

MODELADO Y CONTROL DE SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN POR COMPRESIÓN DE VAPOR

Manuel G. Ortega Linares

Dept. Ingeniería de Sistemas y Automática

Universidad de Sevilla

Índice

- **Introducción.**
- Modelado de Sistemas de Refrigeración por Compresión de Vapor (SRCV).
- Control de SRCV.
- Optimización en SRCV.
- Líneas de trabajo propuestas.

Introducción

- **SRCV**: método más utilizado a nivel mundial para generación de frío a nivel doméstico, comercial e industrial.
- Consumo energético de un supermercado ([Van Baxter, 2002](#)) del orden de 1.5M kWh/año.
- Consumo energético en oficinas de sistema de acondicionamiento de aire en torno al 30% del consumo total en países desarrollados ([Pérez-Lombard, 2008](#)).
- Necesidad de **mejorar su eficiencia** debido a la gran demanda energética).

Introducción

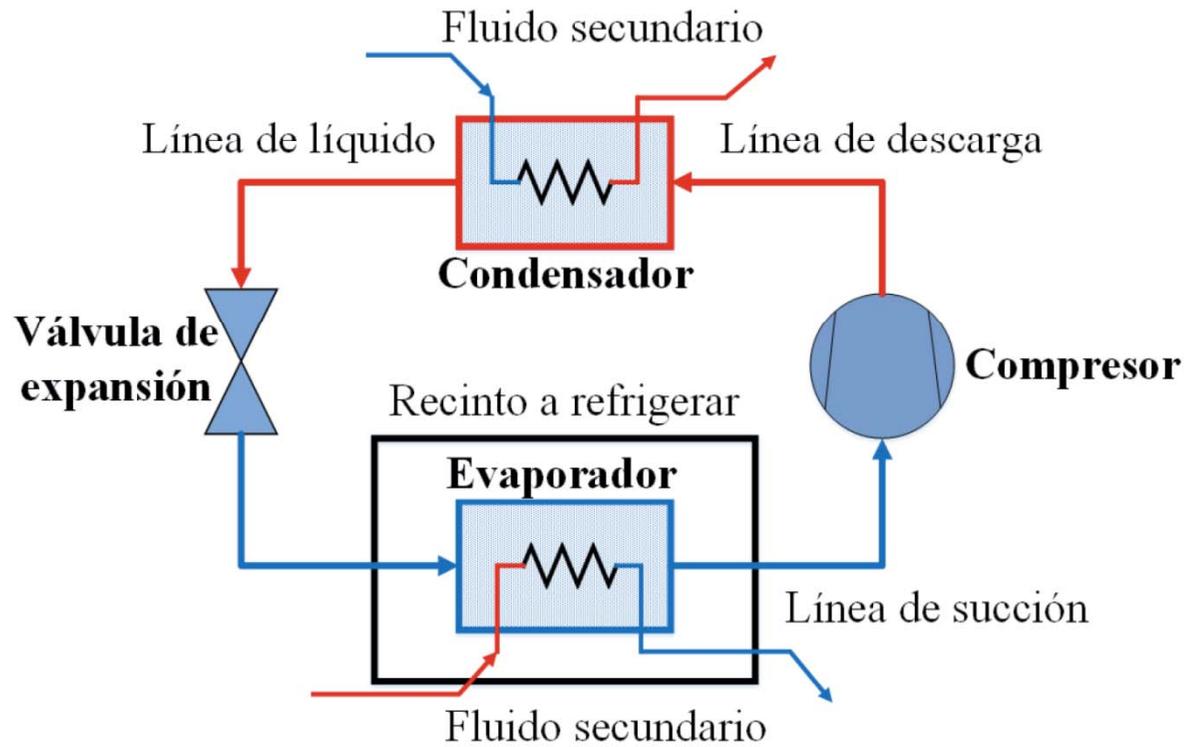
- Líneas de actuación para la mejora de la eficiencia y reducción del impacto sobre el medio ambiente:
 - Rediseño de intercambiadores de calor (condensadores y evaporadores).
 - Nuevos actuadores electrónicos regulables.
 - Detección automática de anomalías y degradaciones.
 - **Operación del sistema en condiciones óptimas de trabajo, optimizando el coeficiente de comportamiento (COP).**
 - Refrigerantes seguros para el medio ambiente e inocuos para la capa de ozono.

Introducción

- En la actualidad, poca flexibilidad en la operación: sistemas muy rígidos con actuadores todo-nada ([Sarabia, 2009](#)).
- Se puede llegar a reducir el consumo energético hasta un 30% ajustando referencias según condiciones ambientales ([Larsen, 2004](#)).
- Algunos estudios de mejoras energéticas por el uso de actuadores regulables (válvulas de expansión electrónicas y compresores de velocidad variable) en ([Tassou, 1998](#)), ([Aprea, 2002](#)), ([Pottker, 2007](#)), ...

Introducción

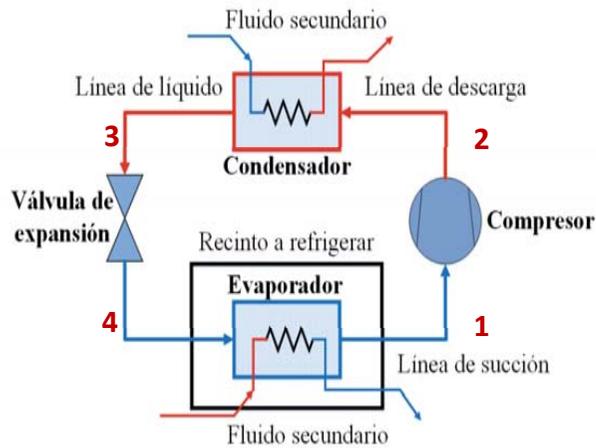
- SRCV (una etapa):



(Rodríguez, 2011)

Introducción

- SRCV (una etapa):

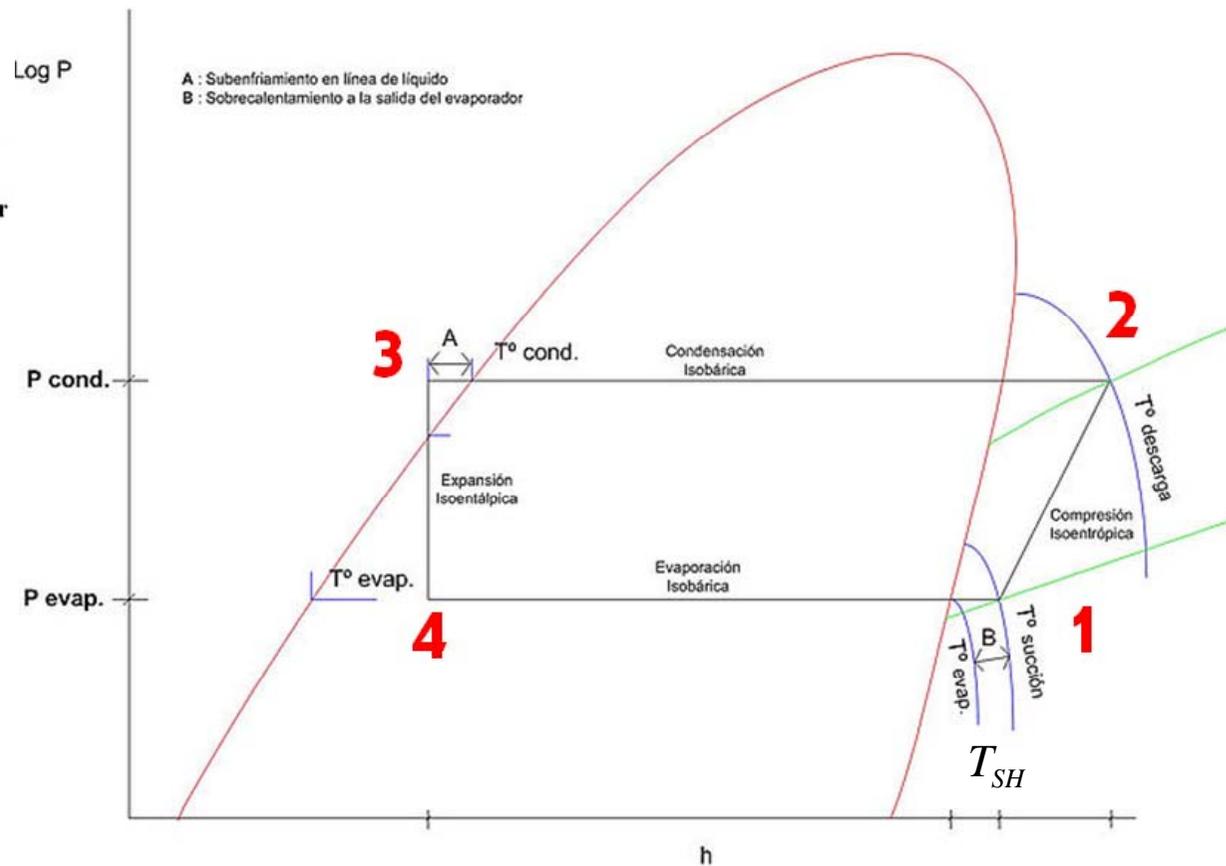


Coef. Comportamiento:

$$COP = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1}$$

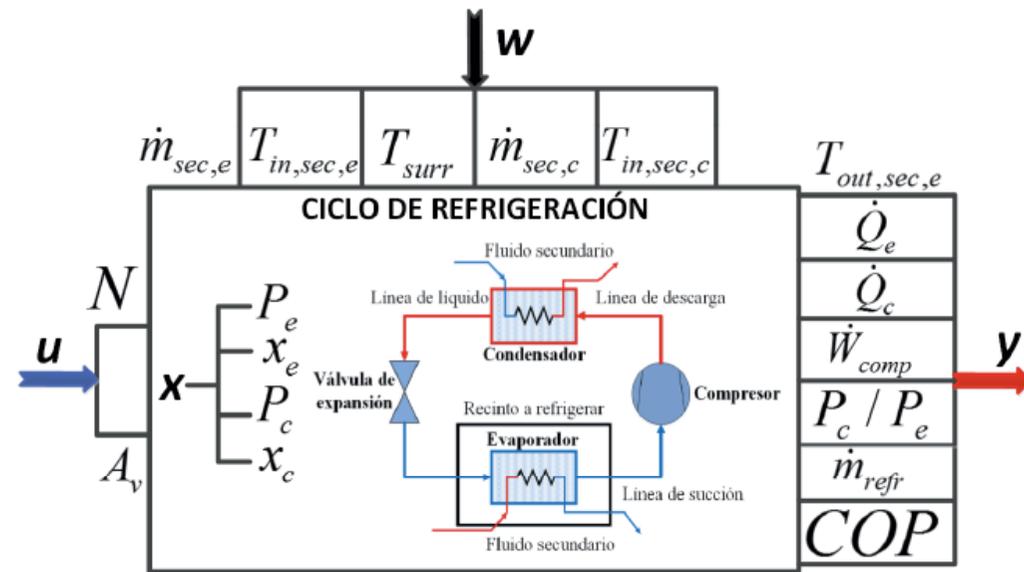
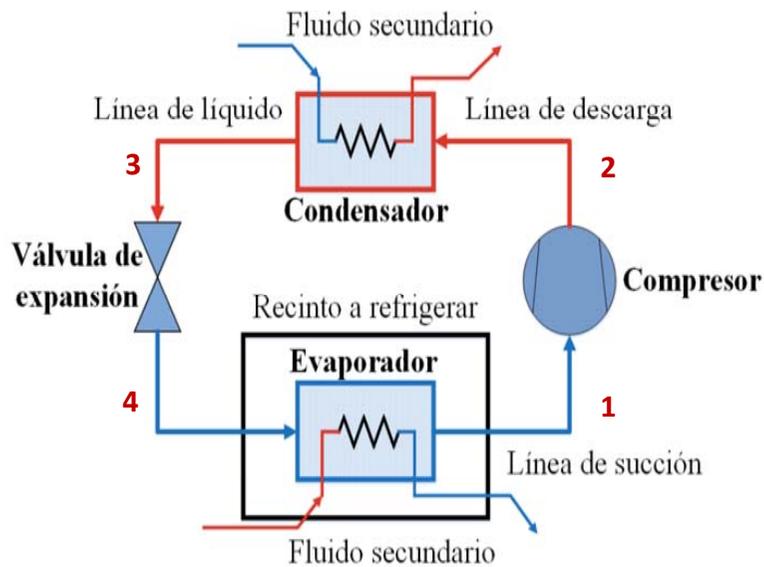
Capacidad de carga frigorífica:

$$\dot{Q}_e = \dot{m}_{ev} (h_1 - h_4)$$



Introducción

- SRCV (una etapa):



Sistema multivariable, no lineal y altamente acoplado

Índice

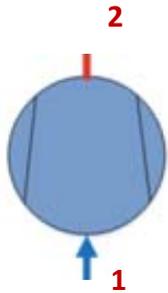
- Introducción.
- Modelado de Sistemas de Refrigeración por Compresión de Vapor (SRPV).
- Control de SRPV.
- Optimización en SRCV.
- Líneas de trabajo propuestas.

Modelado de SRCV

- Modelos modulares por componentes.
- Los modelos del compresor de vapor y de la válvula suelen ser estáticos.
- La dinámica del sistema se suele modelar en los intercambiadores (condensador y evaporador).
 - Parámetros distribuidos.
 - Modelos de fronteras deslizantes (*Moving Boundaries Models*).
 - Modelos de fronteras deslizantes simplificados (Bejarano, 2013).
 - Modelos estáticos.

Modelado de SRCV

- Compresores de vapor:



- $\dot{m}_{comp} = \eta_V V \rho(p, h) N$

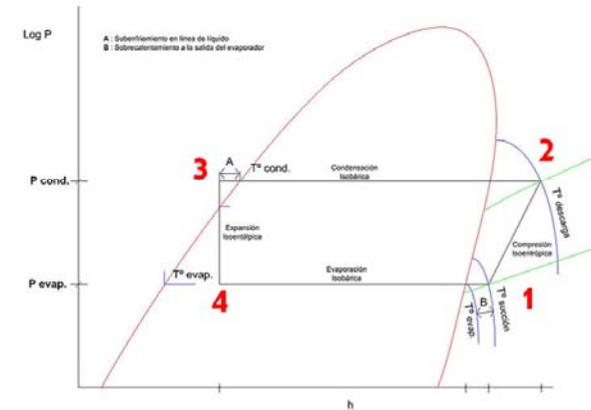
$$\eta_{isen} = \frac{h_{o,ideal} - h_i}{h_{o,real} - h_i}$$

No se fija la relación de presiones

- Válvulas de expansión:

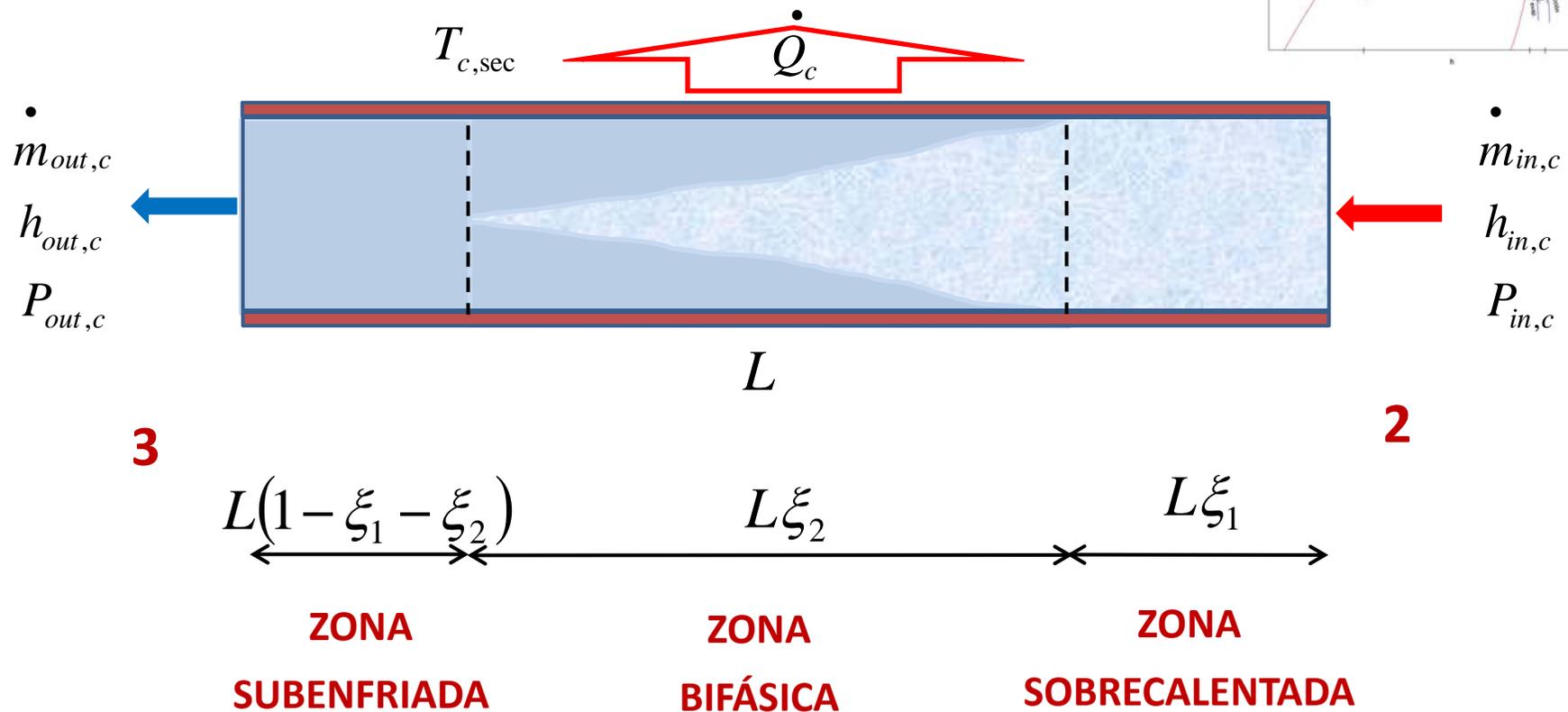
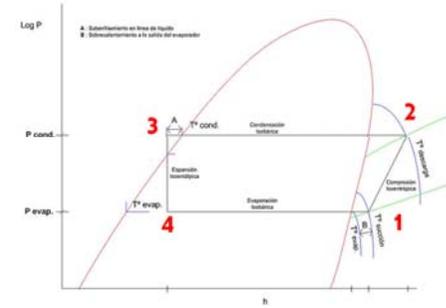


