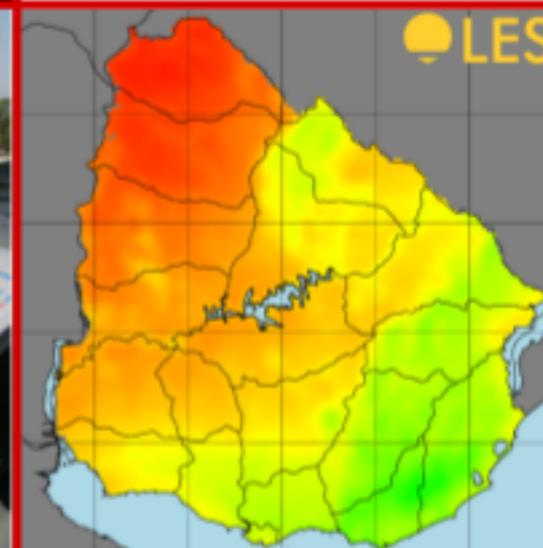
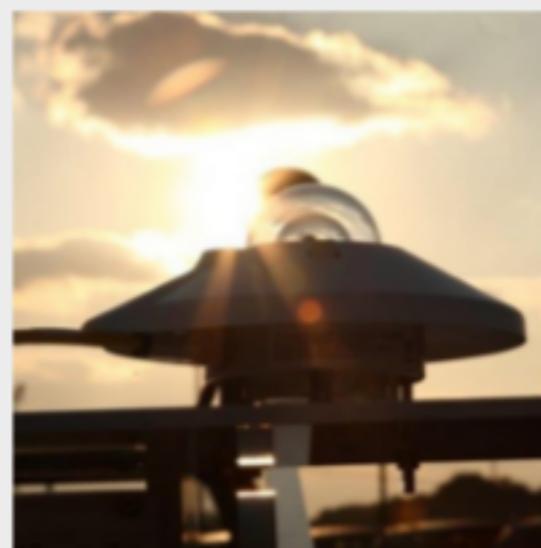


## Clase 2: método f-chart para estimación de la fracción solar

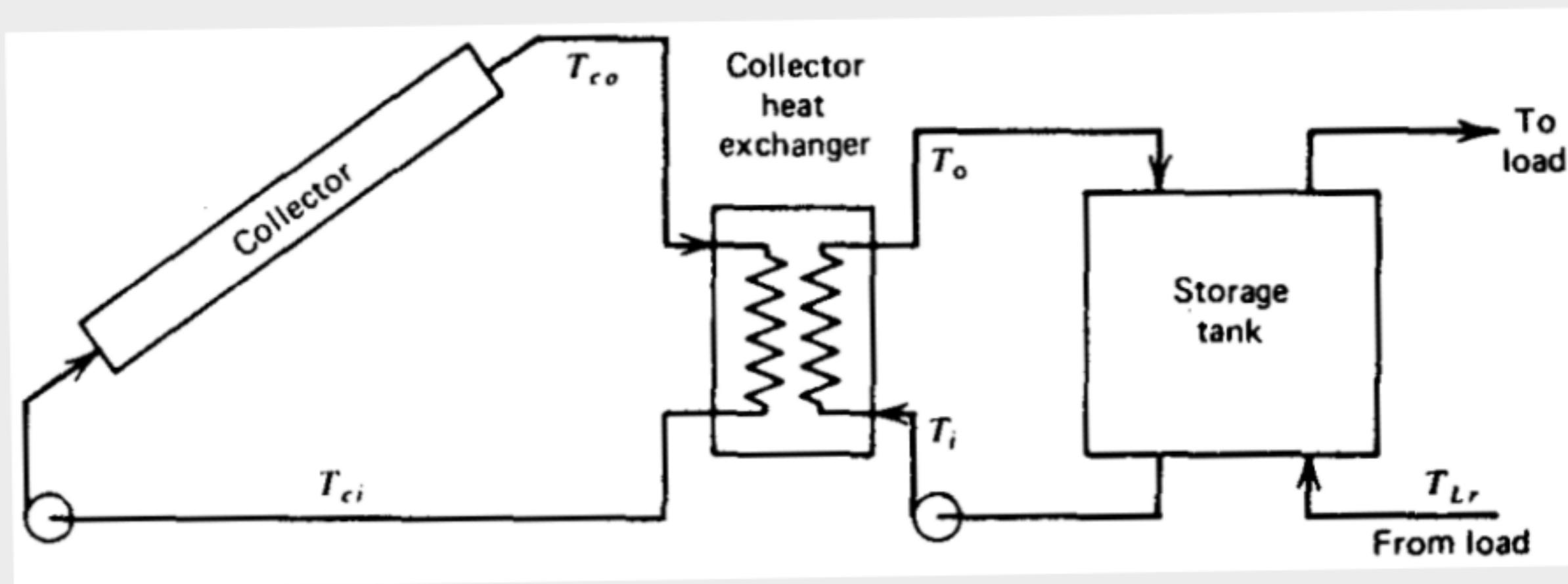
Rodrigo Alonso Suárez  
Gerardo Vitale



LABORATORIO DE  
ENERGÍA SOLAR  
UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA

# **SISTEMAS SOLARES TÉRMICOS**

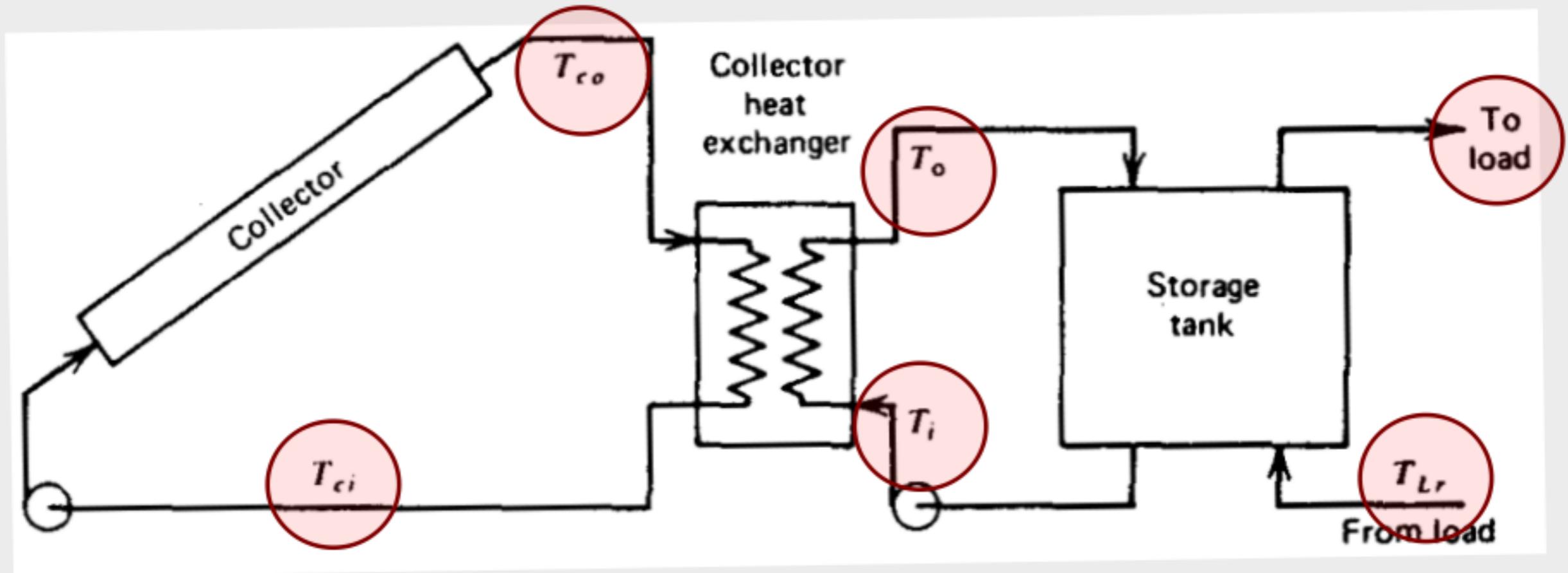
## SISTEMA SOLAR TIPO: de circulación forzada



### Elementos:

Colector solar	→	Parámetros del colector solar
Intercambiador de calor	→	Eficiencia del intercambio
Tanque de acumulación	→	Volumen de acumulación
Bombas de circulación	→	Caudales y flujos máxicos
Controlador	→	ON-OFF: diferencia mínima de temperatura

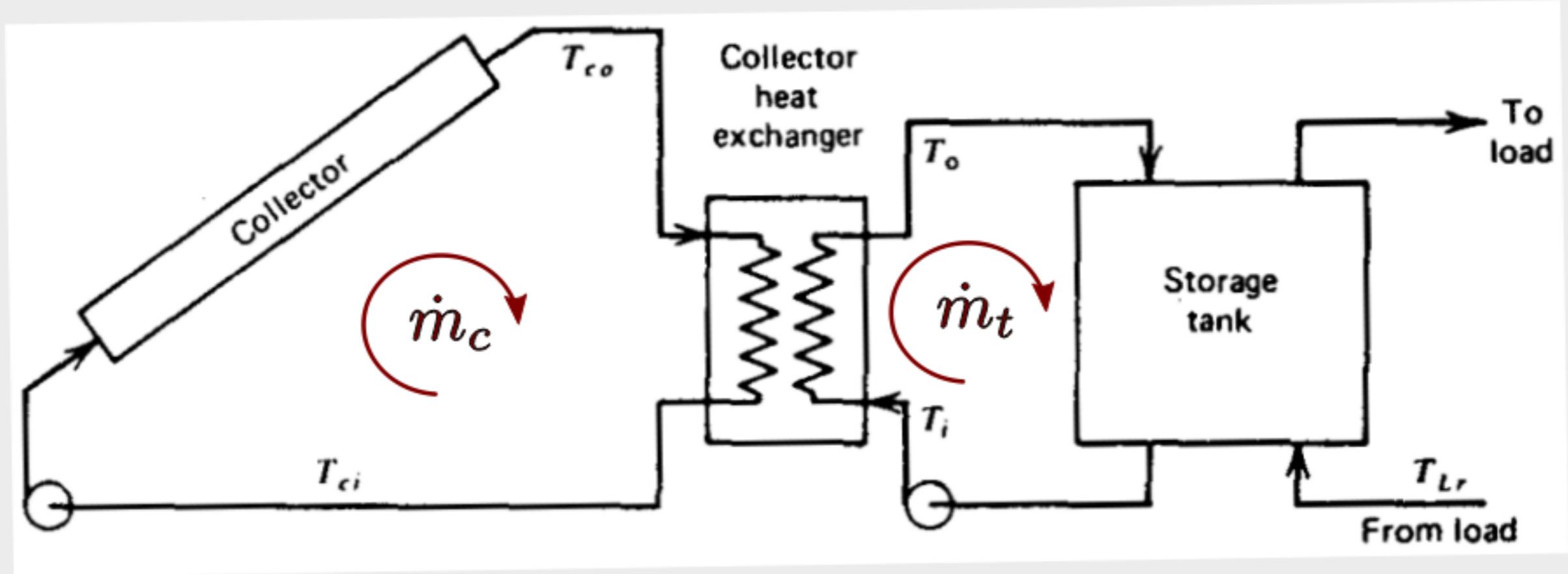
## SISTEMA SOLAR TIPO: de circulación forzada



### Temperaturas:

- Temperatura de entrada y salida del colector
- Temperatura de entrada y salida del intercambiador (del lado de la carga)
- Temperatura de salida del tanque de acumulación hacia la carga
- Temperatura de entrada de agua al tanque (temperatura de agua de red)

## SISTEMA SOLAR TIPO: de circulación forzada



### Flujos másicos:

Flujo másico por el colector (circuito primario)

Flujo másico hacia el tanque (circuito secundario)

Tasa de capacitancia: producto  $(\dot{m} c_p)$

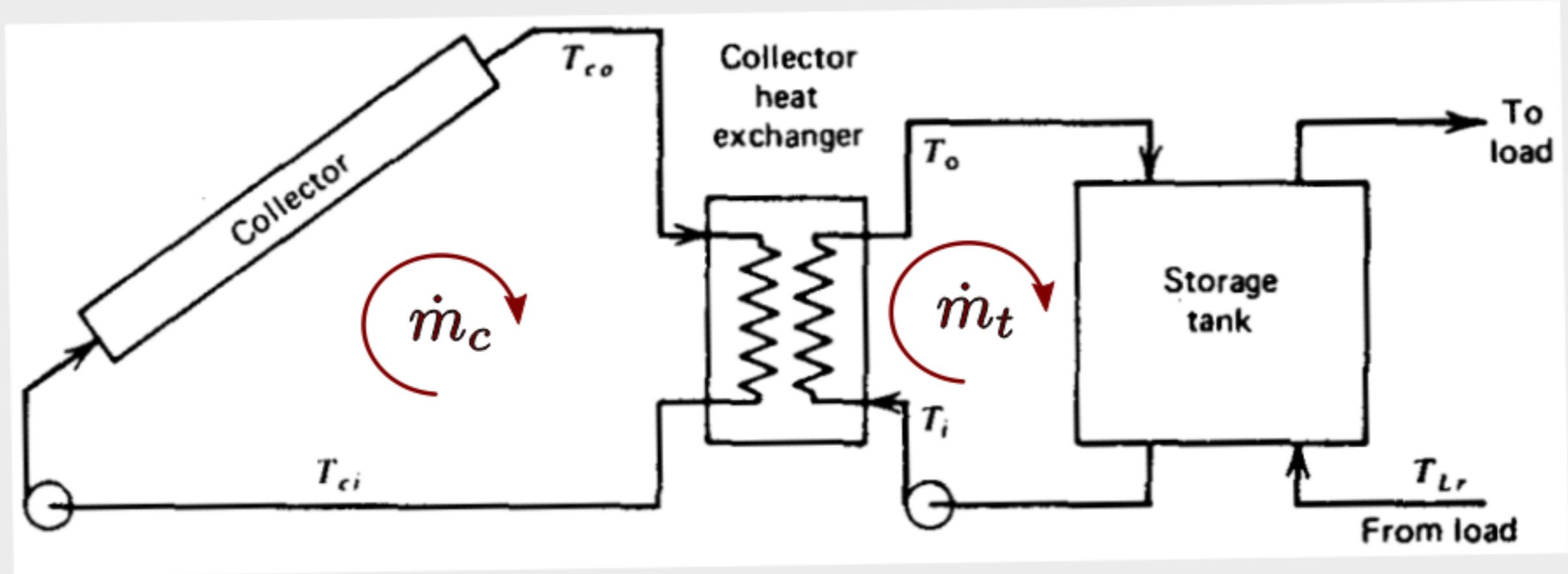
Tasa de capacitancia del lado del colector

$$(\dot{m} c_p)_c$$

Tasa de capacitancia del lado del tanque

$$(\dot{m} c_p)_t$$

## SISTEMA SOLAR TIPO: de circulación forzada



Tasa de capacitancia: producto  $(\dot{m} c_p)$

Si se dimensiona para que la tasa de capacitancia sea la misma a ambos lados del intercambiador de calor:

En el circuito primario puede haber un fluido con anticongelante

$$(\dot{m} c_p)_c = (\dot{m} c_p)_t = (\dot{m} c_p)$$

Pequeños cambios de densidad (y por lo tanto, flujo másico) debido a las distintas temp. a ambos lados del intercamb.

