



Diseño del sistema de control automático para un prototipo de Generación Directa de Vapor con Colectores solares Cilindro-Parabólicos

Proyecto híbrido de energía geotérmica - solar, campo geotérmico de Berlín

Categoría de la Agenda Nacional de Investigación: Energía

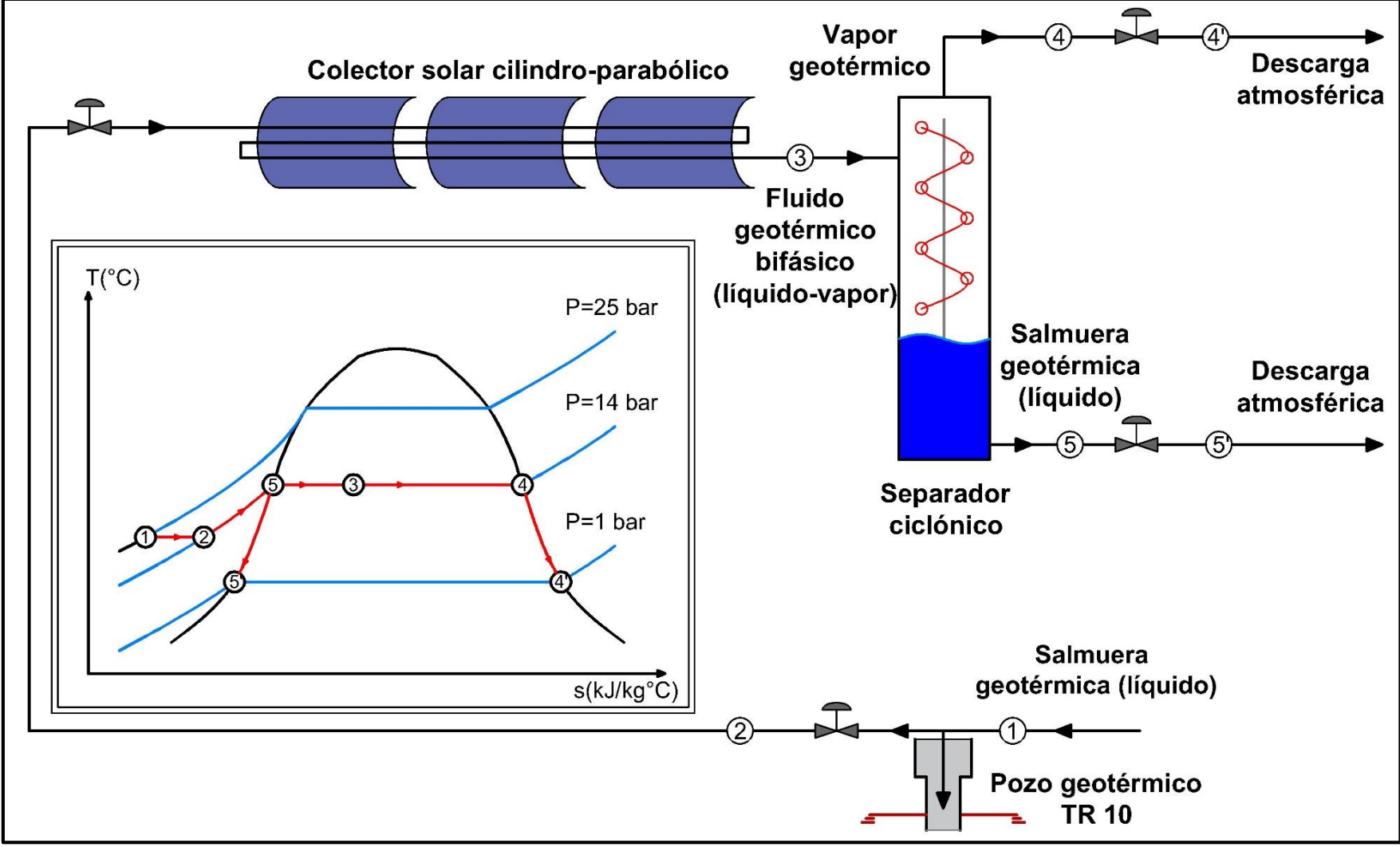
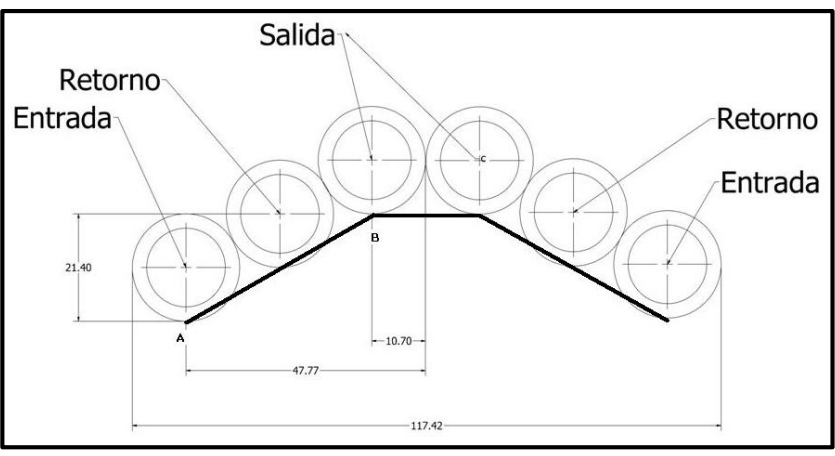
Autor: Antonio Sandá Mera, antonio.sanda.mera@gmail.com, Universidad Don Bosco