- $\dot{m}_{valv} = C_d A_o A_v \sqrt{2\rho(p, h)(P_e - P_c)}$



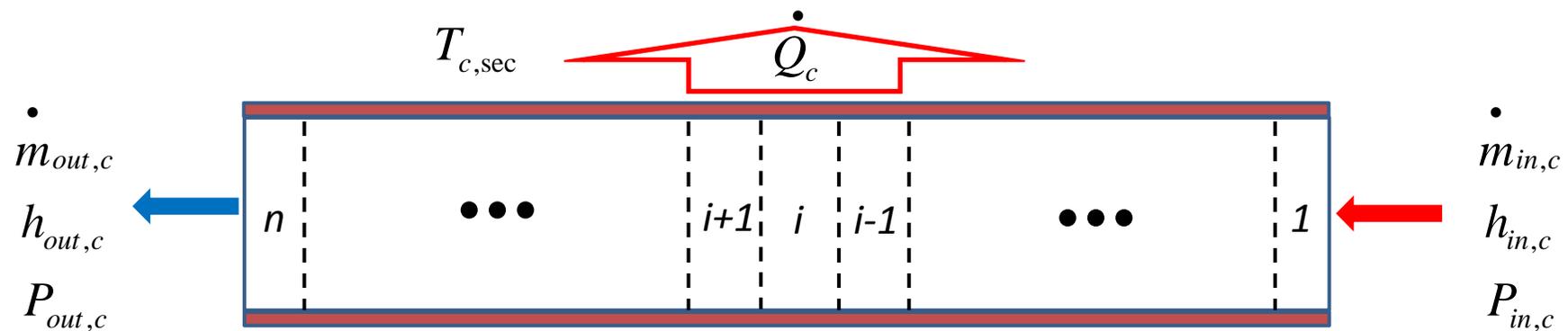
Modelado de SRCV

- Condensador (funcionamiento normal)



Modelado de SRCV

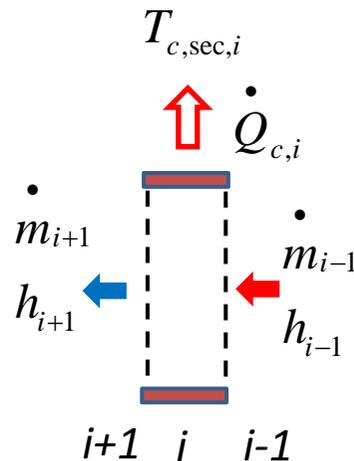
- Condensador (parámetros distribuidos)(Jia, 1999)



- Hipótesis:
 - Flujo unidimensional
 - Difusión de calor despreciable en dirección axial
 - Derivada espacial de presión a lo largo del intercambiador despreciable ($P_c = cte$)
 - Inercia térmica de las paredes despreciable

Modelado de SRCV

- Condensador (parámetros distribuidos):



$$V_i \frac{d\rho_i}{dt} = \dot{m}_{i-1} - \dot{m}_{i+1}$$

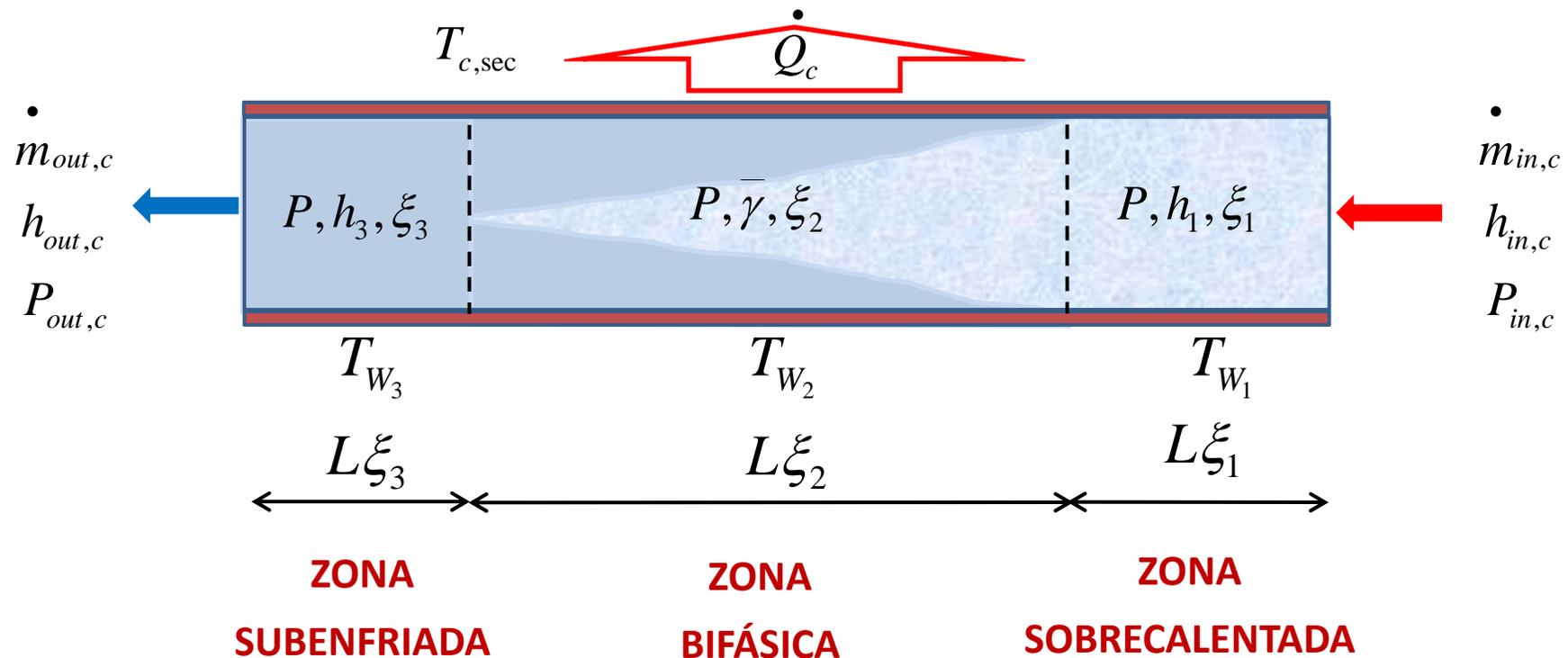
$$V_i \frac{d\rho_i h_i}{dt} = \dot{m}_{i-1} h_{i-1} - \dot{m}_{i+1} h_{i+1} - \dot{Q}_{c,i}$$

$$\dot{Q}_{c,i} \approx \alpha_i (P_i, h_i) (T_i - T_{c,sec,i})$$

- Observaciones:
 - Método genérico que puede aportar mucha información.
 - Evaluación de propiedades del refrigerante en biblioteca de programas.
 - Número de variables de estado: $n+1$, más las temperaturas de las paredes del tubo.
 - Muy costoso computacionalmente.
 - Problemas de *chattering* en las regiones fronteras, probablemente debido a coeficiente de transferencia de calor, α_i

Modelado de SRCV

- Condensador (Moving Boundaries)(McKinley, 2008)



$$x = [P, h_1, \xi_1, \bar{\gamma}, \xi_2, h_3, T_{W_1}, T_{W_2}, T_{W_3}]^T$$

Modelado de SRCV

- Condensador (Moving Boundaries)(Li, 2010)
- Hipótesis adicionales:
 - Cada región representada por valores medios energéticos.
 - Distribución lineal de la entalpía en zona bifásica.
- Observaciones:
 - Método genérico simplificado, permitiendo modos de funcionamiento anormales.
 - Mucho menos costos computacionalmente.
 - Número de variables de estado: 6, más las temperaturas de las paredes del tubo.
 - Ecuaciones diferenciales no lineales.
 - Posibles problemas numéricos con número de condición del sistema.

Modelado de SRCV

- Condensador (Moving Boundaries)(Li, 2010)

$$1) \frac{d\xi_1}{dt} + \frac{\xi_1}{\rho_1} \frac{\partial \rho_1}{\partial P} \frac{dP}{dt} + \frac{\xi_1}{\rho_1} \frac{\partial \rho_1}{\partial h_1} \frac{dh_1}{dt} + \frac{\dot{m}_{12}}{V\rho_1} = \frac{\dot{m}_{in,c}}{V\rho_1}$$

$$2) \frac{dh_1}{dt} + \frac{1}{\rho_1} \frac{dP}{dt} + \frac{(h_g - h_1)}{V\rho_1} \dot{m}_{12} = \frac{Q_{c,Z1} + \dot{m}_{in,c}(h_{in,c} - h_1)}{V\rho_1 \xi_1}$$

$$3) \frac{dh_1}{dt} = \frac{1}{2} \frac{dh_{in,c}}{dt} + \frac{1}{2} \frac{\partial \rho_g}{\partial P} \frac{dP}{dt} \quad \left(\Leftarrow h_1 = \frac{h_{in,c} + h_g}{2} \right)$$

$$4) \frac{d\xi_2}{dt} + \frac{\xi_2}{\rho_2} \frac{\partial \rho_2}{\partial P} \frac{dP}{dt} + \frac{(\dot{m}_{23} - \dot{m}_{12})}{V\rho_2} + \frac{\xi_2}{\rho_2} \frac{\partial \rho_2}{\partial \bar{\gamma}} \frac{d\bar{\gamma}}{dt} = 0$$

$$5) \left(\frac{\partial h_2}{\partial P} - \frac{1}{\rho_2} \right) \frac{dP}{dt} + \frac{h_f - h_2}{V\rho_2 \xi_2} \dot{m}_{23} - \frac{h_g - h_2}{V\rho_2 \xi_2} \dot{m}_{12} + \frac{\partial h_2}{\partial \bar{\gamma}} \frac{d\bar{\gamma}}{dt} = \frac{Q_{c,Z2}}{V\rho_2 \xi_2}$$

$$6) \frac{\partial \bar{\gamma}_{TOT}}{\partial P} \frac{dP}{dt} - K_\gamma (\bar{\gamma} - \bar{\gamma}_{TOT}) = \frac{d\bar{\gamma}}{dt}$$

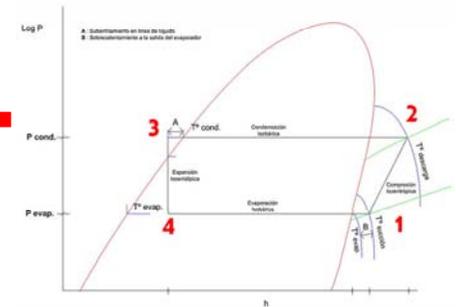
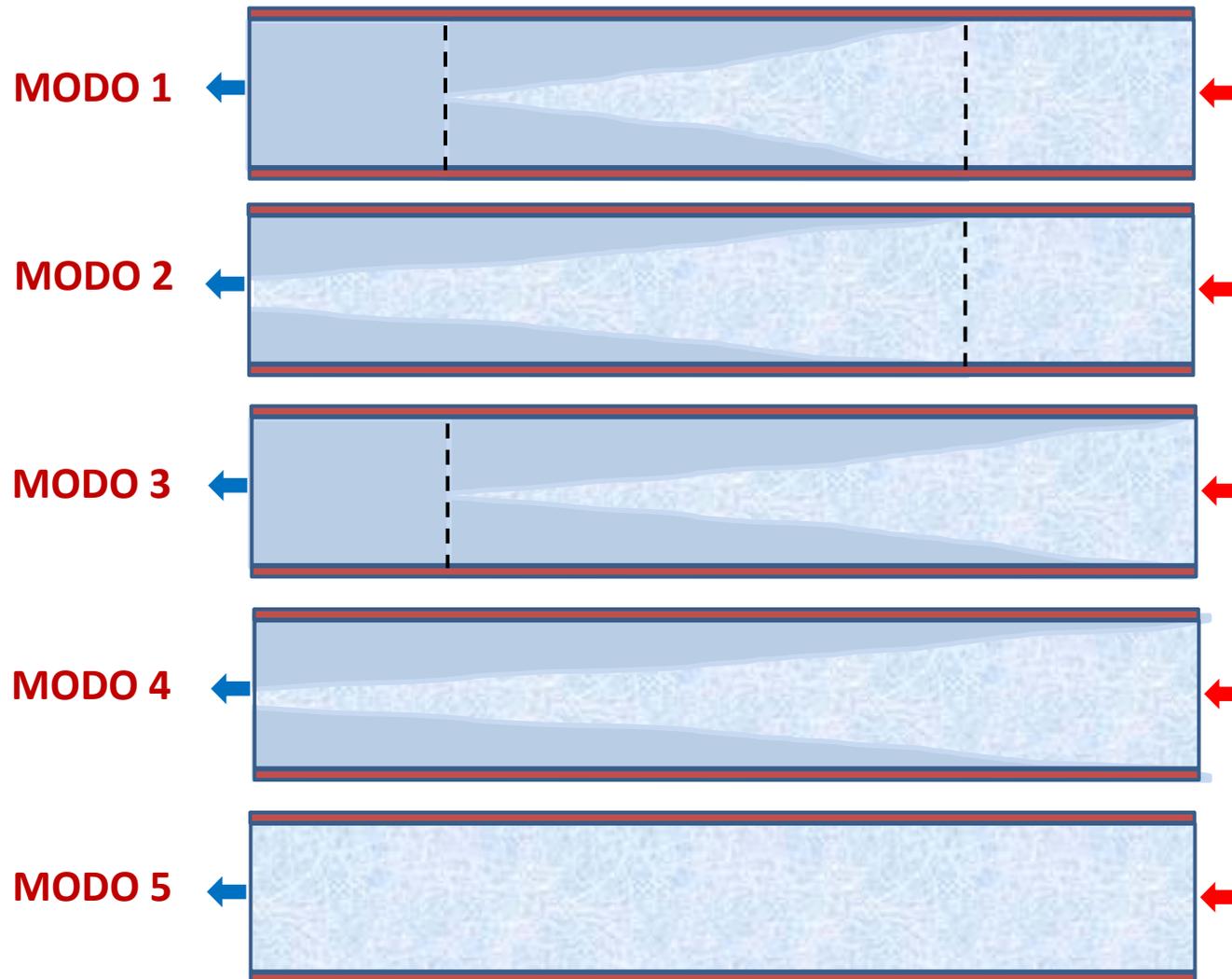
$$7) \frac{d\xi_1}{dt} + \frac{d\xi_2}{dt} - \frac{1 - \xi_1 - \xi_2}{\rho_3} \frac{\partial \rho_3}{\partial h_3} \frac{dh_3}{dt} + \frac{\dot{m}_{23}}{V\rho_3} = \frac{\dot{m}_{out,c}}{V\rho_3}$$

$$8) \frac{dh_3}{dt} - \frac{(h_f - h_3)}{V\rho_3(1 - \xi_1 - \xi_2)} \dot{m}_{23} + \frac{1}{\rho_3} \frac{dP}{dt} = \frac{Q_{c,Z3} - \dot{m}_{out,c}(h_{out,c} - h_3)}{V\rho_3(1 - \xi_1 - \xi_2)} \quad 1)$$

$$x = \begin{bmatrix} P \\ h_1 \\ \xi_1 \\ \bar{\gamma} \\ \xi_2 \\ h_3 \end{bmatrix}$$

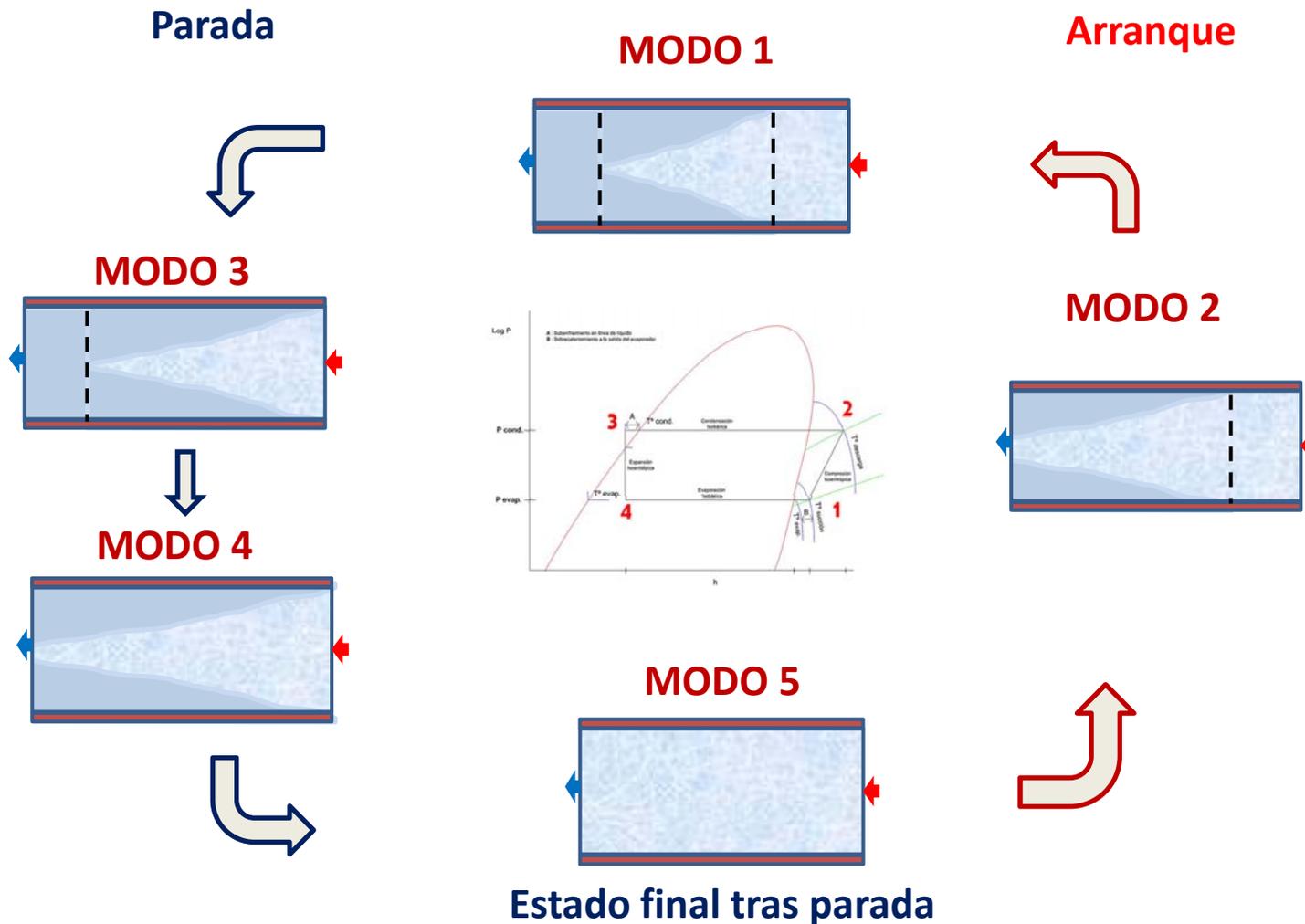
Modelado de SRCV

- Condensador (Moving Boundaries)(Li, 2010)



