 0 | P5.h_in = 350 |
| P0.h_out = 100 | P5.h_out = 450 |
| P1.h_in = 100 | P6.h_in = 450 |
| P1.h_out = 200 | P6.h_out = 600 |
| P2.h_in = 100 | P7.h_in = 450 |
| P2.h_out = 200 | P7.h_out = 600 |
| P3.h_in = 200 | P4.h_in = 350 |
| P3.h_out = 350 | P4.h_out = 450 |

Como ya se ha mencionado, el establecimiento adecuado de una estrategia de control es indispensable para alcanzar una operación segura y estable de la planta de proceso. A pesar de lo objetivo de ese trabajo no ser proponer una metodología para un control óptimo de proceso, basados en otros trabajos ya desarrollados, la ley de control aplicado en esa simulación (ERM) corresponde a un controlador P.I típico, que viene dada por:

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau \right] \quad (5.4)$$

$$e(t) = w(t) - y(t) \quad (5.5)$$

La tabla abajo a presenta los parámetros sintonía para los reguladores PI, contenidos en la estación de regulación y medida obtenidos son:

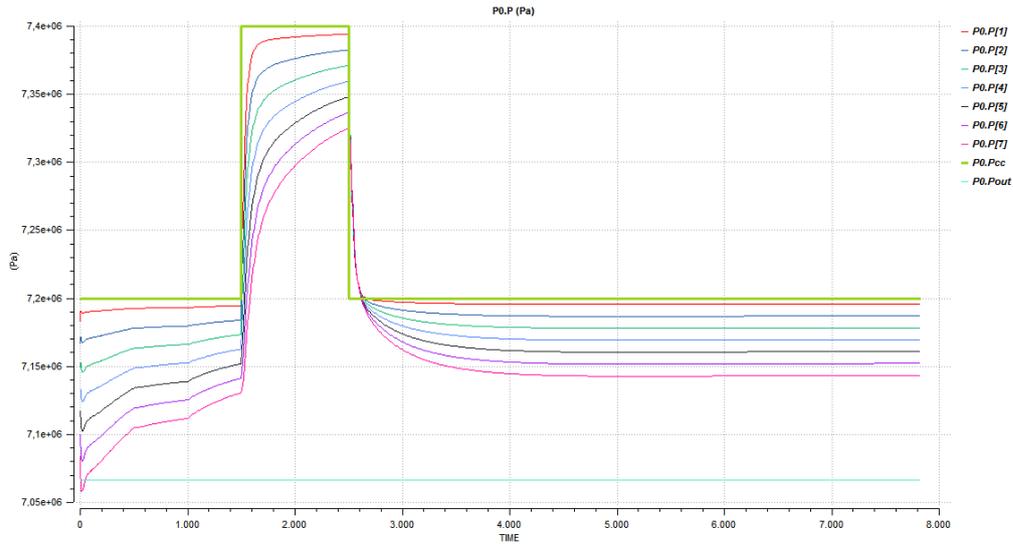
Tabla 4 - Datos de sintonía de los controladores y coeficientes de las válvulas

| | |
|--|-------|
| Parámetros controladores PID_1 | |
| Ganancia proporcional k (-) | -1 |
| Tiempo integral Ti (s) | 10 |
| Filtro del parámetro derivativo Alpha(-) | 0.1 |
| Constante para el antiwindup y el tiempo de integración Gamma(n) | 0.1 |
| Parámetros controladores PID_2 | |
| Ganancia proporcional k (-) | 5 |
| Tiempo integral Ti (s) | 10 |
| Filtro del parámetro derivativo Alpha(-) | 0.1 |
| Constante para el antiwindup y el tiempo de integración Gamma(n) | 0.1 |
| Parámetros controladores PID_3 | |
| Ganancia proporcional k (-) | 1 |
| Tiempo integral Ti (s) | 3 |
| Filtro del parámetro derivativo Alpha(-) | 0.1 |
| Constante para el antiwindup y el tiempo de integración Gamma(n) | 0.1 |
| Coefficiente de las válvulas | |
| Kv válvula ERM_1.Furnace.Kv (Caldera) | 0.465 |
| Kv válvula ERM_1.Reductor_P.Kv | 0.005 |

5.3 Resultado de la simulación dinámica

Las tuberías de gas natural presentes en esta librería fueron modeladas por volúmenes finitos y dividida en N nodos (para esa simulación las tuberías son discretizadas en 7 nodos) para realizar los balances de materia y energía, luego para esa simulación son presentados en las gráficas 1, 2 y 3 los perfiles de presión , perfiles de temperatura y perfiles de caudal másico para la tubería de entrada P0.

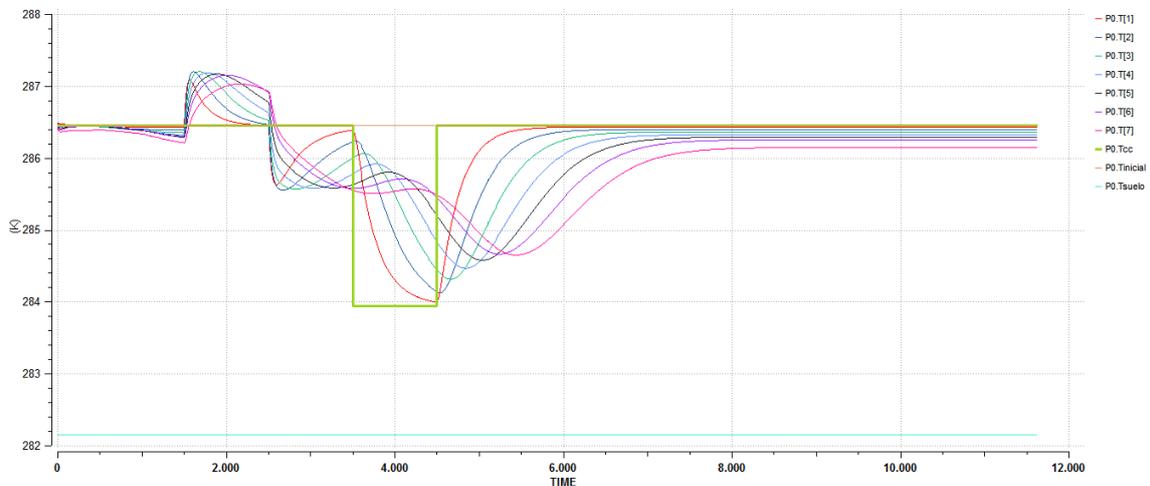
SIMULACIÓN Y OPERACIÓN ÓPTIMA EN ECOSIMPRO® DE ESTACIONES DE REGULACIÓN Y MEDIDA DE LA RED DE GAS NATURAL



Gráfica 1 – Perfil de presiones en la tubería P0, entrada de la red de gas.

La simulación parte con los perfil de presiones de manera lineal con un valor de 72 bar en la entrada de la tubería P0, siendo que se genera un aumento de presión en la entrada de la red, con cambios tipo escalón:

$$P0.Pcc = Pin + 2.0e05 * step(TIME, 1500) - 2.0e05 * step(TIME, 2500)$$



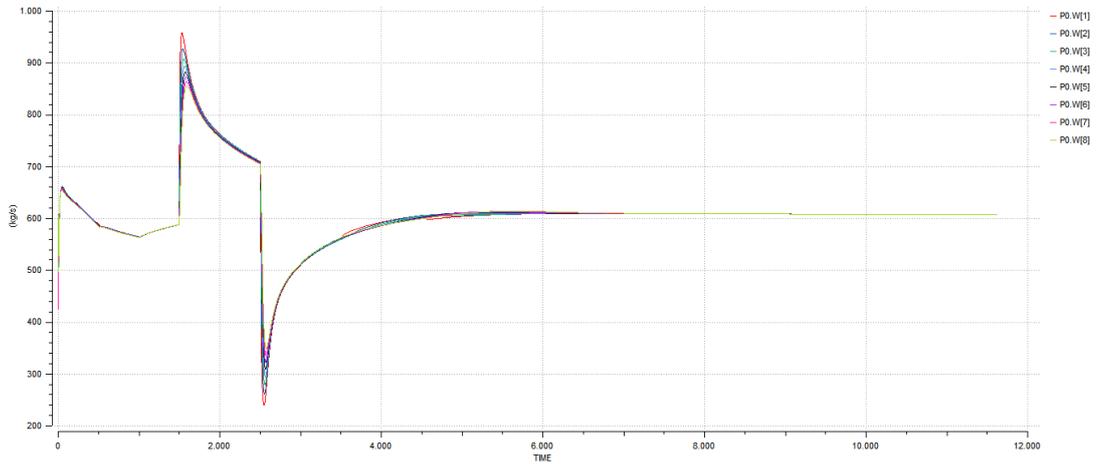
Gráfica 2 – Perfil de temperatura del flujo de gas al largo de la tubería P0 en la entrada de la red.

