



CLASE VII

PLANTAS TERMOSOLARES TIPO BRAYTON

Alejandro Medina, José Miguel Mateos Roco

Febrero 2018

<http://campus.usal.es/gtfe>



ESQUEMA

- 1 MOTIVACIÓN
- 2 MODELO TERMODINÁMICO
- 3 OPTIMIZACIÓN RESPECTO A τ
- 4 DOBLE OPTIMIZACIÓN
- 5 INFLUENCIA DEL REGENERADOR
- 6 OPTIMIZACIÓN MULTIOBJETIVO

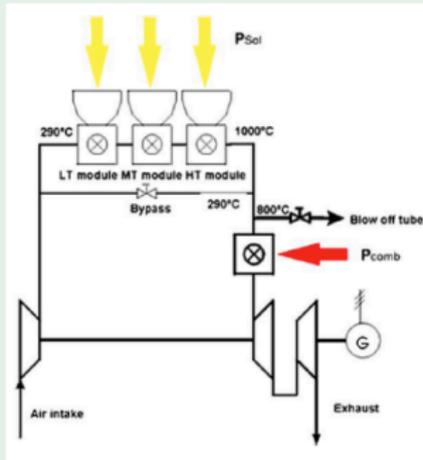


ESQUEMA

- 1 MOTIVACIÓN
- 2 MODELO TERMODINÁMICO
- 3 OPTIMIZACIÓN RESPECTO A τ
- 4 DOBLE OPTIMIZACIÓN
- 5 INFLUENCIA DEL REGENERADOR
- 6 OPTIMIZACIÓN MULTIOBJETIVO

SOLGATE PROJECT

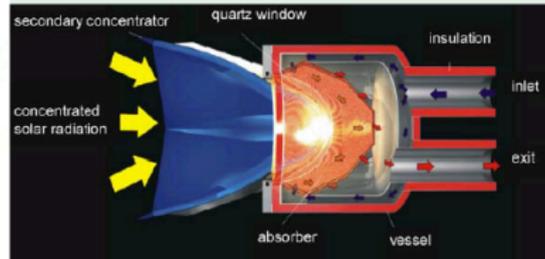
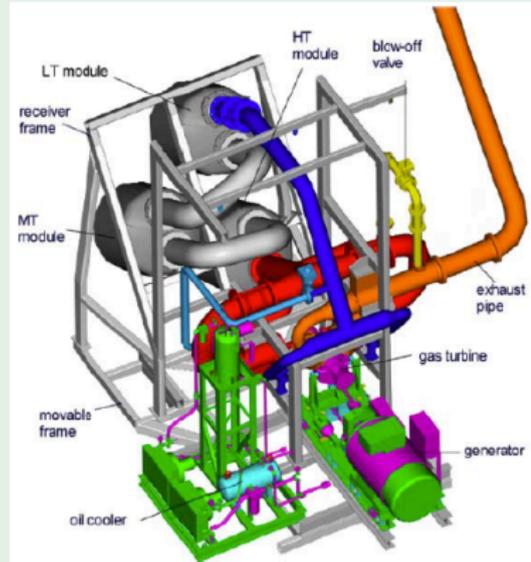
(EC PROJECT, 2006), PLATAFORMA SOLAR DE ALMERÍA (SPAIN)



Thermal Power: 1 MW
Heliostat field: CESA-1
Three modules: 290°C to 1000°C
Combustion chamber: kerosen
Thermal efficiency: $\sim 20\%$