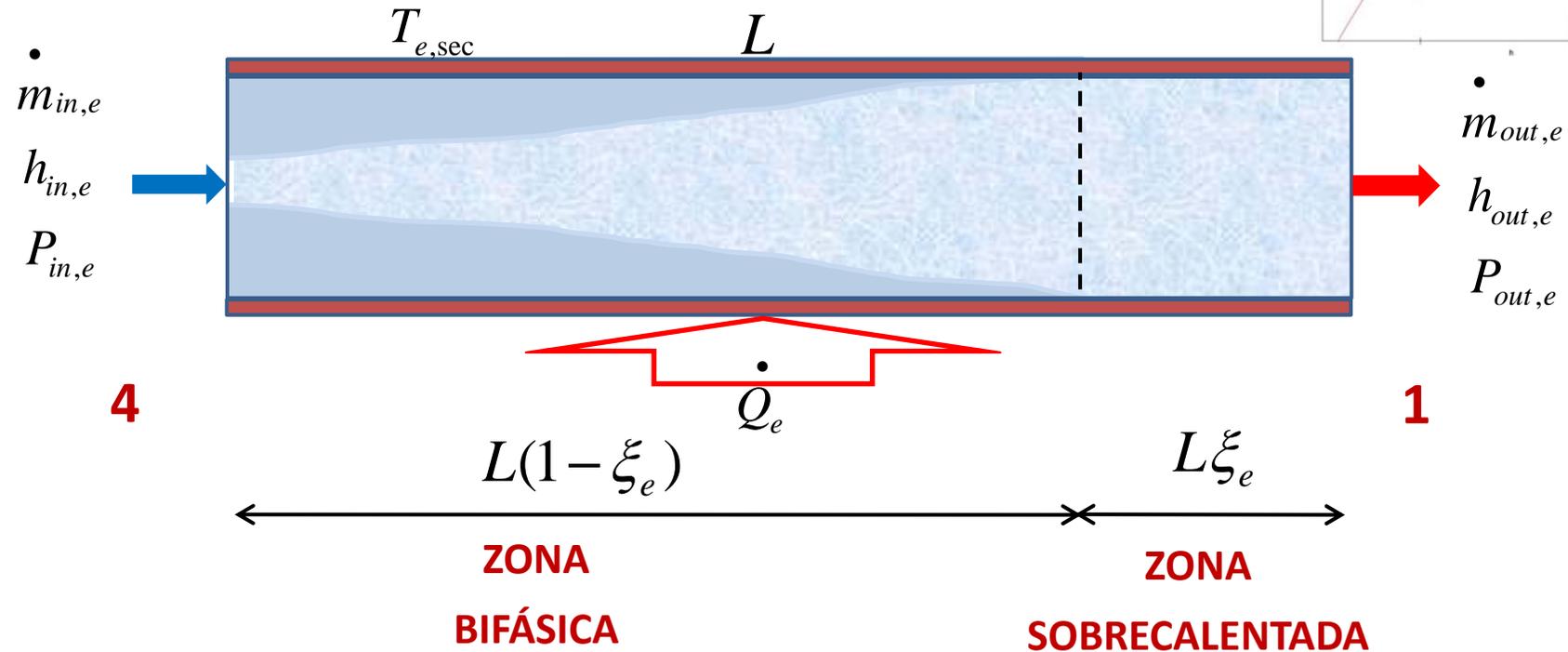
Modelado de SRCV

- Condensador (Moving Boundaries)(Li, 2010)



Modelado de SRCV

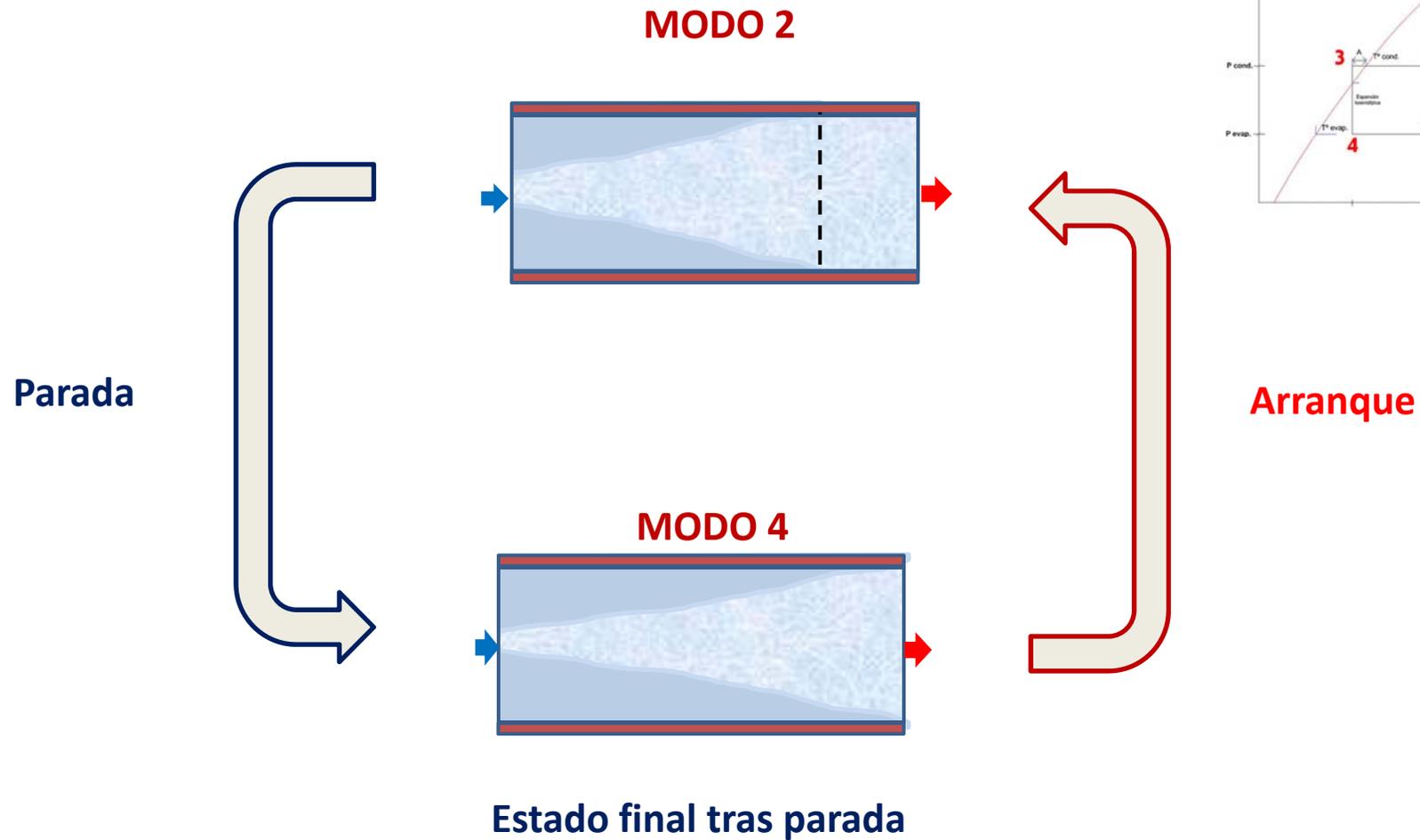
- Evaporador (funcionamiento normal)



- Modelado similar al del condensador
- Solo dos modos de funcionamiento (Modos 2 y 4)

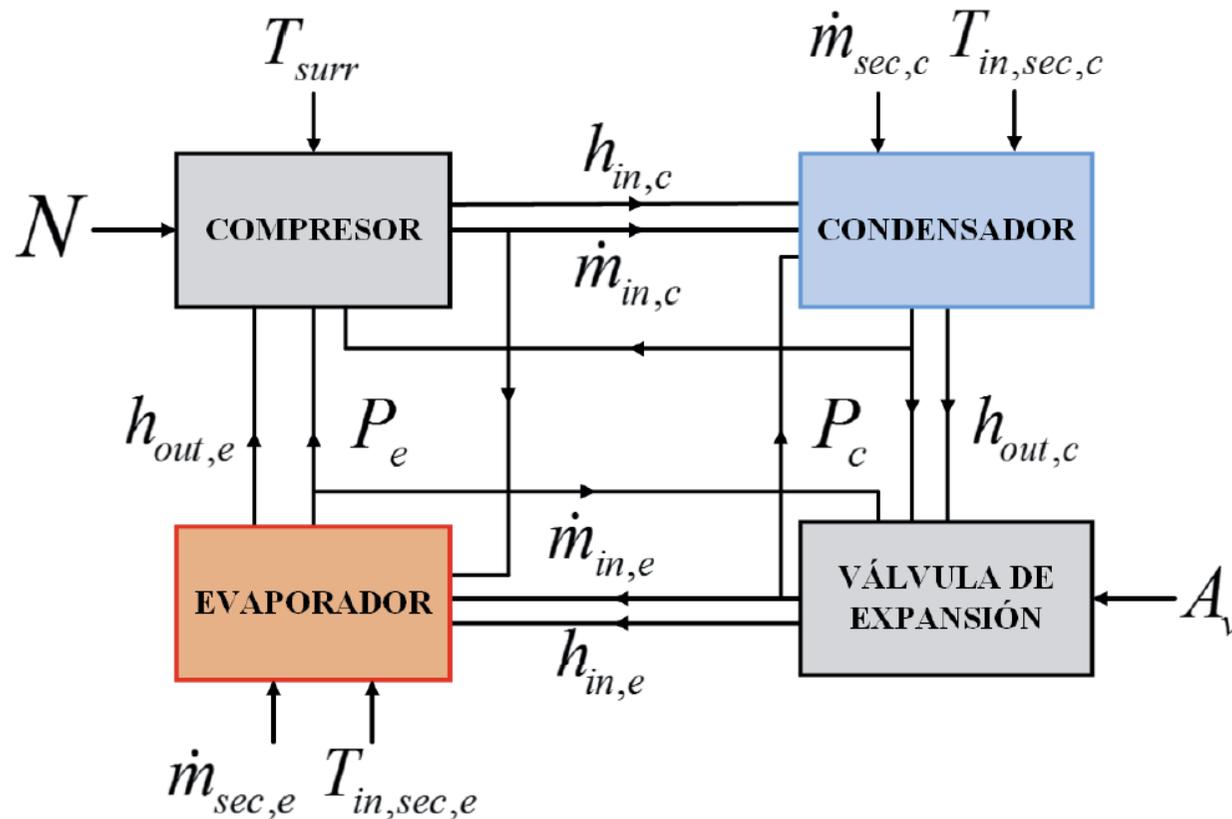
Modelado de SRCV

- Evaporador (Moving Boundaries)(Li, 2010)



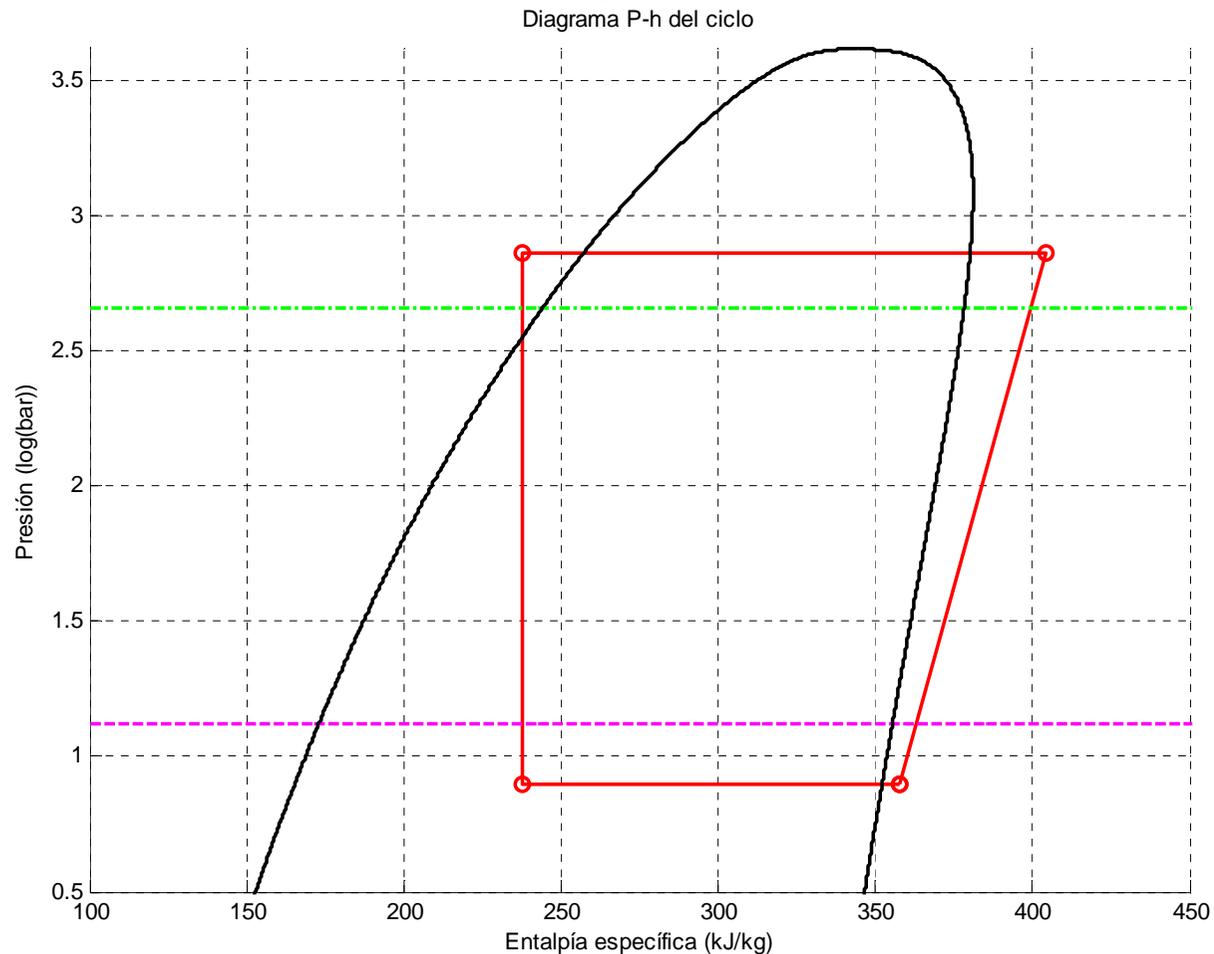
Modelado de SRCV

- Interconexión de submodelos:



Resultados de simulación

- Refrigerante: R134a
- Condiciones de operación:



$$T_{c,in} \approx 57^{\circ} C$$

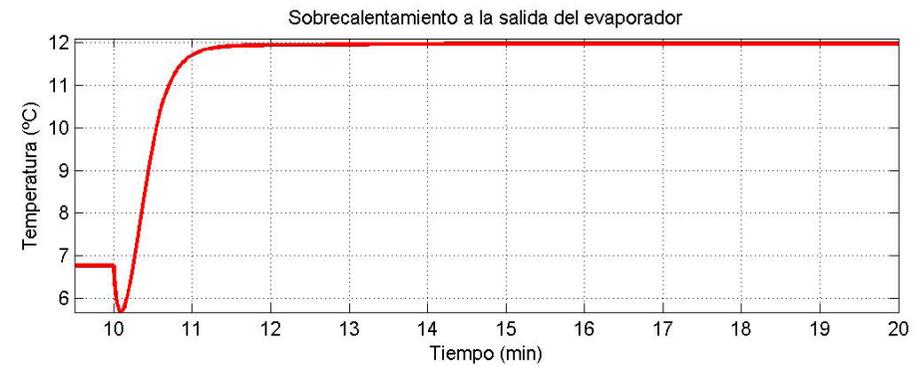
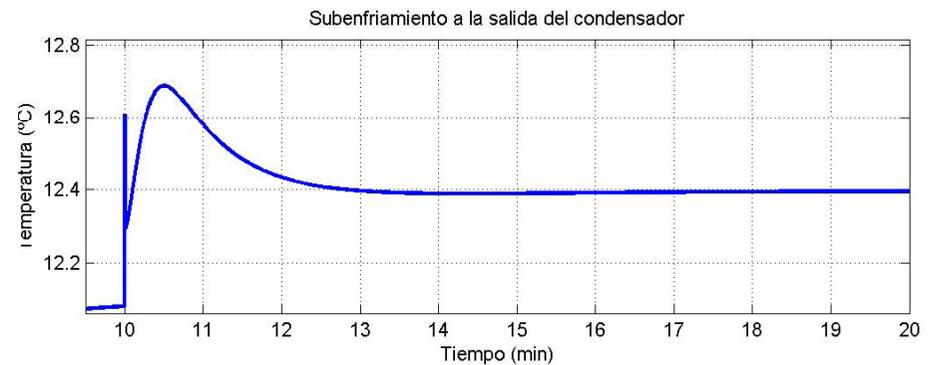
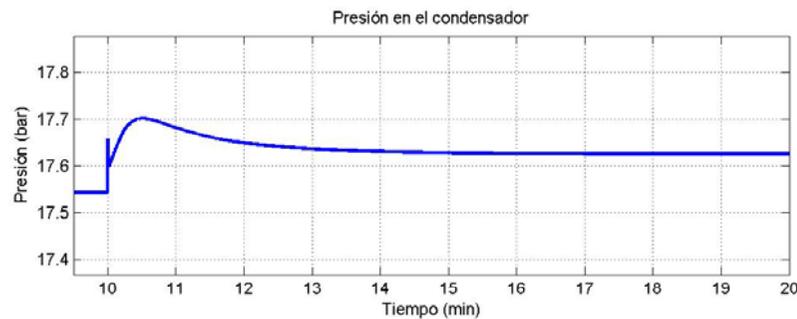
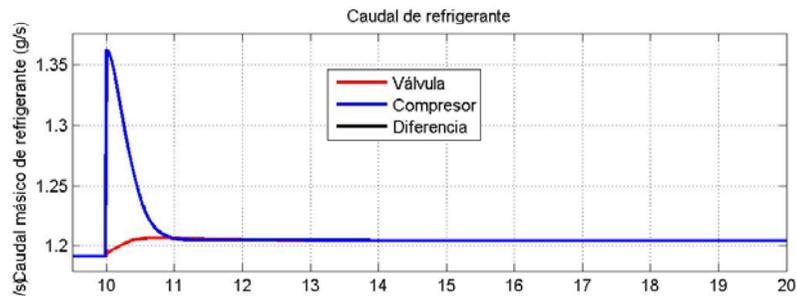
$$T_{c,sec,in} = 30^{\circ} C$$

$$T_{e,in} = -25,5^{\circ} C$$

$$T_{e,sec,in} = -20^{\circ} C$$

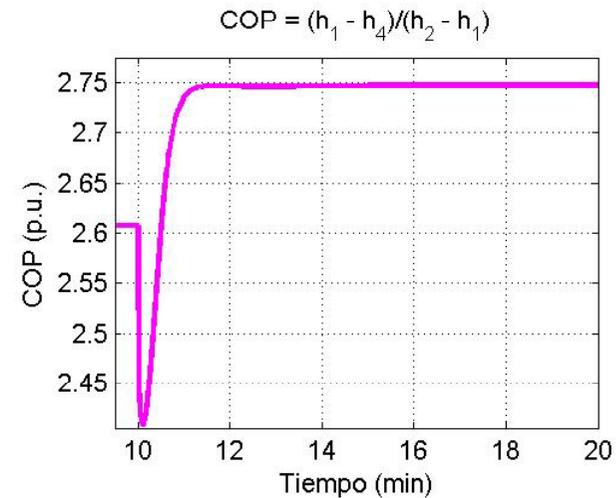
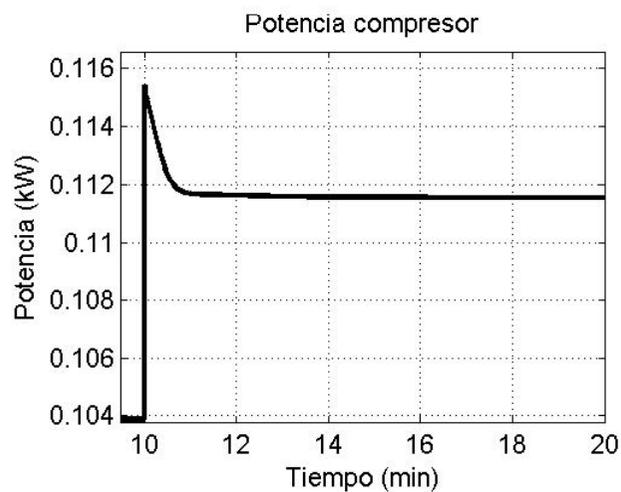
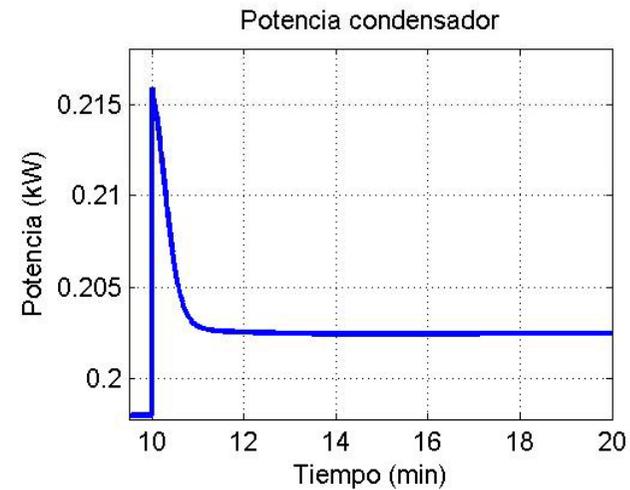
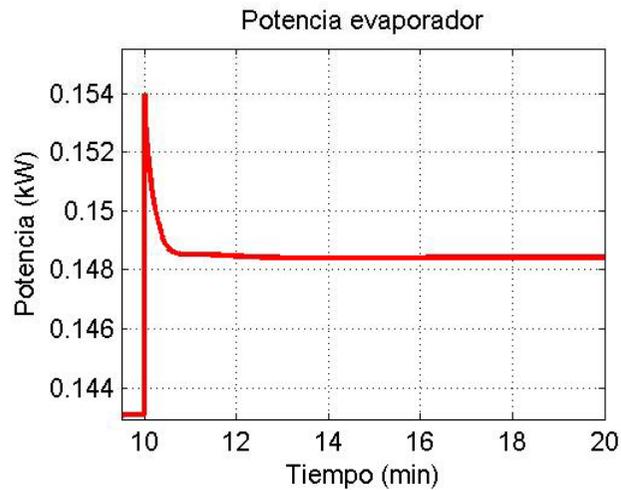
Resultados de simulación