En la gráfica 2 se observa que, los perfiles de temperatura en la entrada de la red de gas y al largo de la tubería. Así como se ha hecho con la presión se genera un aumento en la temperatura de entrada en P0, a través de saltos tipos escalón para probar el corrector funcionamiento de la simulación:

$$P0.P0.Tcc = Tin - 2.5 * step(TIME, 3500) + 2.5 * step(TIME, 4500)$$

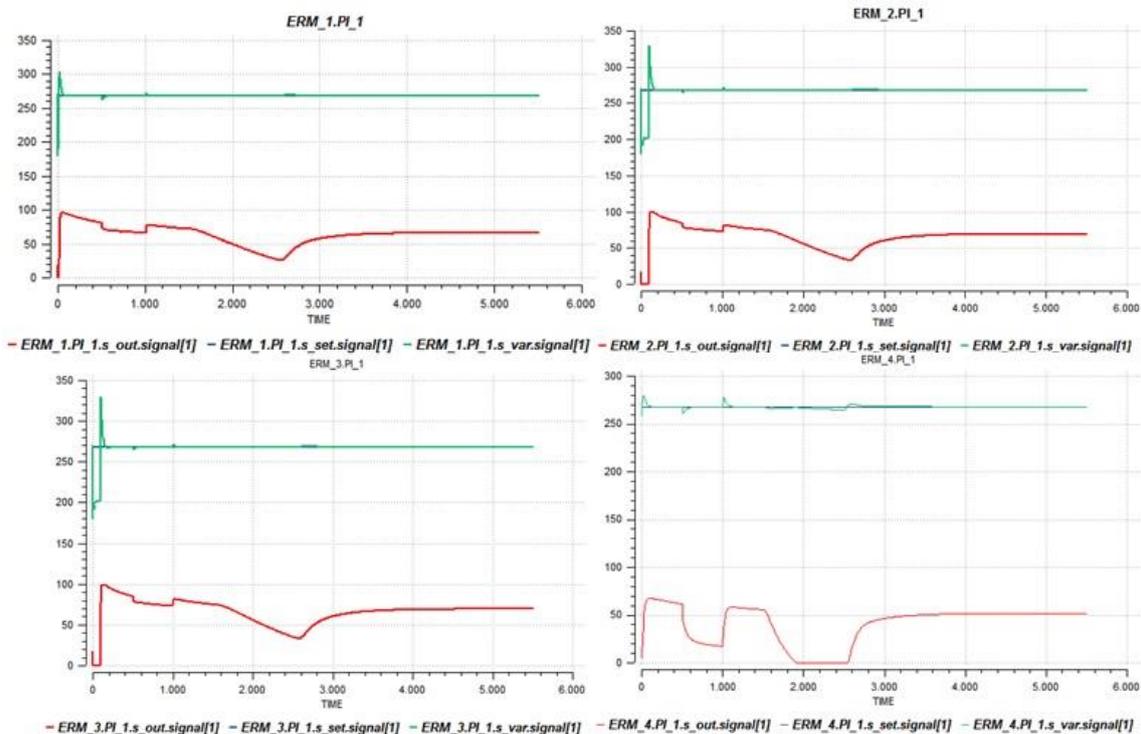
SIMULACIÓN Y OPERACIÓN ÓPTIMA EN ECOSIMPRO® DE ESTACIONES DE REGULACIÓN Y MEDIDA DE LA RED DE GAS NATURAL

Además observase que en los TIMES (1500 y 2500) donde se ha hecho los cambios de presión la temperatura del gas sigue lo mismo comportamiento, o sea, lo aumento o disminución de presión en el gas genera un cambio proporcional en la temperatura do gas natural en la línea



Gráfica 3– Perfil del Caudal masico de gas al largo de la tubería inicial P0 .

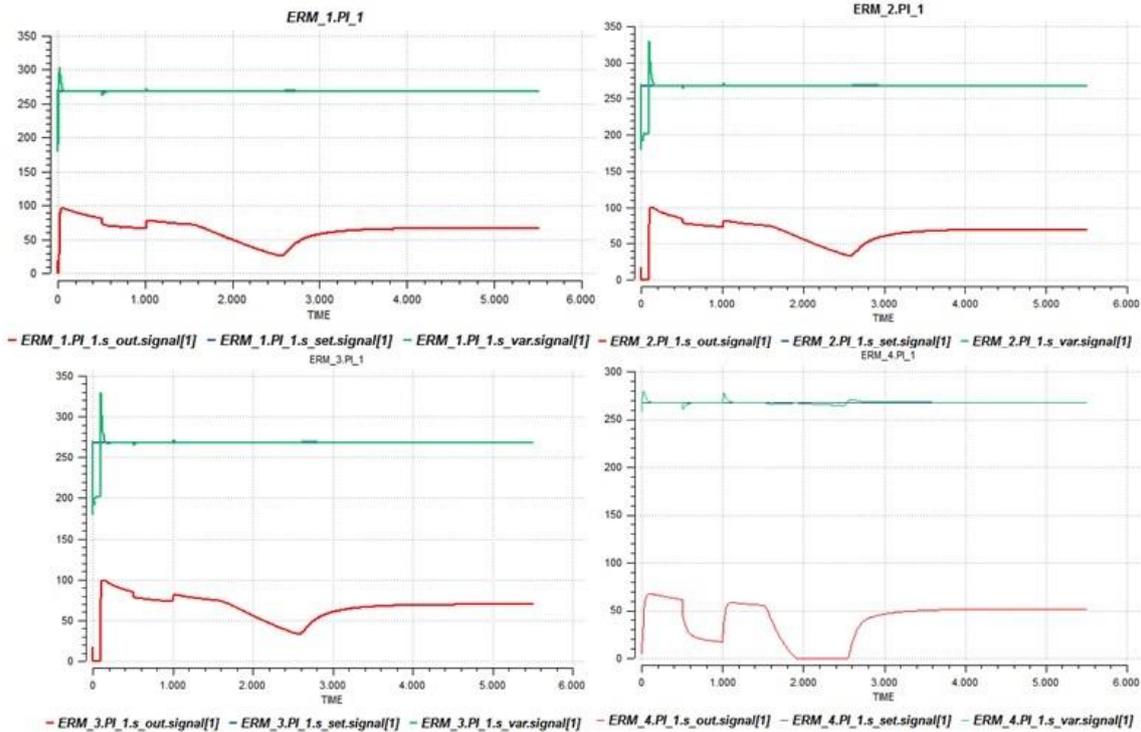
En la gráfica 4, se presentan los valores de Setpoint (PI_1.s_set.signal [1] línea azul), variable controlada (PI_1.s_var.signal[1] línea verde) y variable manipulada (PI_1.s_out. signal [1] línea roja) para el control de temperatura de salida de la ERM



Gráfica 4– SetPoint.PI_1 (Temperatura de la salida del gas 268.15 K) ERM_1, ERM_2, ERM_3, ERM_4.

Se observa que el controlador consigue mantener la temperatura en el SetPoint del proceso, o sea, 268.15 K, con los cambios en la presión y temperatura de entrada de la red y variación de Setpoint de caudal normalizado de salida de la ERM de $125\text{Nm}^3/\text{s}$ para $150\text{Nm}^3/\text{s}$. Para que eso sea posible, el controlador PI_1, recibe el valor de la variable a controlar (temperatura de salida) y del Set Point (temperatura deseada) y envía una señal a la válvula de tres vías para variar la apertura de la misma.

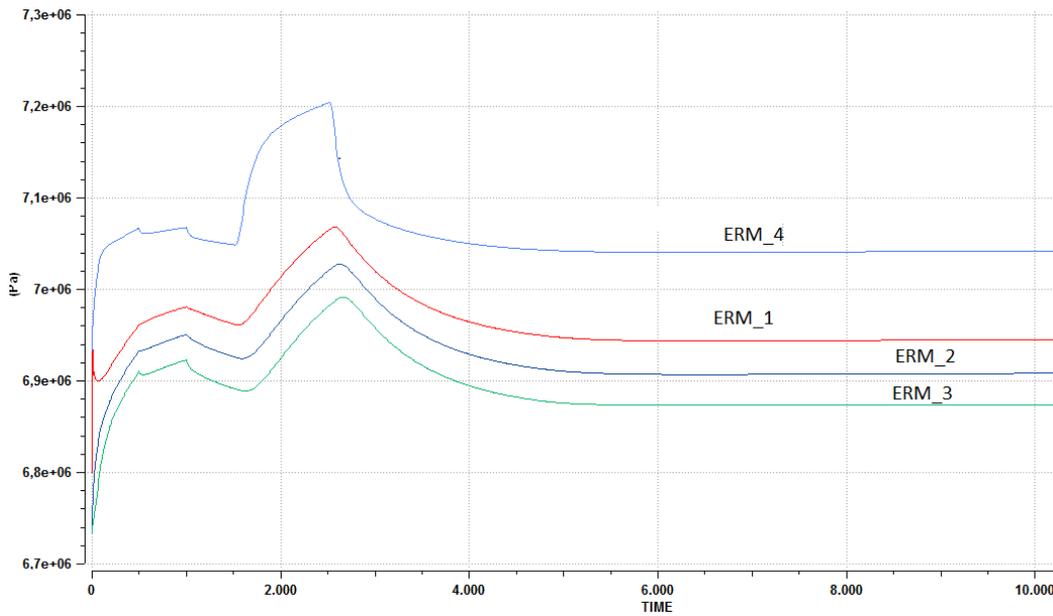
La grafica 5, presenta el control de temperatura de salida del agua de la caldera.



