

OPTIMIZACIÓN MULTI-OBJETIVO DE TURBINAS DE GAS TERMOSOLARES

SANCHEZ ORGAZ, Susana ⁽¹⁾; MEDINA DOMINGUEZ, Alejandro ⁽²⁾; CALVO HERNÁNDEZ, Antonio ⁽²⁾; CURTO-RISSO, Pedro ⁽³⁾; PEDEMONTE, Martín ⁽⁴⁾; EZZATTI, Pablo ⁽⁴⁾.

susan@usal.es

⁽¹⁾Universidad de Salamanca, ETSII de Béjar, Departamento de Ingeniería Mecánica.

⁽²⁾Universidad de Salamanca, Facultad de Físicas, Departamento de Física Aplicada.

⁽³⁾Universidad de la República, Montevideo, Instituto de Ingeniería Mecánica y Producción Industrial.

⁽⁴⁾Universidad de la República, Montevideo, Instituto de Computación.

RESUMEN

Las plantas de potencia basadas en turbinas de gas termosolares son previsiblemente plantas de generación eléctrica, limpias e interesantes desde el punto de vista comercial, pero aún es necesario un trabajo de I+D+i para aumentar su eficiencia y competitividad. El presente trabajo se centra en la investigación de plantas de generación eléctrica mediante conversión solar fototérmica y ciclo Brayton. El modelo incorpora las principales fuentes de irreversibilidad que afectan a una planta real, tanto las irreversibilidades externas que incluyen las pérdidas en los intercambiadores de calor a través de los que el sistema interacciona con la fuente caliente y el medio ambiente, como las irreversibilidades internas considerando el comportamiento no ideal de turbinas y compresores, las caídas de presión en los procesos de absorción y cesión de calor y las pérdidas en el regenerador. Se puede configurar con un número arbitrario de compresores y turbinas (simétrico o no) con los procesos de refrigeración y recalentamiento intermedios. El objetivo de este trabajo es realizar una optimización multi-objetivo (Frente de Pareto) del sistema, que se obtiene considerando las posibles fluctuaciones de todos los parámetros involucrados. La eficiencia global del sistema y la potencia de salida se consideran como funciones objetivo. Un algoritmo genético permite discernir las variables de diseño relevantes. A partir de aquí los frentes de Pareto se obtienen de modo exacto, considerando sólo esas variables relevantes, y la construcción de una malla apropiada. Se analizan varias configuraciones de planta (ideales y realistas, con una o varias etapas de compresión-expansión) y un procedimiento de toma de decisión multi-criterio, analizándose desde el punto de vista físico las conclusiones.

Palabras clave: colector solar-turbina de gas, optimización multiobjetivo, frente de Pareto

1. Introducción

Durante los últimos años, nuestro grupo de investigación ha desarrollado un modelo termodinámico analítico de plantas termosolares tipo Brayton, incluyendo regeneración y la posibilidad de varias etapas de compresión y expansión [1,2]. En el modelo se considera que la energía de entrada proviene de un campo de colectores solares en los que se consideran pérdidas por transferencia de calor tanto por convección, como por conducción y radiación. El modelo ha sido validado previamente [3,4]. El objetivo de esta ponencia es desarrollar una optimización multi-objetivo teniendo en cuenta que el modelo incorpora las principales fuentes de irreversibilidad que afectan a una planta real, tanto las irreversibilidades externas que incluyen las pérdidas en los intercambiadores de calor a través de los que el sistema interactúa con la fuente caliente y el medio ambiente, como las irreversibilidades internas considerando el comportamiento no ideal de turbinas y compresores, las caídas de presión inevitables en los procesos de absorción y cesión de calor, las pérdidas en el regenerador y la transferencia de calor directa, a través de la propia planta, desde la fuente caliente a la fría. Se puede configurar con un número arbitrario de compresores y turbinas (simétrico o no) con los correspondientes procesos de refrigeración y recalentamiento intermedios. La figura 1 muestra un esquema del funcionamiento de la planta considerada. Detalles del modelo desarrollado previamente pueden encontrarse en [5,6].