- Variación de N (3500 a 4000 rpm):



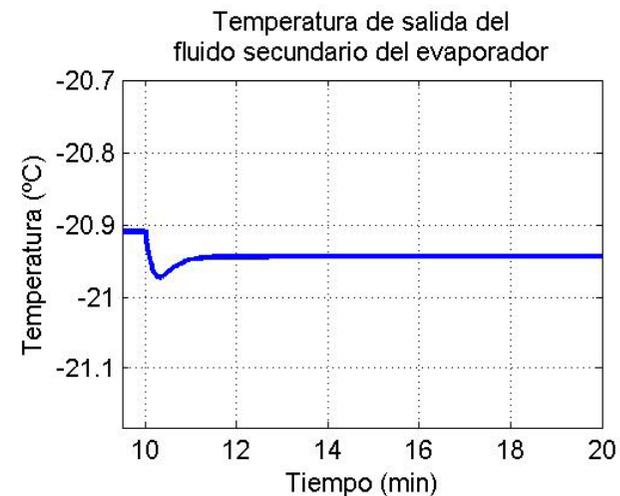
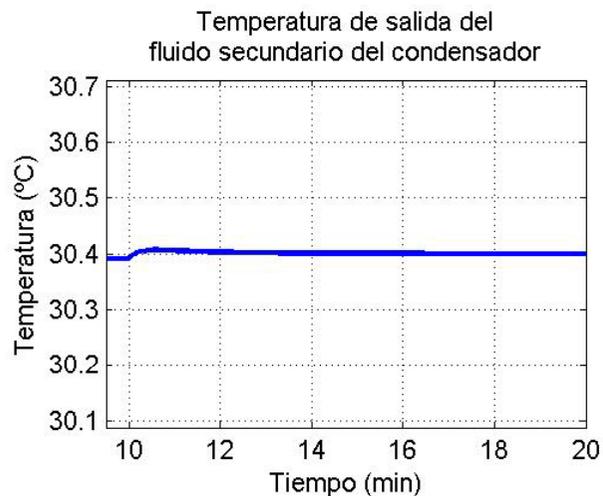
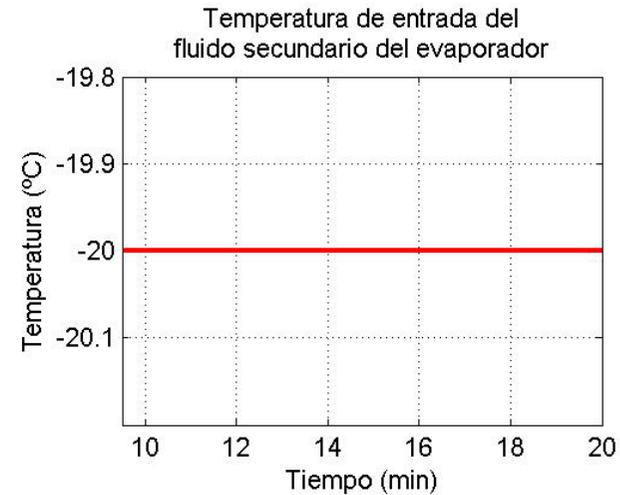
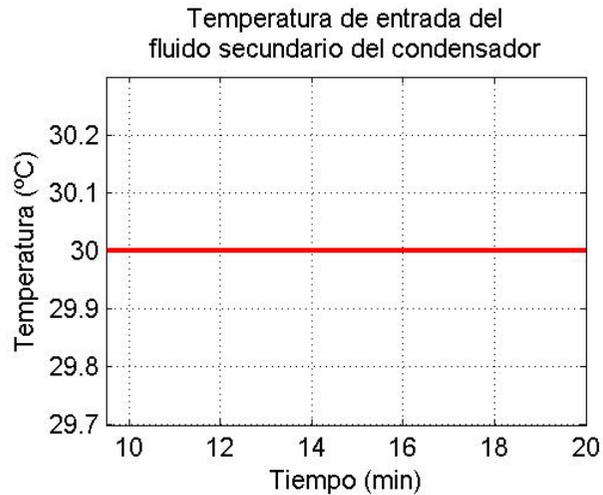
Resultados de simulación

- Variación de N (3500 a 4000 rpm):



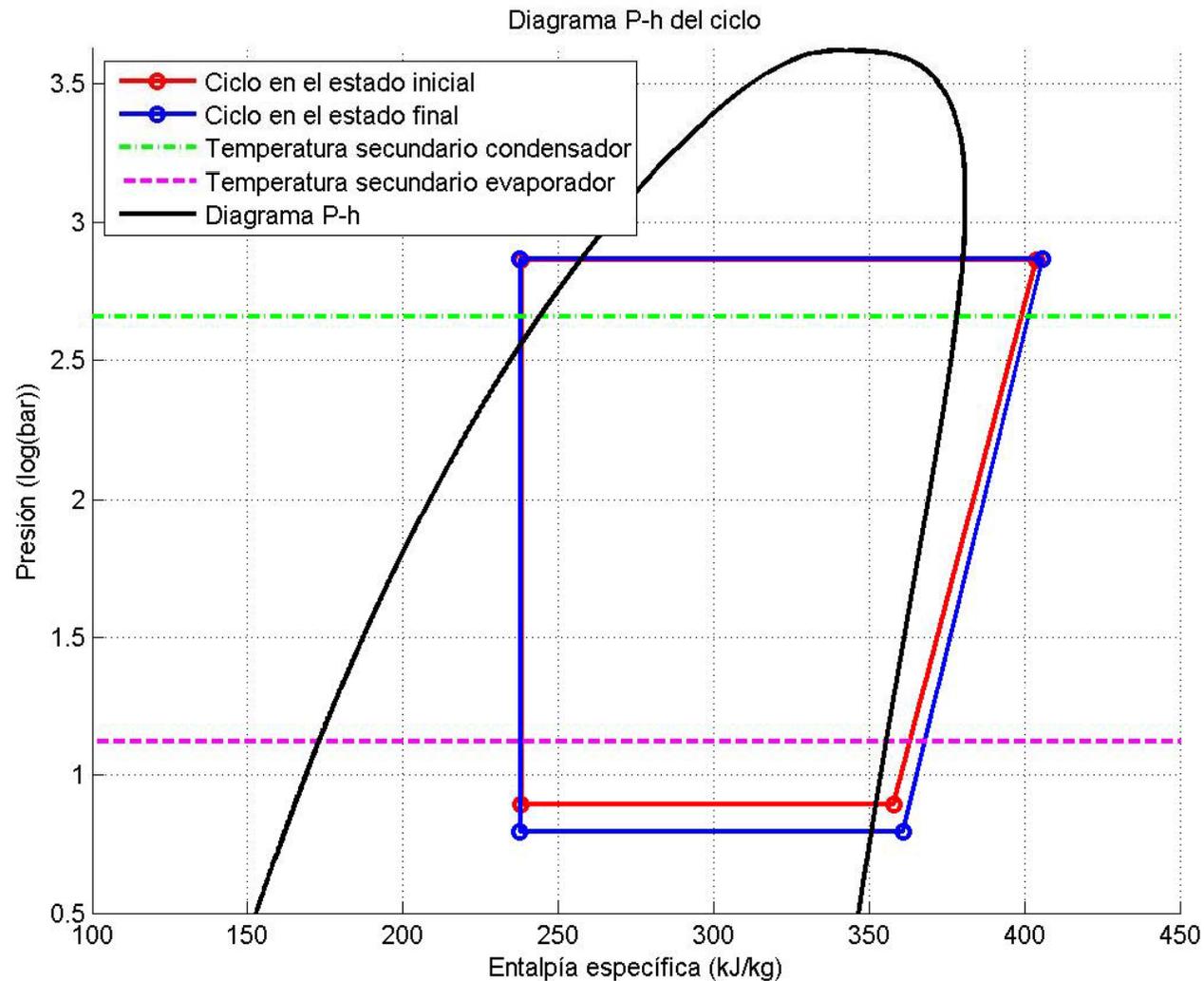
Resultados de simulación

- Variación de N (3500 a 4000 rpm):



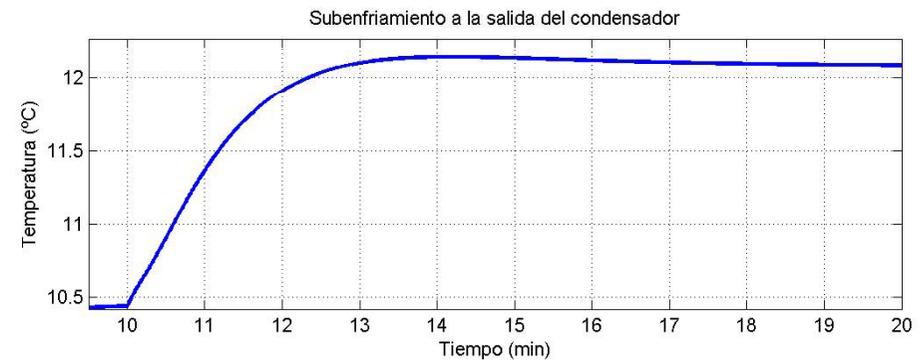
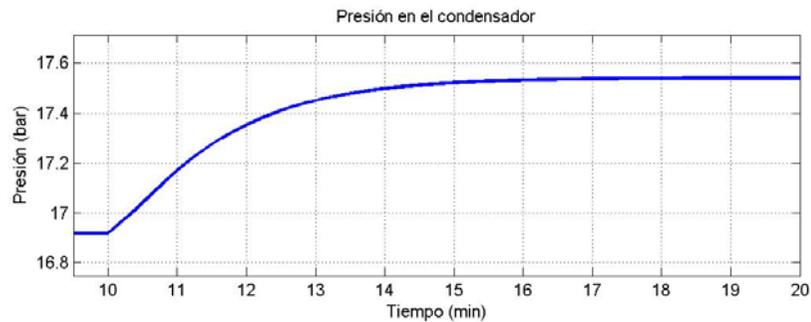
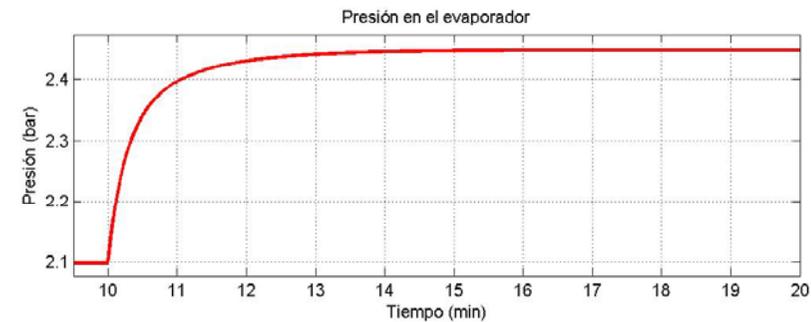
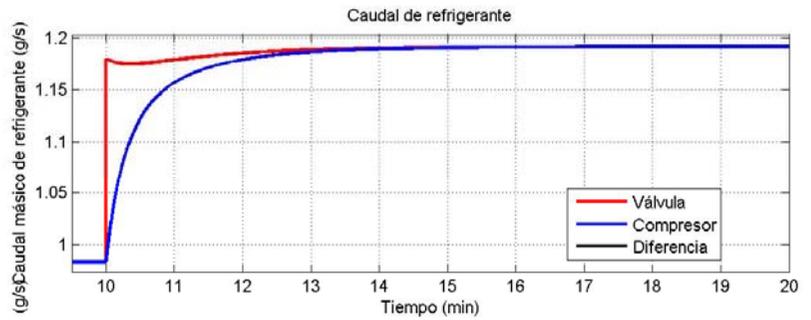
Resultados de simulación

- Variación de N (3500 a 4000 rpm):



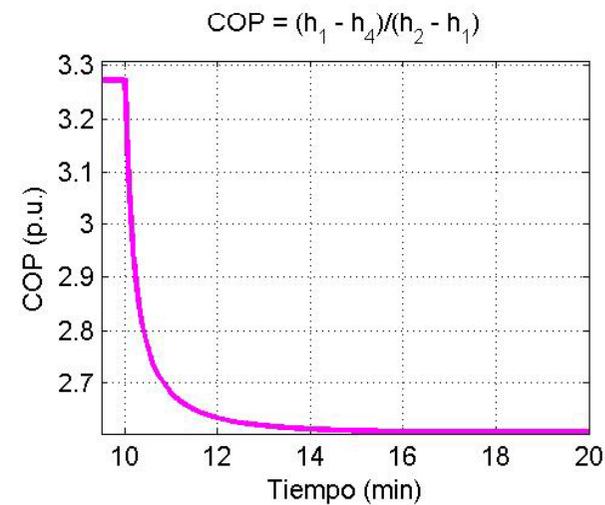
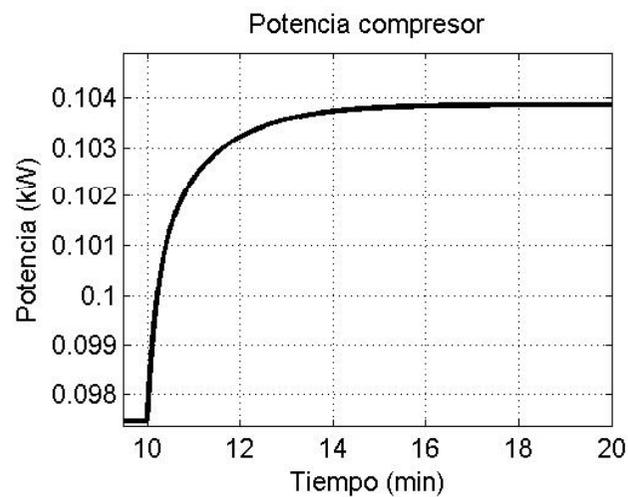
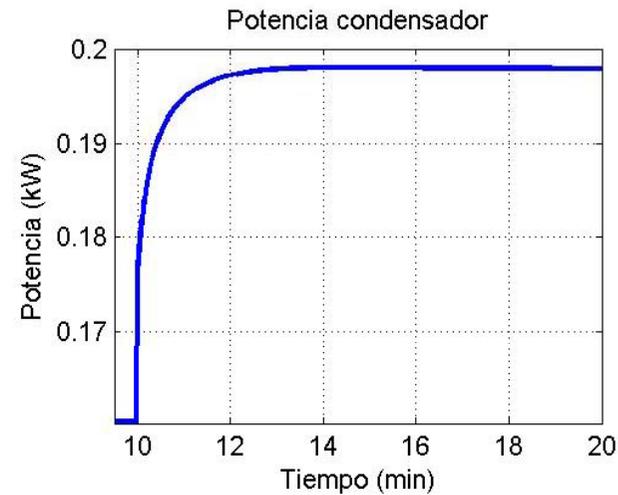
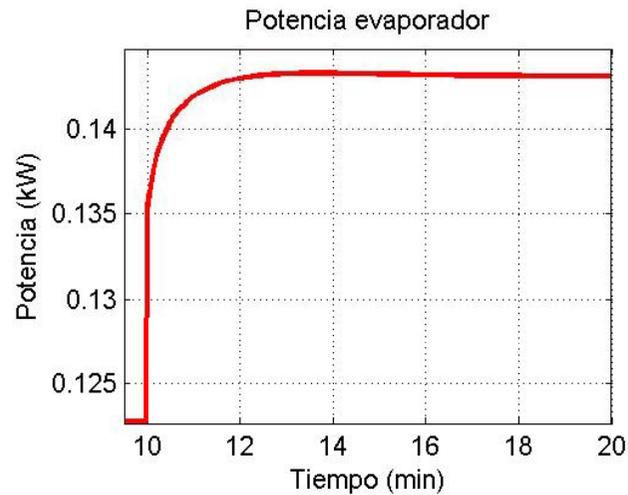
Resultados de simulación

- Variación de A_v (en un 2%):