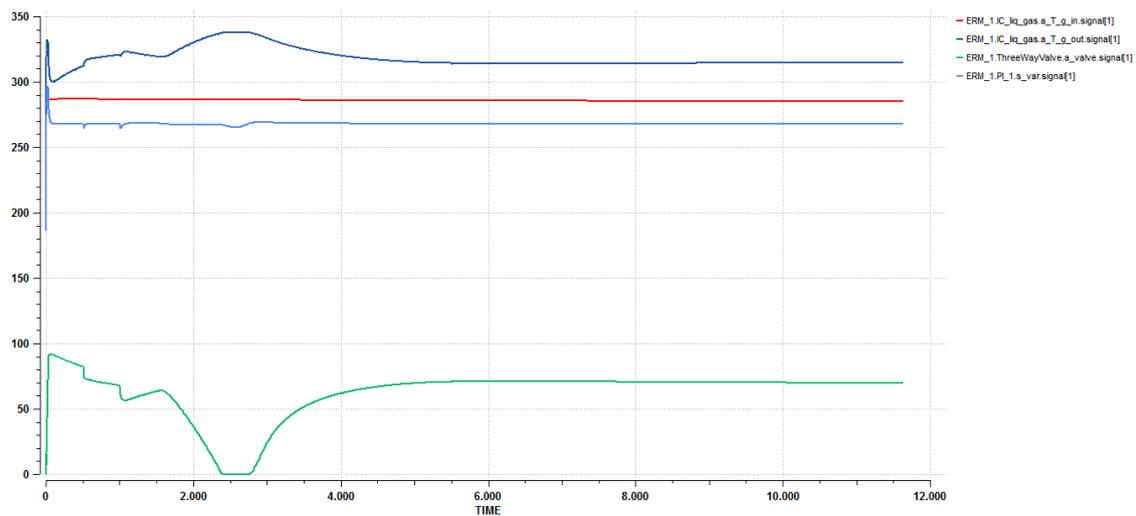
Gráfica 5 – SetPoint.PI_2 (Temperatura de salida del agua, de la caldera 90°C) ERM_1, ERM_2, ERM_3, ERM_4.

Se observa que el controlador PI_2, consigue mantener la temperatura en el SetPoint 90°C. Para realizar el control lo PI_2, que recibe el valor de la variable a controlar (temperatura de agua de entrada al intercambiador de calor **línea verde**) y del Set Point (temperatura deseada **línea azul**) y envía una señal a la válvula de la caldera (**línea roja**) modificando su apertura para que entre más o menor caudal de gas natural al horno para su combustión.

En las gráficas 6, 7,8 y 9 se se muestran los valores en régimen dinámico de algunas de las principales variables de las ERM.

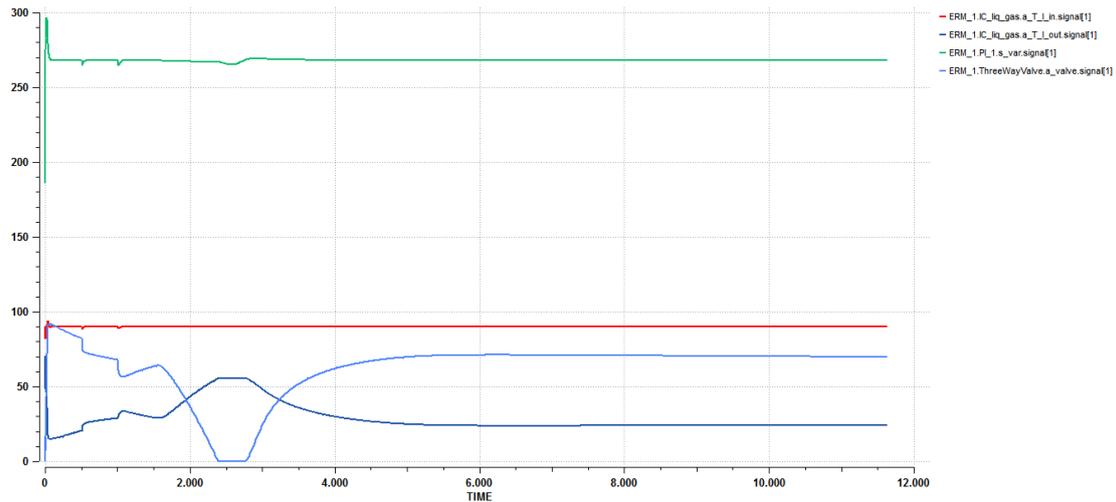


Gráfica 6 – Presión de entrada del gas natural en las ERM_1, ERM_2, ERM_3 y ERM_4.

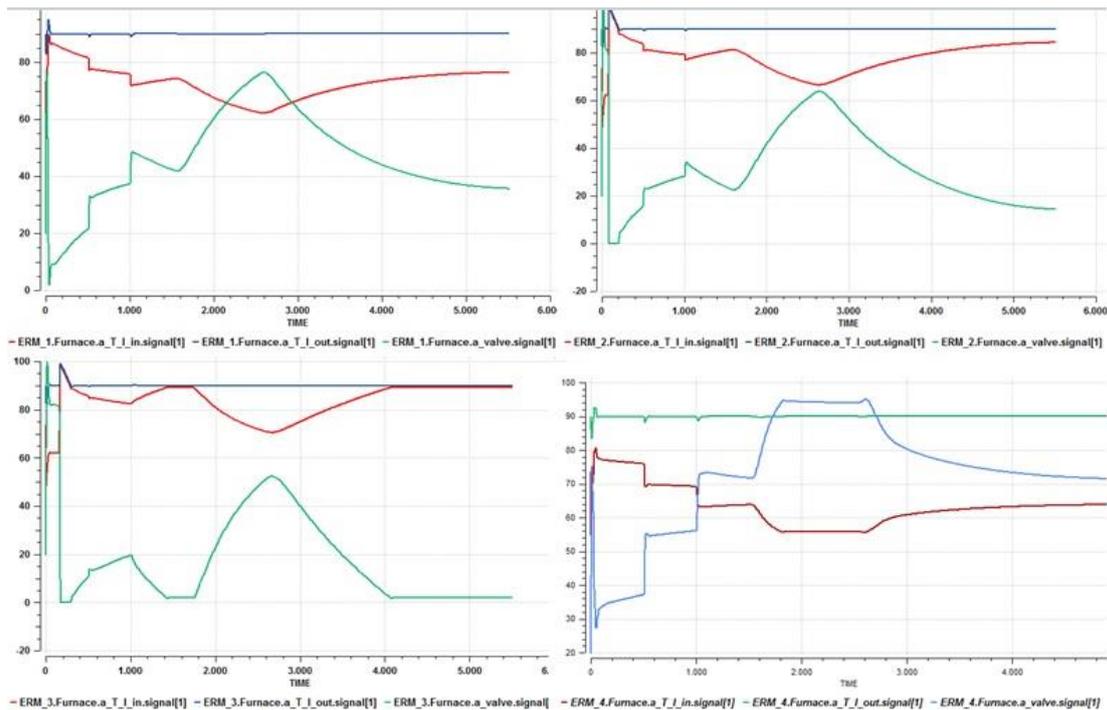


Gráfica 7 – Sensor de temperatura del gas del intercambiador de calor en la ERM_1. Línea roja temperatura en la salida, Línea azul temperatura en la entrada, línea gris variable controlada por el PI_1 y línea verde apertura de la válvula de tres vías (disminuí o aumenta la cantidad del agua en el intercambiador)

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



Gráfica 8– Sensor de temperatura del agua del intercambiador de calor en la ERM_1. Línea roja temperatura en la entrada, Línea azul oscuro temperatura en la salida, línea azul suave apertura de la válvula de tres vías y línea verde variable controlada por PI_1 268,5 K.



Gráfica 9 – Monitoriamente de la temperatura de entra (línea roja), temperatura de salida (línea azul) y apertura de la válvula de entrada de gas de combustión (línea verde) de la caldera para las cuatro ERM.

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

6.1 Programación cuadrática secuencial SQP

El algoritmo SQP (sequential quadratic programming), es un método cuasi newtoniano de resolución de problemas no lineales. Este algoritmo funciona bien cuando hay muchas ecuaciones en comparación con el número de variables y únicamente unas pocas independientemente (grados de libertad) [9].

SQP requiere un buen punto inicial (que se puede obtener a partir de análisis de sensibilidad) y que no hay discontinuidades en las derivadas. SQP es muy eficaz para resolver problemas utilizando simuladores de procesos industriales secuenciales / modulares, por lo que su implementación se ha generalizado en esas herramientas de cálculos. El motivo es que las especificaciones de diseño las restricciones de operación y las corrientes de ruptura se resuelven simultáneamente con el problema de optimización. Su gran ventaja es, por lo tanto, que converge rápidamente con una relativamente baja necesidad de cálculo, al no requerir evaluar un gran número de funciones.[9,21]

SNOPT es paquete de simulación desarrollado por Philip Gill, Walter Murray y Michael Saunders, para resolver problemas de optimización de gran escala de programación lineal y no lineal, pero es especialmente más eficaz en la resolución de problemas de programación no lineal cuyas las funciones y gradientes son suaves de evaluar[21].

La herramienta SNOPT utiliza lo algoritmo SQP (programación cuadrática secuencial), donde las direcciones de búsqueda son obtenidas de los sub problemas de programación cuadrática que minimiza lo modelo cuadrática de la función lagrangiana sujetos a las restricciones linearizada. La función de los méritos de la función de Lagrange aumentada es reducida al largo de cada dirección de búsqueda para asegurar la convergencia de cualquier punto inicial. Lo problema a ser evaluado y resultado pelo SNOPT tiene la forma de un problema programación no lineal (NLP) dado pela ecuación (6.1)

Formulación general

Aplicando las condiciones de KKT (Karush-Kuhn-Tucker) para el problema de programación no lineal:

$$\begin{aligned} \min f(x) & \quad (6.1) \\ x \in R^n & \end{aligned}$$

Sujeto a

$$\begin{aligned} g_j(x) &\leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, m \\ g_j(x) &= 0, \quad j = 1, 2, \dots, p \end{aligned} \quad (6.2)$$

En que $f(x): R^n \rightarrow R$, $g(x): R^n \rightarrow R^{m_i}$ y $h(x): R^n \rightarrow R^{m_i}$

Donde:

- n – El número de variables;
- m_d – El número de restricciones de desigualdad y;
- m_i – El número de restricciones de igualdad

Función Lagrangeana

Con el uso de la función Lagrange tenemos:

$$L(x, \lambda, \pi) = f(x) - \lambda^T \cdot h(x) - \pi^T \quad (6.3)$$

Llegando se al siguiente conjunto de ecuaciones:

$$L(x, \lambda, \pi) = \nabla f(x) + \lambda^T \cdot \nabla h(x) + \pi^T \nabla g(x) = 0 \quad (6.4)$$

$$h(x) = 0$$

$$g_j(x) = 0, j \in \{restricciones\ activas\} \quad (6.5)$$

$$\pi_i(x) = 0, i \in \{restricciones\ inactivas\}$$

En que λ y π son los vectores de los multiplicadores lagrange asociados a las restricciones de igualdad y desigualdad respectivamente:

Ecuación Interactiva

Usando las condiciones de optimalidad de primera orden tenemos que:

$$\nabla L(x, \lambda, \pi) = 0 \quad (6.6)$$

Y aplicando lo método de newton (en la interacción k) tenemos que:

$$\nabla^2 L(x^k \lambda^k \pi^k) \begin{pmatrix} \Delta x^k \\ \Delta \lambda^k \\ \Delta \pi^k \end{pmatrix} = -\nabla L(x^k \lambda^k \pi^k) \quad (6.6)$$

En que $\Delta x^k, \Delta \lambda^k, \Delta \pi^k$ contienen la dirección de búsqueda de newton.