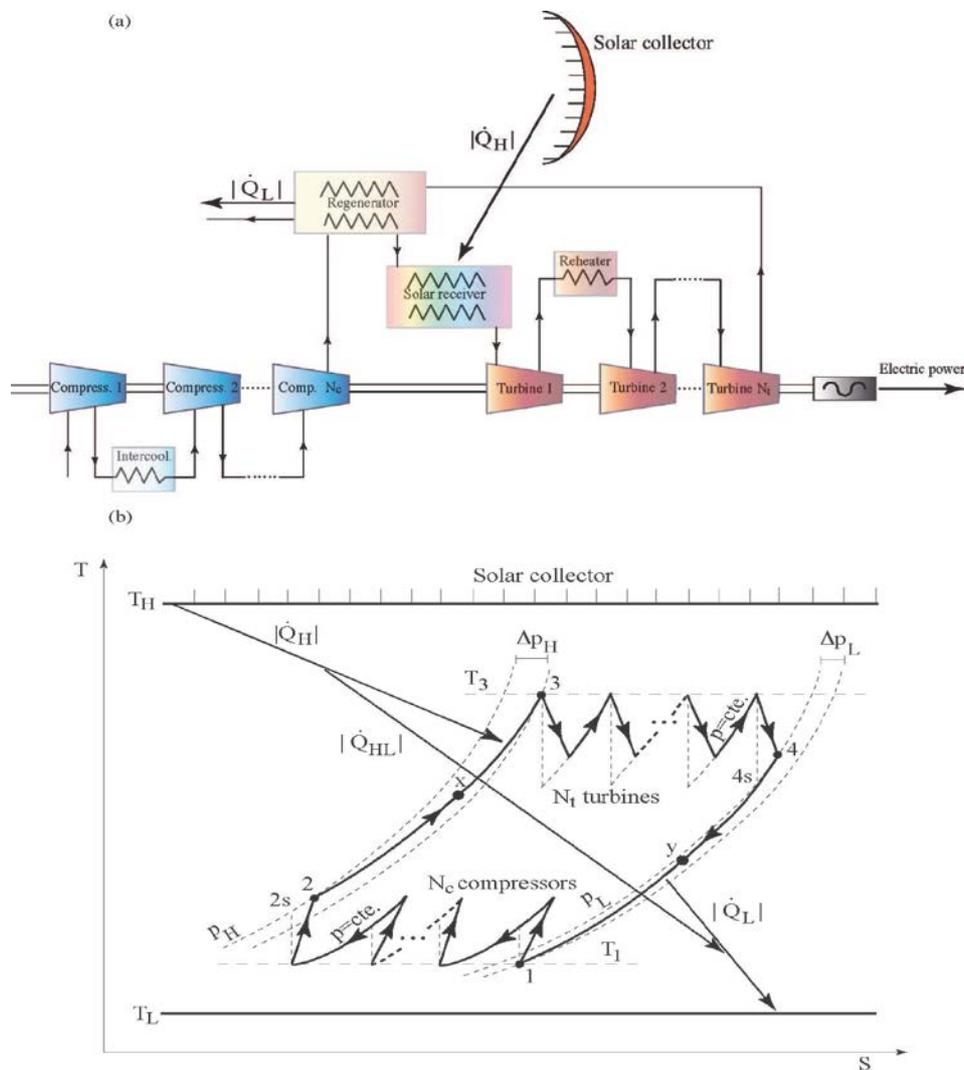


Fig. 1. Esquema del modelo de turbina multietapa regenerativa termosolar.

A continuación resumimos los parámetros básicos del sistema combinado colector solar-turbina de gas que aparecen en la modelización desarrollada:

- Parámetros para la turbina multietapa

- Eficiencia de las turbinas, ε_t
- Eficiencia de los compresores, ε_c
- Coeficiente de pérdidas de presión por la absorción de calor, ρ_H
- Coeficiente de pérdidas de presión por la cesión de calor, ρ_L
- Eficiencia del intercambiador en la parte fría, ε_L
- Eficiencia del intercambiador en la parte caliente, ε_H
- Eficiencia del regenerador, ε_r
- Coeficiente de *heat-leak*, ξ
- Coeficiente adiabático del fluido de trabajo, γ

- Parámetros para el colector solar

- Eficiencia óptica, η_0
- Coeficiente de pérdidas por radiación, M_1
- Coeficiente de pérdidas por convección/conducción, M_2
- Temperatura ambiente, T_L