P. Heller *et al.*, Sol. Energy, 80, 1225-1230
(2006)

SOLGATE PROJECT

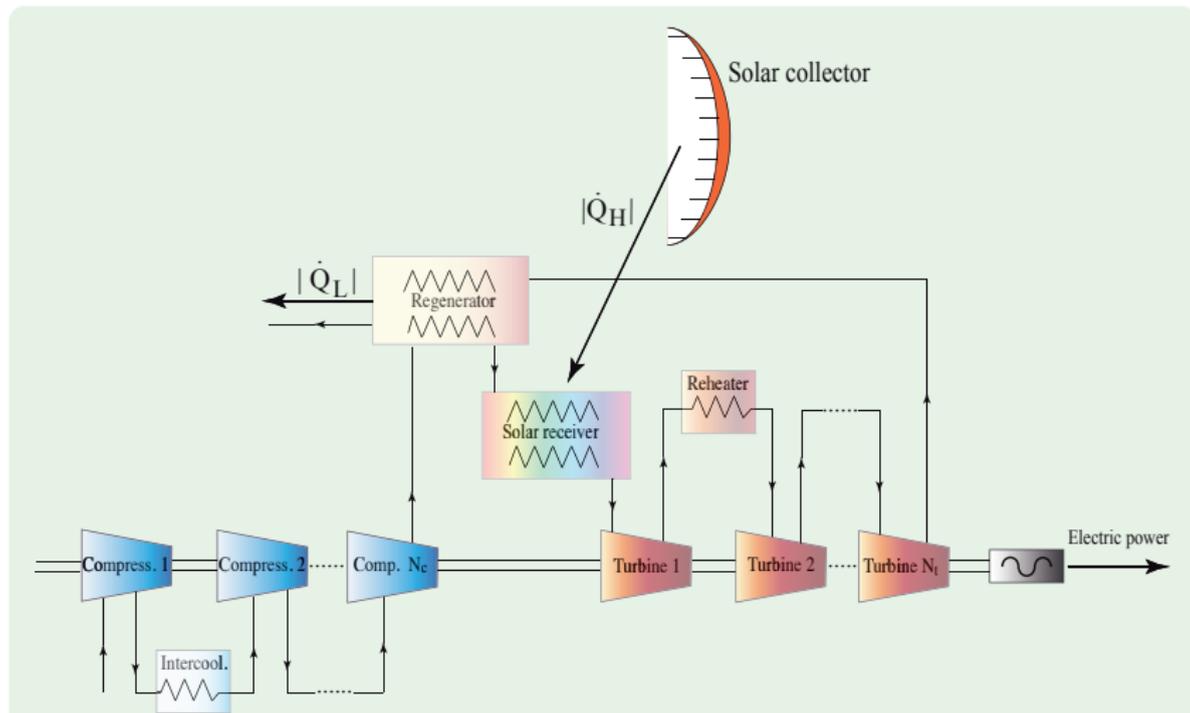




ESQUEMA

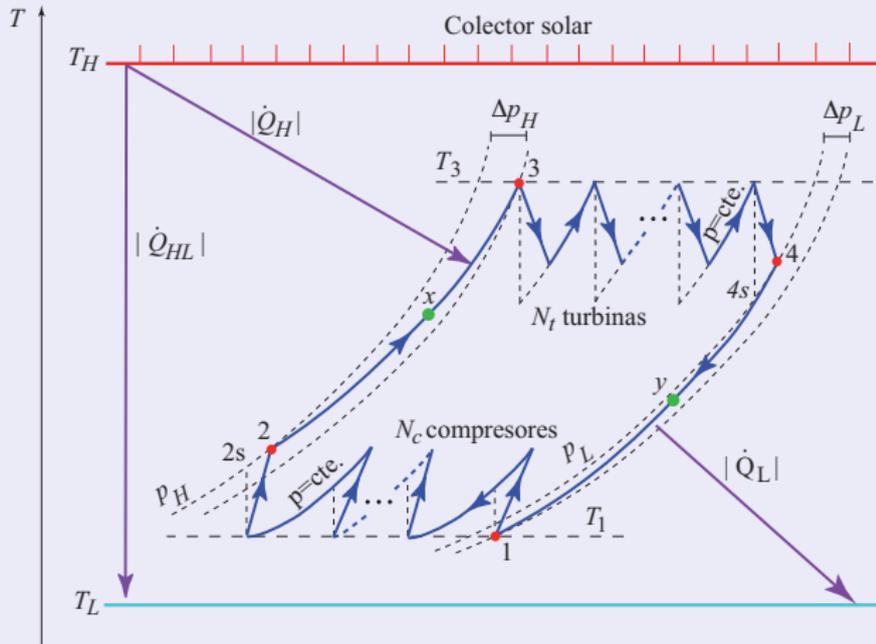
- 1 MOTIVACIÓN
- 2 **MODELO TERMODINÁMICO**
 - Eficiencia del colector solar
 - Eficiencia del ciclo Brayton
- 3 OPTIMIZACIÓN RESPECTO A τ
- 4 DOBLE OPTIMIZACIÓN
- 5 INFLUENCIA DEL REGENERADOR

Solar-driven multistep regenerative Brayton cycle



Solar-driven multistep regenerative Brayton cycle

DIAGRAMA $T - S$





EFICIENCIA GLOBAL DE LA PLANTA

EFICIENCIA GLOBAL DE LA PLANTA, η

$$\eta = \frac{|\dot{W}|}{GA_a} = \frac{|\dot{W}|}{|\dot{Q}_H|} \frac{|\dot{Q}_H|}{GA_a} \equiv \eta_h \eta_s$$

η_h : eficiencia del ciclo Brayton

η_s : eficiencia del colector solar

G : irradiancia solar

A_a : área de apertura



EFICIENCIA DEL COLECTOR SOLAR

CALOR POR UNIDAD DE TIEMPO CEDIDO POR EL COLECTOR

$$|\dot{Q}_H| = \eta_0 G A_a - U_L A_r T_L (\tau - 1)$$

$$\eta_s = \frac{|\dot{Q}_H|}{G A_a} = \eta_0 [1 - (\tau - 1)M]$$

η_0 : eficiencia óptica

A_a : área de apertura (factor de concentración: $C = A_a/A_r$)

$\tau = T_H/T_L$: relación entre las temperaturas de las fuentes

U_L : coeficiente efectivo de pérdidas

$$M \equiv U_L T_L / (\eta_0 G C)$$



EFICIENCIA DEL CICLO BRAYTON

CALOR ABSORBIDO, $|\dot{Q}_H|$, Y CALOR CEDIDO EN EL CICLO, $|\dot{Q}_L|$

$$|\dot{Q}_H| = C_w T_L \left\{ \epsilon_H \left[\tau - Z_c(1 - \epsilon_r) \frac{T_1}{T_L} - \epsilon_r Z_t \frac{T_3}{T_L} \right] + \epsilon_t (N_t - 1) (1 - a_t^{-1/N_t}) \frac{T_3}{T_L} + \xi(\tau - 1) \right\}$$

$$|\dot{Q}_L| = C_w T_L \left\{ \epsilon_L \left[-1 + Z_t(1 - \epsilon_r) \frac{T_3}{T_L} + \epsilon_r Z_c \frac{T_1}{T_L} \right] + \frac{1}{\epsilon_c} (N_c - 1) (a_c^{1/N_c} - 1) \frac{T_1}{T_L} + \xi(\tau - 1) \right\}$$

$C_w = \dot{m}c_p$: capacidad calorífica del fluido por unidad de tiempo (flujo de gas)



PARÁMETROS RELEVANTES

PARÁMETROS *geométricos*

- Relaciones de compresión del compresor, a_c y de la turbina, a_t :

$$a_c = \frac{T_{2s}}{T_1} = \left(\frac{p_H}{p_L - \Delta p_L} \right)^{(\gamma-1)/\gamma}$$
$$a_t = \frac{T_3}{T_{4s}} = \left(\frac{p_H - \Delta p_H}{p_L} \right)^{(\gamma-1)/\gamma}$$