1. Introducción

1.1. El prototipo GDV con CCP del CGB

- Desde 2008 se inició la evaluación del potencial solar del Campo Geotérmico de Berlín (CGB), arrojando valores de radiación elevados, por encima de los 5 kWh/m²·día
- En 2013 se instaló en la plataforma del pozo TR-10, un prototipo de Concentradores solares Cilindro-Parabólicos (CCP) con las siguientes características principales:

Característica	Valor
Nº Módulos	3
Long. Módulo (l _{mod})	13.5 m
Long. apertura (l _a)	4.8 m ²
Área Apertura (A _a)	184 m
Absorbedor	6 tubos de acero AISI 304; configuración en cavidad
Long. Total (l _t)	130 m (trayectoria en "s")
Rendimiento óptico pico (η _{optp})	0.63
Rendimiento térmico (η _{ter})	$\frac{-0.5059 T_f + 125.14}{100}$ $46 \leq T_f \leq 196$
Fact. Modif. Ang. Inc. (K(θ))	$\frac{(-4 \cdot 10^{-4} \theta + 1)}{(-7.6 \cdot 10^{-5} \theta^3 + 6.6 \cdot 10^{-3} \theta^2 - 0.19 \theta + 2.8)}$ $0 < \theta < 24.7$ $24.7 < \theta < 37$



1.2. Planteamiento del problema

- No se cuenta con un modelo de simulación para la caracterización termohidráulica del fluido en el absorbedor y su influencia sobre la estabilidad del CCP.
- Las variaciones en la irradiancia provocan desequilibrios termodinámicos generando estratificación e incrustación de sílice en el absorbedor.

1.3. Objetivo general

- Diseñar el Sistema de Control Automático (SCA) del prototipo GDV con CCP a partir del agua geotérmica de reinyección del campo geotérmico de Berlín.

1.4. Objetivos específicos

- Caracterizar el comportamiento de las variables termodinámicas a controlar y manipular a lo largo del absorbedor del prototipo CCP y analizar su influencia sobre la estabilidad del proceso GDV.
- Determinar la configuración, objetivos y componentes de los lazos de control del prototipo.
- Obtener el modelo matemático y los controladores adecuados de los lazos de control del prototipo.