2. Optimización multi-objetivo

La optimización multi-parámétrica multi-objetivo es una técnica que permite encontrar las configuraciones óptimas de sistemas, como el nuestro, que tienen muchas variables y diversas posibles funciones objetivo a optimizar. Con la técnica multi-objetivo se pueden utilizar algoritmos de tipo evolutivo o pseudo-aleatorio para encontrar las configuraciones óptimas que dependen de un amplio número de variables y satisfacen un conjunto de objetivos impuestos, que incluso pueden ser contradictorios entre sí. El conjunto de soluciones óptimas se encuentran dentro de la denominada frontera de Pareto, que representa el entorno en el cual un conjunto de posibles configuraciones dan lugar a un aceptable compromiso entre los objetivos marcados. En el tipo de sistemas como el considerado aquí, las variables que dan lugar a diferentes configuraciones de planta son por ejemplo la relación de temperaturas y presiones, coeficientes de transferencia de calor, coeficientes que miden pérdidas de presión y eficiencias isoentrópicas de los componentes de la planta.

En este trabajo, se utilizará un algoritmo evolutivo clásico (MOEA) [7, 8] conocido como NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm, versión II)[9]. Un problema de optimización multiobjetivo, plantea la optimización (minimización o maximización) de un conjunto de funciones, habitualmente en conflicto entre sí. La existencia de múltiples funciones objetivo plantea una diferencia fundamental con un problema monoobjetivo: no existirá una única solución al problema, sino un conjunto de soluciones. Para resolver el anterior problema se deben definir algunos criterios con el fin de determinar qué soluciones queremos considerar de buena calidad y cuáles no, apareciendo así el término de solución dominada. Cuando se analizan la dominancia entre dos soluciones y se encuentra que no se cumple la condición de dominancia para ninguna de las dos soluciones, no se puede concluir acerca de la dominancia de una con respecto a otra. Cuando esto sucede, se dice que las soluciones son no-dominadas. De esta forma, si se tiene un conjunto finito de soluciones y se realiza una comparación de todos los pares posibles, al final se va a tener un conjunto de soluciones que son no dominadas entre sí y dicho conjunto tiene la propiedad de dominar al resto de soluciones que no pertenezcan a él, a este conjunto se le llama frente de Pareto.

Vamos a utilizar como hemos visto anteriormente, NSGA-II que es capaz de hacer una exploración inteligente del espacio de búsqueda en lugar de exhaustiva ya que con la discretización elegida el espacio de búsqueda tendría más de $4.31e^{13}$ puntos factibles. Los intervalos de valores posibles de cada parámetro los presentamos en la Tabla 1, son valores realistas y que se pueden encontrar en [2, 3, 5, 6, 10, 11, 12].

Tabla 1: Descripción de cada parámetro, el rango de valores posibles y la discretización utilizada.
Análisis experimental

DESCRIPCIÓN	RANGO	DISCRETIZACIÓN
- Parámetros para la turbina multietapa		
Numero de compresores	$1 \leq N_c \leq 5$	1
Número de turbinas	$1 \leq N_t \leq 5$	1
Coefficiente adiabático	$1.35 \leq \gamma \leq 1.40$	0.01
Relación de presiones	$5.00 \leq r_p \leq 20.00$	1
Relación de temperaturas	$2.00 \leq \tau \leq 4.40$	0.1
Efectividad del intercambiador en la parte caliente	$0.70 \leq \varepsilon_H \leq 1.00$	0.1
Efectividad del intercambiador en la parte fría	$0.70 \leq \varepsilon_L \leq 1.00$	0.1
Efectividad del regenerador	$0.00 \leq \varepsilon_r \leq 1.00$	0.1
Efectividad de los compresores	$0.90 \leq \varepsilon_c \leq 0.95$	0.01
Efectividad de las turbinas	$0.90 \leq \varepsilon_t \leq 0.95$	0.01
Coefficiente de pérdidas de presión por la absorción de calor	$0.90 \leq \rho_H \leq 0.98$	0.02
Coefficiente de pérdidas de presión por la cesión de calor	$0.90 \leq \rho_L \leq 0.98$	0.02
Coefficiente <i>heat-leak</i>	$0.02 \leq \xi \leq 0.30$	0.04
- Parámetros para el colector solar		
Coefficiente de pérdidas por radiación	$0.001 \leq M_1 \leq 0.003$	0.0001
Coefficiente de pérdidas por convección/conducción	$0.002 \leq M_2 \leq 0.010$	0.001
Eficiencia óptica	$0.70 \leq \eta_0 \leq 0.90$	0.1