- Relación entre las temperaturas de las fuentes externas, τ :

$$\tau = \frac{T_H}{T_L} > 1$$

- Coeficiente adiabático del gas considerado, γ :

$$\gamma = C_p / C_v$$



PARÁMETROS RELEVANTES

PARÁMETROS DE *irreversibilidad*

- Eficiencias isoentrópicas del compresor ϵ_c y la turbina ϵ_t :

$$\epsilon_c = \frac{T_{2s} - T_1}{T_2 - T_1}$$

$$\epsilon_t = \frac{T_3 - T_4}{T_3 - T_{4s}}$$

- Eficiencia del regenerador, ϵ_r :

$$\epsilon_r = \frac{T_x - T_2}{T_4 - T_2}$$



PARÁMETROS RELEVANTES

PARÁMETROS DE *irreversibilidad*

- Irreversibilidades en las transferencias de calor con los focos externos, ϵ_H y ϵ_L :

$$\epsilon_H = \frac{T_x - T_3}{T_x - T_H}$$

$$\epsilon_L = \frac{T_1 - T_y}{T_L - T_y}$$

- Caídas de presión en la absorción y cesión de calor, ρ_H y ρ_L :

$$\rho_H = \left(\frac{p_3}{p_2} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} = \left(\frac{p_H - \Delta p_H}{p_H} \right)^{(\gamma-1)/\gamma}$$

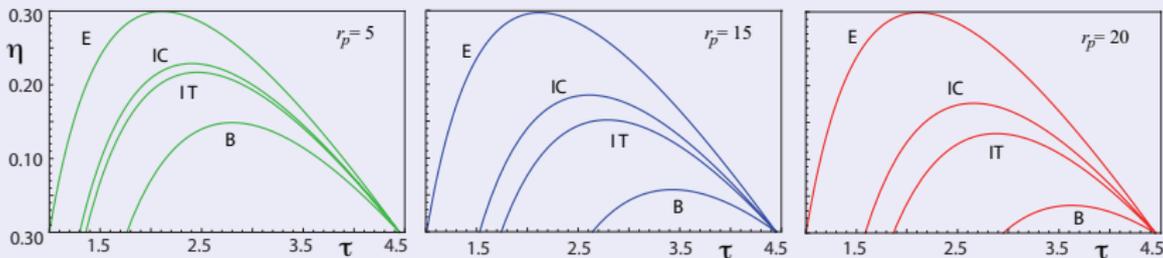
$$\rho_L = \left(\frac{p_1}{p_4} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} = \left(\frac{p_L - \Delta p_L}{p_L} \right)^{(\gamma-1)/\gamma}$$



ESQUEMA

- 1 MOTIVACIÓN
- 2 MODELO TERMODINÁMICO
- 3 OPTIMIZACIÓN RESPECTO A τ
 - Límite endorreversible
 - Caso irreversible
- 4 DOBLE OPTIMIZACIÓN
- 5 INFLUENCIA DEL REGENERADOR

RENDIMIENTO EN EL LÍMITE ENDORREVERSIBLE



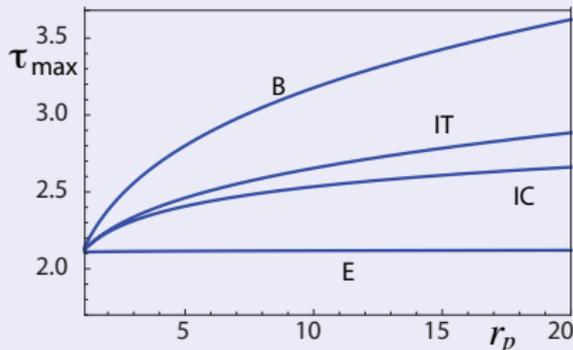
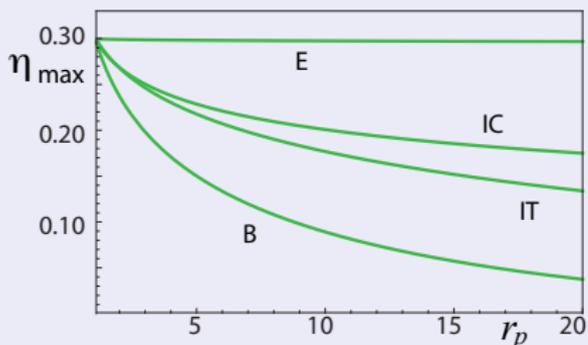
B: $N_t = N_c = 1$; IT: $N_t \rightarrow \infty$; $N_c = 1$, IC: $N_c \rightarrow \infty$; $N_t = 1$, E: $N_c \rightarrow \infty$; $N_t \rightarrow \infty$

Parámetros del colector solar: $\eta_0 = 0,84$, $M = 0,29$

Parámetros del ciclo Brayton:

$\epsilon_H = \epsilon_L = 0,9$, $\xi = 0,02$, $\rho_H = \rho_L = 1$, $\epsilon_t = \epsilon_c = 1$, $\epsilon_r = 1$

RENDIMIENTO MÁXIMO Y TEMPERATURA ÓPTIMA DEL COLECTOR

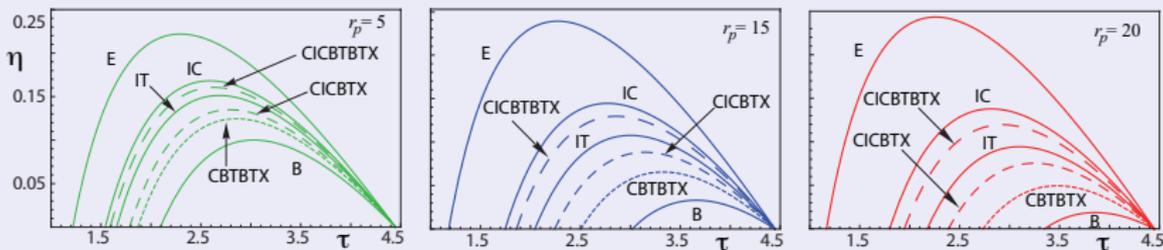


Parámetros del colector solar: $\eta_0 = 0,84$, $M = 0,29$

Parámetros del ciclo Brayton:

$\epsilon_H = \epsilon_L = 0,9$, $\xi = 0,02$, $\gamma = 1,4$, $\rho_H = \rho_L = 1$, $\epsilon_t = \epsilon_c = 1$, $\epsilon_r = 1$

RENDIMIENTO EN EL CASO IRREVERSIBLE

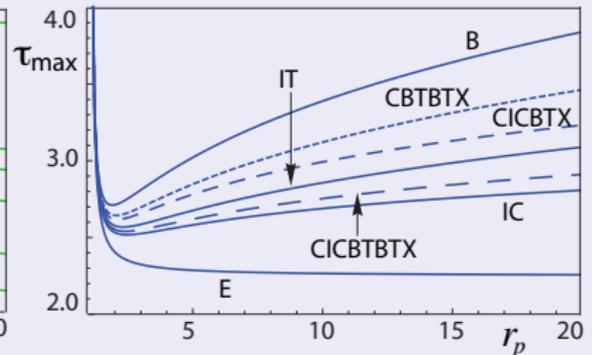
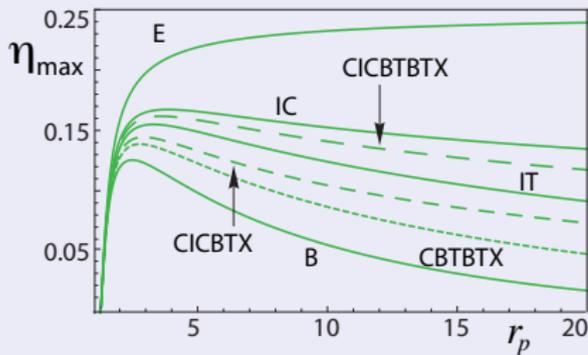


Parámetros del colector solar: $\eta_0 = 0,84$, $M = 0,29$

Parámetros del ciclo Brayton:

$\epsilon_H = \epsilon_L = 0,90$, $\gamma = 1,4$, $\rho_H = \rho_L = 0,98$, $\epsilon_t = \epsilon_c = 0,95$, $\epsilon_r = 0,95$, $\xi = 0,02$

RENDIMIENTO MÁXIMO Y TEMPERATURA ÓPTIMA DEL COLECTOR



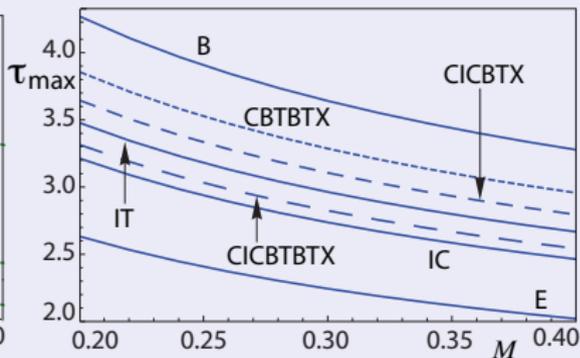
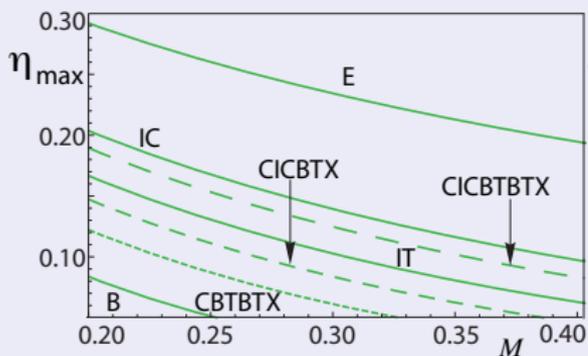
Parámetros del colector solar: $\eta_0 = 0,84$, $M = 0,29$

Parámetros del ciclo Brayton:

$\epsilon_H = \epsilon_L = 0,90$, $\gamma = 1,4$, $\rho_H = \rho_L = 0,98$, $\epsilon_t = \epsilon_c = 0,95$, $\epsilon_r = 0,95$, $\xi = 0,02$

RENDIMIENTO MÁXIMO Y TEMPERATURA ÓPTIMA DEL COLECTOR

EVOLUCIÓN CON LAS PÉRDIDAS EN EL COLECTOR



Parámetros del colector solar: $\eta_0 = 0,84$

Parámetros del ciclo Brayton:

$r_p = 15$, $\epsilon_H = \epsilon_L = 0,90$, $\gamma = 1,4$, $\rho_H = \rho_L = 0,98$, $\epsilon_t = \epsilon_c = 0,95$, $\epsilon_r = 0,95$, $\xi = 0,02$



ESQUEMA

- 1 MOTIVACIÓN
- 2 MODELO TERMODINÁMICO
- 3 OPTIMIZACIÓN RESPECTO A τ
- 4 DOBLE OPTIMIZACIÓN
- 5 INFLUENCIA DEL REGENERADOR
- 6 OPTIMIZACIÓN MULTIOBJETIVO



OPTIMIZACIÓN SIMULTÁNEA RESPECTO A τ Y r_p

INFLUENCIA DE $\epsilon_L = \epsilon_H \equiv \epsilon$

ϵ	$\eta_{\max, \max}$			$r_{p, \max}$			$\tau_{\max, \max}$		
	0,75	0,90	1	0,75	0,90	1	0,75	0,90	1
CBTX	0.103	0.127	0.141	2.155	2.455	2.700	2.877	2.755	2.691
CBTBTX	0.117	0.141	0.155	2.347	2.753	3.105	2.798	2.686	2.628
CICBTX	0.126	0.146	0.158	2.529	2.898	3.191	2.752	2.660	2.612
CICBTBTX	0.144	0.164	0.175	2.985	3.573	4.071	2.659	2.581	2.539