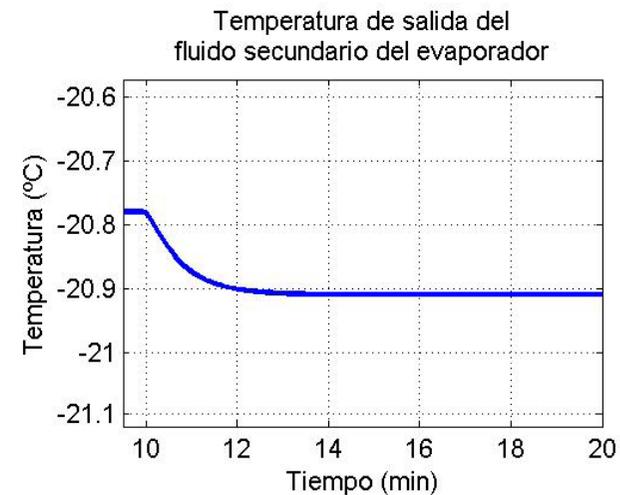
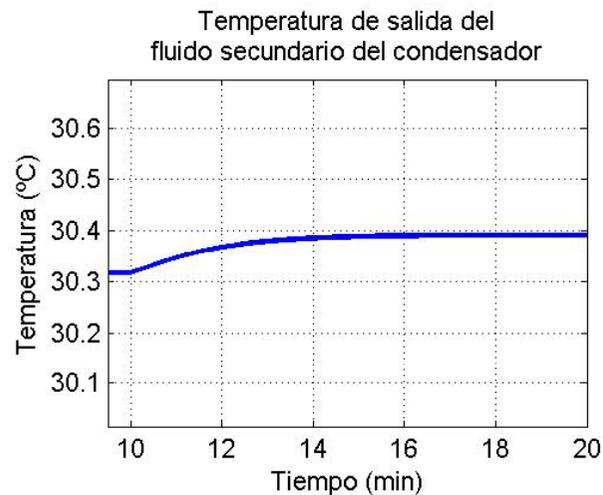
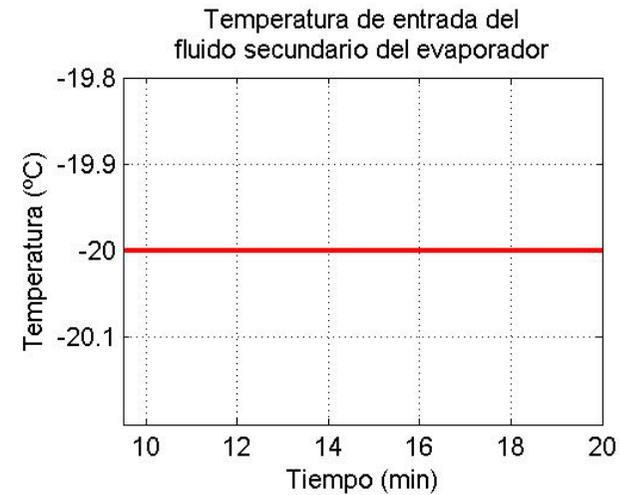
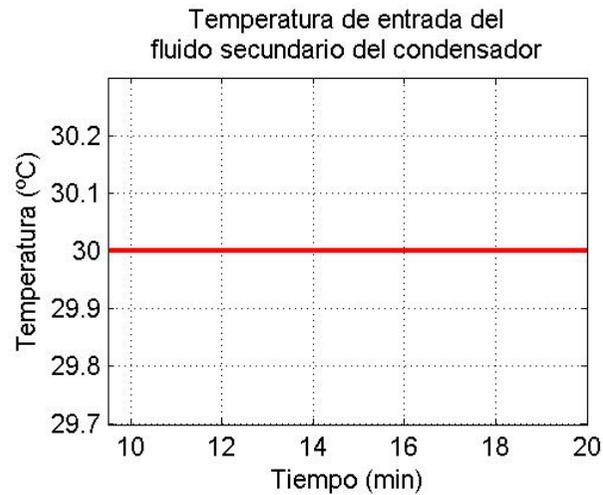
Resultados de simulación

- Variación de A_v (en un 2%):



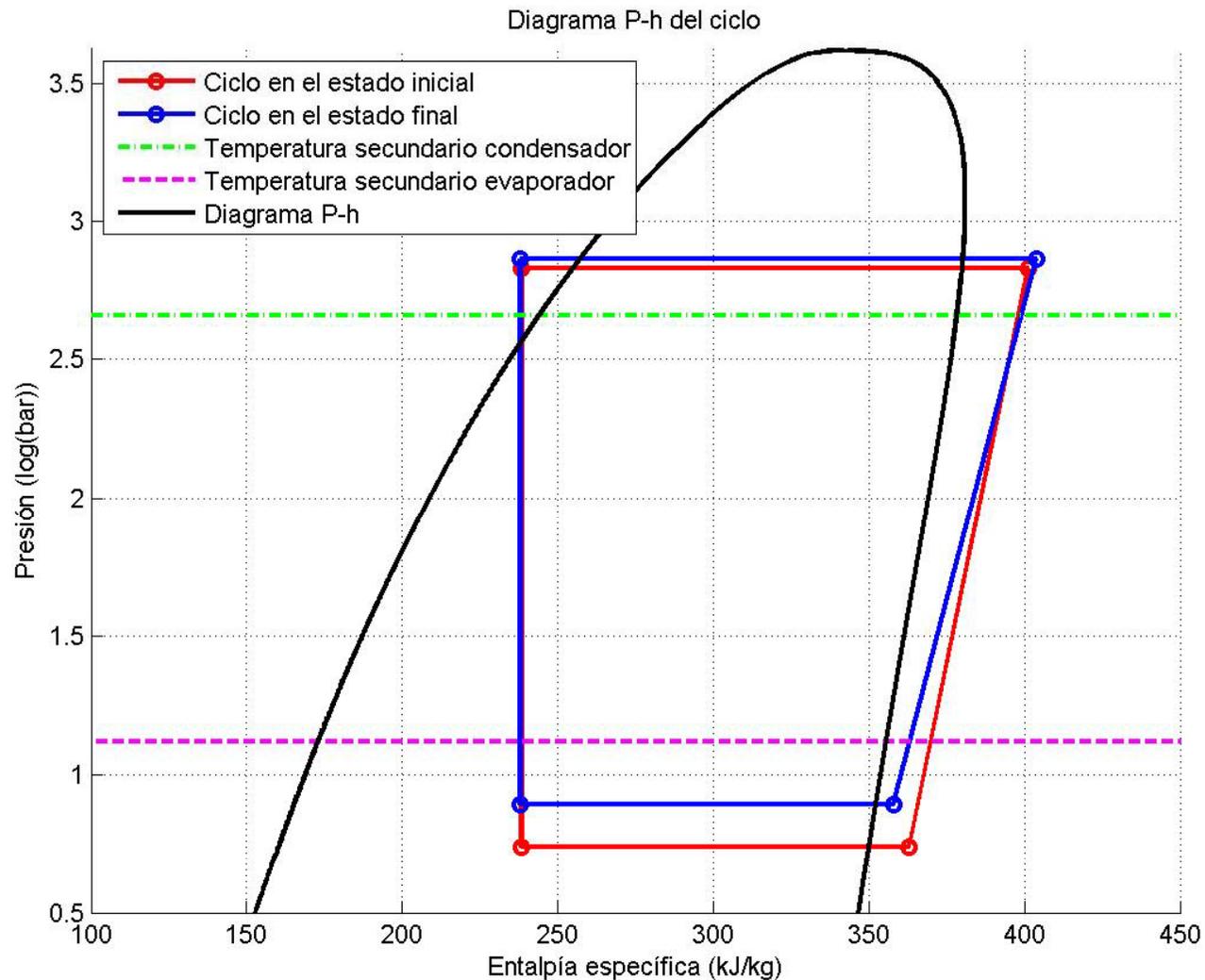
Resultados de simulación

- Variación de A_v (en un 2%):



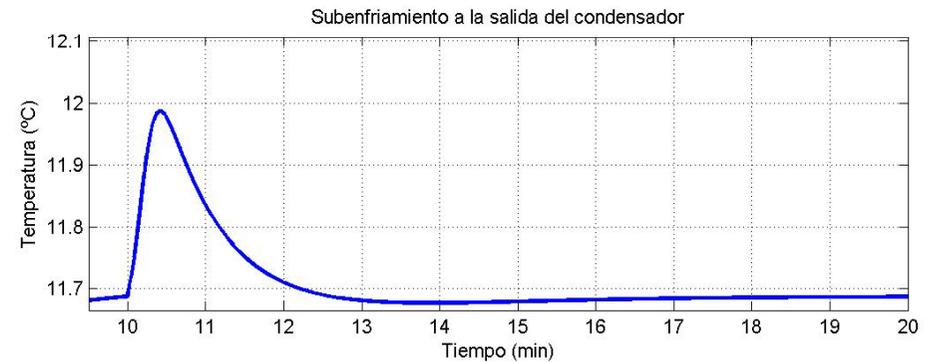
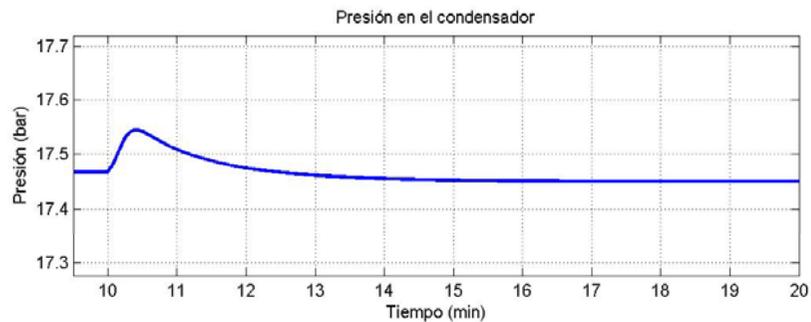
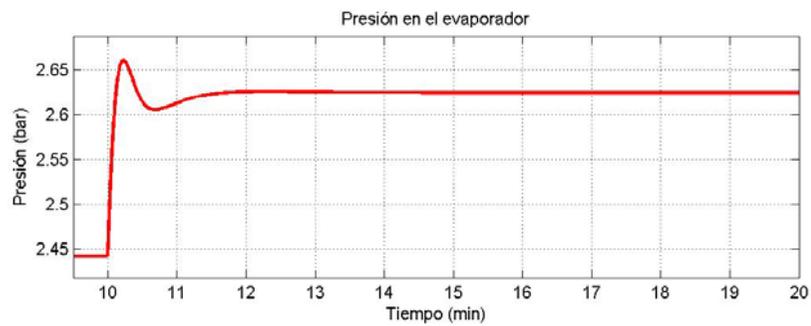
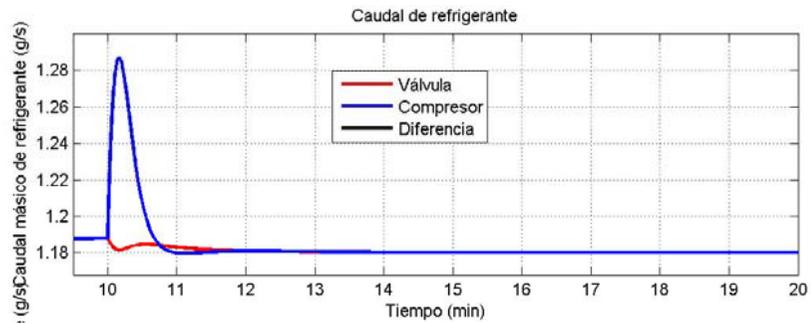
Resultados de simulación

- Variación de A_v (en un 2%):



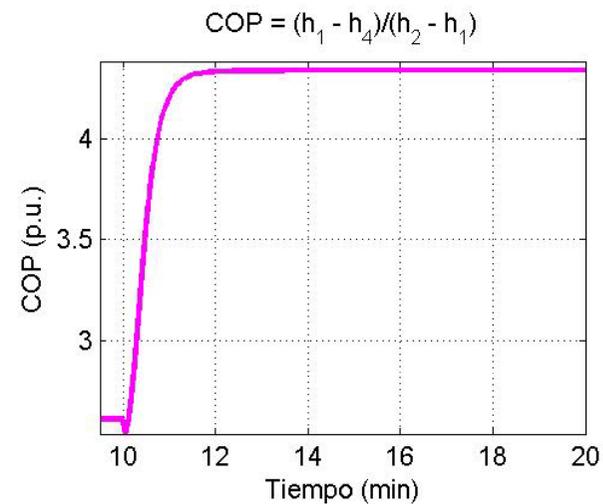
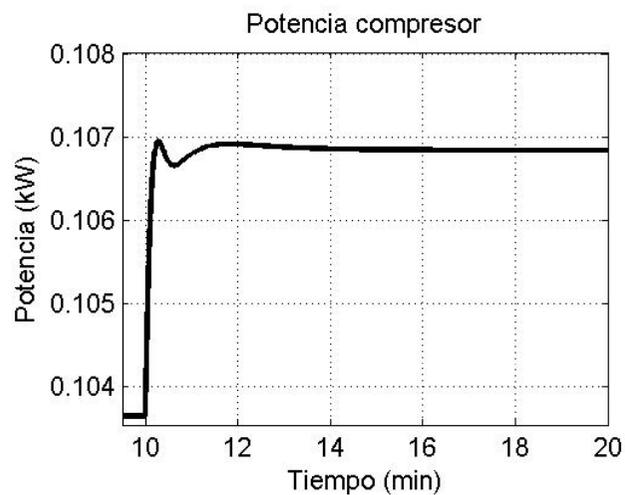
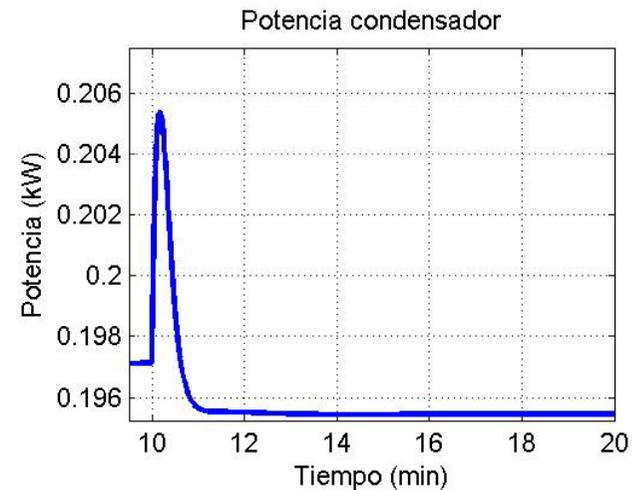
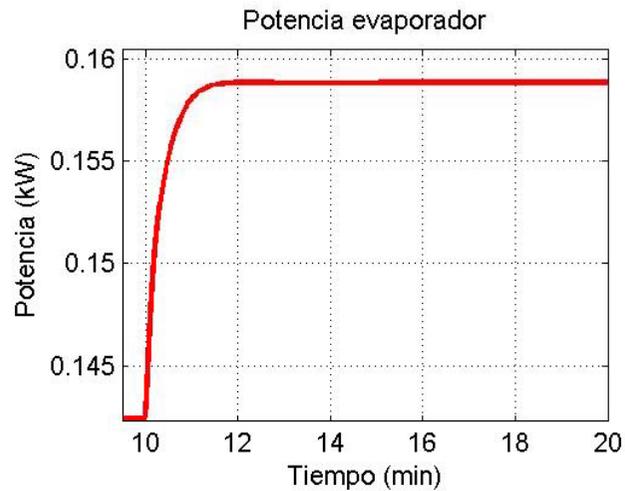
Resultados de simulación

- Variación de $T_{e,sec}$ (desde -20°C a -10°C):



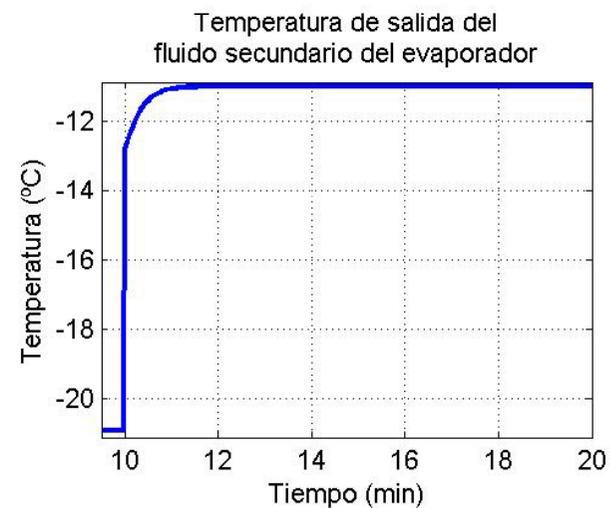
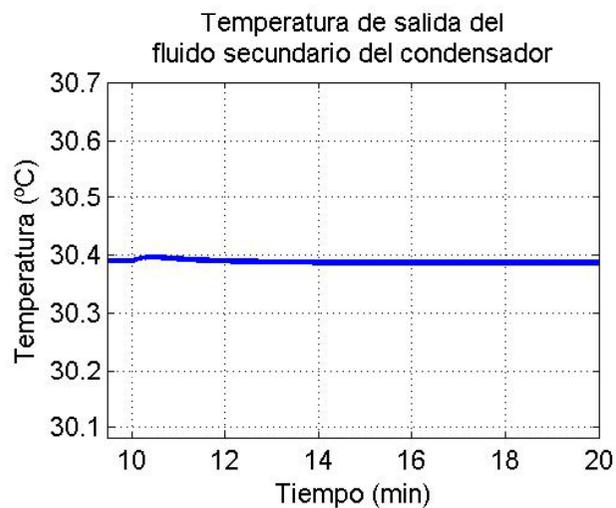
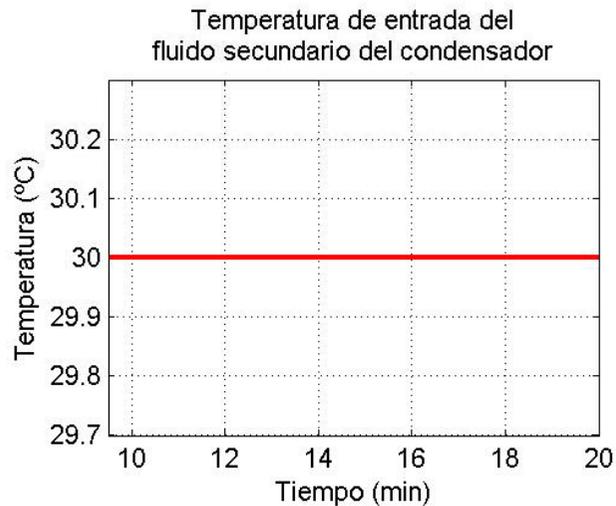
Resultados de simulación

- Variación de $T_{e,sec}$ (desde -20°C a -10°C):