En la Figura 2 está representado el Frente Pareto que se ha obtenido utilizando el método NSGA-II que tiene 121 soluciones no dominadas. Los extremos del Frente de Pareto son los puntos cuyos valores máximos y mínimo de la potencia⁽¹⁾ y rendimiento son respectivamente:

$$P = 1,0107 \text{ y } \eta = 0,4588$$

$$P = 2,1627 \text{ y } \eta = 0,3752.$$

En el análisis de la configuración óptima de Pareto, hemos encontrado que 13 de los 16 parámetros de nuestro modelo toman un valor fijo en todas las soluciones. Los parámetros que se obtienen son los etiquetados como I - conf. en la Tabla 2.

Si comparamos los valores de la columna I-conf de la Tabla 2 con los intervalos que les dimos a los parámetros en la Tabla 1, podemos ver que todos los parámetros asociados a las eficiencias y caídas de presión adquieren los valores más altos del intervalo. Los coeficientes de pérdidas adquieren los valores más bajos. En el caso del número de turbinas y compresores, N_c y N_t , alcanza el valor más alto que se ha tomado: $N_t = N_c \equiv N = 5$. Por lo tanto, las variables que realmente ofrecen diversas combinaciones en el Frente de Pareto son los parámetros de diseño r_p , γ , y τ . Dado que sólo los parámetros r_p , γ , y τ toman diferentes valores para las soluciones del Frente de Pareto obtenido, y

(1) La potencia se encuentra normalizadas por $P = P / C_w T_L$. [3]

con el fin de encontrar la mejor y más real aproximación posible al Frente de Pareto, implementamos un algoritmo exacto que enumera todas las soluciones posibles variando sistemáticamente los valores de los parámetros ρ_p , γ , y τ (manteniendo los mismos intervalos que en Tabla 1), y el resto de los parámetros se mantendrán fijos (estos valores los reflejamos en la Tabla 2 en la columna llamada I - conf.).

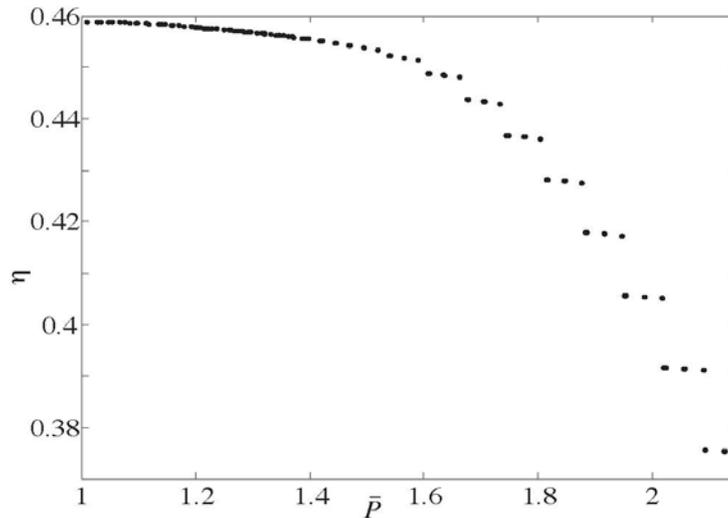


Figura. 2. Frente de Pareto usando el algoritmo NSGA-II.

En este caso, el espacio de búsqueda es relativamente pequeño (2.400 puntos factibles), las discretizaciones se redujeron un orden de magnitud con respecto a los de la Tabla 1, es decir, el pasos de 0,1 para ρ_p , 0.001 para γ , y 0,01 para τ , dando como resultado un espacio de búsqueda con más de $1.85e^6$ puntos.

Tabla 2: Configuraciones: I-conf. es la obtenida por medio del algoritmo NSGA-II. R-conf.: considera valores realistas, incluyendo regeneración. NRR-conf.: es el caso no regenerativo real.