2. Metodología

2.1. Modelos de simulación

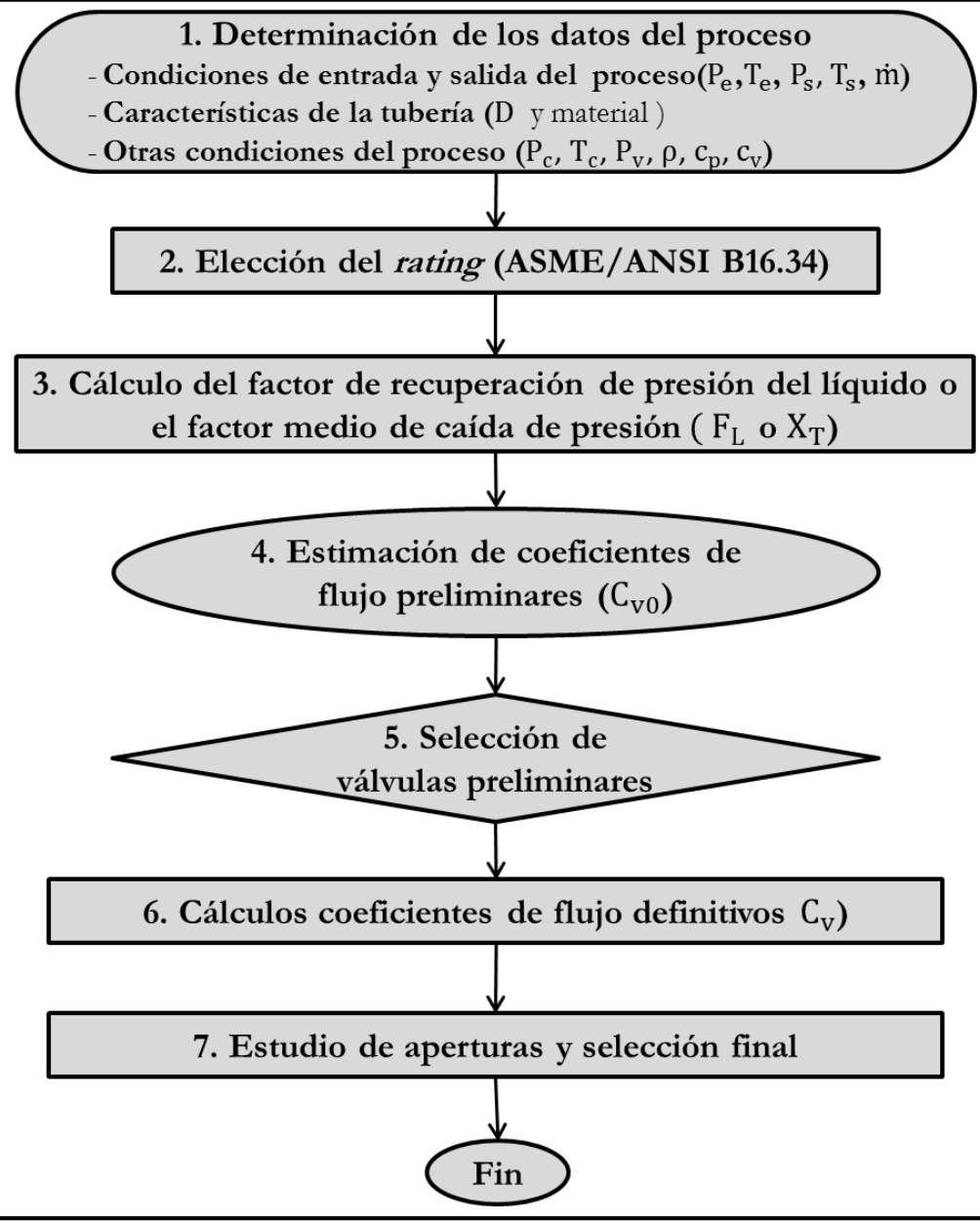
- El balance de energía se calcula (Zarza, 2003):
 $0 = \eta_{optp} \cdot K(\theta) \cdot \eta_{ter}(\bar{T}_f) \cdot F_e \cdot I_d \cdot \cos \theta \cdot A_a - \dot{m} \cdot (h_{fs} - h_{fe})$
- La caída de presión para flujo monofásico contempla pérdidas (Fox et al., 2004):
 - Primarias (Ec. Darcy-Weischback): $\Delta P_{lp} = f \frac{V_f^2 L}{2 D} \rho_l$
 - Secundarias (codos y conexiones): $\Delta P_{ls} = f \frac{V_f^2 L_e}{2 D} \rho_l$
- Las pérdidas en flujo bifásico se calculan con la correlación de Friedel (Thome, 2004): $\Delta P_{fb} = \Delta P_l \Phi_{fr}^2$
- La simulación del proceso se ha realizado con el software matemático *Matlab-Simulink*, considerando las variables del proceso GDV en estado estacionario:
 - i) **Modelo caja negra**: sin considerar lo que sucede en el interior del CCP y asumiendo la caída de presión nula;
 - ii) **Modelo caja gris**: descomponiendo el CCP en módulos por el Método de Volúmenes Finitos y estudiando las condiciones entrada-salida de cada uno, en términos de transferencia de energía y pérdidas de carga.