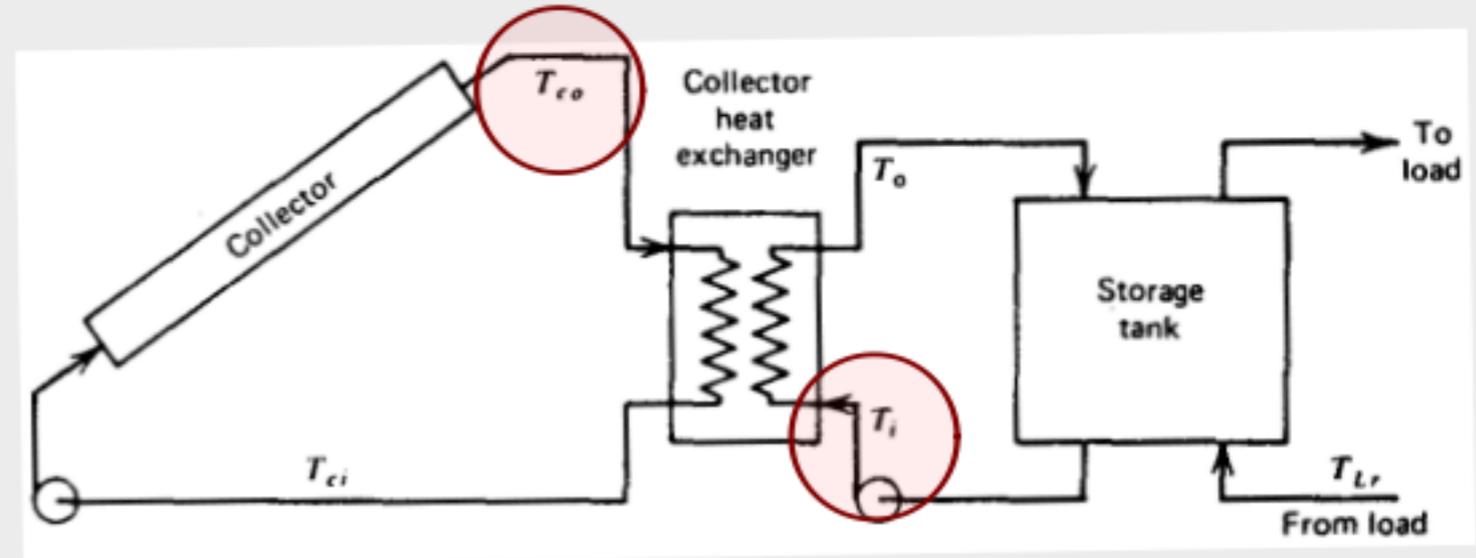


## SISTEMA SOLAR TIPO: de circulación forzada

CALOR EN EL INTERCAMBIADOR

$$\dot{Q}_{hx} = \epsilon (\dot{m}_p)(T_{c0} - T_i)$$

$\epsilon$  EFICIENCIA DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR

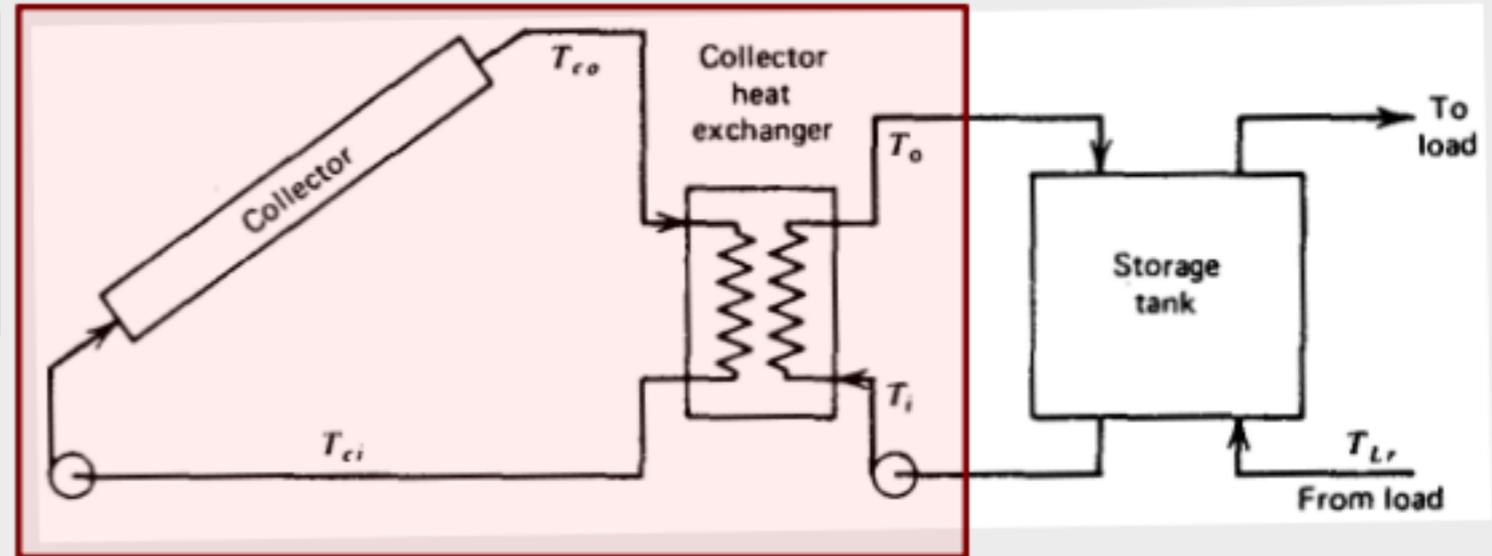


## SISTEMA SOLAR TIPO: de circulación forzada

CALOR EN EL INTERCAMBIADOR

$$\dot{Q}_{hx} = \epsilon (\dot{m}_p)(T_{c0} - T_i)$$

$\epsilon$  EFICIENCIA DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR

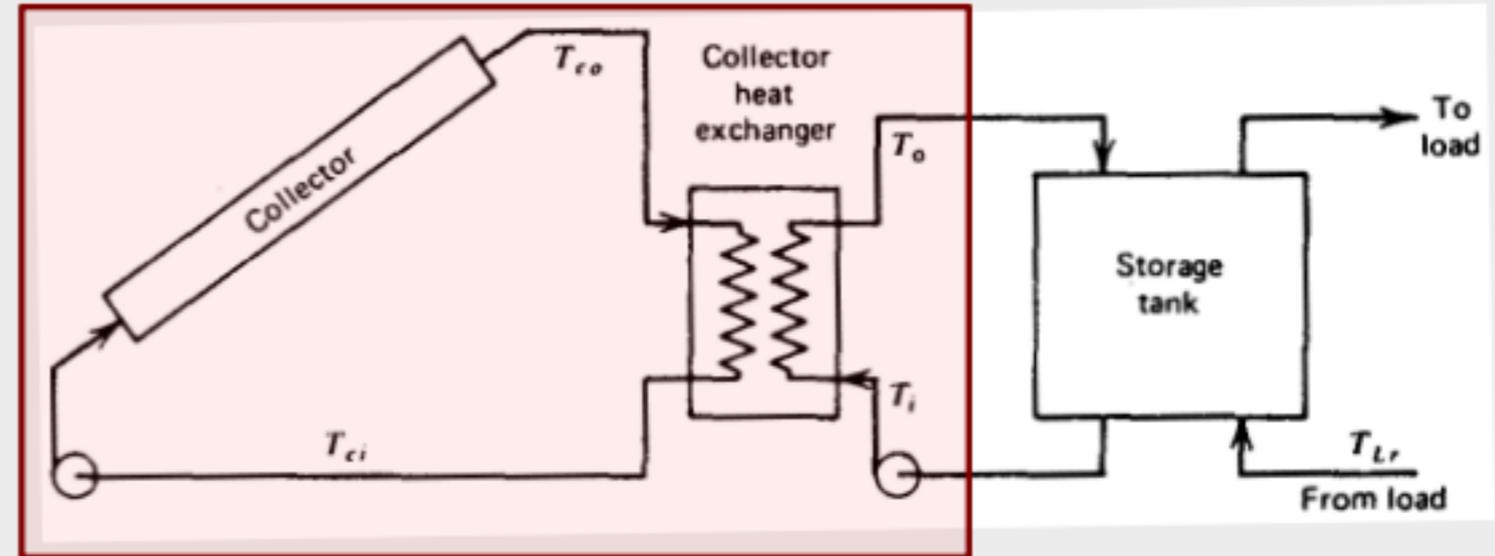


Utilizando estas ecuaciones se puede re-escribir el calor útil obtenido del sistema en términos de la temperatura de entrada al intercambiador y un factor de eficiencia para la remoción de calor que incluye el colector y el intercambiador:

$$\dot{Q}_u = A_c F'_R (S - U_L(T_i - T_a))^+$$

## SISTEMA SOLAR TIPO: de circulación forzada

$$\dot{Q}_u = A_c F'_R (S - U_L(T_i - T_a))^+$$



### FACTOR DE EFICIENCIA PARA LA REMOCIÓN DE CALOR

$$F'_R = F_R \left[ 1 + \left( \frac{A_c F_R U_L}{\dot{m} c_p} \right) \left( \frac{1}{\epsilon} - 1 \right) \right]^{-1}$$

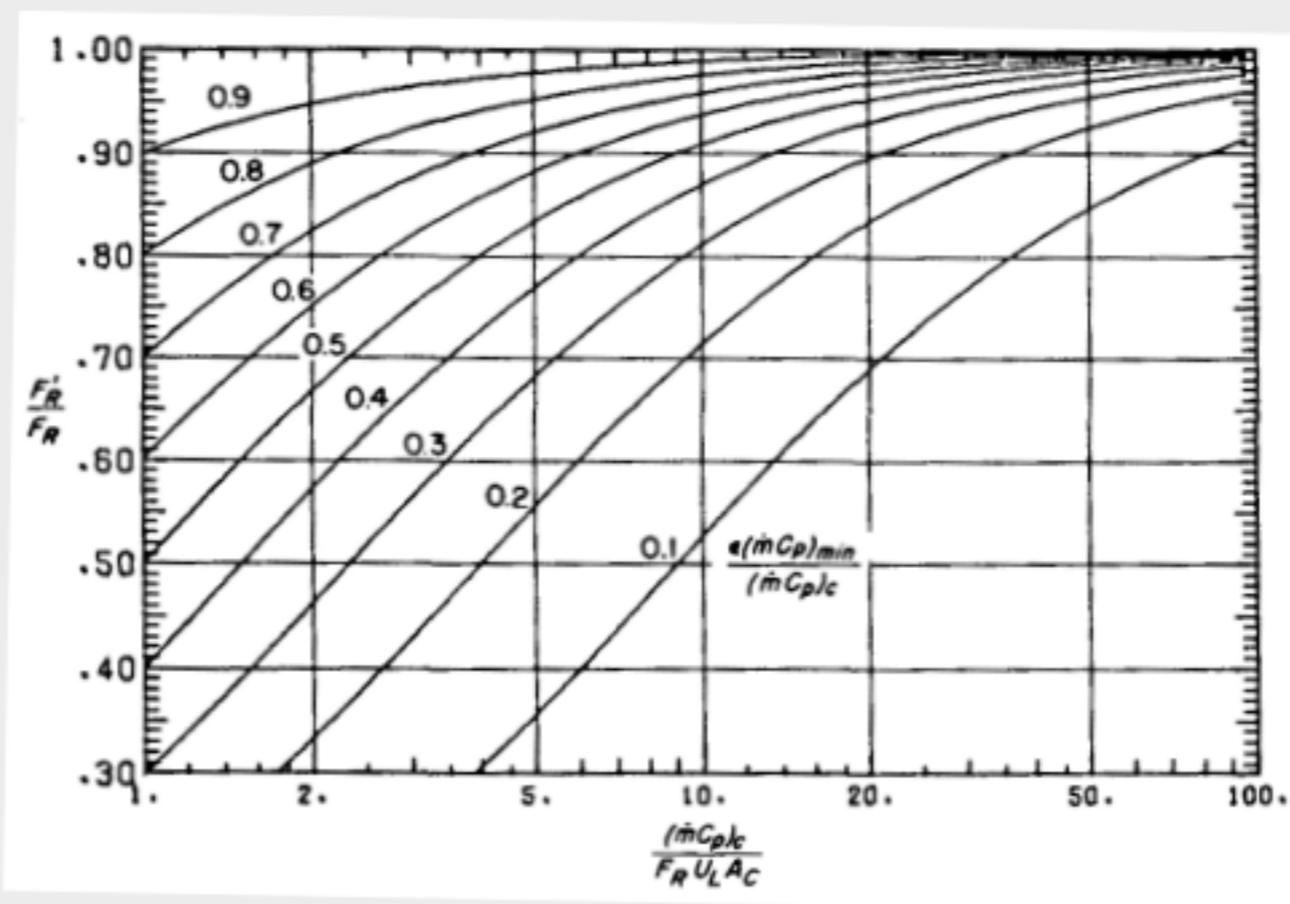
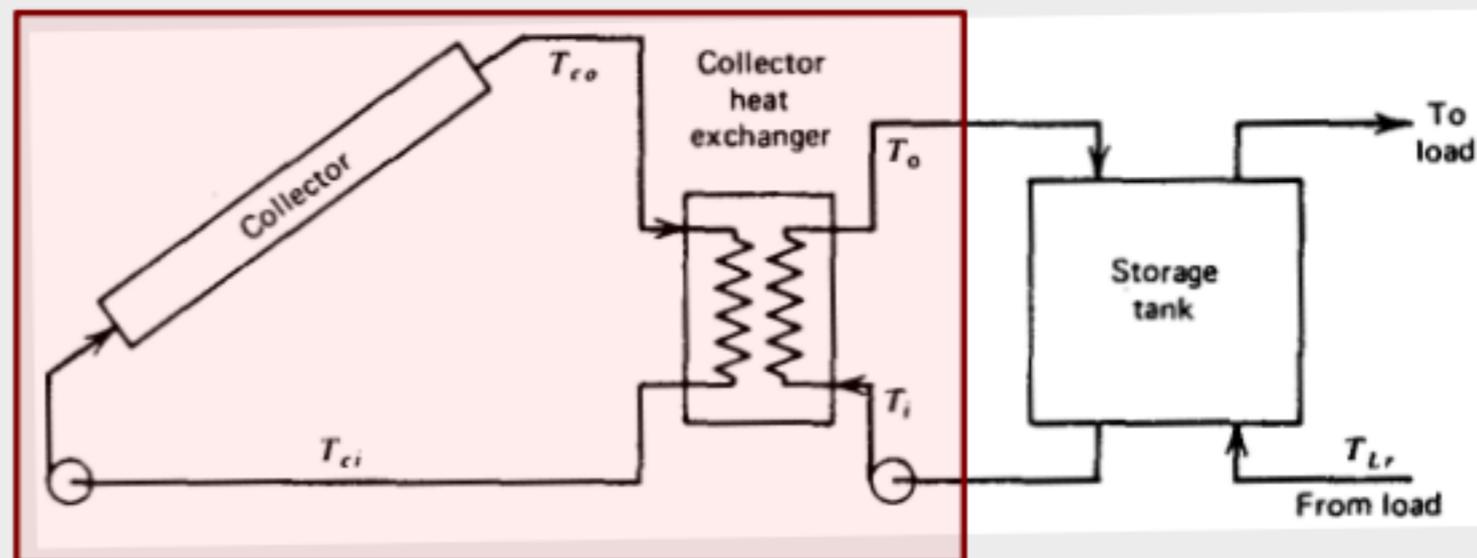
Aplica para un sistema donde las tasas de capacitancia están balanceadas (a ambos lados del intercambiador de calor)