- Lo sistema lineal tiene la forma:

$$\begin{pmatrix} \nabla_{xx}^2 L(x^k \lambda^k \pi^k) & -\nabla h(x^k)^T & -\nabla h(x^k)^T \\ -\nabla h(x^k)^T & 0 & 0 \\ -\nabla g(x^k)^T & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta x^k \\ \Delta \lambda^k \\ \Delta \pi^k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\nabla_x L(x^k \lambda^k \pi^k) \\ h(x^k) \\ g(x^k) \end{pmatrix} \quad (6.7)$$

Lo sistema representa las condiciones de optimalidad de primera orden para lo problema:

$$\min_{x \in R^n} \frac{1}{2} d^T \left(\nabla_{xx}^2 L(x^k \lambda^k \pi^k) \right) d + d^T \left(\nabla_x L(x^k \lambda^k \pi^k) \right) \quad (6.8)$$

Sujeto a

$$(\nabla g(x^k))^T d + g(x^k) \geq 0 \quad (6.9)$$

$$(\nabla h(x^k))^T d + h(x^k) = 0$$

En que $d = \Delta x$ y los multiplicadores de lagrange son $\Delta \lambda$ y $\Delta \pi$.

Globalización

Unas de las posibles técnicas de globalización consiste no uso de una función de mérito:

$$M(x) = f(x) + \rho h(x)^T h(x) + \rho g^-(x)^T g^-(x) \quad (6.10)$$

$$M(x) = f(x) + \rho \sum_{i=1}^{m_i} h_i(x)^2 + \rho \sum_{i=1}^{m_d} g_i(x) \quad (6.11)$$

Donde $c^- = \min\{0, c\}$ y ρ es un parámetro calculado de manera que la dirección de búsqueda sea de reducción para la dirección de mérito ($d^T \nabla M < 0$).

Búsqueda unidimensional

$$\begin{cases} x^{k+1} = x^k + \alpha^k \Delta x^k \\ \lambda^{k+1} = \lambda^k + \Delta \lambda^k \\ \pi^{k+1} = \pi^k + \Delta \pi^k \end{cases} \quad (6.12)$$

α^k - Es lo mayor valor da secuencia $\left\{1, \frac{1}{2}, \frac{1}{4}, \frac{1}{8}, \dots\right\}$ que satisfaga la condición de Armijo (disminución significativa).

$$M(x^{k+1}) \leq M(x^k) + \mu \alpha^k \nabla M(x^k)^T \Delta x^k \quad (6.13)$$

Posibles criterios de parada

- Admisibilidad :

$$\|h(x^k) +\|_2 \leq \epsilon_1 \quad (6.14)$$

$$h(x^k) \geq -\epsilon_2$$

- Complementariedad :

$$|\pi_i^k g_i(x^k)| \leq \epsilon_3 \quad i = 1, \dots, m_d \quad (6.15)$$

- Estacionario :

$$\|h(x^k) +\|_2 \leq \epsilon_4 \quad (6.16)$$

6.2 Modelado de optimización y evaluación económica de la estación de regulación y medida ERM

Así como fue comentado en el marco del trabajo en un problema de optimización dinámica parte de las restricciones vienen dadas por ecuaciones diferenciales y se puede expresar de la forma:

$$\min_x f(x, y) \text{ o } \text{Max } f(x, y) \quad (6.17)$$

$$\frac{dy}{dx} = f(x, y) \quad (6.18)$$

$$g_j = (x) \leq 0$$

$$h_i = (y) \leq 0$$

Donde la función objetivo $f(x, y)$ está sujeta a un cierto número de restricciones, expresadas en forma de desigualdad $g_i(x, y)$, o igualdad $h_i(x, y)$. El

problema de optimización de la estación de regulación y medida tratase de un problema no lineal sujeto a restricciones de desigualdad $g_i = (x, y) \leq 0$.

La metodología de resolución del problema optimización de la ERM, fue basado en un método directo que buscan una solución aproximada mediante método de cálculo numérico (SPQ), que se traduce en la resolución de un problema de programación no lineal, ver figura 18, abordado por [8] y [11,12], que permite resolver el problema de forma iterativa, alternando un paso de simulación, donde se integran numéricamente las restricciones dinámicas (*ODEs y/o DAEs*) del modelo, con un paso de optimización, donde el optimizador u propone nuevos valores para las variables de decisión teniendo en cuenta los resultados (valor de la función de coste y restricciones) de la simulación.

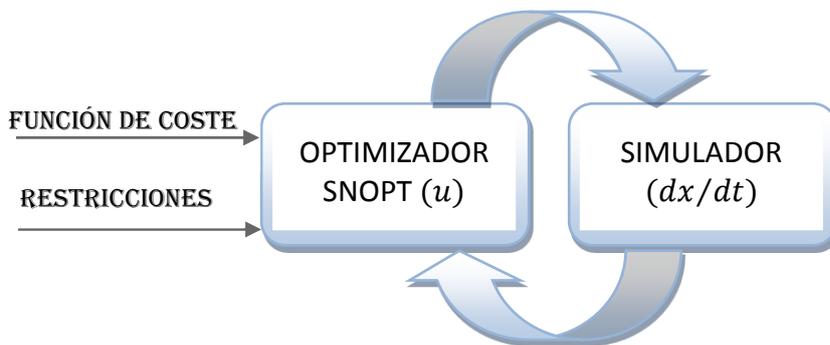


Figura 18 - Esquema de resolución de un problema de optimización de procesos.

Además para resolver el problema de optimización planteado en esa sección se utilizó el algoritmo de optimización SNOPT adecuado para resolver problemas de programación cuadrática secuencial – SQP, a gran escala. Es importante comentar que el modelado, simulación y la optimización fueron desarrollados en EcosimPro®.

A seguir los pasos desarrollados para la optimización de la estación de regulación y medida (ERM):

- Estimación del área de transferencia de calor del intercambiador carcasa y tubos basado en el calor requerido al proceso de calentamiento del gas, además de especificaciones tales como variables de diseño ($d_{tub}, n_{tub}, L_{tub}, d_{car}$) y condiciones de contorno;
- Optimización del coste anual de operación de los intercambiadores de calor basados en la pérdida de presión causadas por la fricción en los tubos y en la carcasa;

- Optimización económica de la caldera basadas en la minimización de los costes de consumo de combustibles y inversión del equipo;
- 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, afín de minimizar los costes requeridos de inversión de la bomba hidráulica y el compresor además de los costes de procesos ;
- 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 (capital de inversiones, costes de operación y coste energéticos) y que cumpla toda las restricciones .