2.2. Metodología de diseño del SCA

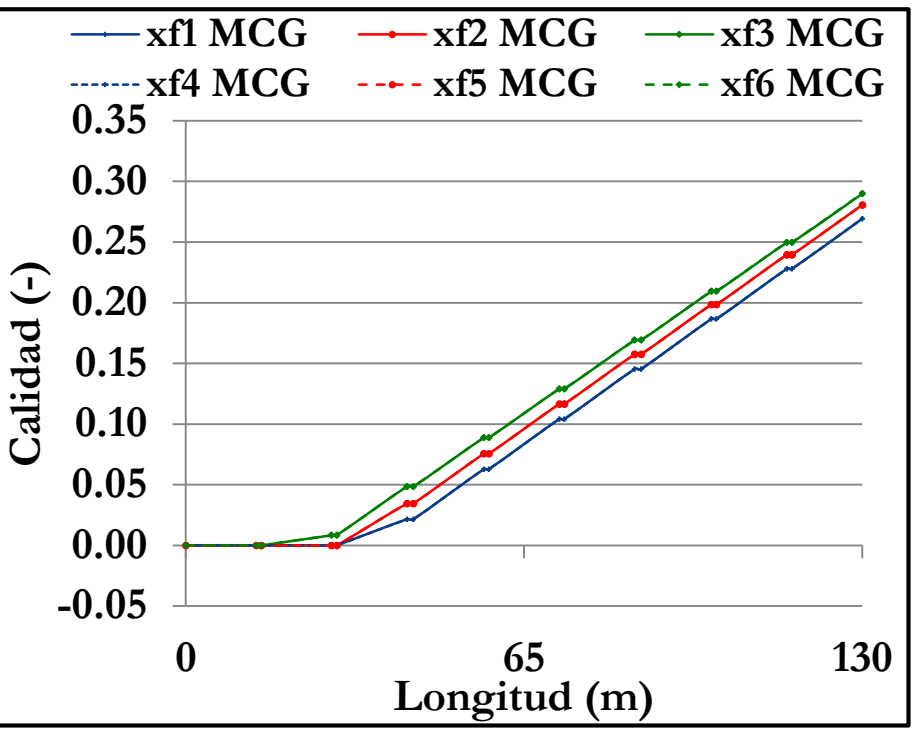
- Se ha optado por una filosofía de control de *caldera en seguimiento* y diseño descentralizado en consonancia con el SCA del prototipo DISS de la Plataforma Solar de Almería (PSA) (Valenzuela, 2008);
- La selección de las válvulas de control se ha realizado de acuerdo a Campo (2014) y Fisher Controls International LLC (2005).