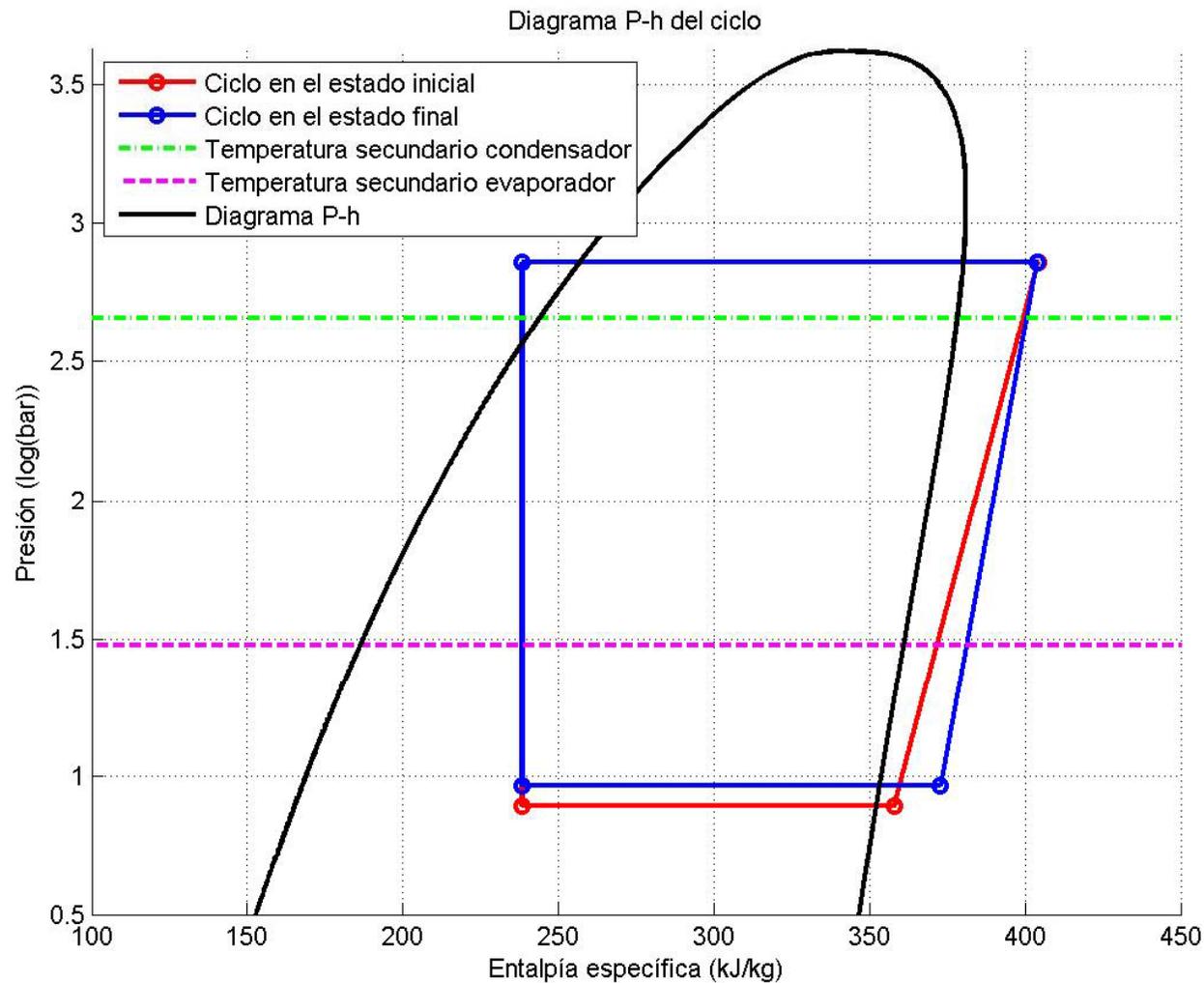
Resultados de simulación

- Variación de $T_{e,sec}$ (desde -20°C a -10°C):



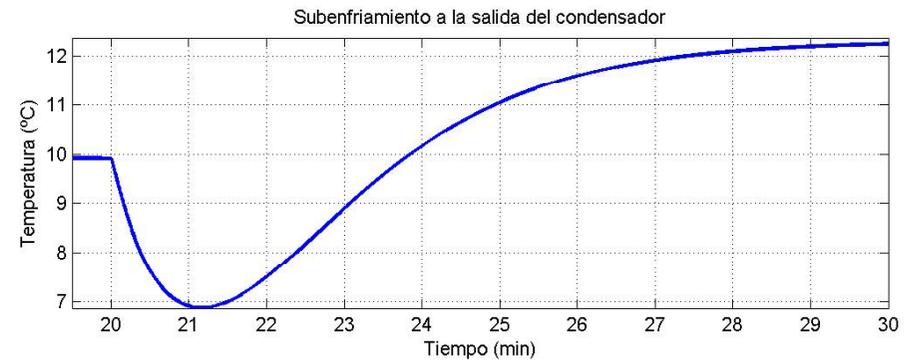
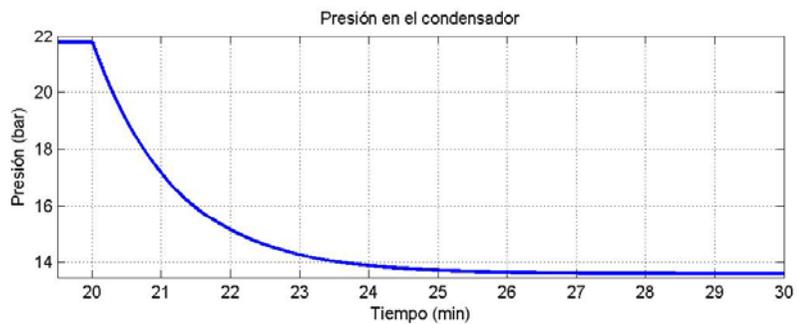
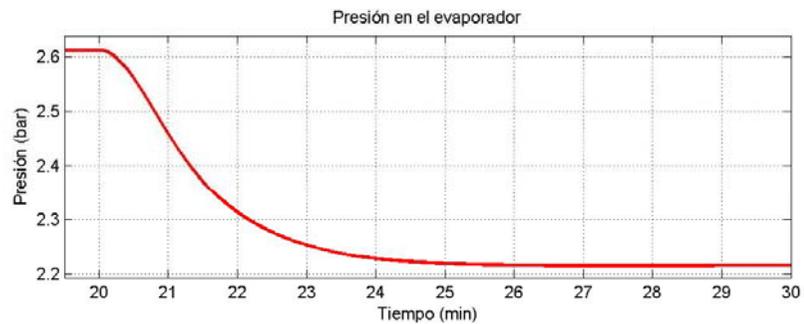
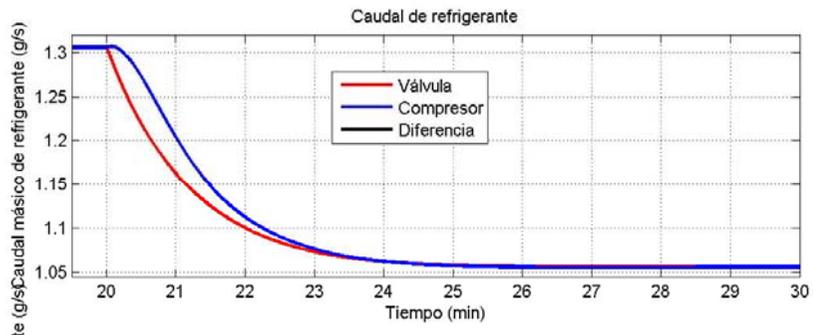
Resultados de simulación

- Variación de $T_{e,sec}$ (desde -20°C a -10°C):



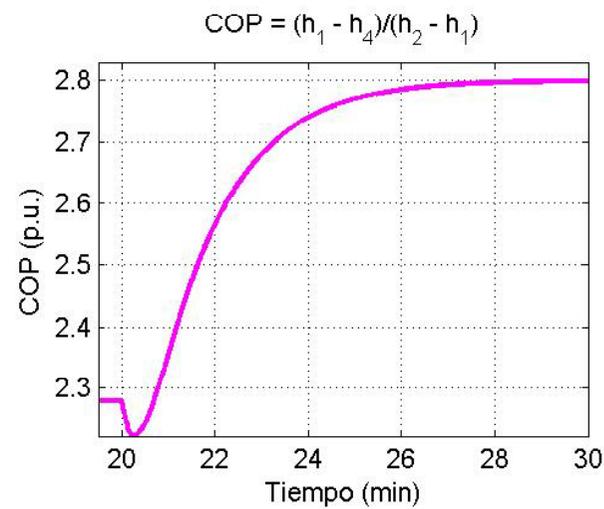
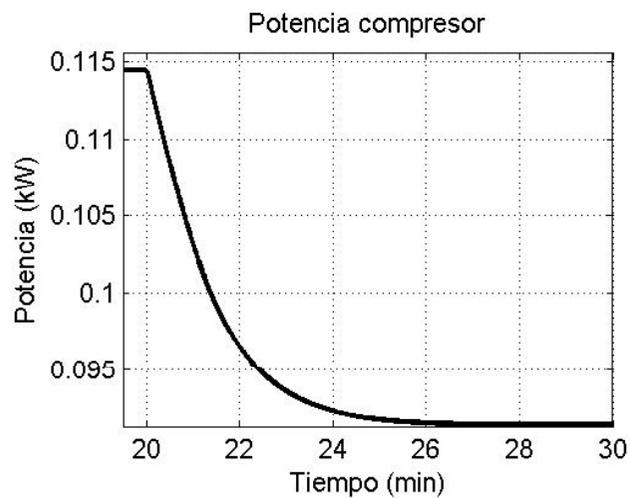
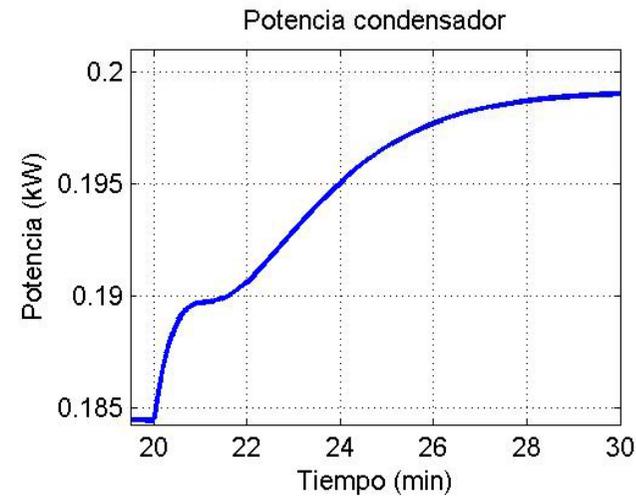
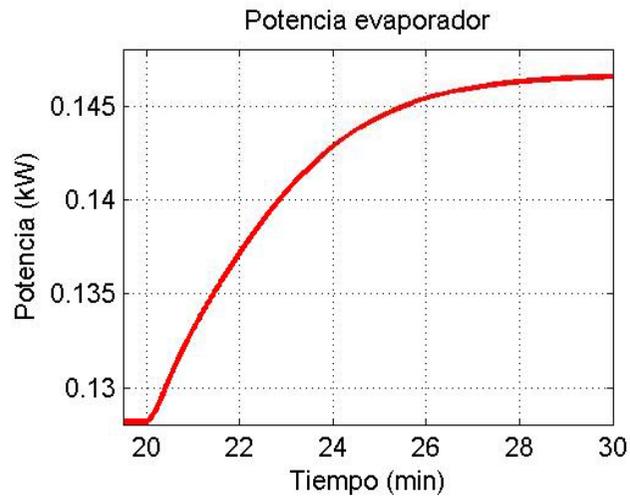
Resultados de simulación

- Variación de $T_{c,sec}$ (desde 40°C a 20°C):



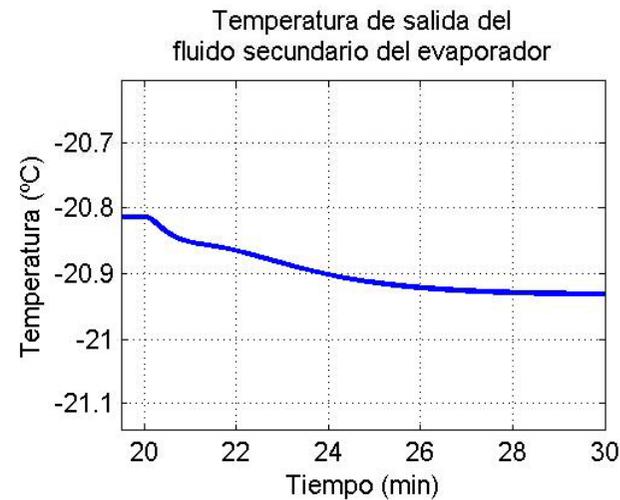
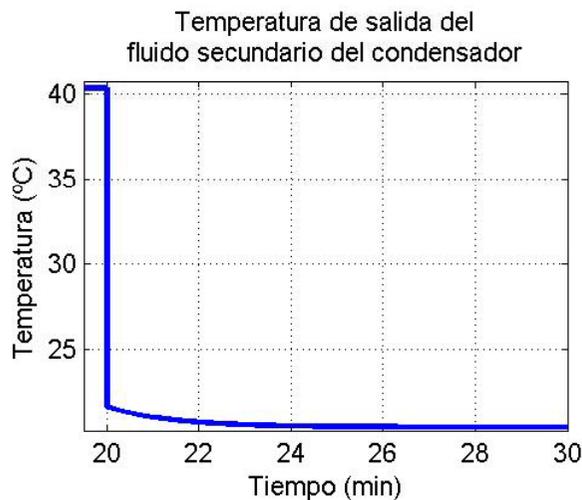
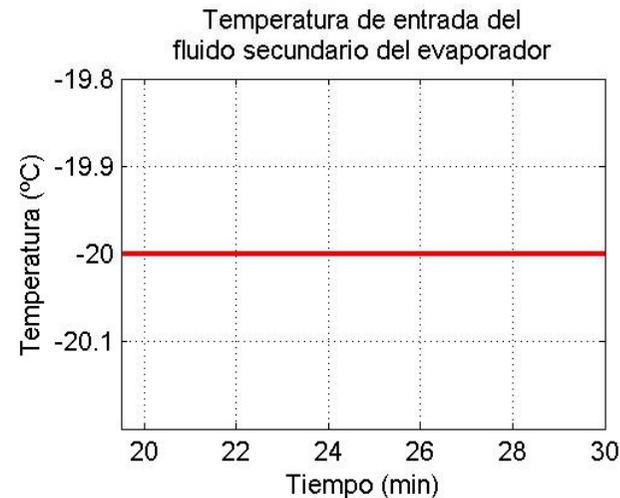
Resultados de simulación

- Variación de $T_{c,sec}$ (desde 40°C a 20°C):



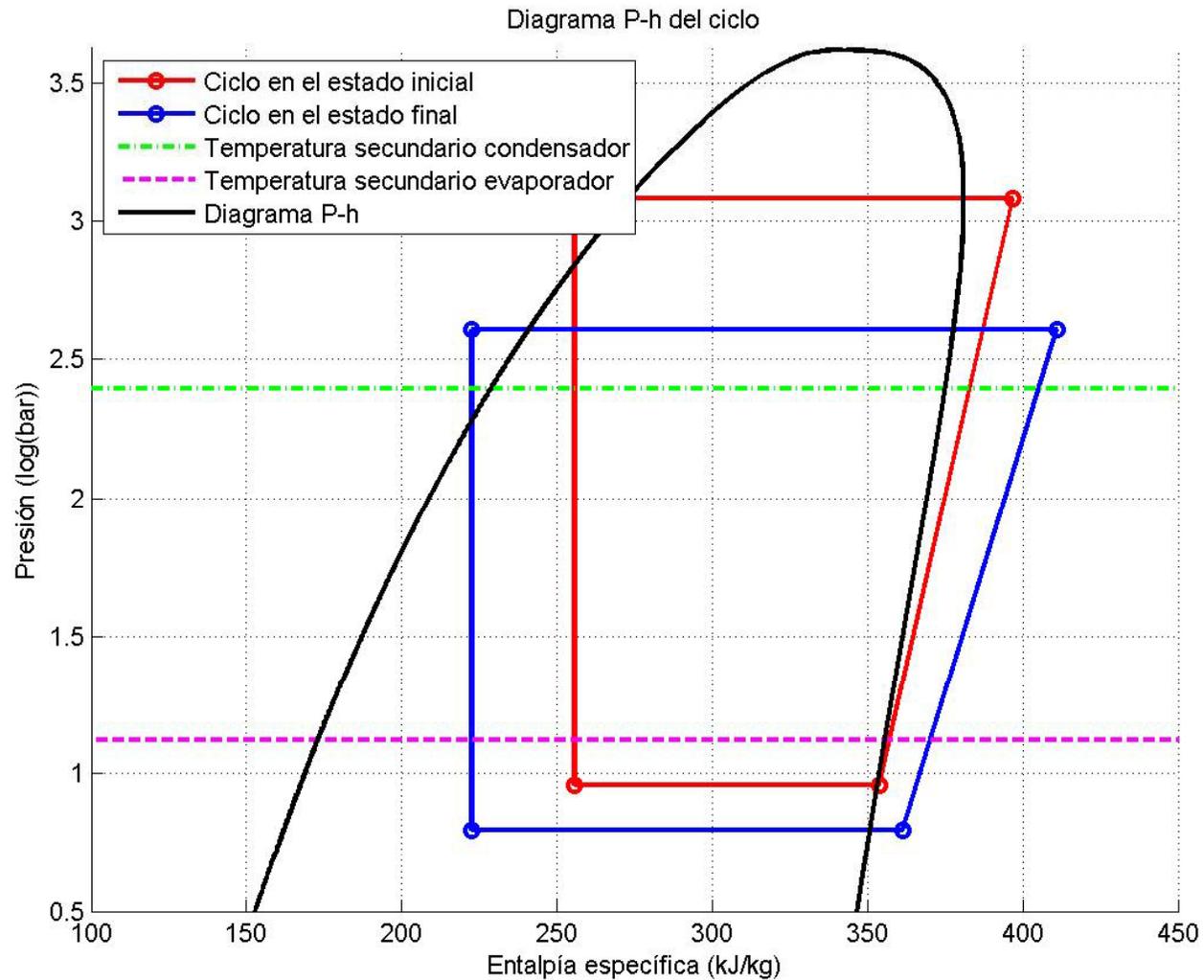
Resultados de simulación

- Variación de $T_{c,sec}$ (desde 40°C a 20°C):



Resultados de simulación

- Variación de $T_{c,sec}$ (desde 40°C a 20°C):



Modelado de SRCV

- Resultados de simulación:
 - Coherentes con resultados experimentales en artículos con plantas similares a las simuladas.
 - Dinámicas del orden de pocos minutos.
 - Resultados muy dependientes del punto de operación.
 - Zonas de operación no admisibles.
 - Válidos para obtención de modelos lineales de bajo orden para síntesis de controladores.

Índice

- Introducción.
- Modelado de Sistemas de Refrigeración por Compresión de Vapor (SRCV).
- Control de SRCV.
- Optimización en SRCV.
- Líneas de trabajo propuestas.

Control de SRCV

- Señales de control habituales (2 máx.):
 - Potencia del compresor: N (r.p.m)
 - Apertura de la válvula de expansión: A_v (%)
 - Caudal de refrigerante: \dot{m}_{ev} (kg/s)
- Variables controladas más comunes (2 máx.):
 - Grado de sobrecalentamiento: T_{SH} (°C)
 - Capacidad de carga frigorífica: $\dot{Q}_e = \dot{m}_{ev}(h_1 - h_4)$ (kW)
 - Temperatura del secundario del evaporador: $T_{e,sec}$ (°C)
 - Presión del condensador (si no se trabaja con presiones flotantes).

Control de SRCV

- Técnicas de control más utilizadas en la literatura:
 - Lineales:
 - Control descentralizado.
 - Control multivariable por desacoplo.
 - Control LQG
 - MPC
 - H_∞
 - No lineales:
 - Gain Scheduling
 - Backstepping
 - MPC No Lineal
 - Borroso, Redes neuronales, ...