Usualmente se expresa en términos de:  $\frac{F'_R}{F_R}$

## SISTEMA SOLAR TIPO: de circulación forzada

$$\dot{Q}_u = A_c F'_R (S - U_L (T_i - T_a))^+$$

$$F'_R = F_R \left[ 1 + \left( \frac{A_c F_R U_L}{\dot{m} c_p} \right) \left( \frac{1}{\epsilon} - 1 \right) \right]^{-1}$$

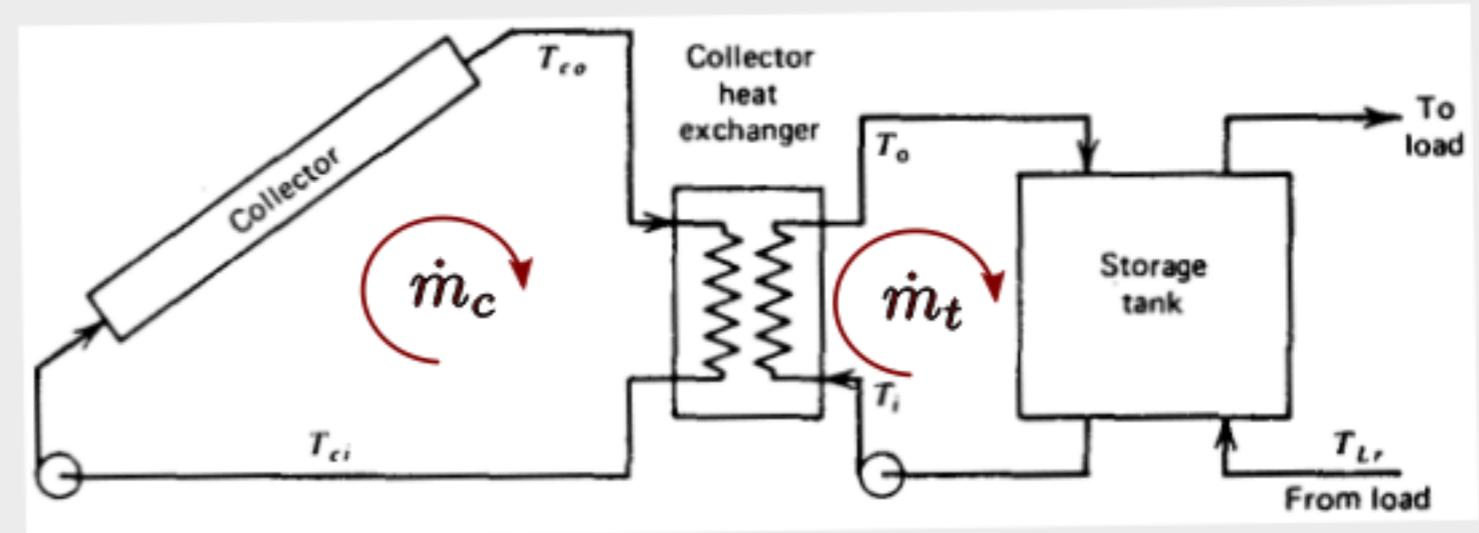


## SISTEMA SOLAR TIPO: de circulación forzada

### CAUDALES

FLUJO MÁSICO [kg/s, kg/h]:  $\dot{m}$   
Masa por unidad de tiempo

CAUDAL [m<sup>3</sup>/s, lt/h]:  $\dot{V}$   
Volumen por unidad de tiempo



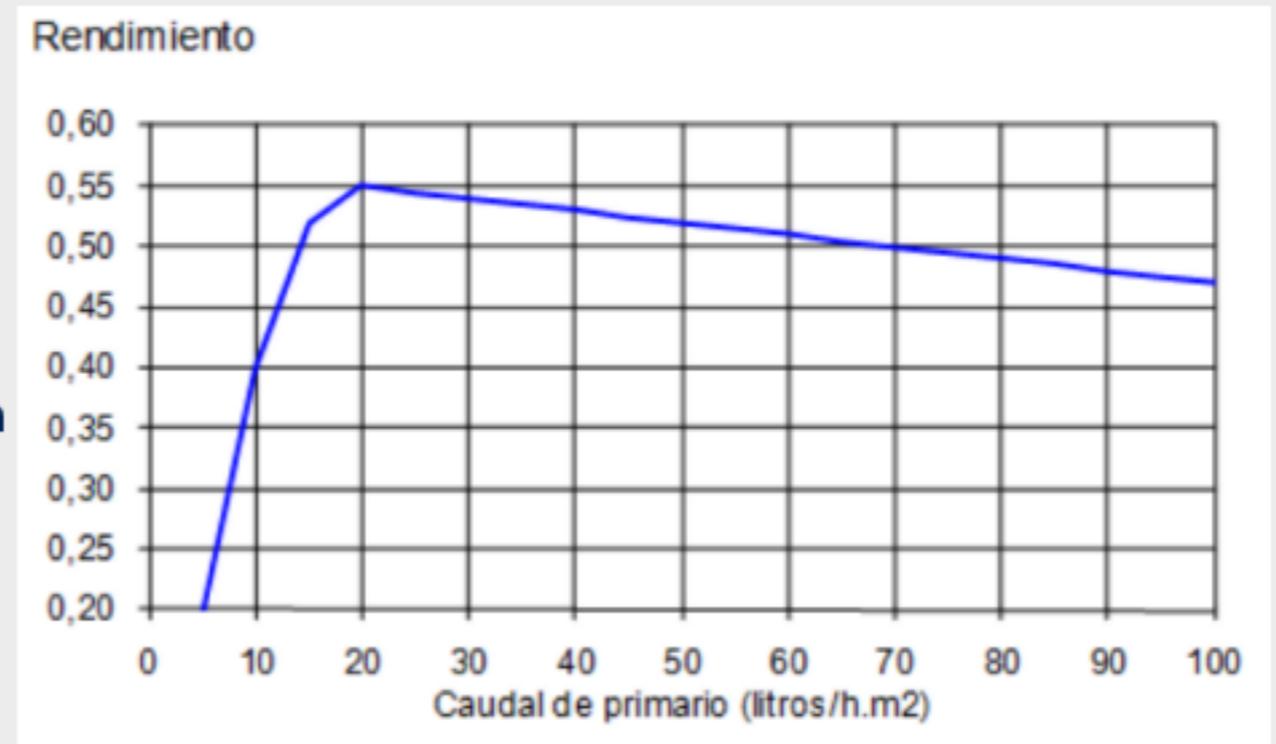
### CAUDAL POR EL CIRCUITO PRIMARIO

Caudal específico: caudal por unidad de área de colección de la instalación.  
Unidad útil: lt/h m<sup>2</sup>

Existe un caudal "óptimo" para cada instalación

Por debajo: rendimiento decae abruptamente

Por encima: rendimiento decae lentamente

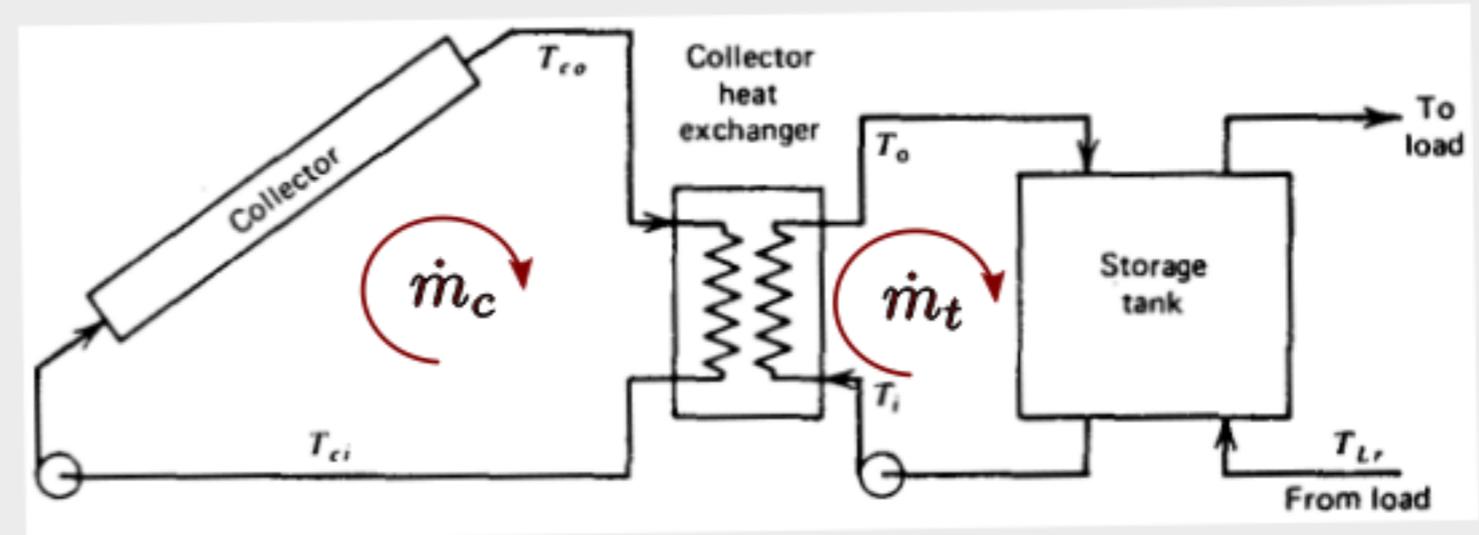


## SISTEMA SOLAR TIPO: de circulación forzada

### CAUDALES

FLUJO MÁSICO [kg/s, kg/h]:  $\dot{m}$   
Masa por unidad de tiempo

CAUDAL [m<sup>3</sup>/s, lt/h]:  $\dot{V}$   
Volumen por unidad de tiempo

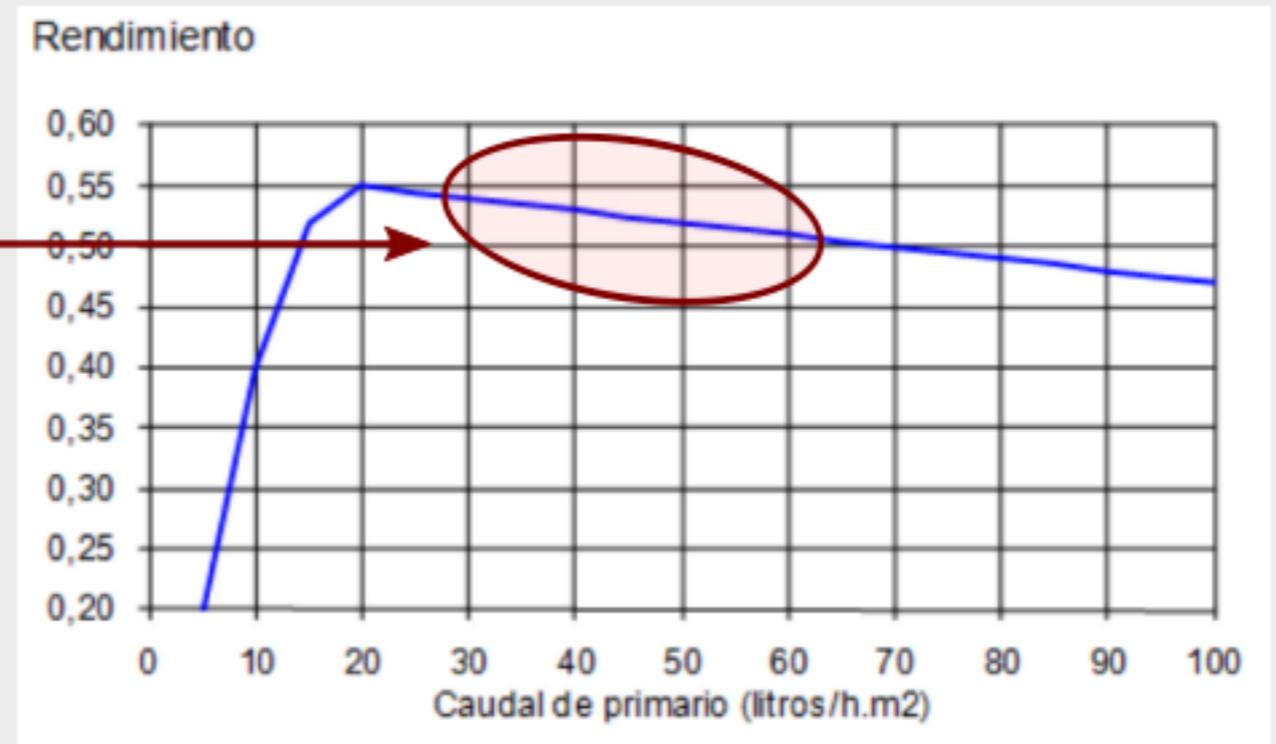


### CAUDAL POR EL CIRCUITO PRIMARIO

Se recomienda establecer un caudal por encima del caudal de máxima eficiencia, para tener un rango de trabajo con alta eficiencia asegurada (margen de error)