- El modelado de los lazos de control se ha realizado para:
 - Válvulas de control (Coughanowr y LeBlanc, 2009):
$$G_v(s) = \frac{m(s)}{u(s)} = \frac{K_v}{\tau_v s + 1}$$
 - Procesos, a partir de leyes físicas (Valenzuela, 2008):
$$\frac{\partial x(t)}{\partial t} = f(x, u, d)$$
$$y(t) = h(x(t))$$
- La sintonización de los lazos de control se ha realizado por el método de síntesis directa (Seborg et al., 2004):
$$g_c(s) = \frac{1}{g_p(s)} \left(\frac{q(s)}{1 - q(s)} \right)$$
- Los controladores se han diseñado a partir de especificaciones en el dominio de la frecuencia (en lazo abierto y lazo cerrado) y del tiempo; garantizando estabilidad, y compromiso entre rapidez y robustez.

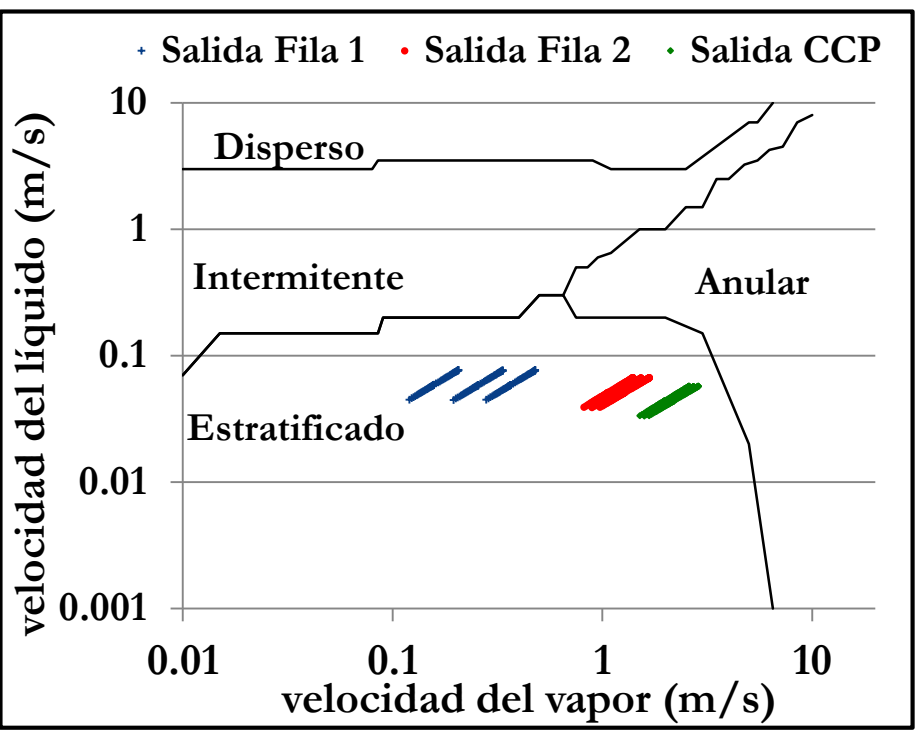
Método de selección de válvulas de control