Parámetros	I- conf.	R-conf.	NRR-conf.
ϵ_H	1.0	0.9	0.9
ϵ_L	1.0	1.0	1.0
ϵ_r	1.0	0.85	0.0
ϵ_c	0.95	0.84	0.84
ϵ_t	0.95	0.89	0.89
ρ_H	0.98	0.98	0.98
ρ_L	0.98	0.98	0.98
ξ	0.02	0.02	0.02
M_1	0.001	2.25×10^{-3}	2.25×10^{-3}
M_2	0.002	2.5×10^{-3}	2.5×10^{-3}
η_0	0.9	0.8	0.8

En la Figura 3 hemos representado los cálculos para tres valores diferentes de N ($N = 1, 2, \text{ y } 5$) y para los tres casos que hemos presentado en la Tabla 2, I-conf, NRR – conf, R- conf. En la Figura 3(a) podemos ver que estos frentes de Pareto son más densos que el anterior y están compuestos entre 7444 ($N = 2$) y 15.638 ($N = 5$) soluciones no dominadas. Los extremos del frente de Pareto para $N = 1$ son los puntos ($P = 0,5616, \eta = 0,3510$) y ($P = 0,9518, \eta = 0,2518$) y para el mayor número de etapas de compresión-expansión, $N = 5$, ($P = 1,0185, \eta = 0,4588$) (esta solución domina el extremo del primer frente de Pareto obtenido, Fig. 2), y ($P = 2,1627, \eta = 0,3752$). En la figura es evidente el aumento tanto en la salida de potencia y la eficiencia al aumentar el número de etapas del caso en el que tenemos una sola etapa $N=1$ al caso que tenemos múltiples etapas $N = 5$. Debido a razones económicas un mayor número de etapas se considera hoy en día poco práctico [13].

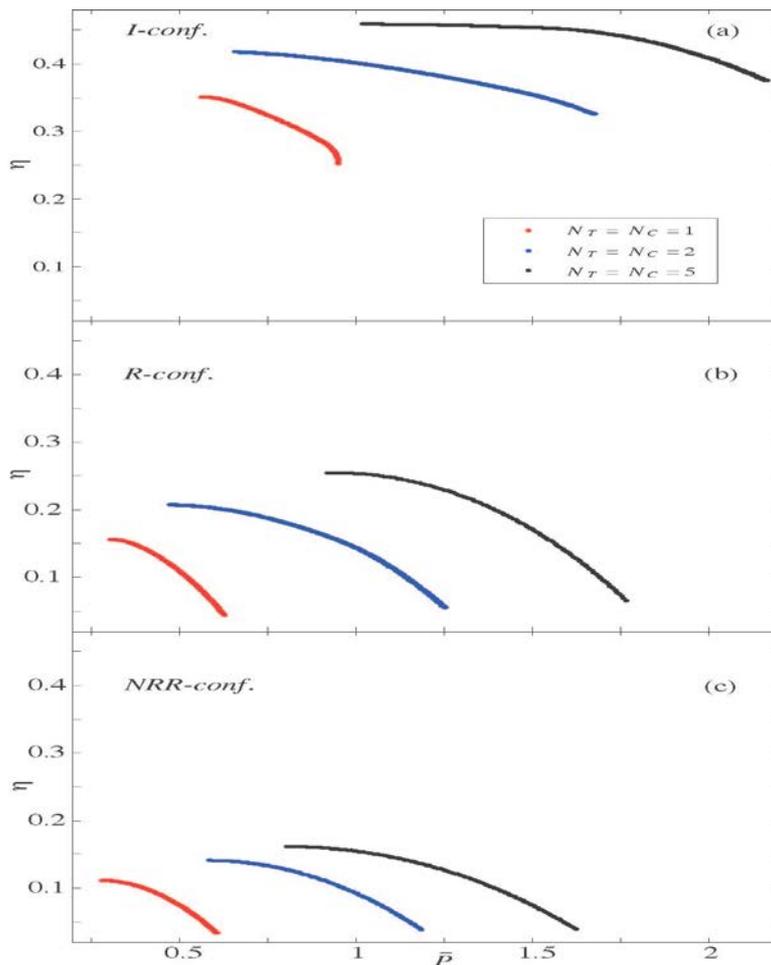


Figura. 3: Frente de Pareto.