Temperaturas óptimas en el intervalo ($T_L = 300$ K): 762 – 863 K



OPTIMIZACIÓN SIMULTÁNEA RESPECTO A τ Y r_p

COMPARACIÓN CON LA CONFIGURACIÓN CBTX

ϵ	$\Delta\eta_{\max,\max}$ (%)			$\Delta r_{p,\max}$ (%)			$\Delta\tau_{\max,\max}$ (%)		
	0,75	0,90	1	0,75	0,90	1	0,75	0,90	1
CBTBTX	13.6	11.0	9.9	8.9	12.1	15.0	-2.75	-2.50	-2.34
CICBTX	22.3	14.9	12.0	17.3	18.0	18.2	-4.34	-3.44	-2.93
CICBTBTX	39.8	29.1	24.1	38.5	45.5	50.7	-7.57	-6.32	-5.64

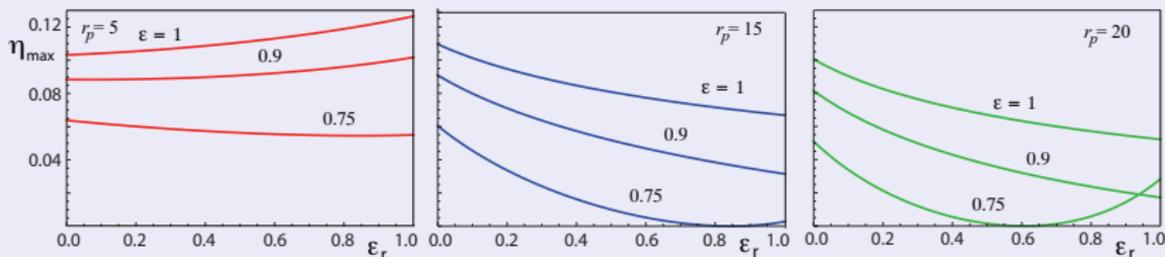


ESQUEMA

- 1 MOTIVACIÓN
- 2 MODELO TERMODINÁMICO
- 3 OPTIMIZACIÓN RESPECTO A τ
- 4 DOBLE OPTIMIZACIÓN
- 5 INFLUENCIA DEL REGENERADOR
- 6 OPTIMIZACIÓN MULTI OBJETIVO

INFLUENCIA DEL REGENERADOR

RENDIMIENTO MÁXIMO. CONFIGURACIÓN CBTX



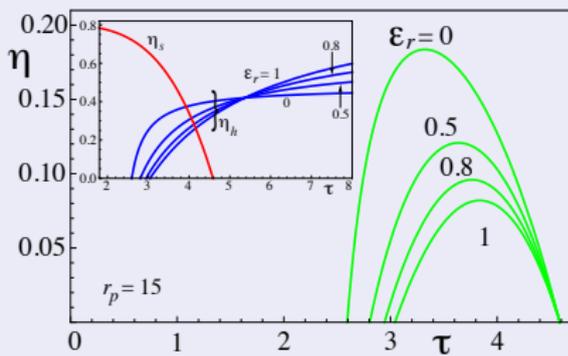
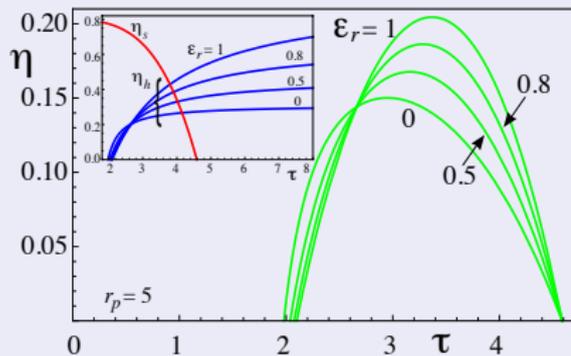
Parámetros del colector solar: $\eta_0 = 0,84$, $M = 0,29$

Parámetros del ciclo Brayton:

$\gamma = 1,4$, $\rho_H = \rho_L = 0,98$, $\epsilon_t = \epsilon_c = 0,95$, $\xi = 0,02$

INFLUENCIA DEL REGENERADOR

ANÁLISIS DE LAS CAUSAS (CBTX)



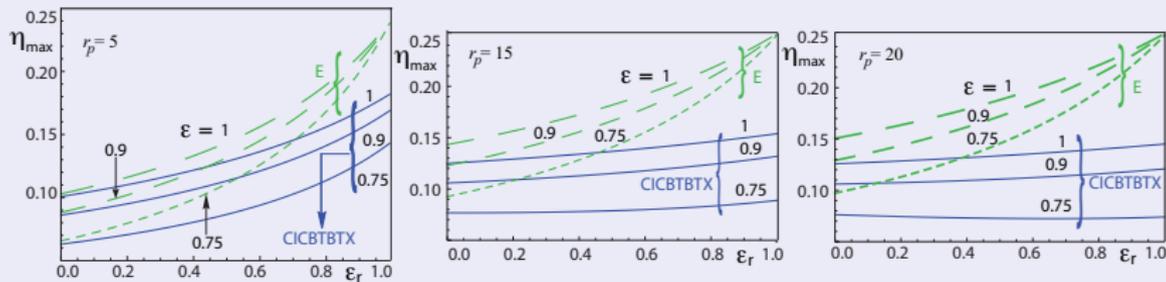
Parámetros del colector solar: $\eta_0 = 0,84$, $M = 0,29$

Parámetros del ciclo Brayton:

$\gamma = 1,4$, $\rho_H = \rho_L = 0,98$, $\epsilon_t = \epsilon_c = 0,95$, $\xi = 0,02$