Se recomiendan caudales entre 30 y 60 lt/h m<sup>2</sup>

Un caudal en torno a 40 lt/h m<sup>2</sup> es adecuado



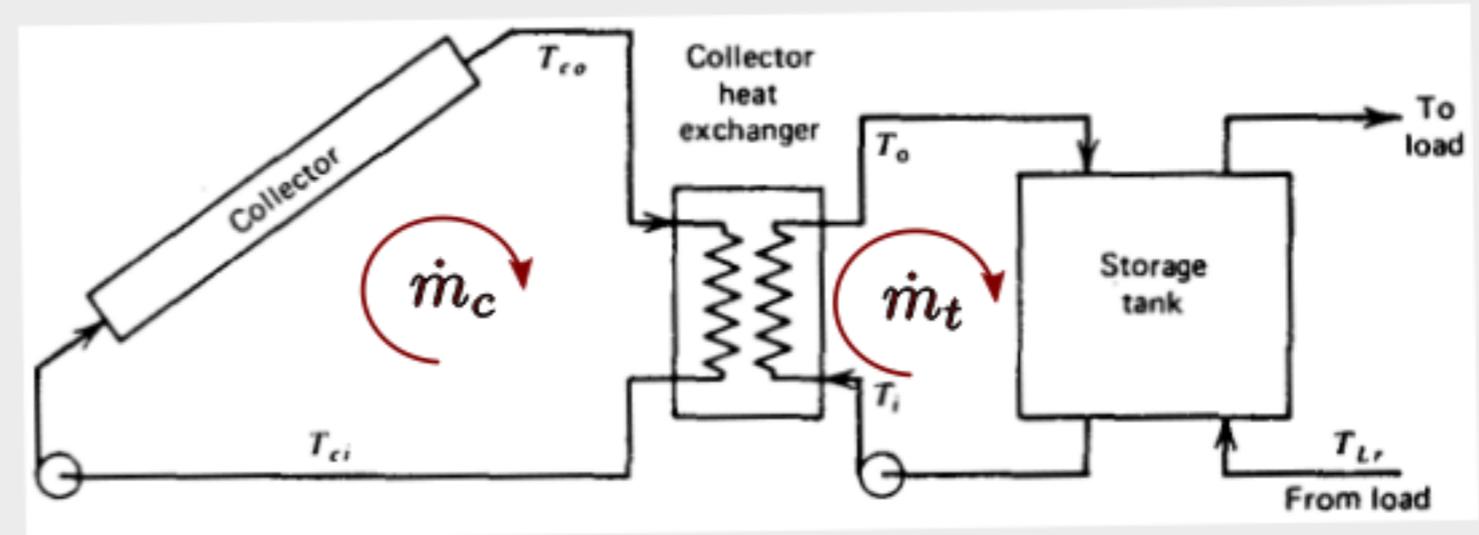


## SISTEMA SOLAR TIPO: de circulación forzada

### CAUDALES

FLUJO MÁSICO [kg/s, kg/h]:  $\dot{m}$   
Masa por unidad de tiempo

CAUDAL [m<sup>3</sup>/s, lt/h]:  $\dot{V}$   
Volumen por unidad de tiempo



### CAUDAL POR EL CIRCUITO SECUNDARIO

Balance de tasa de capacitancia a ambos lados del intercambiador de calor

Un caudal alto mejora la transferencia de calor, pero rompe la estratificación en el tanque

Como criterio general, se utiliza (guía ASIT):

$$0,9 \dot{V}_c \leq \dot{V}_t \leq \dot{V}_c$$

## SISTEMA SOLAR TIPO: de circulación forzada

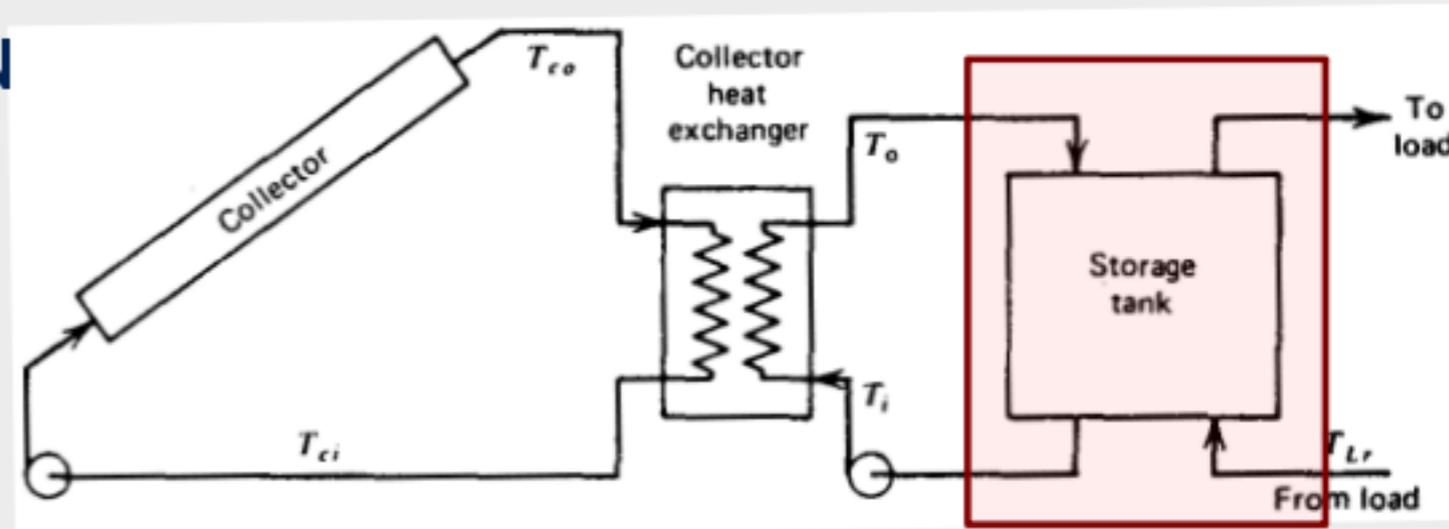
### VOLUMEN DE ACUMULACIÓN

El volumen de acumulación depende del tamaño de la instalación (cantidad de m<sup>2</sup> de colectores)

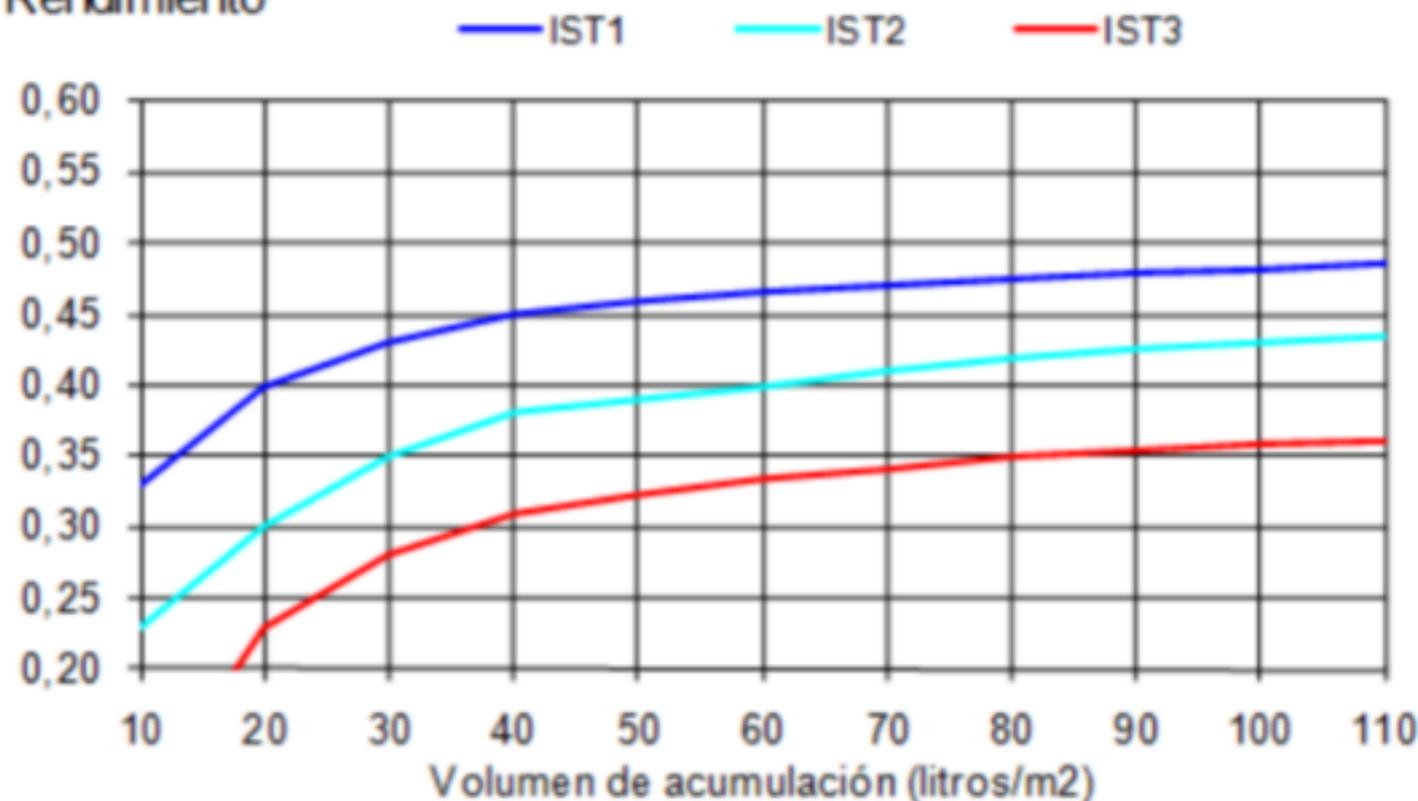
VOLUMEN POR UNIDAD DE ÁREA DE ACUMULACIÓN: [lt/m<sup>2</sup>]

$$\frac{V_{acu}}{A_c}$$

Esta magnitud no depende del tamaño de la instalación



Rendimiento



## SISTEMA SOLAR TIPO: de circulación forzada

### VOLUMEN DE ACUMULACIÓN

El volumen de acumulación depende del tamaño de la instalación (cantidad de m<sup>2</sup> de colectores)

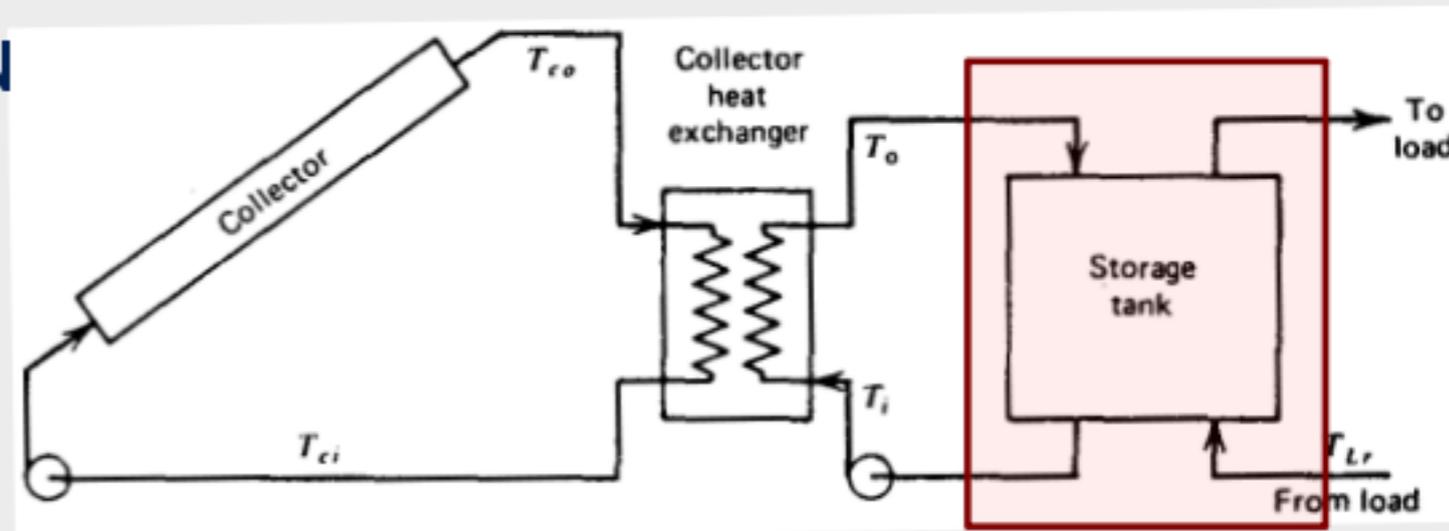
VOLUMEN POR UNIDAD DE ÁREA DE ACUMULACIÓN: [lt/m<sup>2</sup>]