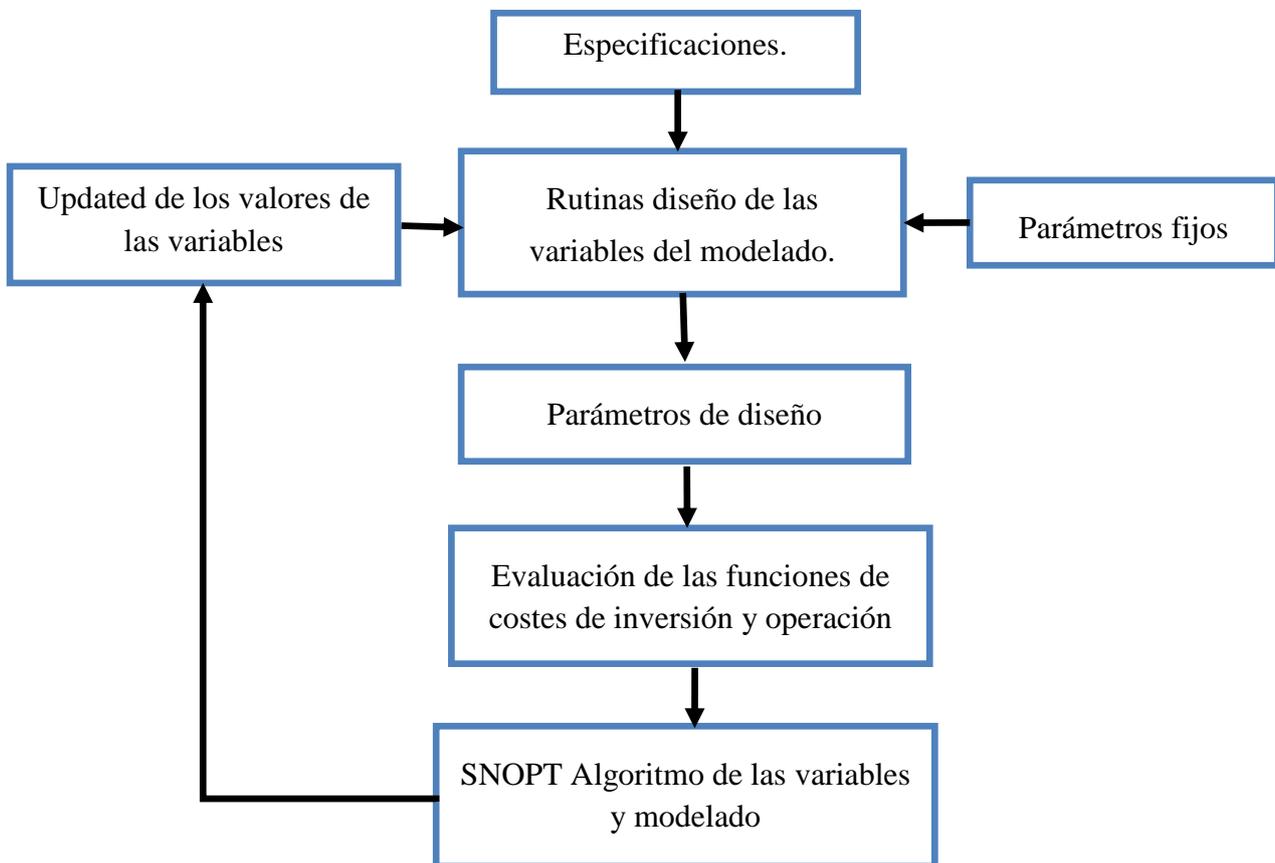


Figura 19 - Algoritmo de lo método de optimización de la ERM .

6.3 Optimización diseño 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 (6.20).

$$C_{iic} = a_1 + a_2 S^{a_3} \quad (6.19)$$

Siendo, $a_1 = 7000$, $a_2 = 360$ y $a_3 = 0.80$, coeficientes para intercambiadores de calor hecho de acero carbono (carcasa y tubos).

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

$$J = \min_{\{d_{tub}, n_{tubos}, L_{tubos}\}} \sum_{i=1}^n (a_1 + a_2 S^{a_3}) \quad (6.20)$$

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

$$\begin{aligned} 0.025 &\leq d_{tub} \leq 0.05 \\ 710 &\leq n_{tubos} \leq 810 \\ 7.0 &\leq L_{tubos} \leq 12.0 \end{aligned} \quad (6.21)$$

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 y presión, o sea la variable a controlar (temperatura de salida) del regulador PI_1 :

$$267.5 \leq T_{in} - \frac{(P_{in} - P_{out})}{100000} \cdot 0,5 \leq 268.5 \quad (6.22)$$

- Diferencia media logarítmica de temperatura para lo Intercambiador Carcasa y tubos:

$$30 \leq \frac{(T_{lin} - T_{gout}) - (T_{lout} - T_{gin})}{\ln\left(\frac{(T_{lin} - T_{gout})}{(T_{lout} - T_{gin})}\right)} \leq 50 \quad (6.23)$$

6.3.1 Resultado de la optimización Intercambiador de Calor carcasa y tubos

- Experimento realizado sobre el esquemático de la figura 22 , compuesta por tres red de gas sencillas y 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 ($P_0 - 125 \text{ Nm}^3/\text{s}$, $P_1- 150 \text{ Nm}^3/\text{s}$ y $P_2- 170 \text{ Nm}^3/\text{s}$) para cada red de la figura 22, lo objetivo es encuentra un valor de diseño óptimo (variables de decisión) para los intercambiadores de calor basado en la minimización de la función de coste de inversión y cumpla las restricciones de proceso para cualquier valor de caudal de alimentación entre los intervalos de $125 \text{ Nm}^3/\text{s}$ a $170 \text{ Nm}^3/\text{s}$;
- Inicialización de las variables de decisión con $d_{\text{tub}} = 0,030 \text{ m}$, $N_{\text{tub}} = 780$ $L_{\text{tub}} = 10\text{m}$;
- Numero de variables de la simulación : 4697
- Numero de ecuación del modelo: 2919
- Numero de variables de contorno: 93

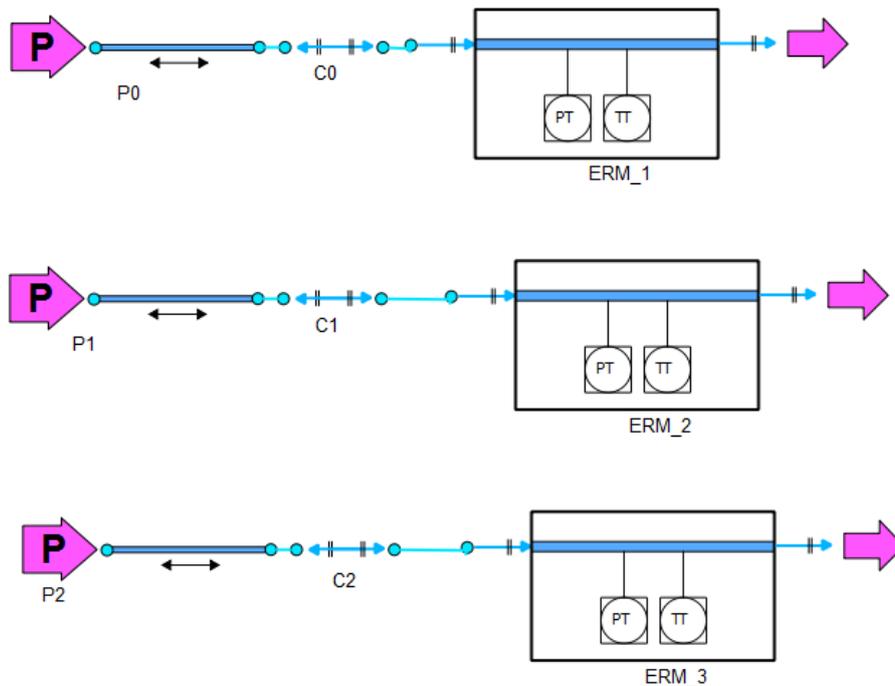


Figura 20 – Tres ERM independientes conectadas a una tubería inicial a la entrada con fuente de presión;

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

La tabla 6, a presenta los resultados óptimos para las variables de decisión encontrados a través de SNOPT, para lo diseño de los intercambiadores de calor

Tabla 5 – Resultados de la optimización (variables de decisión y restricciones de proceso)

| Variables de decisión | X_{low} | X₀ | X_{up} |
|---|------------------------|---|-----------------------|
| var_dec[1] d_{tub} (m) | 0,025 | 0,0310 | 0,05 |
| var_dec[2] n_{tub} (adim) | 710 | 753,8280 | 800 |
| var_dec[3] L_{tub} (m) | 7.0 | 8,1290 | 12.0 |
| Función objetivo y restricciones | F_{low} | Función objetivo y restricciones | F_{up} |
| F_optim[1] (€) | 1e-06 | 296757,3190 | 1e+06 |
| F_optim[2] (K) | 267.5 | 268,1700 | 268.5 |
| F_optim[3] (K) | 267.5 | 268,4370 | 268.5 |
| F_optim[4] (K) | 267.5 | 268,1630 | 267.5 |
| F_optim[5] (°C) | 30.0 | 32,3260 | 50.0 |
| F_optim[6] (°C) | 30.0 | 36,7945 | 50.0 |
| F_optim[7] (°C) | 30.0 | 40,0431 | 50.0 |

- Tempo de simulación: 180 segundos
- Tempo total de la optimización: 14222,4 seg (3,95 horas)
- Número de llamadas de la función objetivo 32 OK y 0 NOK
- Número máximo de interacción: 200
- Número de la interacción optima : 7^a (12^a llamada de la función objetivo)

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), afín de observar lo correcto funcionamiento de los intercambiadores con los valores óptimos de diseño.

La figura 22, a presenta el Setpoint con cambios en rampa de caudal normalizado de gas a la salida de la ERM.

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

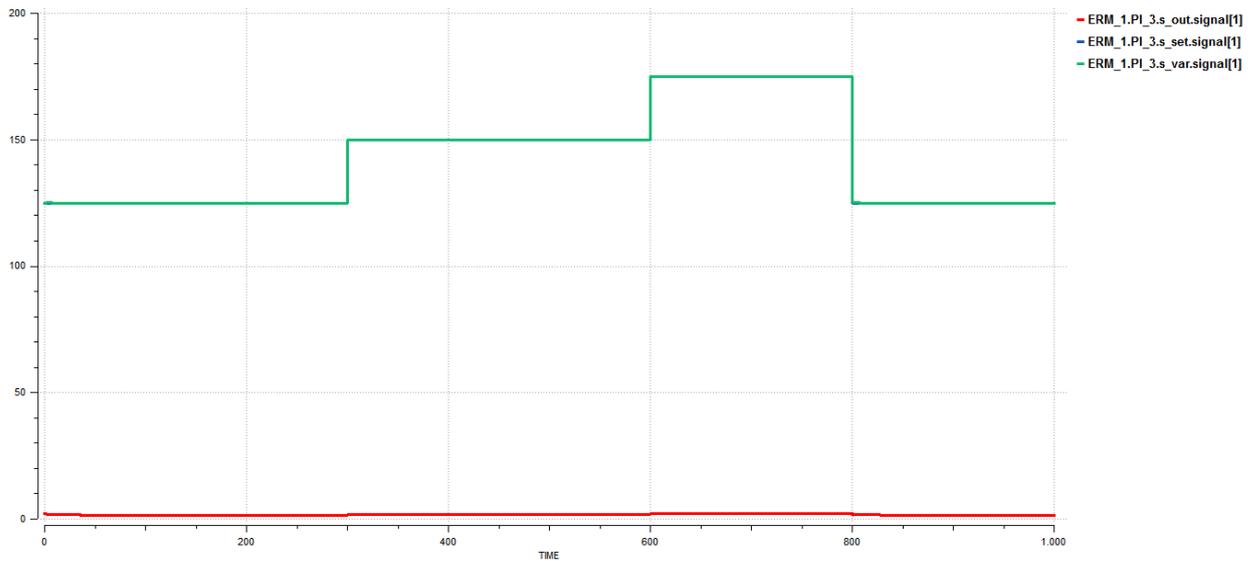


Figura 21 - Referencias del controlador de caudal a salida de la ERM.