INFLUENCIA DEL REGENERADOR

OTRAS CONFIGURACIONES



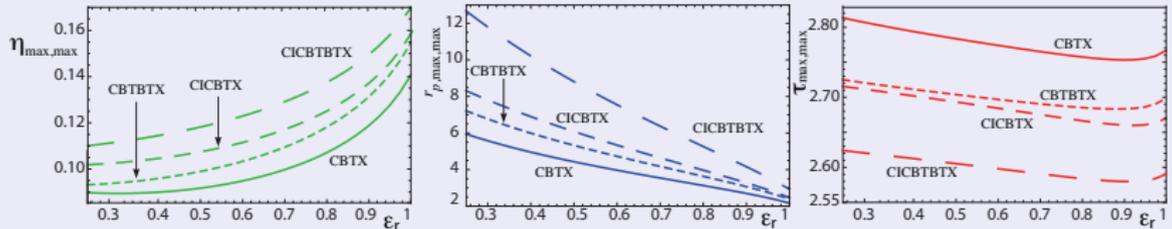
Parámetros del colector solar: $\eta_0 = 0,84$, $M = 0,29$

Parámetros del ciclo Brayton:

$\gamma = 1,4$, $\rho_H = \rho_L = 0,98$, $\epsilon_t = \epsilon_c = 0,95$, $\xi = 0,02$

INFLUENCIA DEL REGENERADOR

OTRAS CONFIGURACIONES: DOBLE OPTIMIZACIÓN



Parámetros del colector solar: $\eta_0 = 0,84$, $M = 0,29$

Parámetros del ciclo Brayton:

$\epsilon = 0,9$, $\gamma = 1,4$, $\rho_H = \rho_L = 0,98$, $\epsilon_t = \epsilon_c = 0,95$, $\xi = 0,02$



ESQUEMA

- 1 MOTIVACIÓN
- 2 MODELO TERMODINÁMICO
- 3 OPTIMIZACIÓN RESPECTO A τ
- 4 DOBLE OPTIMIZACIÓN
- 5 INFLUENCIA DEL REGENERADOR
- 6 OPTIMIZACIÓN MULTI OBJETIVO

OPTIMIZACIÓN MULTIOBJETIVO

PLANTEAMIENTO FORMAL DE UN PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN MULTIOBJETIVO (MOP):

- 1 Dado un conjunto de q funciones objetivo, $f_i(\vec{x})$, dependiendo cada una de n variables, $\vec{x} = (x_1, x_2 \dots x_n)$, se trata de:

$$\text{minimizar } f_i(\vec{x}) \quad i = 1, \dots, q$$

$$\text{ligaduras: } g_k(\vec{x}) \geq 0 \quad k = 1, \dots, m$$

$$h_l(\vec{x}) = 0 \quad l = 1, \dots, p$$

$$x_j^L \leq x_j \leq x_j^U \quad j = 1, \dots, n$$

donde $\vec{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ es una solución.

- 2 El espacio de soluciones, \mathcal{S} , se define como el conjunto de vectores solución que satisfacen todas las condiciones del problema.
- 3 $F(\vec{x})$ denota $[f_1(\vec{x}), \dots, f_q(\vec{x})]$.



CONCEPTO DE DOMINANCIA

CONDICIONES DE DOMINANCIA

- 1 Un vector $\vec{u} = (u_1, \dots, u_q)$ domina a otro $\vec{v} = (v_1, \dots, v_q)$ si y solo si $u_i \leq v_i \forall i \in 1, \dots, q$ y existe al menos un j ($1 \leq j \leq q$) tal que $u_j < v_j$. Esto se denota como: $\vec{u} \preceq \vec{v}$.

(Este planteamiento es válido para un problema de minimización. El de maximización sería idéntico pero cambiando el sentido de las desigualdades.)

- 2 Dos vectores son no dominantes entre sí cuando ninguno de ellos domina al otro.
- 3 En nuestro caso la dominancia se establece sobre los vectores $F(\vec{x})$.



FRENTE DE PARETO

Pareto Optimal Set (POS)

- 1 El *Pareto Optimal Set (POS)* de un MOP $F(\vec{x})$ dado se define como $\mathcal{P}^* = \{\vec{x}_1 \in \mathcal{S} \mid \neg \exists \vec{x}_2 \in \mathcal{S}, F(\vec{x}_2) \preceq F(\vec{x}_1)\}$.
- 2 Las soluciones del POS satisfacen que cualquier par de soluciones \mathcal{P}^* son no dominadas (la una respecto a la otra), y que cualquier otra solución que no pertenece a \mathcal{P}^* debe ser dominada al menos por un elemento del set.
- 3 La representación del POS en el espacio de funciones objetivo se conoce como Frente de Pareto. Formalmente: el *Frente de Pareto* de un MOP $F(\vec{x})$ es: $\mathcal{PF}^* = \{F(\vec{x}_1) \mid \vec{x}_1 \in \mathcal{P}^*\}$.



FRENTE DE PARETO

SIGNIFICADO DEL FRENTE DE PARETO

- 1 Las soluciones del Frente de Pareto representan diversos compromisos entre objetivos *contradictorios*: la mejora de uno de los objetivos empeora al menos otro.
- 2 En conclusión todas las soluciones del Frente de Pareto son igualmente importantes e interesantes (con la información de la que se dispone).
- 3 Un paso posterior es, entonces, tomar la decisión de qué solución elegir del Frente de Pareto (*Multi-criteria Decision Making Process*). Hay diversos métodos para hacerlo. Se pueden clasificar en función de cuándo se incorpora información adicional en el proceso de decisión: *a priori* o *a posteriori*.