$$\frac{V_{acu}}{A_c}$$

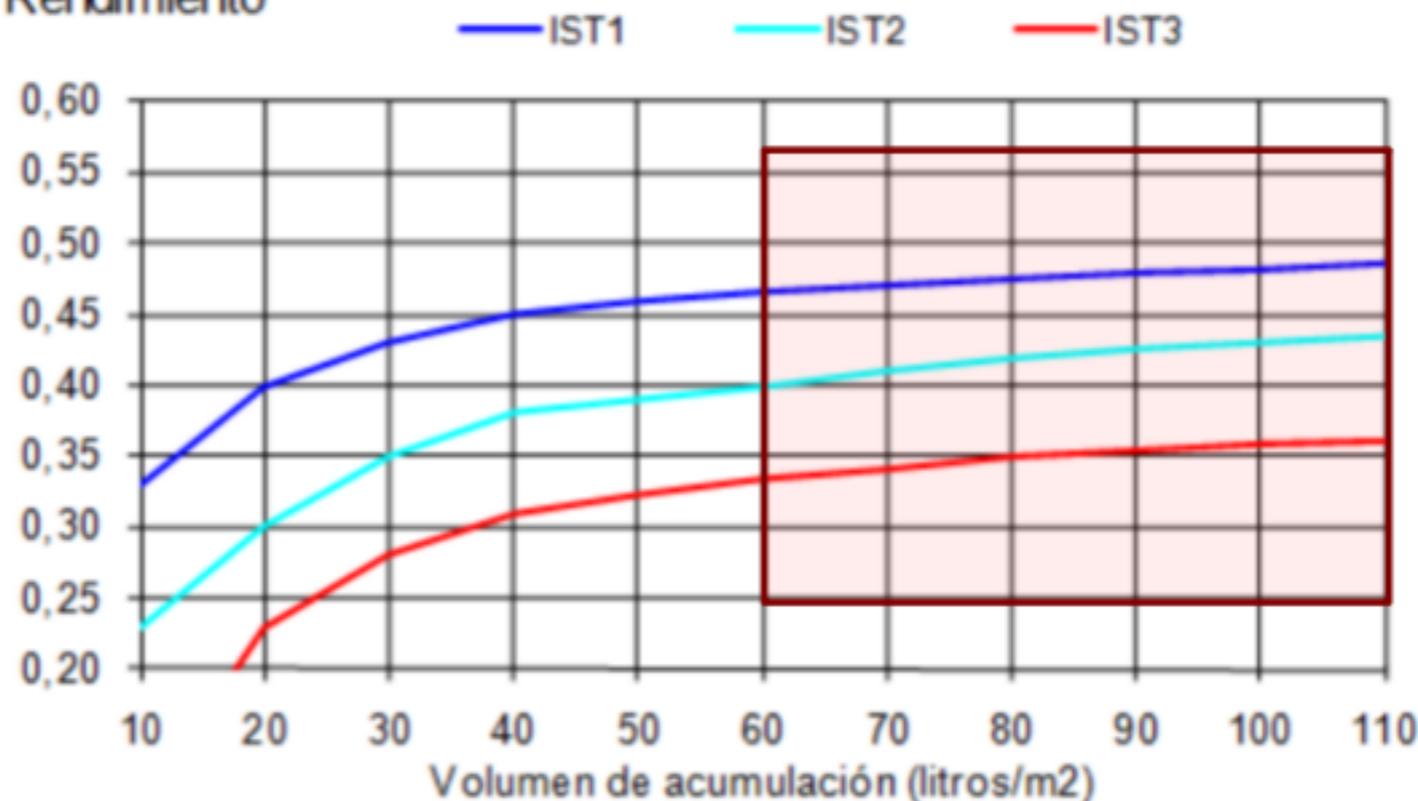
Esta magnitud no depende del tamaño de la instalación

Desde el punto de vista de la eficiencia de la instalación se recomienda trabajar entre:

$$60\text{lt/m}^2 \leq \frac{V_{acu}}{A_c} \leq 120\text{lt/m}^2$$



Rendimiento



## SISTEMA SOLAR TIPO: de circulación forzada

### VOLUMEN DE ACUMULACIÓN

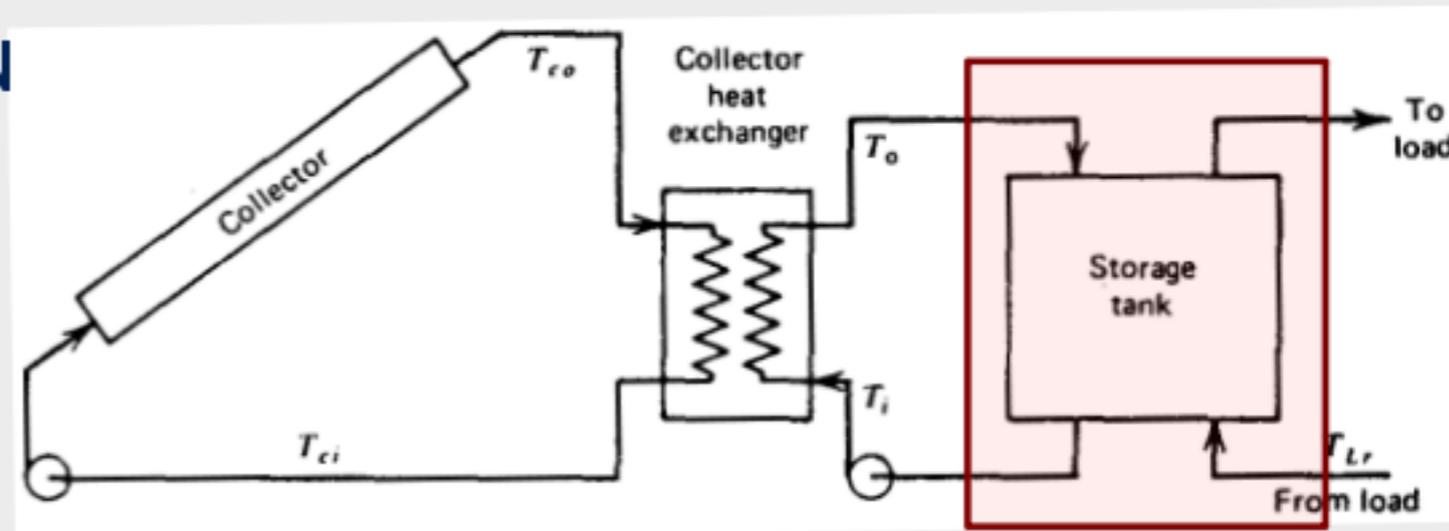
El volumen de acumulación depende del tamaño de la instalación (cantidad de m<sup>2</sup> de colectores)

VOLUMEN POR UNIDAD DE ÁREA DE ACUMULACIÓN: [lt/m<sup>2</sup>]

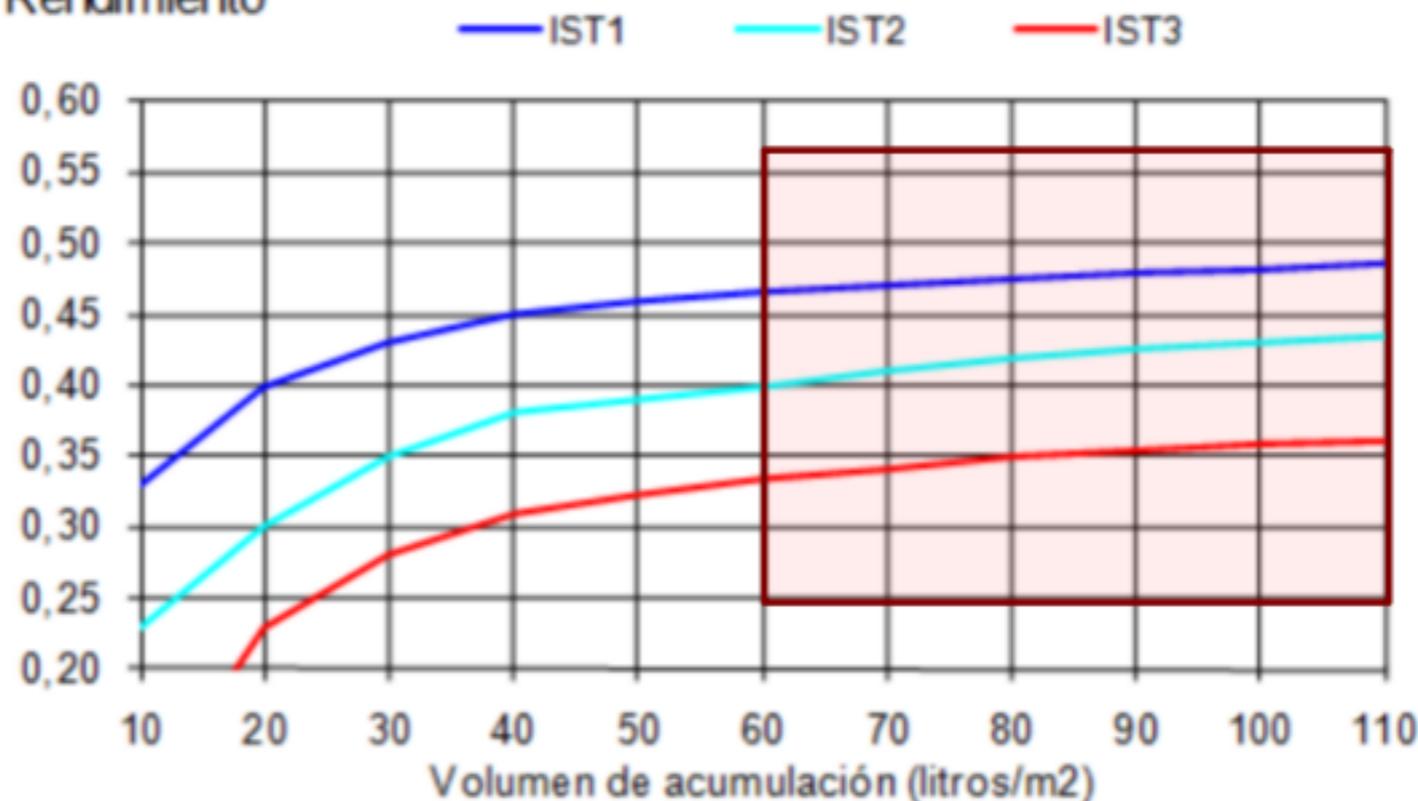
$$\frac{V_{acu}}{A_c}$$

Esta magnitud no depende del tamaño de la instalación

Tanto el tamaño de la instalación (m<sup>2</sup>) como el volumen de acumulación deben guardar relación con la demanda de ACS requerida



### Rendimiento



# MÉTODO F-CHART

## MÉTODO F-CHART

Procedimiento empírico para estimar la fracción solar mensual de un sistema solar térmico (SST).

Luego de estimar las fracciones solares mensuales, se estima a escala anual.

Fracción solar: porcentaje de la demanda de energía que es cubierta por el SST.

La estimación se basa en la experimentación con varios SST en distintas partes del mundo, no obstante, el resultado no está carente de error. Este método brinda una primera estimación del rendimiento del SST.

Se puede utilizar con baja incerteza dentro de los siguientes rangos:

$$0,6 \leq (\tau\alpha)_n \leq 0,9$$

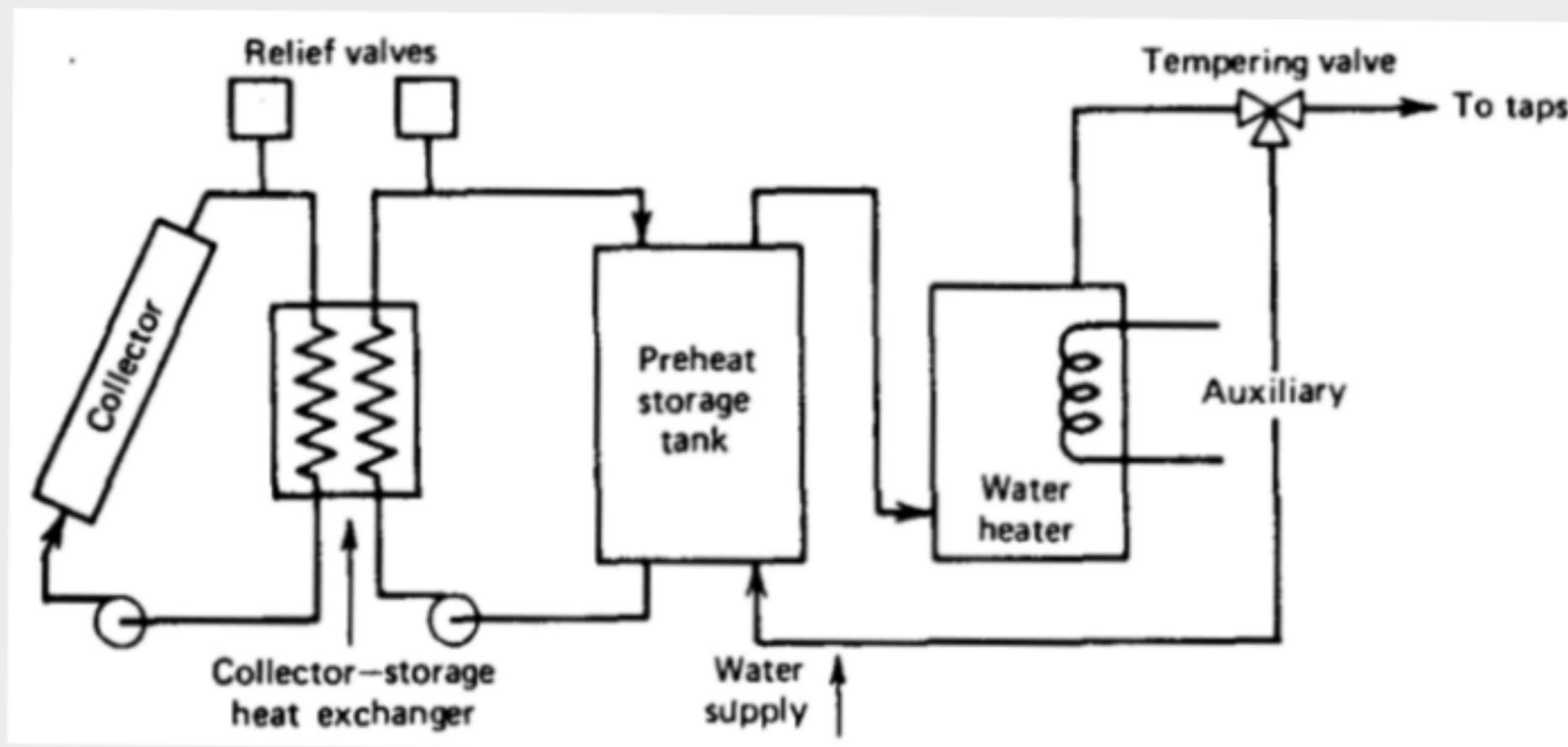
$$5\text{m}^2 \leq F'_R A_c \leq 120\text{m}^2$$

$$2,1 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C} \leq U_L \leq 8,3 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$$