En la figura 13, 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.

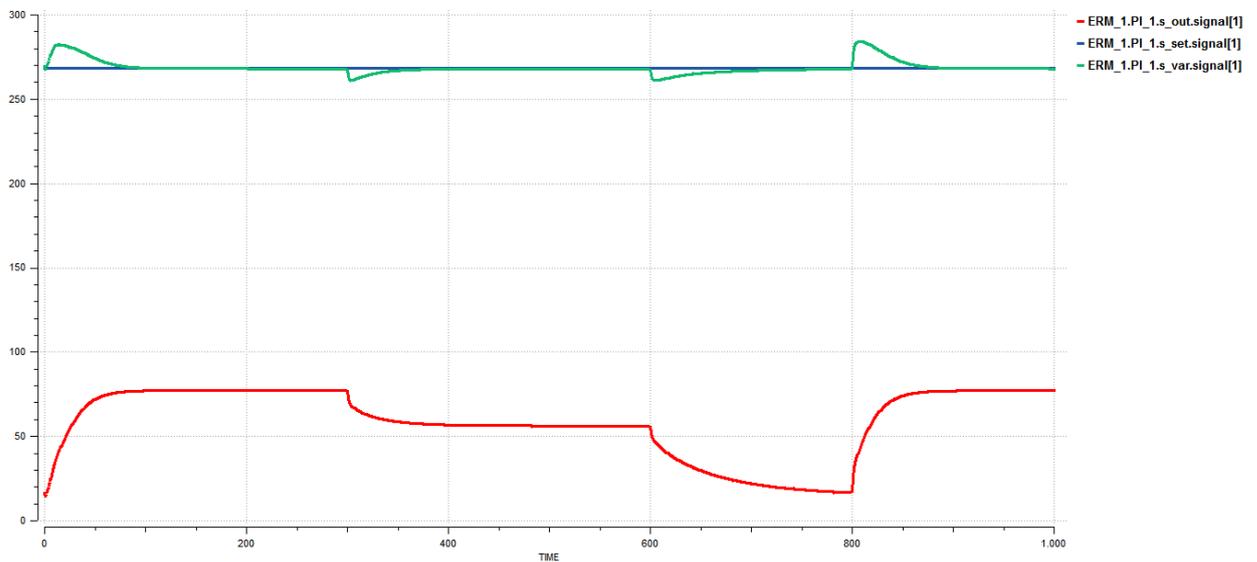


Figura 22- Referencias del controlador temperatura de gas a la salida ERM

6.4 Optimización de la operación ERM

La optimización de la operación de la estación de regulación y medida es función de lo coste anual de operación y el coste operativo total con tasa de interés fraccional por año fijada en un 10% y tiempo de vida útil del equipo se establecido como 10 años. 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 ver ecuación 6.25.

$$J = \min_{\{W_{lout}, P_{in}, T_{out_{gc}}, T_{inicial_{liq}}, PI_{2.set_signal}[1]\}} \sum_{i=1}^n (\beta_1 C_0 + C_{iB} + \beta_2 C_{ic} + \beta_3 C_{comb} + C_{icomp}) \quad (6.24)$$

Sujeto a.: Variables de decisión del problema de optimización

$$\begin{aligned} 50 &\leq W_{lout} \leq 100 \\ 69 &\leq P_{in} \leq 76 \\ 450 &\leq T_{out_{gc}} \leq 650 \\ 80 &\leq T_{inicial_{liq}} \leq 95 \\ 85 &\leq PI_{2.set_signal}[1] \leq 90 \end{aligned} \quad (6.25)$$

Restricciones de Proceso:

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

$$267.5 \leq T_{in} - \frac{(P_{in} - P_{out})}{100000} \cdot 0,5 \leq 268.5 \quad (6.26)$$

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

$$70 \leq W_{lin} = W_{out} \leq 100 \quad (6.27)$$

- Flujo Volumétrico de salida del gas en el reductor.

$$1,0 \leq \frac{y_{valve} \cdot C_v \cdot N_g \cdot F_p \left(\frac{P_{gin}}{100000} \right) Y_f}{\sqrt{\frac{(PM/1000) T_{gin} \cdot Z_{in}}{x_p}}} \leq 2,0 \quad (6.29)$$

6.4.1 Planteamiento de la optimización de operación de los intercambiadores de calor

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 (6.30):

$$C_0 = P \cdot C_e \cdot H \quad (6.30)$$

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

$$C_{oD} = \sum_{k=1}^{ny} \frac{C_0}{(1+i)^k} \quad (3.31)$$

Donde:

- C_0 – El costo anual de operación (€/years);
- C_e – El costo de la energía (€/kWh) ;
- C_{oD} – El costo total de operación con descuento (€);

“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.

6.4.2 Planteamiento de la optimización bomba hidráulica

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 6– 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 |

$$C_{TB} = C_{iB} + C_0 \quad (6.32)$$

Siendo:

$$C_{TB}(\text{€}, 2014) = C_1 \cdot \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{exp} \cdot \frac{M\&S(2014)}{M\&S(1970)} \cdot \frac{0,911296 \text{ €}}{1 \$} + P_2 \cdot C_e \cdot H \quad (6.33)$$

- C_{iB} – Coste de inversión (€) ;
- C_0 – Coste de operación relacionados al bombeo (€/years);
- C_1 – Coste de la bomba de referencia , tabla anterior (\$);
- P_2 – Potencia de la bomba a instalar(W) ;
- P_1 – Potencia de la bomba de referencia , tabla anterior (W) ;
- exp – (vacío = 0,41; embolo = 0,60 ; centrífugas = 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 .

Siendo:

$$M\&S(1970) = 303,3 \text{ y } M\&S(2014) = 1.521,0 - [16].$$

6.4.3 Planteamiento de la optimización caldera a gas natural

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 (6.33).

$$C_{Tc} = C_{ic} + C_{comb} \quad (6.34)$$

La ecuación (6.34), para el 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.

$$C_{ic} = C_1 \cdot \left(\frac{Q_2}{Q_1}\right)^b \quad (6.35)$$

- C_{ic} – Coste de la inversión (€)
- C_1 – Coste del equipo conocido (€)
- Q_1 – Potencia de la caldera conicida (€)

- Q_2 – Potencia de la caldera deseada (€)
- b – Exponente de Willians para superficie de calefacción

Siendo:

$$C_{comb} = \dot{m}_{(gas_natural)} * C_{p(gas_natural)} * \Delta T * C_{gas} * H \quad (6.36)$$

- $\dot{m}_{(gas_natural)}$ - Flujo másico del gas que se quema en la caldera (kg/s);
- $C_{p(gas_natural)}$ – Poder Calorífico inferior de la mezcla de gases (kJ/kg K);
- ΔT – La diferencia de temperatura del gas de combustión en la entrada y salida de la caldera (K).

Además lo costo del kWh de gas natural en la España para el año de 2015 es $C_{gas} = 0.055$ €/kWh [7] y considerando una carga de trabajo anual “H” de 7 000h/year igual lo determinado para los demás equipos de proceso.

6.4.3 Planteamiento de la optimización de los costes con compresión de gas

Se calcula el valor de los compresores teniendo en cuenta la potencia requerida, mediante la siguiente correlación, propuesta pelo método de Happel de coste del equipo:

$$H_p = 0,0044 \cdot P_1 \cdot Q \cdot \ln \frac{P_2}{P_1} \quad (6.37)$$

$$C_{icomp} (\text{€}, 2014) = 645 \cdot H_p^{0.8} \cdot \frac{M\&S(2014)}{M\&S(1970)} \cdot \frac{0,911296 \text{ €}}{1 \$} \quad (6.38)$$

H_p – Potencia del compresor (CV)

P_1 – Presión de entrada en (lb/in²)

P_2 – Presión de salida en (lb/in²)

Q – Flujo volumétrico de gas a la entrada (ft³/min)

6.5 Resultado de la optimización de la operación ERM.

Para probar lo planteamiento desarrollado en la sección anterior optimización de la operación de la estación de regulación y medida se ha hecho un experimento sobre el esquemático de la figura 24, compuesta por dos ERM conectadas a tramos de tuberías intermediarias bidireccionales con una longitud de 10.000 m y diámetro 1,25m y un tramo de tubería inicial bidireccional con fuente de presión y con una longitud de 12.000 m y diámetro 1,00m

Las variables de entrada en el modelo (experimento) son : la presión de entrada (P_{in}) y de salida (P_{out}) de la red de gas natural respectivamente en los valores de 72 bar y 68 bar, temperatura a la entrada (T_{in}) 286,45 K y composición de gas natural en la entrada de la red (y_{In}) [0.033, 0.0558, 0.025, 0.82, 0.05, 0.005, 0.0001, 0.0001, 0.001, 0.001, 0.001,0.008] y el caudal normalizado de 125 Nm³/s, 150 Nm³/s y 170 Nm³/s;

- Numero de variables: 4073
- Numero de ecuación: 2639
- Numero de variables de contorno: 48