BÚSQUEDA DE SOLUCIONES

PROCEDIMIENTOS DE BÚSQUEDA DE SOLUCIONES

- 1 Cuando el espacio de variables es reducido, se puede hacer un rastreo sistemático a partir de una discretización y mallado.
- 2 Si hay muchas variables esto resulta lento y posiblemente irrealizable. Se utilizan entonces algoritmos evolutivos. Son métodos estocásticos de búsqueda inspirados en los procesos naturales de evolución de las especies.
- 3 Algunos de ellos, de tipo genético (NSGA II, SPEA2, PAES...) se han desarrollado específicamente para la solución de MOPS. Brevemente se sortea inicialmente una población (vector inicial de variables) que evoluciona genéticamente mejorando su cercanía a la solución del problema.

UNA APLICACIÓN CONCRETA: OPTIMIZACIÓN DE TURBINAS TERMOSOLARES

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

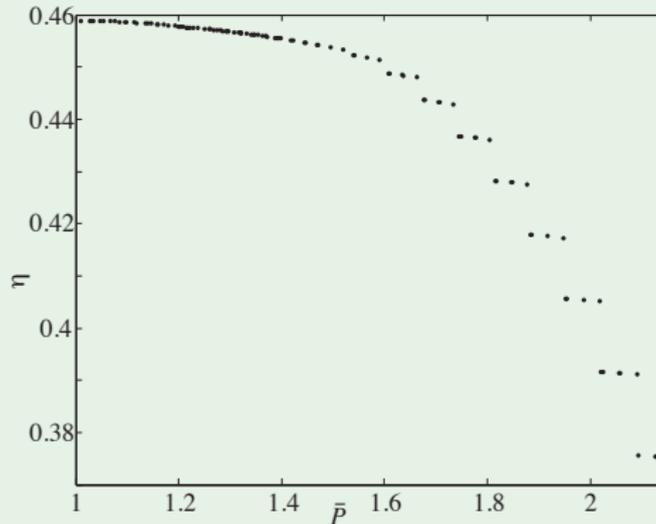
- 1 Funciones objetivo: Potencia neta de salida de la planta, P , y rendimiento termodinámico, η
- 2 Variables a optimizar:

Description	Range	Discretization			
Basic design parameters					
Number of compressors	$1 \leq N_C \leq 5$	1	Isentropic efficiency of the turbines	$0.90 \leq \epsilon_t \leq 0.95$	0.01
Number of turbines	$1 \leq N_T \leq 5$	1	Pressure drops in the heat input	$0.90 \leq \rho_H \leq 0.98$	0.02
Adiabatic coefficient	$1.35 \leq \gamma \leq 1.40$	0.01	Pressure drops in the heat release	$0.90 \leq \rho_L \leq 0.98$	0.02
Overall pressure ratio	$5.00 \leq r_p \leq 20.00$	1	Heat leakage through the plant to the surroundings	$0.02 \leq \xi \leq 0.30$	0.04
Heat reservoirs temperature ratio	$2.00 \leq \tau \leq 4.40$	0.1	Solar subsystem losses parameters		
Brayton thermal cycle losses parameters			Radiation heat loss coefficient for the solar collector	$0.001 \leq M_1 \leq 0.003$	0.0001
Irreversibilities coming from the coupling of the working fluid with the heat reservoir at temperature T_L	$0.70 \leq \epsilon_H \leq 1.00$	0.1	Convection heat loss coefficient for the solar collector	$0.002 \leq M_2 \leq 0.010$	0.001
Irreversibilities coming from the coupling of the working fluid with the heat reservoir at temperature T_H	$0.70 \leq \epsilon_L \leq 1.00$	0.1	Effective transmittance-absorptance product	$0.70 \leq \eta_0 \leq 0.90$	0.1
Regenerator effectiveness	$0.00 \leq \epsilon_r \leq 1.00$	0.1			
Isentropic efficiency of the compressors	$0.90 \leq \epsilon_c \leq 0.95$	0.01			