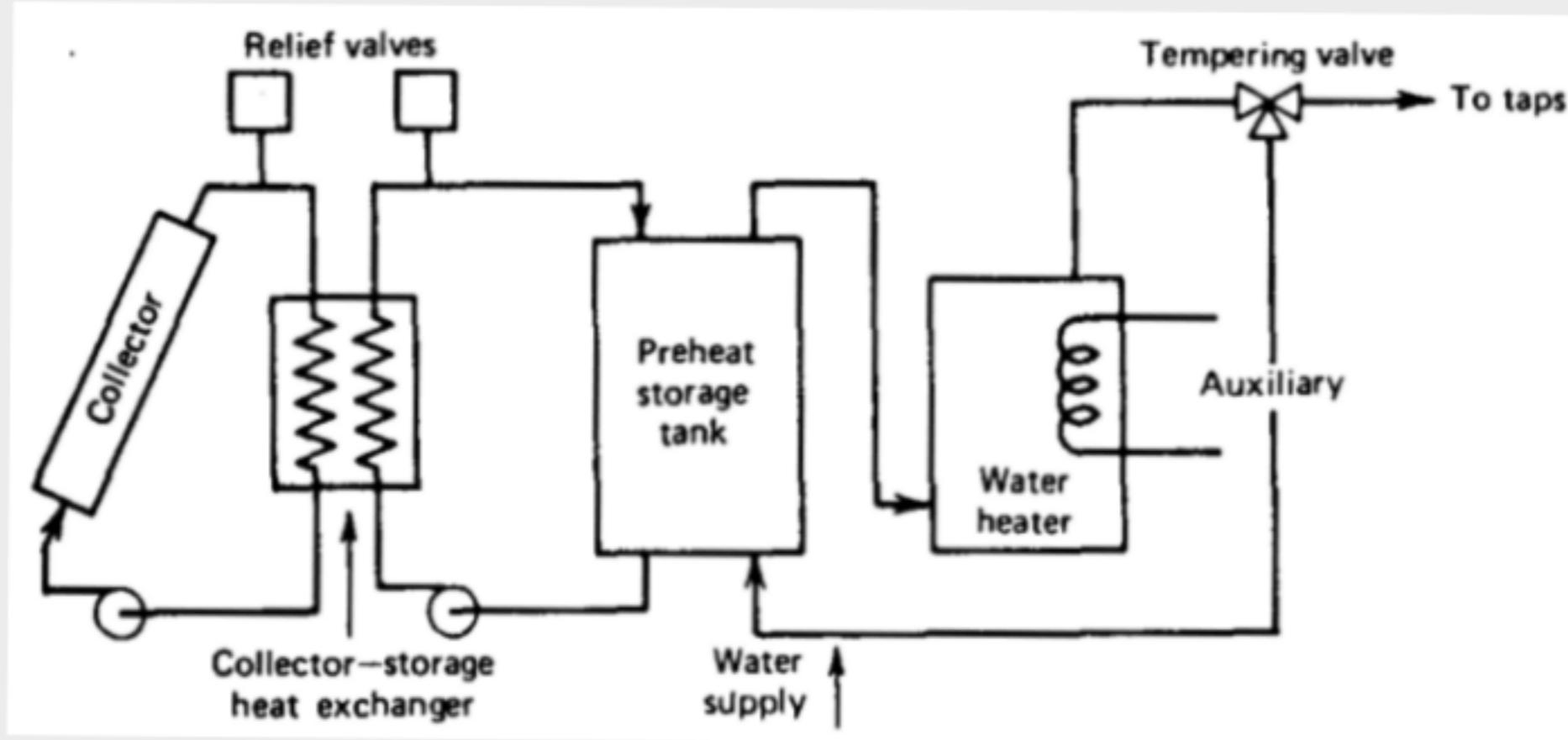
$$30^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$$

Es decir, en condiciones relativamente normales

## UTILIZAREMOS ESTE SISTEMA COMO REFERENCIA



## UTILIZAREMOS ESTE SISTEMA COMO REFERENCIA

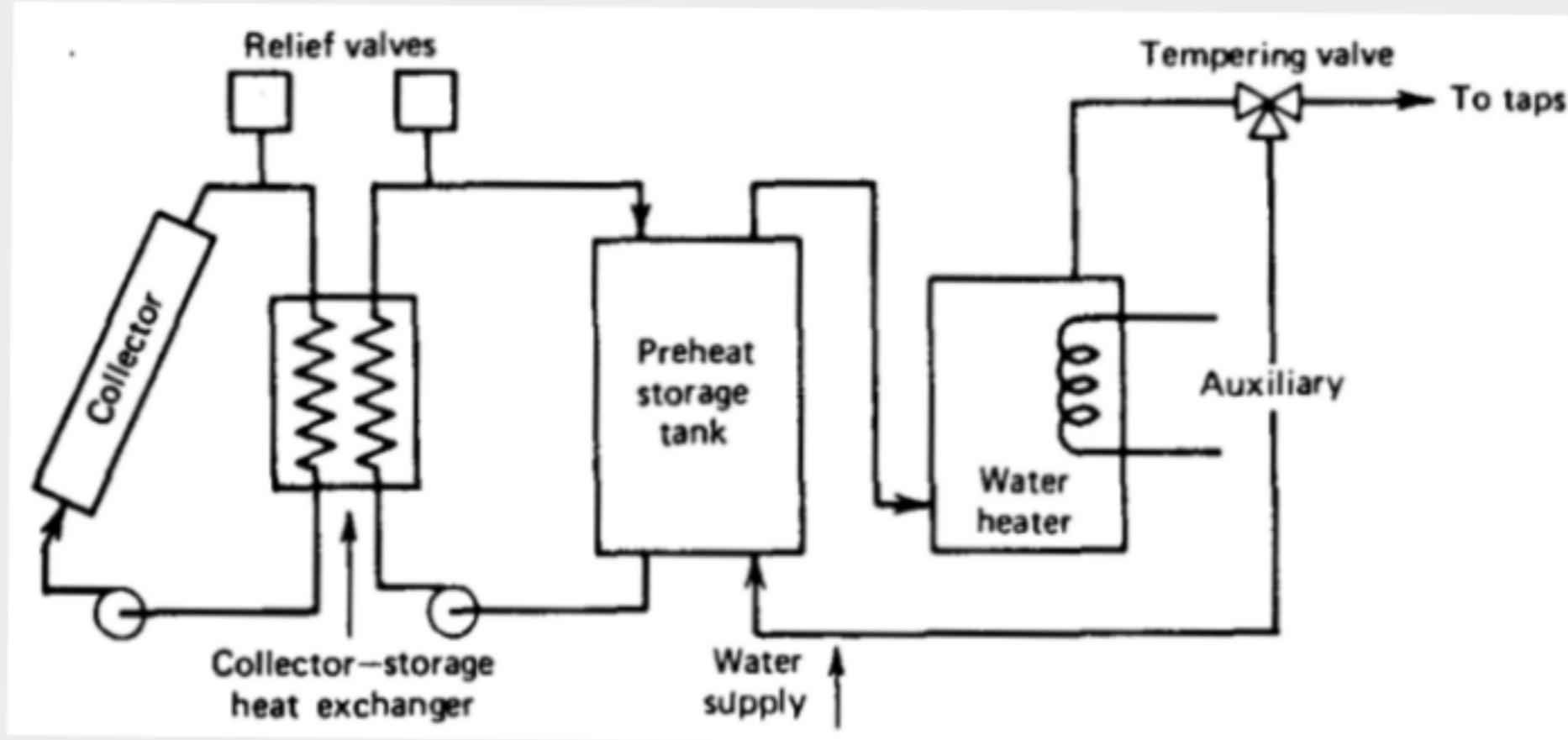


SE DEFINEN DOS VARIABLES ADIMENSIONADAS  $X_i$  e  $Y_i$  PARA CADA MES.

DE LO QUE SE OBTIENE LA FRACCIÓN MENSUAL PARA ESE MES:

$$f_i = 1,029 Y_i - 0,065 X_i - 0,245 Y_i^2 + 0,0018 X_i^2 + 0,0215 Y_i^3$$

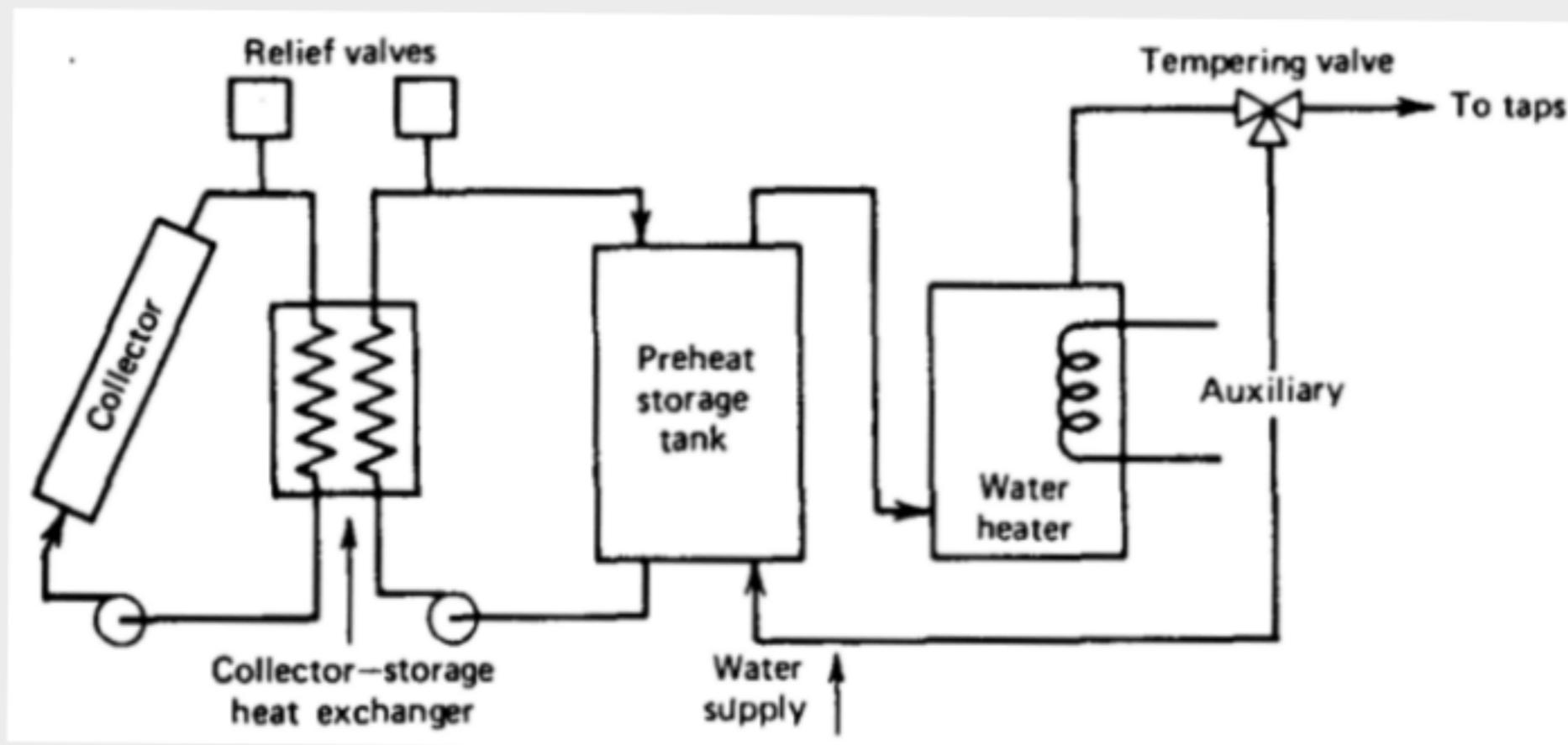
## UTILIZAREMOS ESTE SISTEMA COMO REFERENCIA



## COEFICIENTE X

$$X = F_R U_L \times \frac{F'_R}{F_R} \times (T_{\text{ref}} - \bar{T}_a) \times \Delta t \times \frac{A_c}{L}$$