Control de SRCV

- Ejemplos de modelos lineales:

[\(USE, 2014\)](#)

$$\begin{bmatrix} \Delta T_{SH} (^{\circ}C) \\ \Delta T_e (^{\circ}C) \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{0.0104(-9s+1)}{(30.6s+1)(1.2s+1)} & \frac{-4.33}{30.6s+1} \\ \frac{-0.065}{49.2s+1} & \approx 0 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \Delta N(rpm) \\ \Delta A_v(\%) \end{bmatrix}$$

[\(Lin, 2007\)](#)

$$\begin{bmatrix} \Delta T_{SH} (^{\circ}C) \\ \Delta T_e (^{\circ}C) \end{bmatrix} = \frac{10^{-2}}{s+0.07985} \begin{pmatrix} 1.2071 & -0.4794 \\ -1.2631 & 0.3716 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \Delta N(Hz) \\ \Delta A_v(pulsos) \end{bmatrix}$$

[\(Larsen, 2003b\)](#)

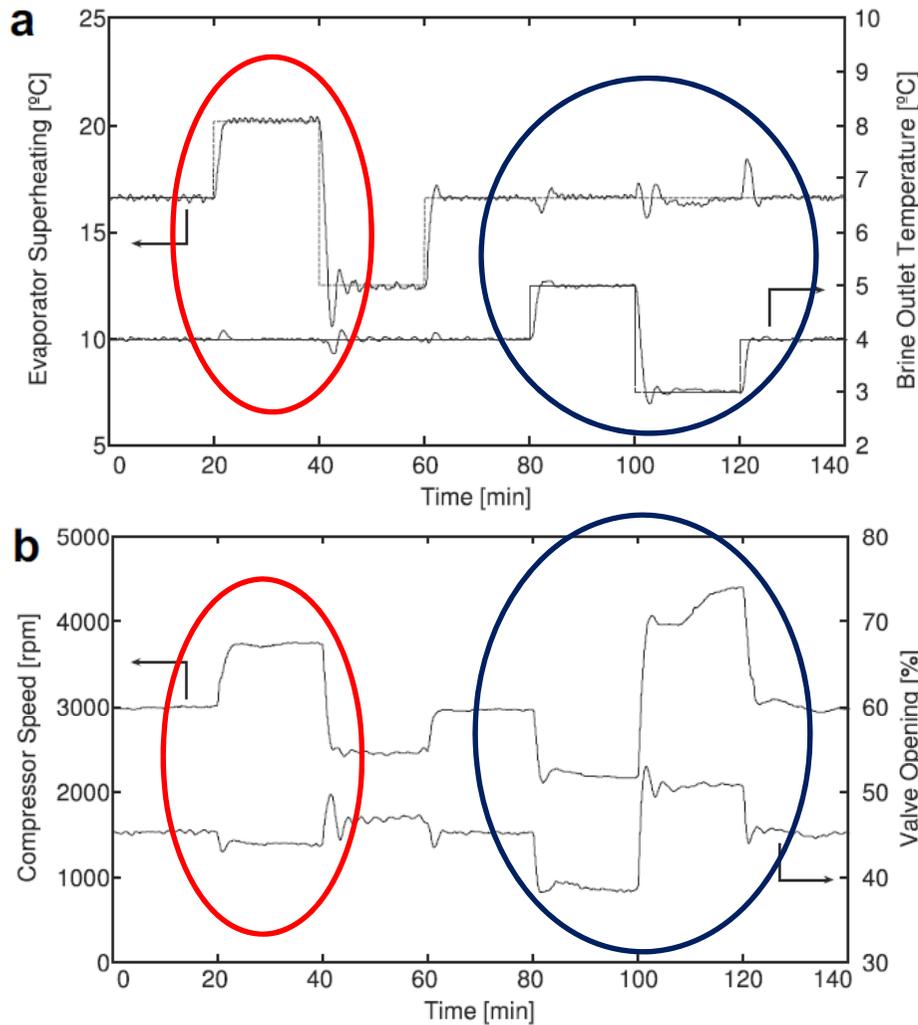
$$\begin{bmatrix} \Delta T_{SH} \\ \Delta T_e \end{bmatrix} = G(s) \begin{bmatrix} \Delta N \\ \Delta A_v \end{bmatrix} \quad G_{esc}(s)|_{s=0} = \begin{pmatrix} 5.18 & -1 \\ -1 & 0.01 \end{pmatrix}$$

[\(Li, 2008\)](#)

$$\begin{bmatrix} \Delta T_{SH} (^{\circ}C) \\ \Delta T_{room} (^{\circ}C) \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{-0.47}{780s+1} - \frac{-0.15}{30s+1} e^{-25s} & \frac{-0.38}{57s+1} e^{-16s} \\ \frac{-0.42}{680s+1} & 0 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \Delta N(Hz) \\ \Delta A_v(\%) \end{bmatrix}$$

Control de SRCV

- Experimento de (Schurt, 2009), (Schurt, 2010):



○ $\Delta T_{SH} \uparrow \Rightarrow \begin{cases} \Delta N \uparrow \\ \Delta A_v \approx 0 \end{cases}$

○ $\Delta T_{e,sec} \uparrow \Rightarrow \begin{cases} \Delta N \downarrow \\ \Delta A_v \downarrow \end{cases}$

Control de SRCV

- Control descentralizado:

- **Emparejamiento más habitual:**

- Control de T_{SH} con A_v
 - Control de Q_e o $T_{e,sec}$ con N

- (Marcinichen, 2008):

- Modelos: $\frac{\Delta T_{SH} (^{\circ}C)}{\Delta A_v (\%)} = \frac{-1.3}{95s+1}$ $\frac{\Delta T_{e,sec} (^{\circ}C)}{\Delta N (rpm)} = \frac{-0.007}{4s+1} e^{-4s}$
 - Control: lugar de las raíces y Ziegler-Nichols

- (Jain, 2009), (Jain, 2010):

- PI desacoplados, pero con **realimentación de nuevas variables:**

	VARIABLE CONTROLADA	
Var. Manipulada	Industria	Propuesta
A_v (%)	T_{SH}	$P_{(3+4)/2}$
N (rpm)	P_4	T_{3-4}
Pot. Vent. Evap.	$T_{e, in sec}$	$T_{(1+4)/2}$

Control de SRCV

- Control MIMO con desacoplo:

- (Li, 2009):

- Modelos:
$$\begin{bmatrix} \Delta T_{SH} (^{\circ}C) \\ \Delta T_{room} (^{\circ}C) \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{-0.47}{780s+1} - \frac{-0.15}{30s+1} e^{-25s} & \frac{-0.38}{57s+1} e^{-16s} \\ \frac{-0.42}{680s+1} & 0 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \Delta N(Hz) \\ \Delta A_v(\%) \end{bmatrix}$$

- Aproximación de retardos por Padè de primer orden.
 - Control PI para sistema desacoplado.

- Control LQG con efecto integral:

- (Schurt, 2009), (Schurt, 2010):

- Modelo linealizado en variables de estado
 - Control MIMO de T_{SH} y $T_{e,sec}$ con N y A_v

Control de SRCV

- Control MPC:
 - (Changenet, 2008):
 - MPC Funcional de T_{SH} con A_v
 - Modelo: sistema de primer orden con retardo.
 - (Wallace, 2012):
 - Objetivo: controlar $T_{e,sec}$ asegurando un mínimo T_{SH}
 - Modelo identificado en tiempo discreto, incluyendo dinámica de perturbaciones (temperaturas de entrada de secundarios).

Control de SRCV

- Control H_∞ :

- (Larsen, 2003b):

- Control MIMO de T_{SH} y T_e .

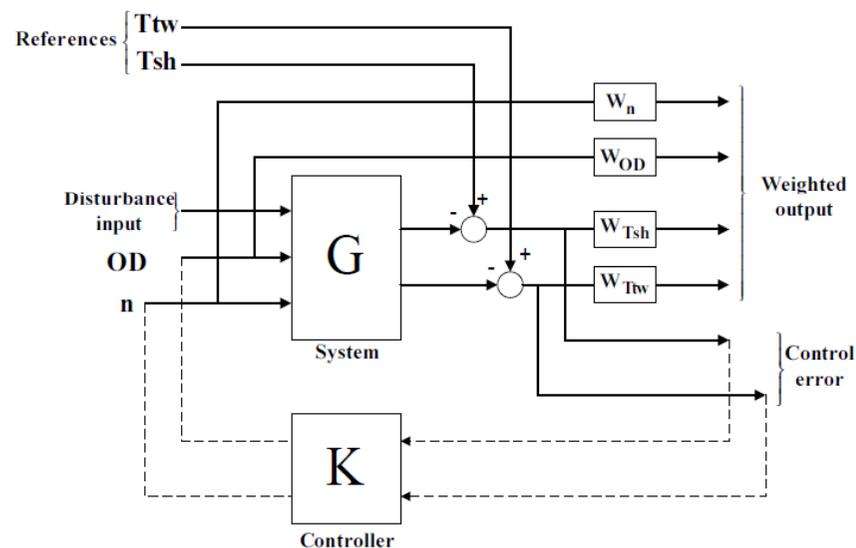
- Modelos de 6º orden linealizado.

$$\begin{bmatrix} \Delta T_{SH} \\ \Delta T_e \end{bmatrix} = G(s) \begin{bmatrix} \Delta N \\ \Delta A_v \end{bmatrix}$$

- Una vez escalado:

$$G_{esc}(s)|_{s=0} = \begin{pmatrix} 5.18 & -1 \\ -1 & 0.01 \end{pmatrix}$$

- Metodología de sensibilidad mixta, pero funciones de ponderación no aparecen.



Control de SRCV

- Control Gain Scheduling :
 - (He, 1998):
 - Control MIMO de T_{SH} y T_e .
 - Modelos de 5º orden linealizados en varios puntos de operación.
 - LQG con integrador para cada punto de equilibrio.
 - Tiene un análisis de las dinámicas del sistema.
 - (Rasmussen, 2010):
 - Control MIMO de T_{SH} y P_{c-e} .
 - Modelos de 2º orden linealizados en varios puntos de operación.
 - LQG con integrador para cada punto de equilibrio.
 - Adaptación vía Parametrización de Youla.

Control de SRCV

- Control Backstepping:

- (Rasmussen, 2009):

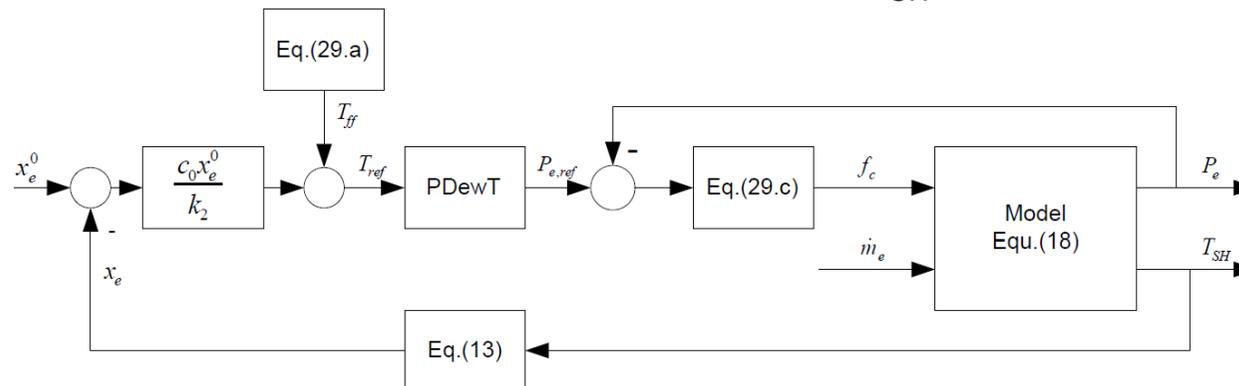
- Emparejamiento contrario al habitual:

$$\begin{aligned} \dot{m}_{ev} &\rightarrow \dot{Q}_e \\ N &\rightarrow T_{SH} \end{aligned}$$

- Basado en modelo simplificado del evaporador tipo *Moving Boundaries*, despreciando aporte de energía de zonas no bifásicas.

$$\dot{m}_{ev} = \dot{Q}_e^{ref} / (h_1 - h_4)$$

- Esquema de Control Backstepping de T_{SH} en función de N :



Control de SRCV

- Control MPC No Lineal:
 - (Gräber, 2012):
 - Basado en modelo tipo *Moving Boundaries*, pero siempre con los mismos volúmenes de control (no válido, p.e., para arranques).
 - Objetivo de control: regular $T_{e,sec}$ minimizando potencia del compresor.

Índice

- Introducción.
- Modelado de Sistemas de Refrigeración por Compresión de Vapor (SRCV).
- Control de SRCV.
- Optimización en SRCV.
- Líneas de trabajo propuestas.

Optimización en SRCV

- Aportar referencias a control para optimizar algún funcional.
- Lo más común en este tipo de sistema:

Optimización de eficiencia energética

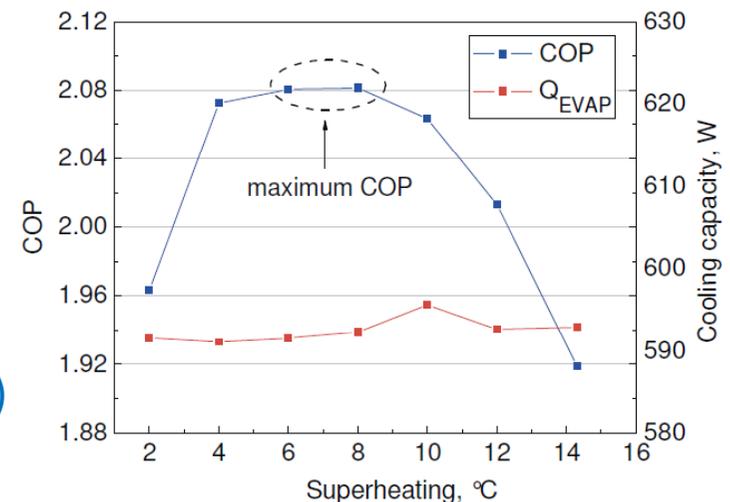
(maximizar **COP**)

- De manera intuitiva:

COP muy dependiente del T_{SH}

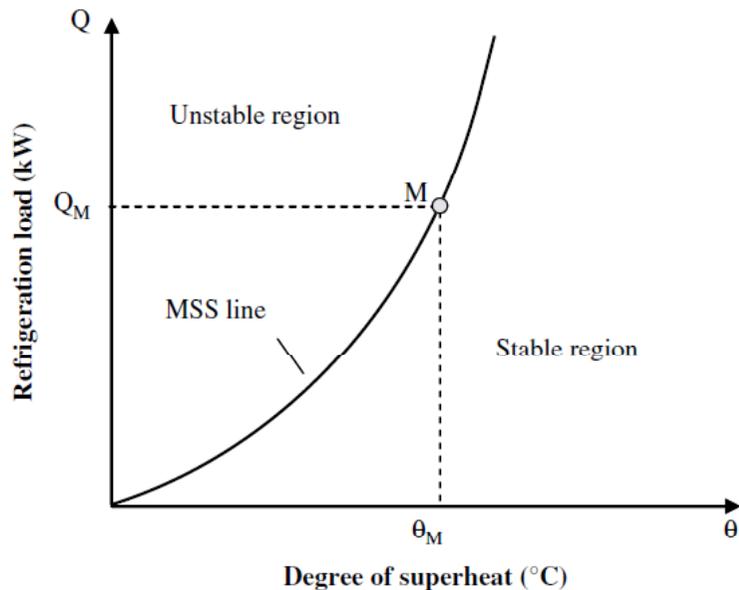
- Termodinámicamente, COP máximo con T_{SH} nulo, pero esto no es posible por estabilidad del sistema (efecto *hunting*)

(Marcinichen, 2008)

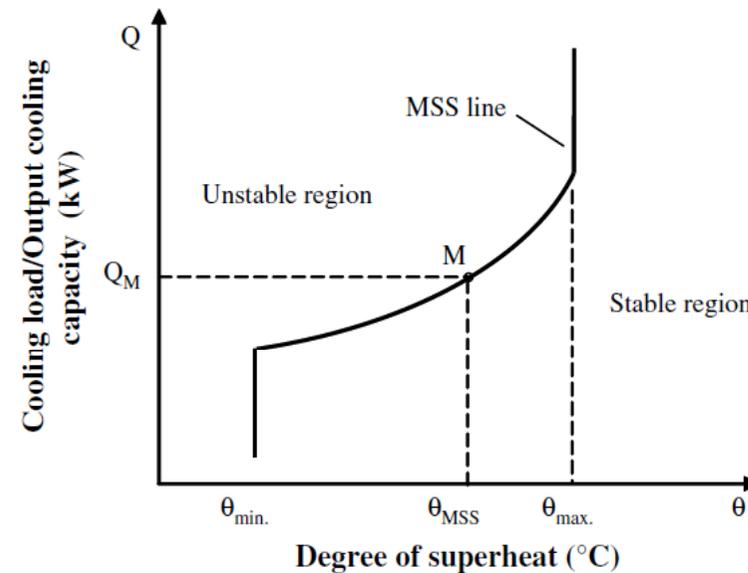


Optimización en SRCV

- Efecto *hunting*: limitación inferior de T_{SH} (He, 1998)
- Si T_{SH} es inferior a un cierto límite, el evaporador entra en resonancia con el compresor, y las variables del sistema se vuelven oscilatorias (**problema de estabilidad**).
- Es una propiedad del sistema, no del control.