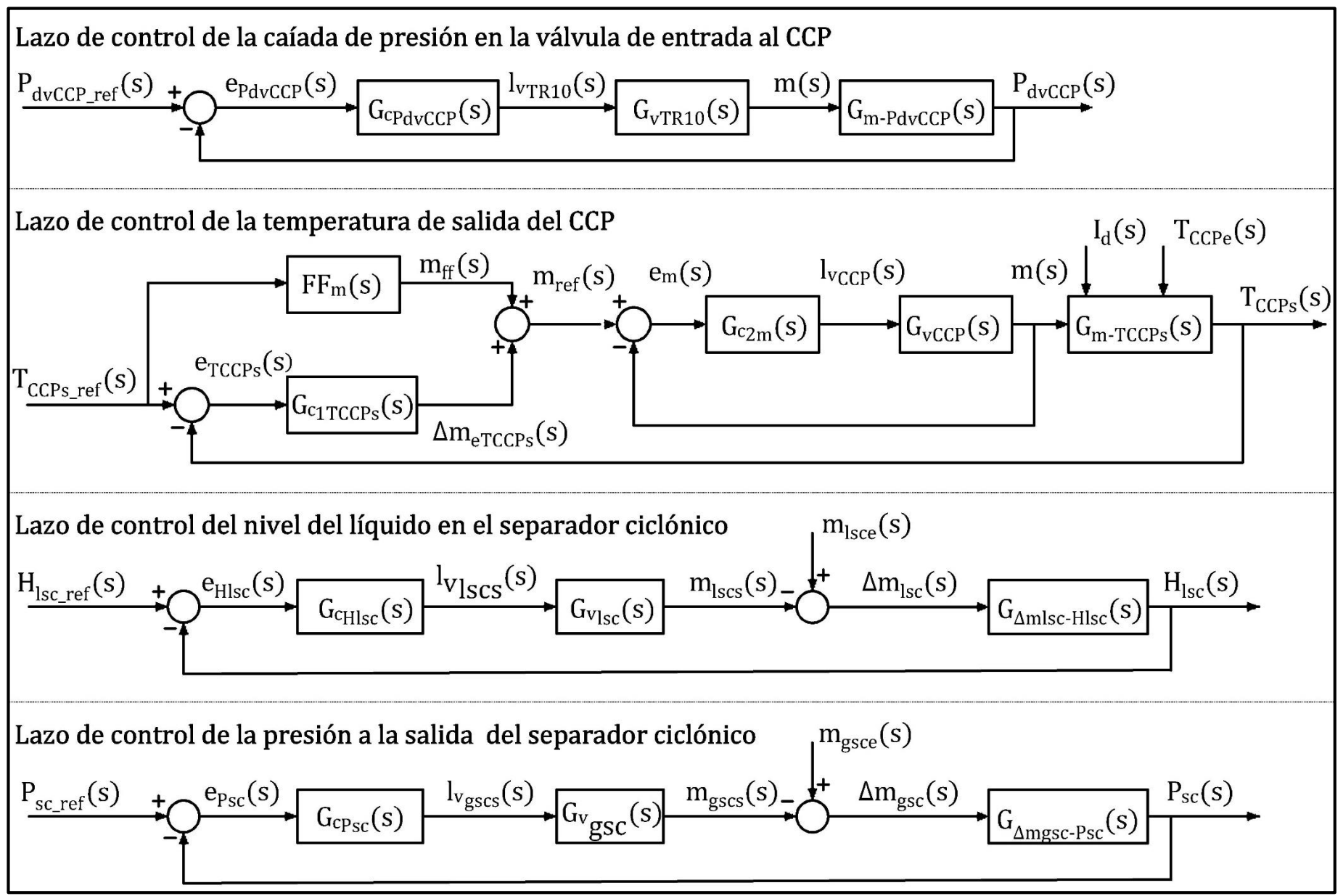
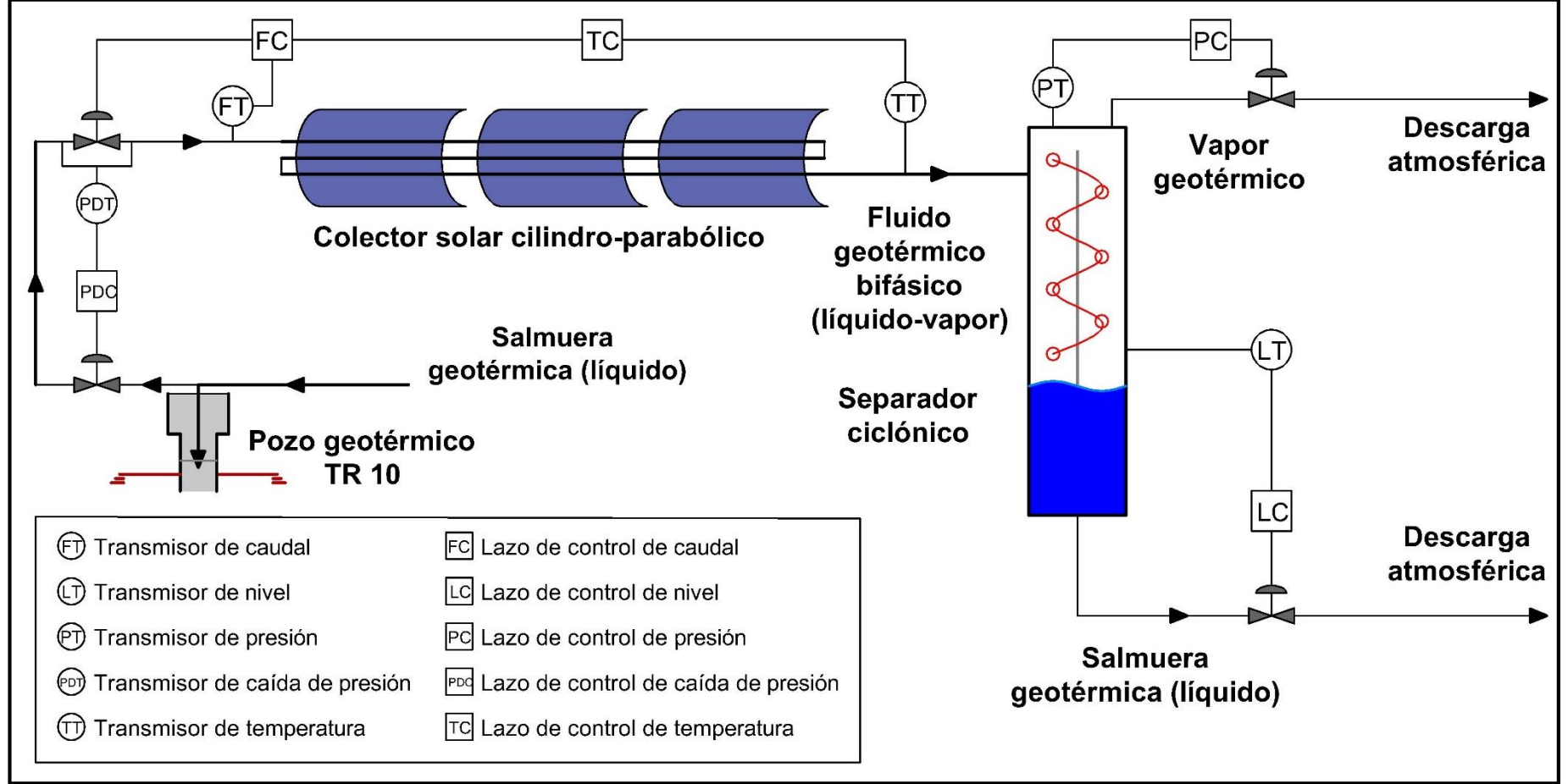
Evolución de la calidad del vapor (MCG)