## UTILIZAREMOS ESTE SISTEMA COMO REFERENCIA



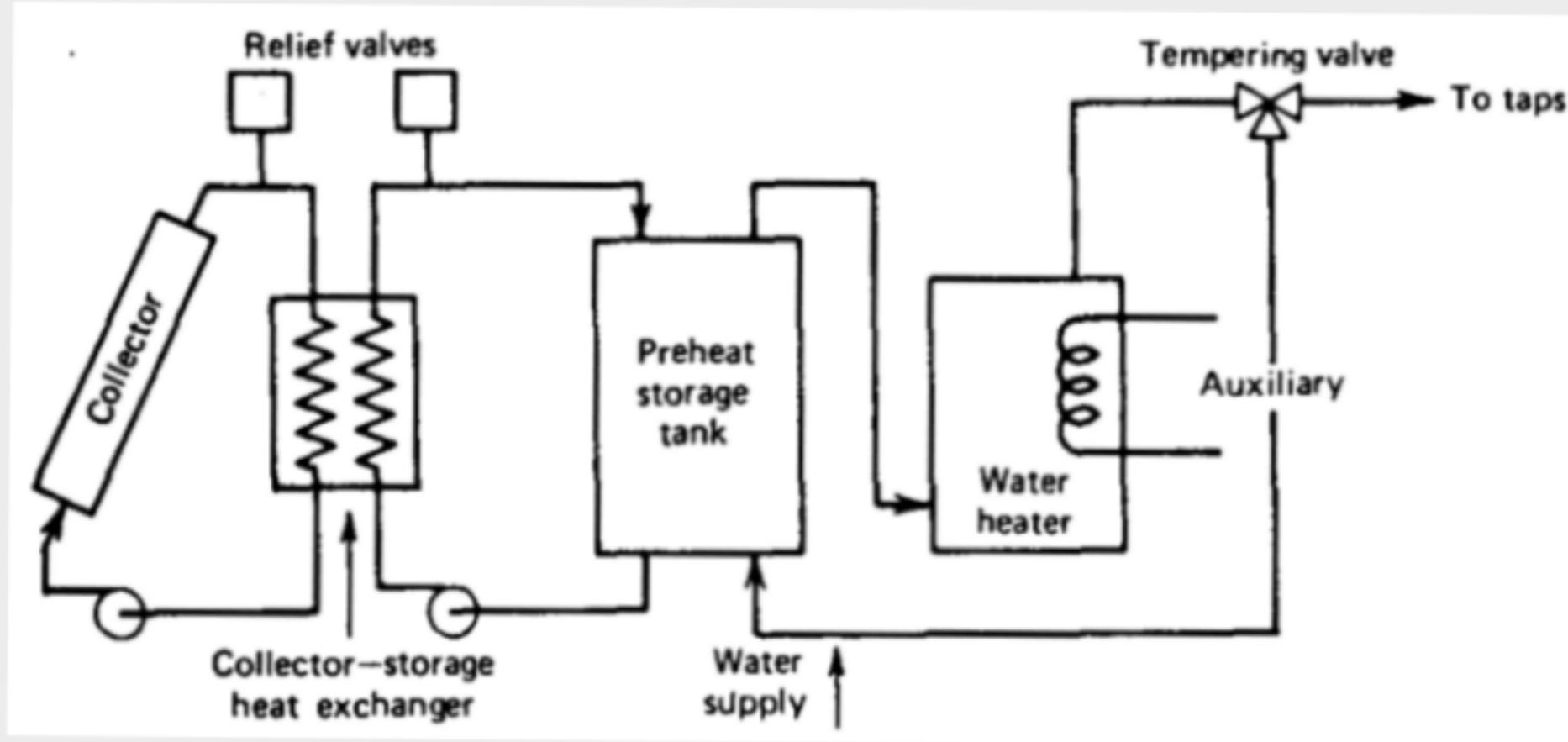
### COEFICIENTE X

$$X = F_R U_L \times \frac{F'_R}{F_R} \times (T_{\text{ref}} - \bar{T}_a) \times \Delta t \times \frac{A_c}{L}$$

The equation is annotated with the following labels:
 

- $F_R U_L$ : parámetro del colector
- $\frac{F'_R}{F_R}$ : parámetro del sist. colector-intercam.
- $T_{\text{ref}}$ : Temperatura de referencia: 100°C
- $\bar{T}_a$ : Temperatura media ambiente del mes
- $\Delta t$ : Cantidad de segundos en el mes
- $\frac{A_c}{L}$ : Demanda de energía para ACS
- $A_c$ : Area total de colección

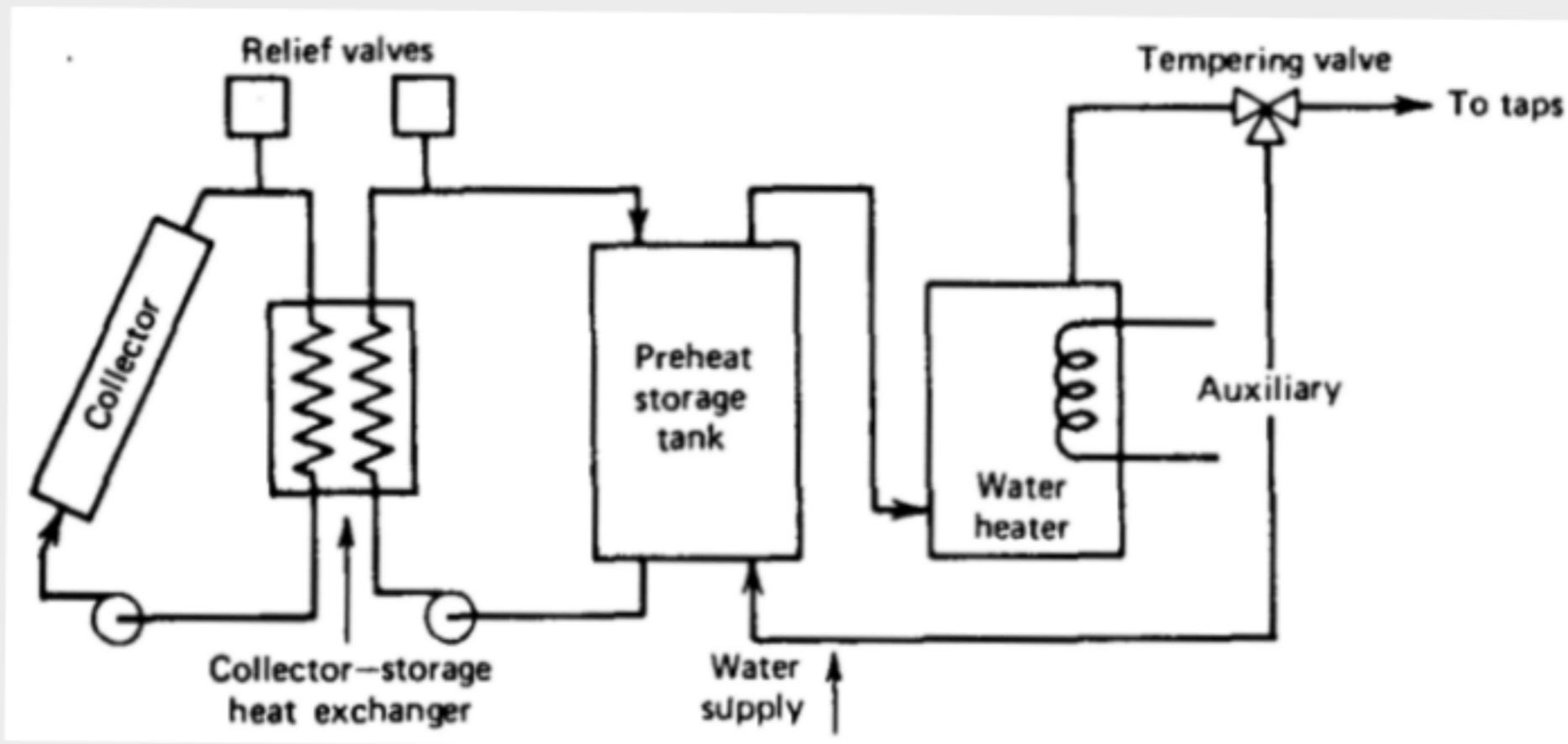
## UTILIZAREMOS ESTE SISTEMA COMO REFERENCIA



## COEFICIENTE Y

$$Y = F_R(\tau\alpha)_n \times \frac{F'_R}{F_R} \times \frac{(\tau\alpha)_{av}}{(\tau\alpha)_n} \times \bar{H}_t N \times \frac{A_c}{L}$$

## UTILIZAREMOS ESTE SISTEMA COMO REFERENCIA

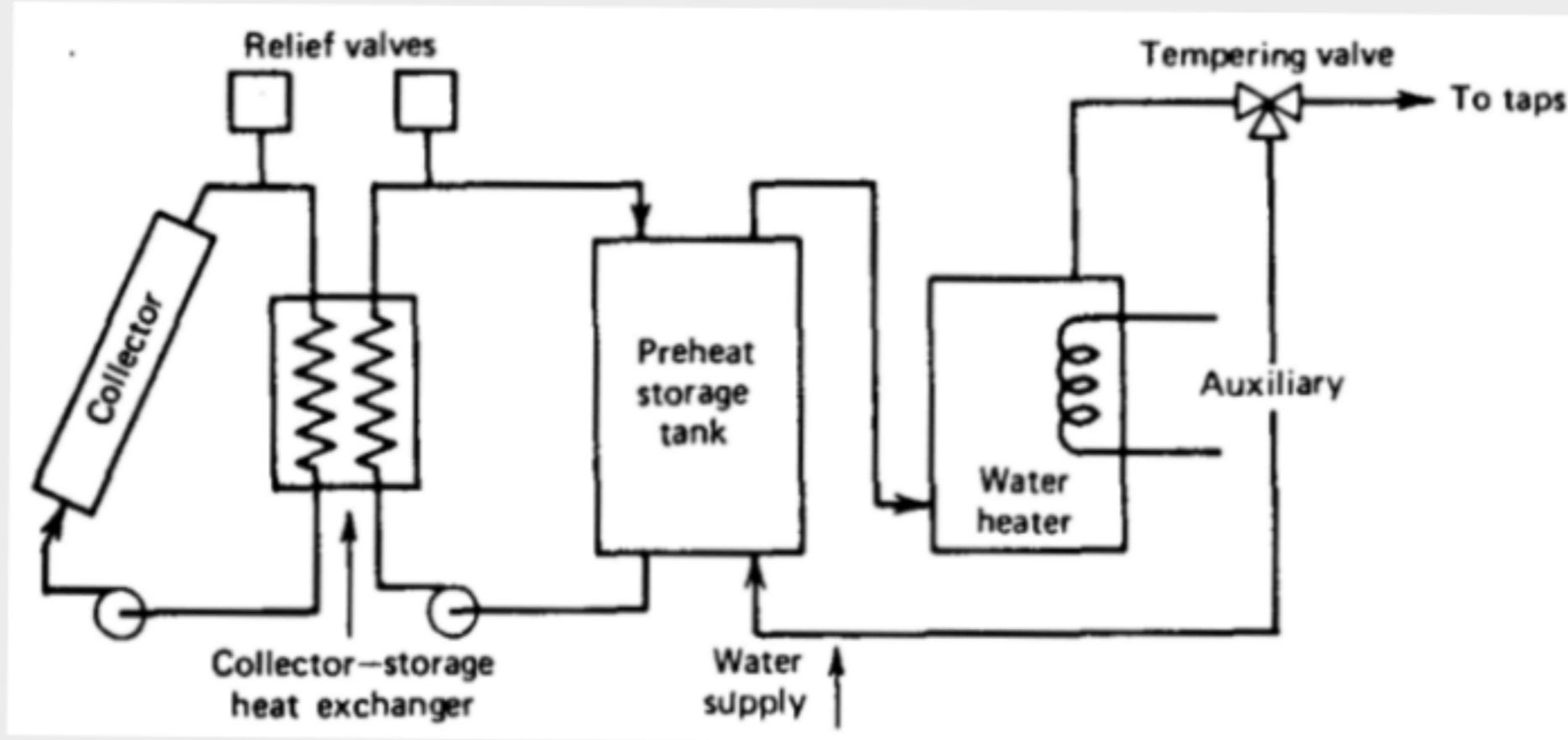


### COEFICIENTE Y

$$Y = F_R(\tau\alpha)_n \times \frac{F'_R}{F_R} \times \frac{(\tau\alpha)_{av}}{(\tau\alpha)_n} \times \bar{H}_t N \times \frac{A_c}{L}$$

Media mensual de la irradiación global diaria sobre el plano del colector →  $\bar{H}_t$   
 Area total de colección →  $A_c$   
 Demanda de energía para ACS →  $L$   
 Cantidad de días en el mes →  $N$   
 Modificador de ángulo →  $\frac{(\tau\alpha)_{av}}{(\tau\alpha)_n}$   
 parámetro del sist. colector-intercam. →  $\frac{F'_R}{F_R}$   
 parámetro del colector →  $F_R(\tau\alpha)_n$

## UTILIZAREMOS ESTE SISTEMA COMO REFERENCIA



**MODIFICADOR DE ÁNGULO (MAI):** depende de la posición relativa colector-sol

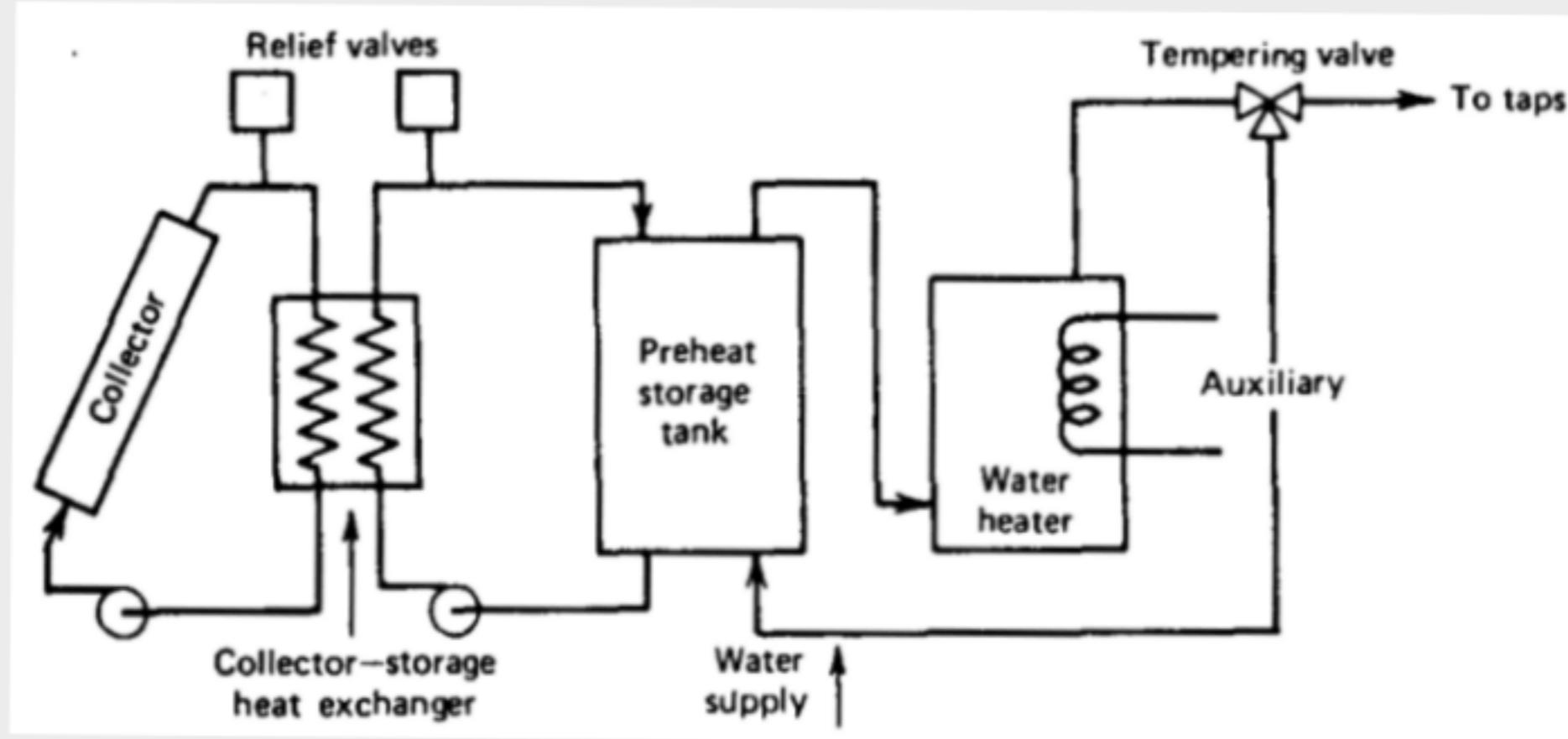
COLECTORES DE PLACA PLANA: MAI = 0.94

$$MAI = K_{\theta} = \frac{(\tau\alpha)_{av}}{(\tau\alpha)_n}$$

COLECTORES DE TUBO DE VACÍO CON ABSORBEDOR PLANO: MAI = 0.97.