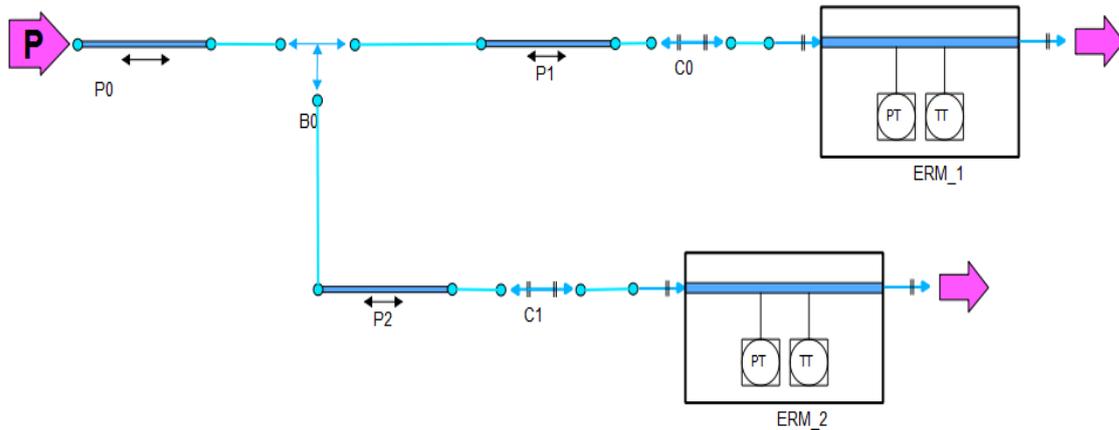


Figura 23 – Esquemático para optimización de la operación ERM de dos ERM conectadas a tramos de tuberías intermedias, con una fuente de presión inicial.

Los valores de inicialización de las variables de decisión son:

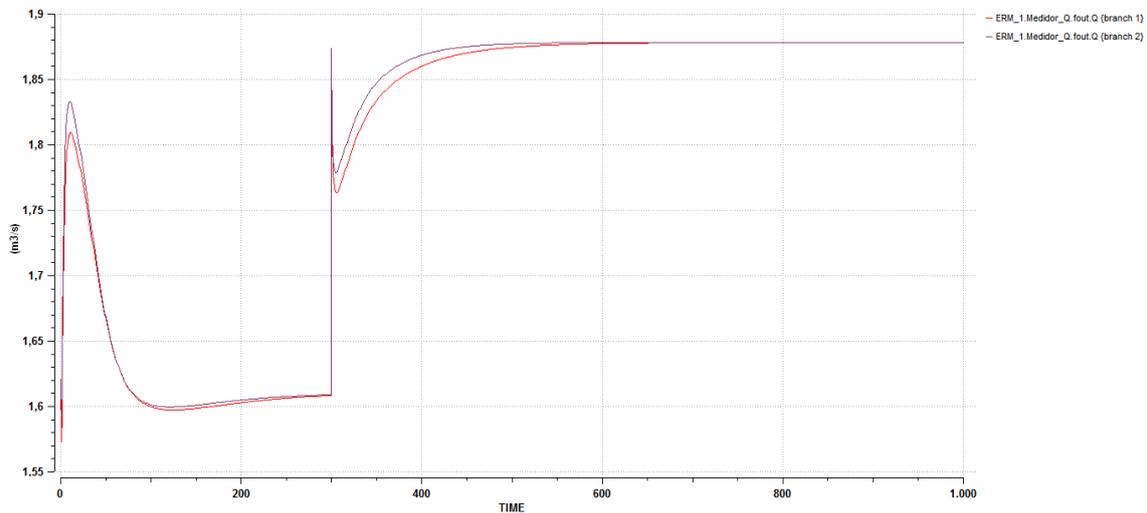
- $Pump.W_{lin} = 90 \text{ Kg/s}$, para la ERM_1 y ERM_2,
- $P_{gin} = 72 \text{ Bar}$
- $T_{gc} = 573 \text{ K}$ para la ERM_1 y ERM_2,
- $T_{liq} = 90 \text{ }^\circ\text{C}$ para la ERM_1 y ERM_2 y,
- $PI_1.set_signal [1]$ y $PI_2.set_signal [1] = 90 \text{ }^\circ\text{C}$

La tabla 9, a presenta los resultados óptimos de operación encontrados SNOPT, de las variables de decisión para las tres alimentación de caudal normalizado en la entrada de la red de gas (125 Nm³/s, 150 Nm³/s, 170 Nm³/s) .

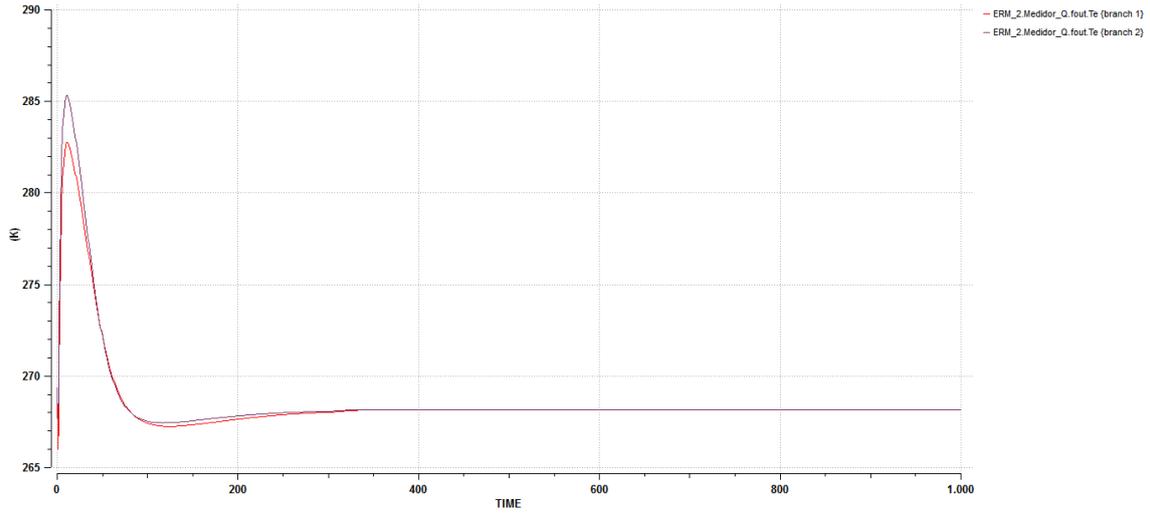
Tabla 7 – Resultados óptimos de la operación para las variables de decisión (125 Nm³/s, 150 Nm³/s, 170 Nm³/s)

| | 125 | 150N | 170 |
|-------------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Resultados | Nm³/s | Nm³/s | Nm³/s |
| <i>ERM_1.Pump.W</i> | 89.20 | 88.91 | 90.10 |
| <i>P_{in}</i> | 71.3 e5 | 71.4e5 | 71.7 e5 |
| <i>ERM_1.Tout_{gc}</i> | 568.60 | 570.0 | 571.1 |
| <i>ERM_1.Tinicial_{liq}</i> | 87.20 | 89.51 | 89.0 |
| <i>ERM_1.PI_2.set</i> | 87.31 | 87.42 | 88.74 |
| <i>ERM_2.Pump.W</i> | 90.00 | 89.15 | 89.61 |
| <i>ERM_2.Tout_{gc}</i> | 564.72 | 569.23 | 572.23 |
| <i>ERM_2.Tinicial_{liq}</i> | 88.0 | 89.00 | 88.50 |
| <i>ERM_2.PI_2.set</i> | 89.50 | 90.173 | 91.07 |

Las gráficas 10, 11 y 12 muestran las variables de restricción del proceso, descritas por las ecuaciones 6.27, 6.28 y 6.29 es importante resaltar que son restricciones de desigualdad y que todas son cumplidas para el rango de caudal de 125 Nm³/s a 170 Nm³/s

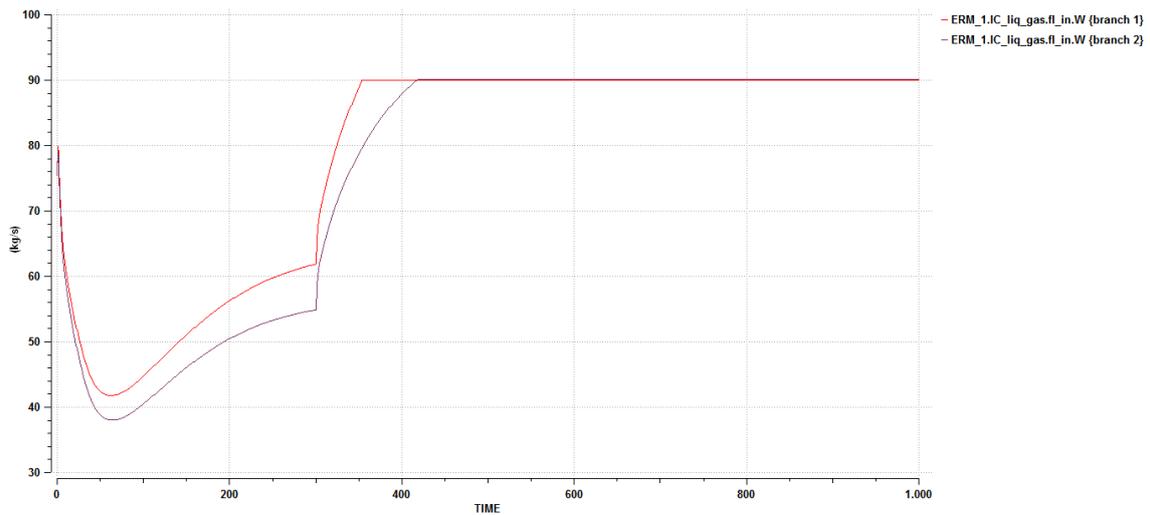


Gráfica 10 - Flujo Volumétrico de salida del gas en el reductor, Con la línea roja variable en el valor de proyecto y línea negra variable en el punto óptimo de operación.