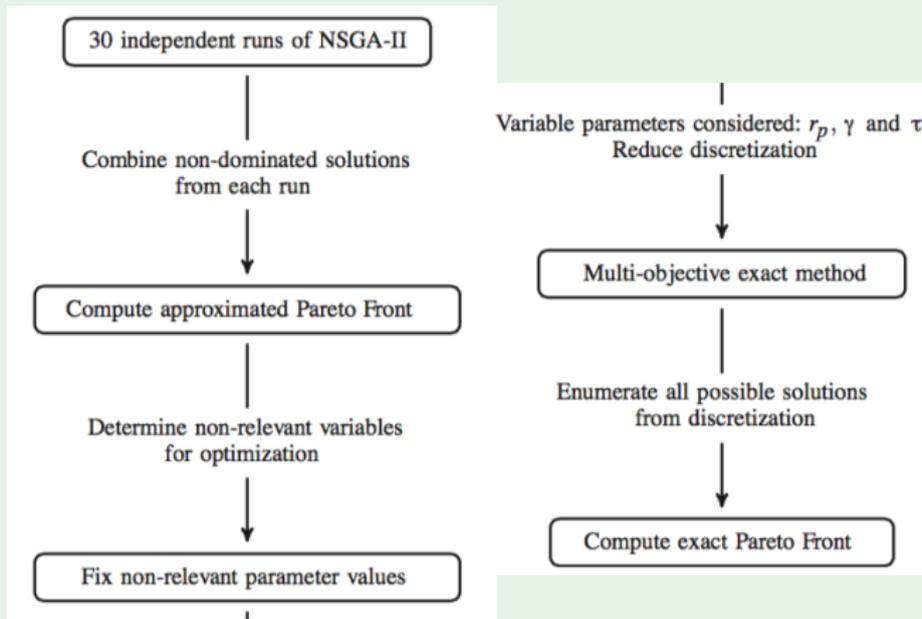
OPTIMIZACIÓN DE TURBINAS TERMOSOLARES

FRENTE DE PARETO OPTIMIZANDO SIMULTÁNEAMENTE TODAS LAS VARIABLES.
ALGORITMO GENÉTICO NSGAII



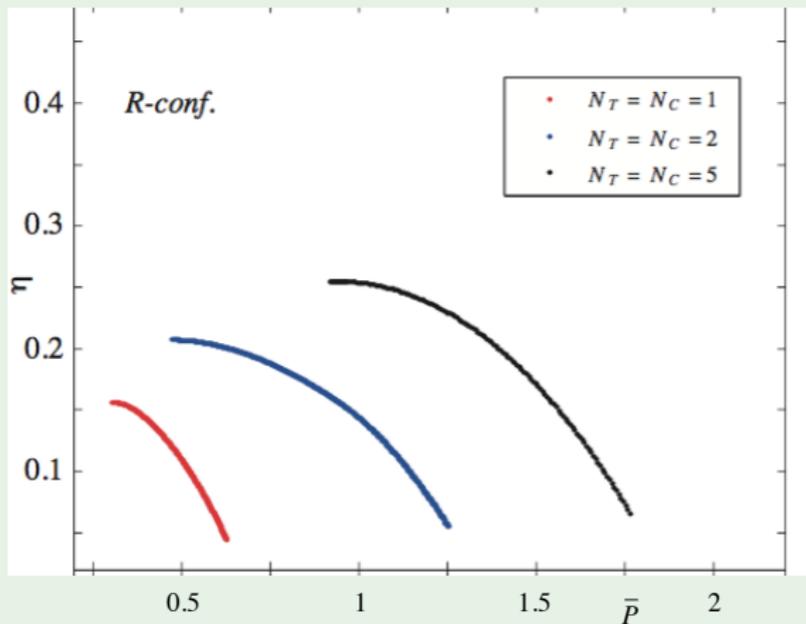
OPTIMIZACIÓN DE TURBINAS TERMOSOLARES

SECUENCIA DE OPERACIONES



OPTIMIZACIÓN DE TURBINAS TERMOSOLARES

FRENTES DE PARETO DE DISTINTAS CONFIGURACIONES





OPTIMIZACIÓN DE TURBINAS TERMOSOLARES

VALOR DE LAS VARIABLES EN EL FRENTE DE PARETO

\bar{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	4.40
0.6284	0.0445	8.6	1.369	4.40
$N = 2$ (23162)				
0.4737	0.2071	6.9	1.355	3.22
0.9382	0.1573	20.0	1.396	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
1.7647	0.0654	20.0	1.400	4.40

OPTIMIZACIÓN DE TURBINAS TERMOSOLARES

MEJORAS EN EL RENDIMIENTO Y LA POTENCIA

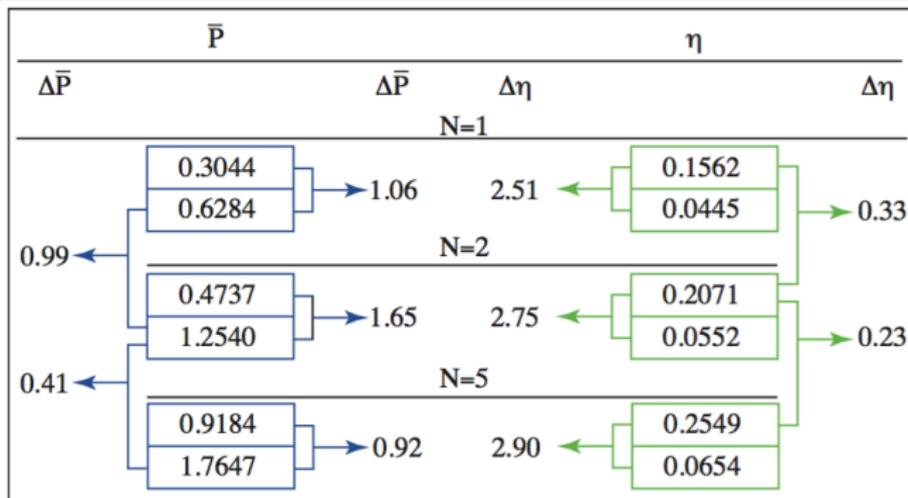


Figure 6: Relative increments of power output, $\Delta\bar{P}$, and overall efficiency, $\Delta\eta$, between the extremes of the Pareto Front for the R configuration and the number of compression-expansion stages considered, N . All the percentages are calculated with respect to the lowest value in each case. The scheme also shows the increase of \bar{P} and η with N .



BIBLIOGRAFÍA BÁSICA

- J.H. Horlock
Advanced Gas Turbine Cycles, Pergamon (2003)
- T. Yilmaz, Y. Ust, and A. Erdil
Optimum operating conditions of irreversible solar driven heat engines,
Renewable Energy 31 (2006) 1333–1342.
- Y. Zhang, B. Lin, and J. Chen,
Optimum performance characteristics of an irreversible solar-driven Brayton heat engine at the maximum overall efficiency, Renewable Energy 32 (2007) 856–867.
- R. Pitz-Paal,
Solar Energy Conversion and Photoenergy Systems, UNESCO, Eolss Publishers, 2007, Ch. High Temperature Solar Concentrators.



BIBLIOGRAFÍA BÁSICA

- P. Heller, M. Pfänder, T. Denk, F. Téllez, A. Valverde, J. Fernández and A. Ring
Test and evaluation of a solar powered gas turbine system, Solar Energy 80, 1225-30 (2006)
- S. Sánchez Orgaz, A. Medina, and A. Calvo Hernández
Maximum overall efficiency for a solar-driven gas turbine power plant, Int. J. Energy Research (2012, DOI: 10.1002/er.2967)
- S. Sánchez Orgaz, A. Medina, and A. Calvo Hernández
Recuperative solar-driven multi-step gas turbine power plants, Energy Conversion and Management 67, 171-178 (2013)
- K. Deb
Multi-objective optimization using evolutionary algorithms, Wiley (2001)
- D. Goldberg
Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning, Addison Wesley (1989).



FIN