Patrón de flujo (MCG)



3.3. Diseño del SCA



Lazo	FT de la planta	Controlador
Caída de presión en la válvula de entrada al CCP	$g_{pPd}(s) = \frac{K_{pPd}}{\tau_{pPd} s + 1}$ $K_{pPd} = [1.54, 6.48] \text{ bar}/\%$ $\tau_{pPd} = 0.24 \text{ s}$	PI / $K_{cPd} = 0.21 \text{ } \%/ \text{bar}$; $\tau_{iPd} = 0.19 \text{ s}$
Temperatura de salida del CCP	$g_{pTs1}(s) = \frac{K_{pTs1} e^{-\tau_{dTs1} s}}{\tau_{pTs1} s + 1}$ $K_{pTs1} = [-11862, -5785] \text{ } ^\circ\text{C}/(\text{kg/s})$ $\tau_{pTs1} = [623, 1437] \text{ s}$ $\tau_{dTs1} = [538, 1240] \text{ s}$	PI / $K_{cTs1} = 4.5 \cdot 10^{-5} \text{ kg/s}/^\circ\text{C}$ $\tau_{iTs1} = 1,450 \text{ s}$ FF/ $m_H = [0.0209, 0.0368] \text{ (kg/s)}$ $T_{CCPs_ref} = 195.05 \text{ } ^\circ\text{C}$
Nivel del líquido en el separador	$g_{pHl}(s) = \frac{K_{pHl} w_{aHl}}{s^2 + 2\xi_H w_{aHl} s}$ $K_{pHl} = 1 \text{ m}/\%$ $\xi_H = 15.31$ $w_{aHl} = 0.163 \text{ rad/s}$	P / $K_{cHl} = 275 \text{ } \%/ \text{m}$
Presión de salida del separador	$g_{pPs}(s) = \frac{K_{pPs} w_{aPs}}{s^2 + 2\xi_P w_{aPs} s}$ $K_{pPs} = 1 \text{ bar}/\%$ $\xi_P = 6.72$ $w_{aPs} = 0.310 \text{ rad/s}$	P / $K_{cPs} = 0.105 \text{ } \%/ \text{bar}$

4. Conclusiones

- La simulación termohidráulica ha permitido identificar limitaciones de diseño del CCP que exigen:
 - Un nuevo dimensionamiento (Nº módulos y configuración del absorbedor), y planteamiento del modo y niveles de operación, que garanticen patrón de flujo adecuado.
 - Mejorar la precisión de los algoritmos de simulación y adaptarlos a las nuevas condiciones de operación.
- El diseño del SCA ha supuesto un gran avance a nivel conceptual y metodológico, sin embargo, tras el redimensionamiento del CCP, será necesario:
 - Diseñar los lazos de control para las nuevas condiciones de operación, a partir de la metodología aquí desarrollada.
 - La evaluación experimental del esquema y de los emparejamientos de las variables de control, y la identificación paramétrica para su sintonización.
- Ante la escasa información sobre 1 tecnología innovadora como la GDV, sería importante establecer alianzas de cooperación científica y educativa con universidades y centros de investigación pioneros como la PSA (España) el DLR (Alemania) o la UNAM y CENIDET (México).

Referencias bibliográficas

Campo, A. (2014). *Válvulas de control. Selección y Cálculo*. Madrid: Ediciones Díaz de Santos.

Coughanowr, D.R. y Leblanc, S.E. (2009). *Process Systems Analysis and Control* (3ª Ed.). Nueva York: McGraw-Hill.

Fisher Controls International LLC (2005). *Control Valve Handbook* (4ª Ed.). Marshalltown: Emerson Process Management.

Fox, R.W., McDonald, T. y Pritchard, P.J. (2004). *Introduction to fluid mechanics* (3ª Ed.). Nueva York: John Wiley & Sons.

Seborg, D. E., Edgar, T. F. y Mellichamp, D. A. (2004). *Process Dynamics and Control* (2ª Ed.). Nueva York: John Wiley & Sons.

Thome, J.R. (2004). *Engineering Data Book III*. Wolvewerine Tube Inc.

Valenzuela, L. (2008). *Control automático de plantas de Generación Directa de Vapor con Colectores solare Cilindro-Parabólicos*. Madrid: CIEMAT.

Zarza, E. (2003). *Generación directa de vapor con colectores solares cilindro parabólicos*. Tesis de Doctorado para la obtención del título de Doctor en Ingeniería Industrial, Escuela Superior de Ingenieros, Universidad de Sevilla, Sevilla, España.

Agradecimientos

El autor agradece a la Universidad Don Bosco (UDB) el apoyo brindado durante el desarrollo del presente trabajo, y de manera especial al Dr. Humberto Flores por la confianza y respaldo institucional mostrados, para la difusión de los resultados de la investigación.