Gráfica 11 - Temperatura de salida en el medidor de caudal (salida de la ERM).

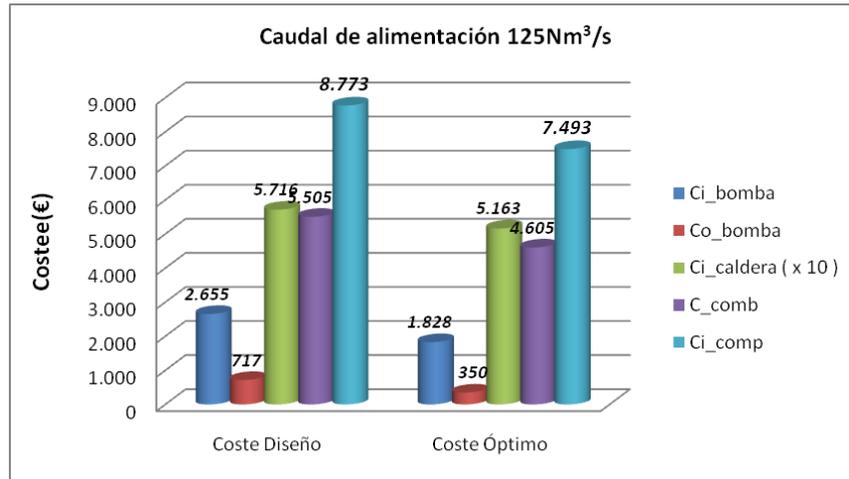
Línea roja variable de proyecto (diseño) línea negra la variable en el punto óptimo de operación.



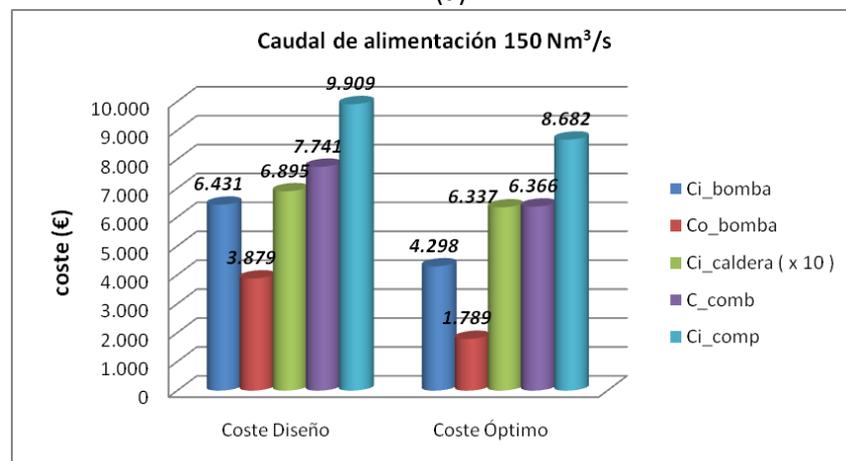
Gráfica 12 – • Caudal de la agua que circula en el intercambiador de calor de calor carcasa y tubos.

Línea roja variable de proyecto (diseño) y línea negra la variable en el punto óptimo de operación.

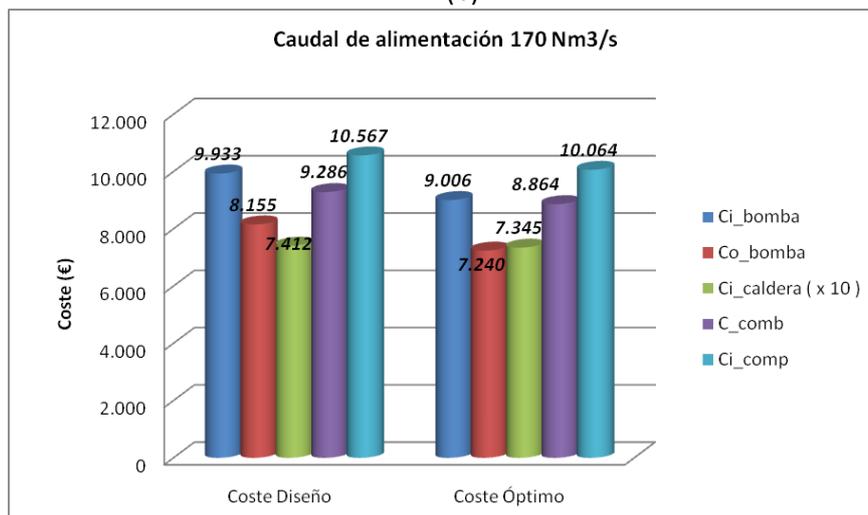
La grafica 10, presenta los costes de operación de las ERM haciendo una comparación entres los valores de proyecto (diseño) y los valores optimizados.



(a)



(b)



(c)

Gráfica 13 - Comparaciones de los costes de operación (diseño y óptimo) de la ERM: (a) caudal de alimentación 125Nm³/s; (B) caudal de alimentación 150 Nm³/s; (c) Caudal de alimentación 170 Nm³/s

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

La tabla 10, presenta los la función objetivo después de la optimización para los caudal normalizado 125 Nm³/s, 150 Nm³/s, 170 Nm³/s

Tabla 8 - Beneficio económico de la función objetivo.

| Caudal de alimentación Nm³/s | Coste inicial / diseño (€) | Coste óptimo de operación (€) | Porcentaje de ahorro económico (%) |
|--|---------------------------------------|--|---|
| 125 | 19.719,50 | 13.794,54 | 30,05 |
| 150 | 56.598,60 | 32.142,29 | 43,21 |
| 170 | 103.718,61 | 93.094,76 | 10,24 |

7. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Uno de los más importantes enfoques en cualquier proceso productivo son las tomas de decisiones con respecto a la reducción de costes (inversión y operación) y la maximización de la producción sin que haya pérdida de la calidad del producto o del proceso. En este 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. Se utilizó como algoritmo para resolución del problema de optimización la herramienta SNOPT implementada en EcosimPro®. El problema de optimización de la ERM se ha planteado en dos etapas la primera basada en la reducción del área del intercambiador de calor tomando como variables de decisión parámetros de diseño (diámetro de los tubos, longitud de los tubos y la cantidad de tubos) la segunda etapa basada en la reducción de coste de operación teniendo se en cuenta los costes de energía eléctrica con bombeo del agua en el circuito de la ERM, reducción de los coste de combustible de la caldera y coste de compresión de aire en la entrada de la ERM.

En relación a la eficiencia de la herramienta SNOPT (SQP) se puede comprobar que converge rápidamente al óptimo del problema siendo el número de iteraciones en todos los casos menor de 20, economizando así tiempo de CPU

El diseño óptimo del intercambiador de calor ha sido realizado para un rango de caudales específicos (125 Nm³/s-170 Nm³/s). De este modo se ha diseñado un solo intercambiador de calor que será óptimo siempre y cuando la red opere dentro de dicho rango y así se evita la necesidad de usar distintos equipos en función de las condiciones de operación. Además partir de los datos obtenidos con la simulación y consecuentemente la optimización se ha llegado a la conclusión que la metodología desarrollada para optimizar el proceso de las ERM se ha hecho eficiente (elección de las funciones objetivo, variables de decisión, restricciones y algoritmo de optimización), puesto que se obtuvo beneficio económico con la minimización de los coste de las funciones objetivos en todo los experimentos, alcanzando valores **de ahorro económico de 30,05% 40,31% y 10,24%** para los caudales 125 Nm³/s, 150 Nm³/s, 170 Nm³/s respectivamente.

En cuanto a trabajo futuro es válido destacar a posibilidad de aplicar esta metodología en problemas con reales del proceso de las estaciones de regulación y medida, visto que una simulación previa del proceso ayuda a determinar las condiciones óptimas de operación de un proceso.

8. CONTRIBUCIONES REALIZADAS

Se ha realizado un artículo “**Operación óptima en Ecosimpro® de estaciones de regulación y medida de la red de gas natural**” Enviado para evaluación en XXXVI Jornadas Nacionales de Automatica. Bilbao 2015.

9. 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, Jul. 2004.
- [12] Begonia V. “Programación Matemática: Modelos de Optimización”. Facultad CC. Matemáticas, Universidad Complutense, 2010. Madrid
- [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
- [17] Guo B., Ghalambor A. (2005) .“*Natural Gas Engineering Handbook*”, Second Edition
- [18] *Gas natural (metano) el combustible fósil que menos CO₂* .Disponible en la internet. <http://www.greenpeace.org/>
- [19] Ruiz Canales, A. Departamento de Ingeniería. Escuela Politécnica Superior de Orihuela. Universidad Miguel Hernández (Alicante)..
- [20] “*Masonilan Control Valve Sizing Handbook*”. ISA-75.01.01-2007 (60534-2-1 Mod). Disponible na internt. <http://www.engr.sjsu.edu/>
- [21] Philip E. Gill, Walter Murray, Michael A. Saunders. SNOPT: An SQP Algorithm for Large-Scale Constrained Optimization.
- [22] Donald W. Schroeder, Jr. *A tutorial on pipe flow equations*. Stoner Associates, Inc. Carlisle, Pennsylvania. August 16, 2001
- [23] García J. C. “Multi-objective optimization for the sustainability assessment of coal based electricity generation technologies”. Memoria de Tesis Doctoral. Santander, Julio 2013