El frente de Pareto también se calculó para un conjunto de parámetros realistas. Este conjunto está etiquetada R - conf. en la Tabla 2 se tomaron estos valores de varias referencias, [7, 8, 10, 11]. Los correspondientes frentes de Pareto y los subconjuntos de soluciones están contenidas en la Fig. 4 (b) y en la Tabla 3. En general, hay una clara disminución tanto en la potencia y la eficiencia general con respecto al caso I - Conf, porque ahora las pérdidas son mayores y más cerca de los valores reales en las instalaciones existentes. No obstante, los comentarios anteriores sobre los valores y la evolución de los parámetros de diseño r_p , γ , y τ siguen siendo válidos.

En la Tabla 3 podemos ver los valores numéricos de configuración R-conf que corresponde a la Figura 4 (b) en la que encontramos que los valores de r_p varían en el caso de una sola etapa ($N=1$) en un intervalo de (5.0 a 8.6) y cuando aumentamos el número de etapas vemos que va a adquirir el valor máximo del rango que hemos marcado (20.0). En el caso de la relación de temperaturas señalar

que el intervalo varía entre (3.12 a 4.40) y que alcanza el valor máximo del intervalo anterior independientemente del número de etapas.

También hemos analizado la influencia del regenerador en la optimización del proceso de la planta mediante la construcción de los frentes de Pareto con los mismos parámetros que en el denominado R - conf, pero eliminando el recuperador, que en nuestro modelo es idéntica a la fijación de su eficacia igual a cero. Esta configuración se denomina NRR - conf. en la Tabla 2. Los frentes asociados Pareto y el conjunto de puntos analizados están representados en la Fig. 4 (c). La disminución de la eficiencia global, es evidente cuando se comparan con los resultados para la planta de recuperación (Fig. 4 (b)). Para N = 1 para la disminución del punto de eficiencia más alto está aproximadamente por 40%, para N = 2, sobre el 47%, y para N = 5, el 58%. Con respecto a la potencia de salida, la ausencia o presencia de un regenerador en el diseño de la planta debe ser indiferente, porque la regeneración es un efecto de transferencia de calor interno, que no afecta a la potencia de salida neta.

Tabla 3: Soluciones del Frente de Pareto para la configuración R-conf. con N= 1, 2 y 5. Entre paréntesis tenemos el número de puntos de la frontera.

P	η	r_p	γ	τ
N=1 (20190)				
0.3044	0.1562	5.0	1.350	3.41
0.4594	0.1254	5.6	1.377	3.92
0.4905	0.1139	6.3	1.363	4.01
0.4976	0.1111	5.8	1.392	4.03
0.5566	0.0844	6.4	1.395	4.20
0.5818	0.0714	7.3	1.376	4.27
0.6282	0.0448	7.4	1.400	4.4
0.6284	0.0445	8.6	1.369	4.4
N=2 (23162)				
0.4737	0.2071	6.9	1.355	3.22
0.9382	0.1573	20.0	1.386	3.85
0.9573	0.1535	20.0	1.400	3.88
0.9676	0.1513	20.0	1.398	3.90
1.1456	0.1000	20.0	1.400	4.21
1.2026	0.0778	20.0	1.400	4.31
1.2540	0.0552	20.0	1.400	4.40
N=5 (276)				
0.9184	0.2549	20.0	1.390	3.12
1.3548	0.2092	20.0	1.400	3.77
1.4264	0.1917	20.0	1.400	3.88
1.4524	0.1846	20.0	1.400	3.92
1.6346	0.1231	20.0	1.400	4.20
1.6931	0.0986	20.0	1.400	4.29
1.7646	0.0654	20.0	1.400	4.40

3. Conclusiones y consideraciones finales

Realizar una optimización multi-objetivo nos va a permitir y ayudar a diseñar plantas más eficientes. Este estudio podría constituir una guía interesante para el diseño de las futuras generaciones de plantas de este tipo, que están ahora en fase de investigación y desarrollo.