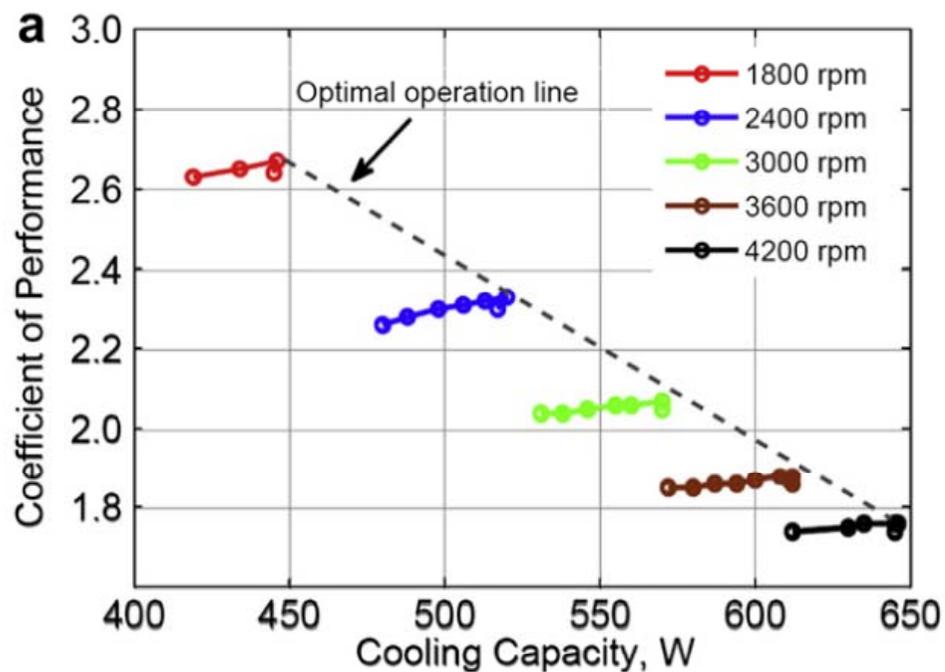
(Huelle, 1972)



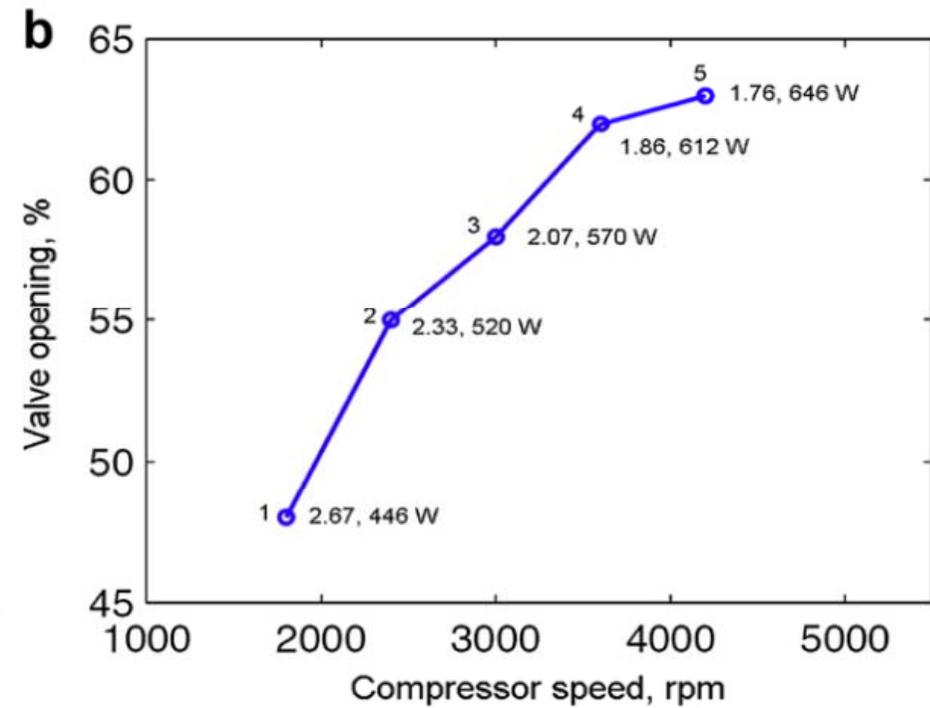
(Chen, 2008)

Optimización en SRCV

- Regiones de funcionamiento óptimo (Oliveira, 2011)



**Línea de operación óptima lineal
en variables de salida**

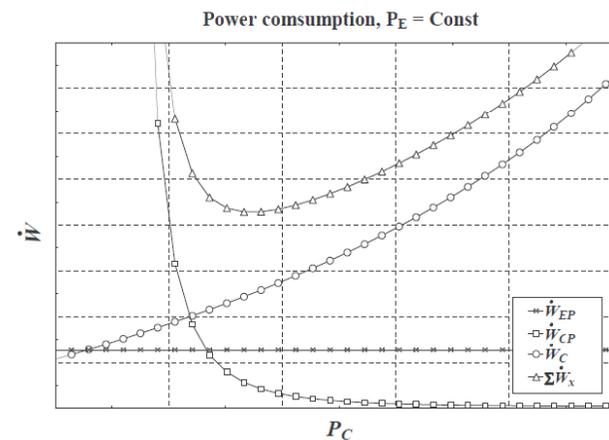


**Pero no es lineal en el dominio
de las señales de control**

Optimización en SRCV

- (Larsen, 2003a): Estimación mediante modelo estático para calcular referencia de P_c (supuesta P_e controlada con lazo interno)

$$\min_{N_C, N_{EP}, N_{CP}, A_v | \dot{Q}_e = cte, T_{SH} = cte} \left(\dot{W}_C + \dot{W}_{EP} + \dot{W}_{EP} \right)$$



- Inclusión de potencia del compresor en función de optimización de control (típico en NMPC) (Gräber, 2012).
- **Otros enfoques:**
 - Optimización en la gestión de demanda (Smart Grids) (Hovgaard, 2012).
 - Confortabilidad eficiente en edificios (Salsbury, 2013).

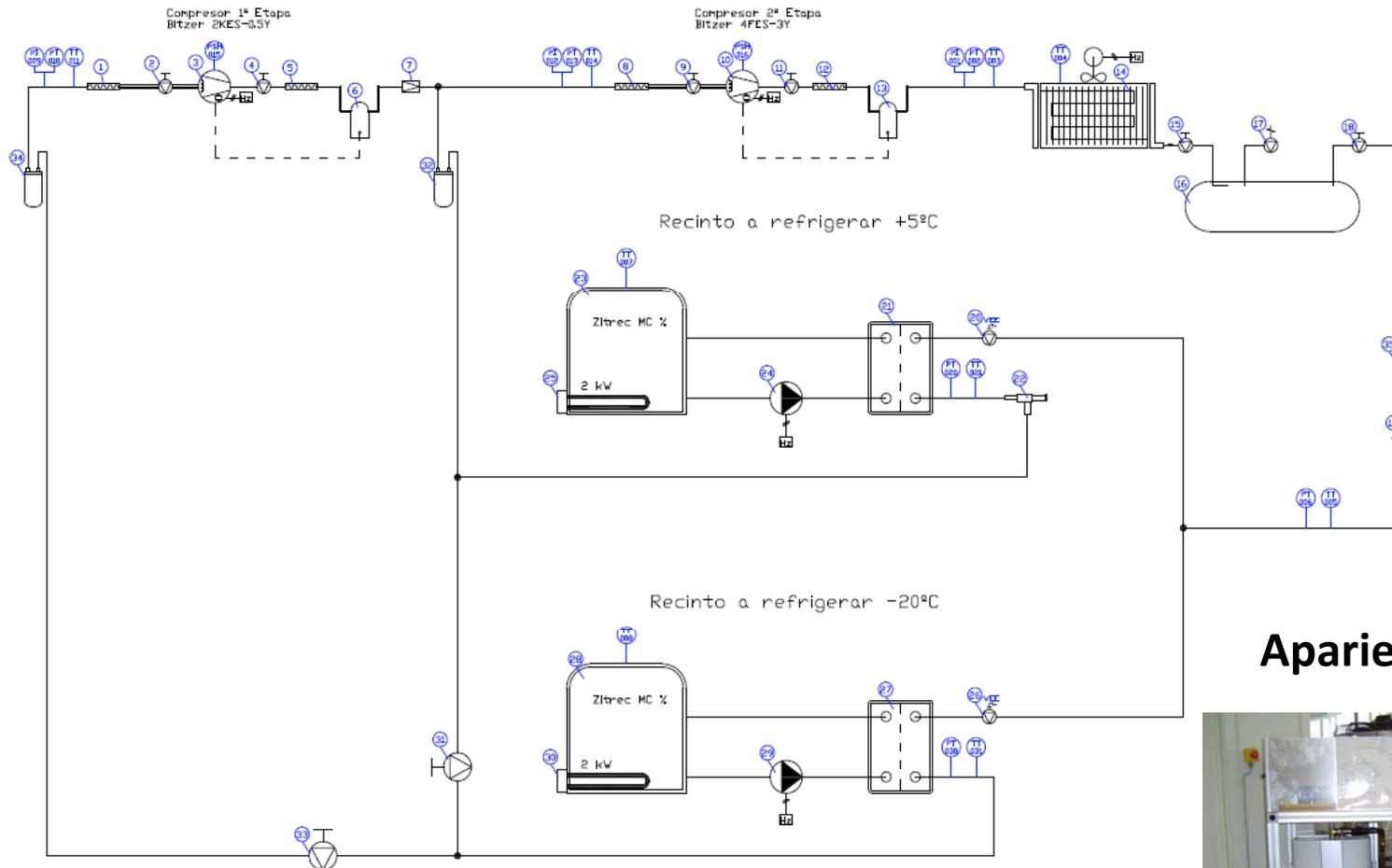
Índice

- Introducción.
- Modelado de Sistemas de Refrigeración por Compresión de Vapor (SRCV).
- Control de SRCV.
- Optimización en SRCV.
- Líneas de trabajo propuestas.

Líneas de trabajo

- Control lineal
 - Análisis de controlabilidad entrada/salida.
 - Control robusto lineal.
- Control no lineal
 - Linealización por realimentación robusta.
- Operación del sistema en situaciones anómalas
 - Arranques, paradas, transitorios por perturbaciones.
 - Estimación no lineal del estado.
- Optimización
 - Nuevas funciones de optimización (no lineales)
 - Eficiencia de intercambiadores
- Sistemas multietapas
 - Construcción de planta experimental

Diseño de planta experimental

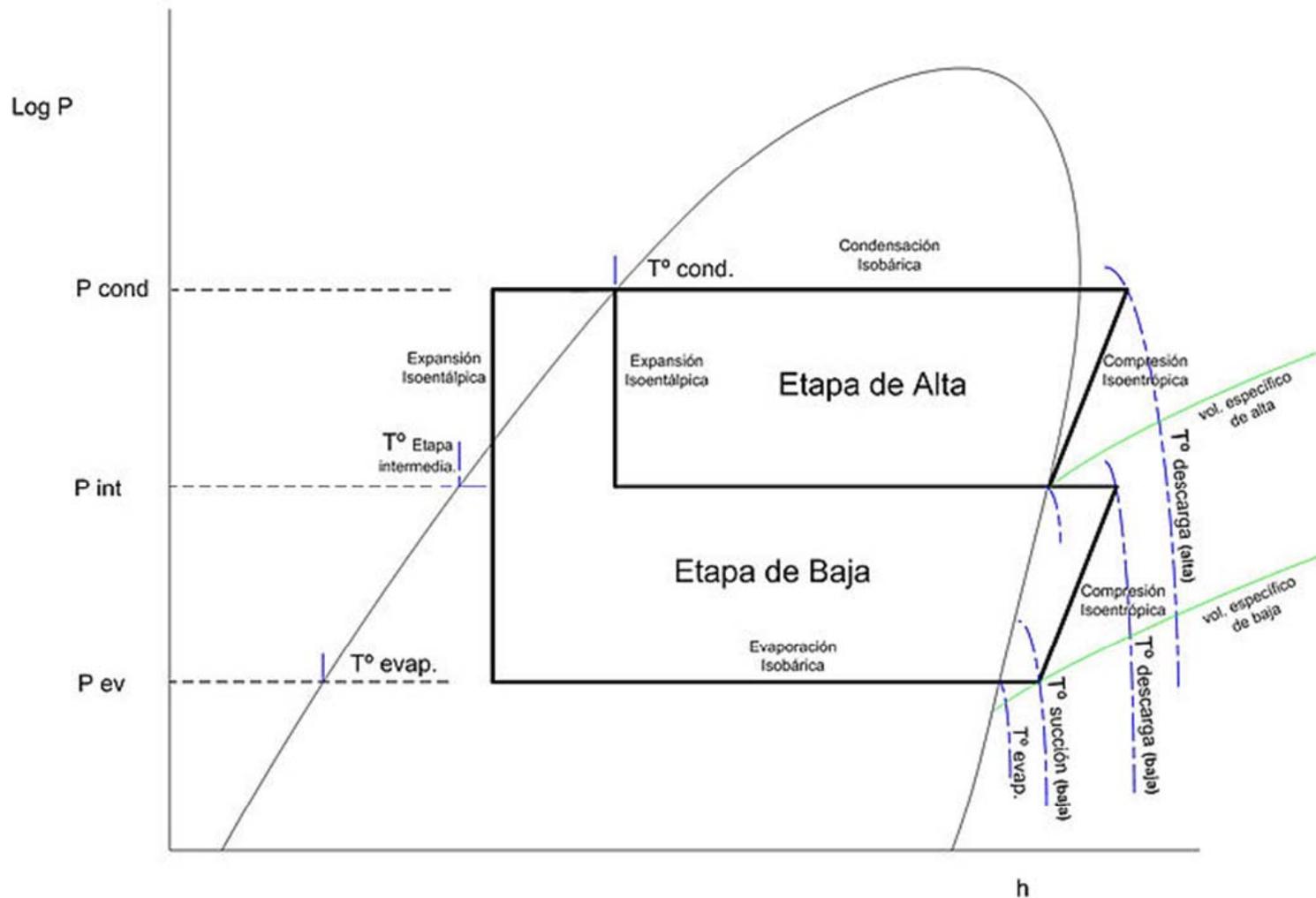


Apariencia esperada



SRCV de dos etapas

- Diagrama P-h (doble etapa):



Referencias

- (Aprea, 2002): Aprea, C., Mastrullo, R., *Experimental evaluation of electronic and thermostatic expansion valves performances using R22 and R407C*. App. Therm. Eng., 22, 206-218, 2002.
- (Bejarano, 2013): Bejarano, G., Ortega, M.G., Rubio, F.R., Morilla, F., *Modelado simplificado orientado al control de sistemas de refrigeración*. XXXIV Jornadas de Automática, 2013.
- (Changenet, 2008): Changenet, C., Charvet, J.N., Géhin, D., Sicard, F., Charmel, B., *Study on predictive functional control of an expansion valve for controlling the evaporator superheat*. Proc. IMechE, Part I: J. Syst. Control Eng. 222(I6), 571-582. 2008
- (Chen, 2008): Chen, Y., Deng, S., Xu, X., Chan, M., *A study on the operational stability of a refrigeration system having a variable speed compressor*. Int. Journal of Refrigeration, 31, 1368-1374. 2008.
- (Gräber, 2012): Gräber, M., Kirches, C., Schlöder, J., Tegethoff, W., *Nonlinear model predictive control of a vapor compression cycle based on first principle models*. Proceedings MATHMOD, 7TH Vienna international conference on mathematical modeling. Austria, 2012.
- (He, 2008): He, X.D., Liu, S., Asada, H., Itoh, H., *Multivariable control of vapor compression systems*. HVAC&R Rereach, 4-3, 205-229. 1998.
- (Hovgaard, 2012): Hovgaard, T.G., Larsen, L., Edlund, K., Jorgensen, J.B., *Model predictive control technologies for efficient and flexible power consumption in refrigeration systems*. Energy, 44, 105-116, 2012.
- (Jain, 2009): Jain, N., Alleyne, A., *Comparison of SISO and MIMO control techniques for a diagonally dominant vapor compression system*. American Control Conference, 2009.
- (Jain, 2010): Jain, N., Li, B., Keir, M., Hencsey, B., Alleyne, A., *Decentralized Feedback Structures of a vapor compression cycle system*. IEEE Trans. on Control Systems Technology, 18-1, 185-193. 2010.
- (Jia, 1999): Jia, X., Tso, C.P., Jolly, P., Wong, Y.W., *Distributed steady and dynamic modeling of dry-expansion evaporators*. Int. Journal of Refrigeration, 22, 126-136, 1999.

Referencias

- [\(Larsen 2003\)](#): Larsen, L., Thybo, C., Stoustrup, J., Rasmussen, H., *Control methods utilizing energy optimizing schemes in refrigeration systems*. European control conference (ECC), Cambridge, UK. 2003.
- [\(Larsen, 2003b\)](#): Larsen, L., Holm, J.R., *Modelling and multivariable control of refrigeration systems*. Central R&D - Refrigeration and Air Conditioning, Danfoss A/S, Nordborg, Denmark.
- [\(Larsen, 2004\)](#): Larsen, L., Tybo, C., *Potential energy savings in refrigeration systems using optimal set-points*. IEEE Int. Conference on Control Applications, 1, 701-704. 2004.
- [\(Li, 2008\)](#): Li, H., Jeong, S.K., Yoon, J.I., You, S.S., *An empirical model for independent control of variable speed refrigeration system*. Applied Thermal Engineering, 28, 1918-1924. 2008.
- [\(Li, 2009\)](#): Li, H., Jeong, S.K., You, S.S., *Feedforward control of capacity and superheat for variable speed refrigeration system*. Applied Thermal Engineering, 29, 1067-1074. 2009.
- [\(Li, 2010\)](#): Li, B., Alleyne, A., *A dynamic model of a vapor compression cycle with shut-down and start-up operations*. Int. Journal of Refrigeration, 33, 538-552, 2010.
- [\(Lin, 2007\)](#): Lin, J., Yeh, T.-J., *Modeling, identification and control of air-conditioning systems*. Int. Journal of Refrigeration, 30, 209-220, 2007.
- [\(Marcinichen, 2008\)](#): Marcinichen, J.B., Holanda, T., Melo, C., *A dual SISO controller for a vapor compression refrigeration system*. International Refrigeration and Air Conditioning Conference, 2008.
- [\(McKilney, 2008\)](#): McKilney, T., Alleyne, A., *An advanced nonlinear switched heat exchanger model for vapor compression cycles using the moving-boundary method*. Int. Journal of Refrigeration, 31, 1253-1264, 2008.
- [\(Oliveira, 2011\)](#): Oliveira, V., Trofino, A., Hermes, C., *A switching control strategy for vapor compression refrigeration systems*. Applied Thermal Engineering, 31, 3914-3921. 2011.
- [\(Pérez-Lombard, 2008\)](#): Pérez-Lombard, L., Ortiz, J., Pout, C. *A review on buildings energy consumption information*. Energy and Buildings, 40, 3, 394-398.

Referencias

- (Pottker, 2007): Pottker, G., Melo, C., *A study on the relationship between compressor speed and expansion valve opening in refrigeration systems*. Conf. in compressors and their systems, London, UK, paper C658, 2007.
- (Rasmussen, 2009): Rasmussen, H., Alleyne, A., *Gain scheduled of an air conditioning system using Youla parameterization*. IEEE Trans. On Control Systems s Technology, 18-5, 1216-1225. 2010.
- (Rasmussen, 2010): Rasmussen, H., Larsen, L., *Nonlinear and adaptive control of a refrigeration system*. IET Control Theory and Applications, 5-2, 364-378. 2011.
- (Rodríguez, 2011): Rodríguez-Cantalejo, R.D., *Diseño de planta experimental de refrigeración por compresión de vapor*. Trabajo fin de máster. Universidad de Córdoba. 2011.
- (Salsbury, 2013): Salsbury, T., Mhaskar, P., Qin, S.J., *Predictive control methods to improve energy efficiency and reduce demand in buildings*. Computers and Chemical Engineering, 51, 75-85. 2013.
- (Sarabia, 2009): Sarabia, D., Capraro, F., Larsen, L., de Prada, C., *Hybrid NMPC of supermarket display cases*. Control Engineering Practice, 17, 428-441, 2009.
- (Schurt, 2009): Schurt, L., Hermes, C., Trofino, A., *A model-driven multivariable controller for vapor compression refrigeration system*. Int. Journal of Refrigeration, 32, 1672-1682, 2009.
- (Schurt, 2010): Schurt, L., Hermes, C., Trofino, A., *Assessment of the controlling envelope of a model-based multivariable controller for vapor compression refrigeration systems*. Applied Thermal Engineering, 30, 1538-1546, 2010.
- (Tassou, 1998): Tassou, S.A., Qureshi, T.Q. *Comparative performance evaluation of positive displacement compressors in variable-speed refrigeration applications*. Int. J. of Refrigeration, 21, 29-41, 1998.
- (Van Baxter, 2002): Van Baxter, D. *Advances in supermarket refrigeration systems*. Oak Redge National Laboratory, Oak Redge, TN 37831-6070, 2002.
- (Wallace, 2012): Wallace, M., Das, B., Mhaskar, P., House, J., Salsbury, T., *Offset-free model predictive control of a compression cycle*. Journal of Process Control, 22, 1374-1386. 2012.

Agradecimientos

- **Guillermo Bejarano, José Enrique Alonso, Fernando Castaño y Francisco R. Rubio (Universidad de Sevilla).**
- **Fernando Morilla, Francisco Vázquez y R. David Cantalejo (UNED y Universidad de Córdoba).**

Gracias por la atención