Se demostró que en cualquier caso las variaciones de la eficiencia y la potencia de salida asociada a los puntos de diseño en el frente de Pareto son importantes, es decir, pequeños cambios en r_p , τ , y γ conducen a muy diferentes valores de η y P . Esto refuerza la idea de que en el diseño de este tipo de

plantas de un estudio de optimización previo es básico con el fin de encontrar los intervalos numéricos apropiados de las principales variables de diseño termodinámicas.

En resumen, la optimización multi-objetivo y multi-paramétrico sistemática de una planta solar impulsado pura considerado muestra el amplio intervalo de posibilidades de optimización de estas plantas cuando eligen funciones como objetivo su producción global de rendimiento y potencia. Este tipo de estudios en una etapa inicial de diseño de la planta son muy dilucidar para decidir los principales parámetros de la planta termodinámicas. Pequeños cambios en estos parámetros podrían llevar a un punto de diseño no deseado con extravíos importantes de los registros de salida.

4. Agradecimientos

M. Pedemonte, P. Ezzatti, and P. L. Curto-Risso de la Universidad de la República y Agencia Nacional de Investigación e Innovación, Uruguay. M. Pedemonte and P. Ezzatti gracias por el soporte del Programa de Desarrollo, Uruguay. A. Medina, A. Calvo Hernández, y S. Sánchez Orgaz agradecemos por el soporte económico del proyecto MINECO de España, ENE2013-40644-R, y Universidad de Salamanca. S. Sánchez Orgaz agradece al Banco Santander de España por financiar su visita a Montevideo. +

5. Referencias

- [1] A. Calvo Hernández, J. M. M. Roco, A. Medina, Power and efficiency in a regenerative gas-turbine with multiple reheating and intercooling stages, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 29 (1996)1462-68
 - [2] J. M. M. Roco, S. Velasco, A. Medina, A. Calvo Hernández, Optimum performance of a regenerative Brayton thermal cycle, *J. Appl. Phys.* 82 (1997) 2735–41.
 - [3] S. SÁNCHEZ- ORGAZ, Model, analysis, and thermodynamic optimization of Brayton multi-step power plants. Application to thermosolar plants, Ph.D. thesis, Universidad de Salamanca, Spain (2012).URL <http://gtfe.usal.es/Eng/>
 - [4] S. SÁNCHEZ- ORGAZ, A. MEDINA y A. CALVO HERNÁNDEZ. Thermodynamic model and optimization of a multi-step irreversible Brayton cycle. *Energy Conversion and Management*, 2010, vol. 51, pp. 2134-43.
 - [5] S. SÁNCHEZ- ORGAZ, A. MEDINA y A. CALVO HERNÁNDEZ. Recuperative solar-driven multi-step gas turbine power plants. *Energy Conversion and Management*, 2013, vol. 67, pp. 171-178.
 - [6] S. SÁNCHEZ- ORGAZ, A. MEDINA y A. CALVO HERNÁNDEZ. Maximum overall efficiency for a solar-driven gas turbine power plant. *International Journal of Energy Research*, 2013, vol. 37, pp. 1580-1591.
 - [7] K. Deb, *Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms*, John Wiley & Sons, Inc, New York, NY, USA, 2001.
 - [8] C. A. Coello, G. B. Lamont, D. A. Van Veldhuizen, *Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems*, 2nd Edition, Genetic and Evolutionary Computation, Springer, 2007.
 - [9] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, T. Meyarivan, A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II, *Evolutionary Computation*, IEEE Transactions on 6 (2) (2002) 182–197.
 - [10] L. Wu, G. Lin, J. Chen, Parametric optimization of a solar-driven Braysson heat engine with variable heat capacity of the working fluid and radiation-convection heat losses, *Renew. Energ.* 35 (2010) 95–100.
 - [11] L. Chen, J. Wang, F. Sun, Power density analysis and optimization of an irreversible closed intercooled regenerated Brayton cycle, *Math. Comput. Model.* 48 (2008) 527–540.
 - [12] C. Herrera, J. Sandoval, M. Rosillo, Power and entropy generation of an extended irreversible Brayton cycle: optimal parameters and performance, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 39 (2006) 3414–3424.
- J. Horlock, *Cogeneration-Combined Heat and Power Plants*, Krieger,1997.