COLECTORES DE TUBO DE VACÍO CON ABSORBEDOR CILÍNDRICO: MAI = 1.00

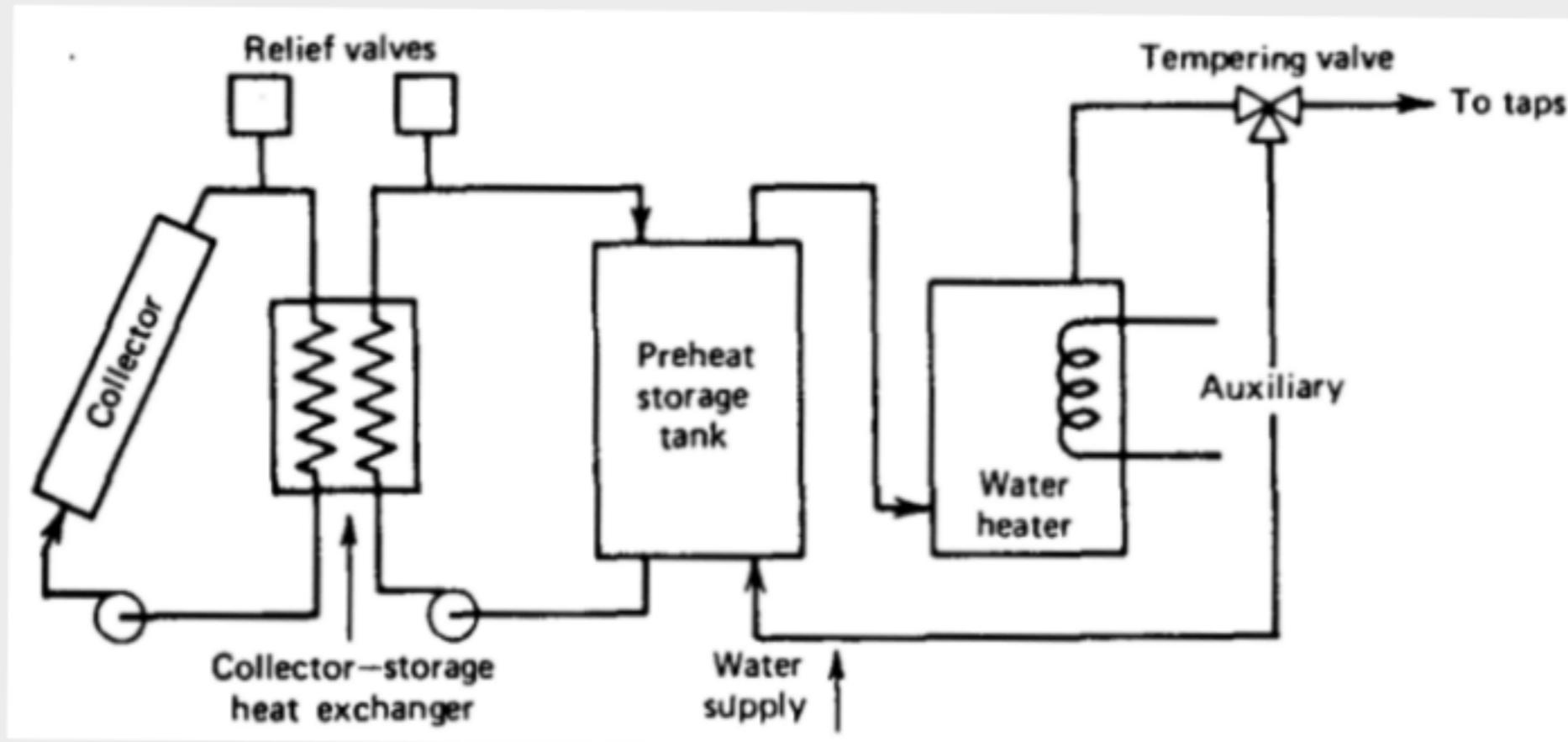
## UTILIZAREMOS ESTE SISTEMA COMO REFERENCIA



## CORRECCIÓN DE X POR VOLUMEN DE ACUMULACION

$$CV = \frac{X_c}{X} = \left( \frac{V_{acu}/A_c}{75 \text{ lt/m}^2} \right)^{-0,25}$$

## UTILIZAREMOS ESTE SISTEMA COMO REFERENCIA



## CORRECCIÓN DE X POR TEMPERATURA

$$CT = \frac{X_c}{X} = \frac{11,6^{\circ}\text{C} + 1,18 T_w + 3,86 T_m - 2,32 \bar{T}_a}{100^{\circ}\text{C} - \bar{T}_a}$$

$T_w$  TEMPERATURA MEDIA DE AGUA DE RED (en °C)

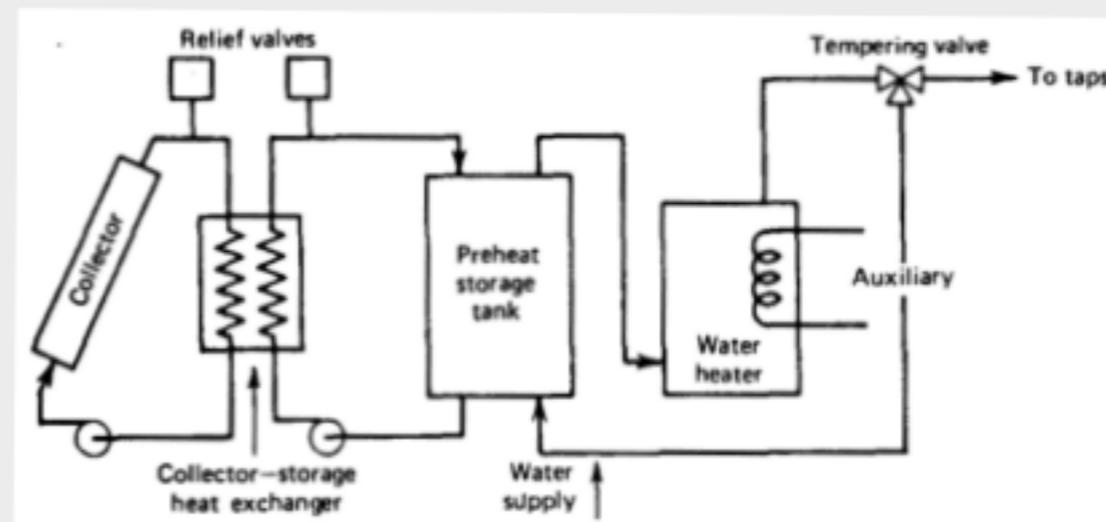
$T_m$  TEMPERATURA DE PREPARACIÓN DEL AGUA (To load, en °C)

## MÉTODO F-CHART

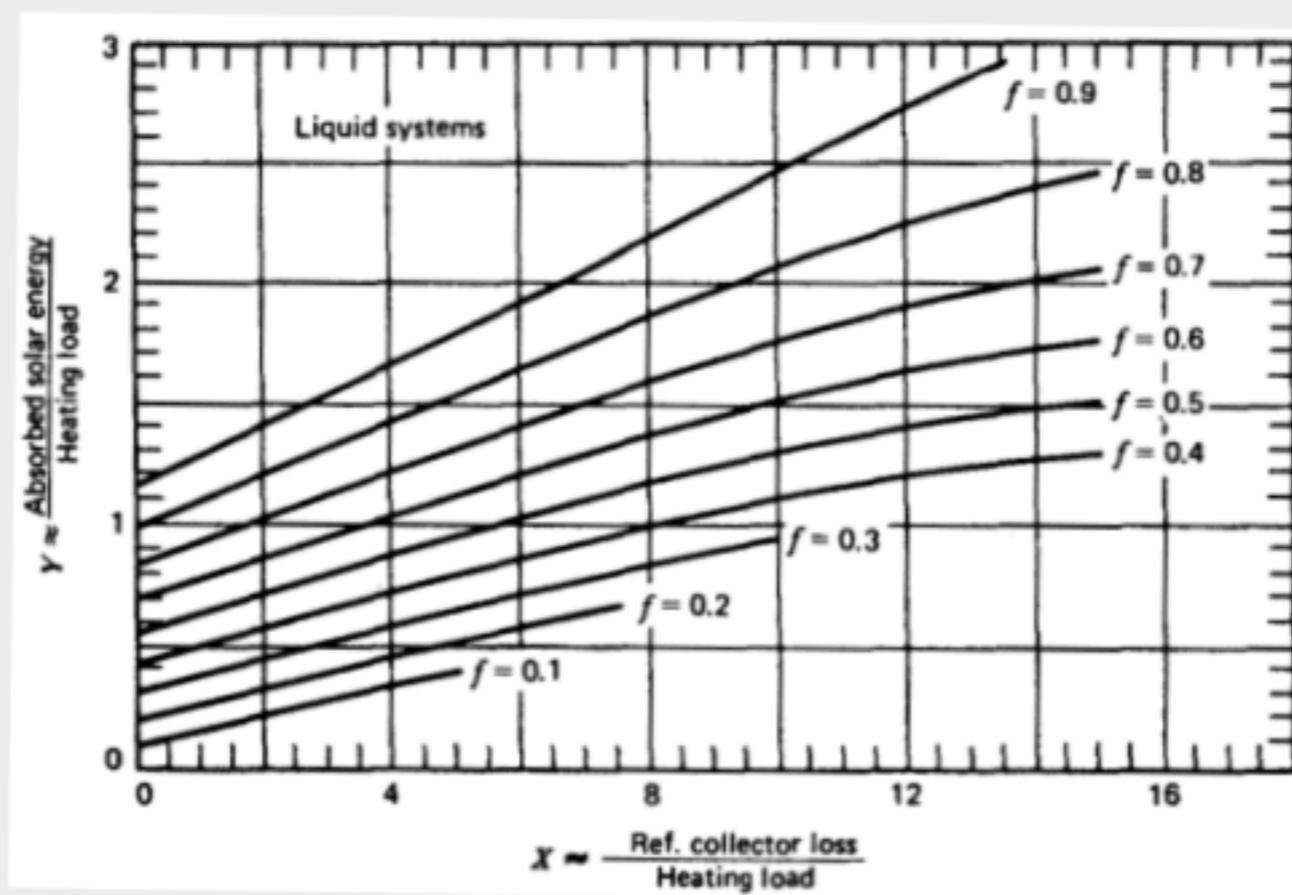
Para cada mes se calcula:

$$X = F_R U_L \times \frac{F'_R}{F_R} \times (T_{\text{ref}} - \bar{T}_a) \times \Delta t \times \frac{A_c}{L} \times CV \times CT$$

$$Y = F_R (\tau\alpha)_n \times \frac{F'_R}{F_R} \times \frac{(\tau\alpha)_{\text{av}}}{(\tau\alpha)_n} \times \bar{H}_t N \times \frac{A_c}{L}$$



Fracción solar mensual:  $f_i = 1,029 Y_i - 0,065 X_i - 0,245 Y_i^2 + 0,0018 X_i^2 + 0,0215 Y_i^3$

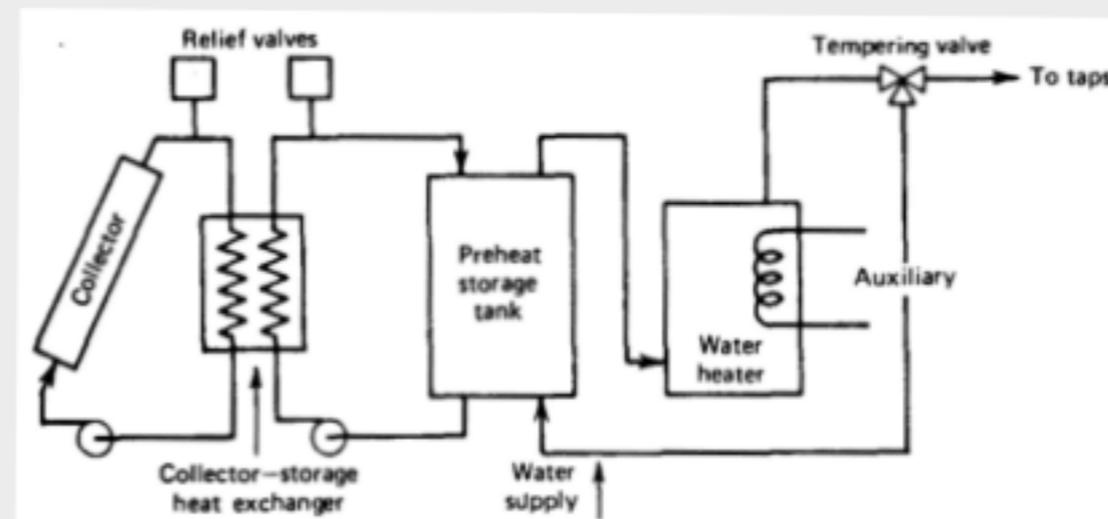


## MÉTODO F-CHART

Para cada mes se calcula:

$$X = F_R U_L \times \frac{F'_R}{F_R} \times (T_{\text{ref}} - \bar{T}_a) \times \Delta t \times \frac{A_c}{L} \times CV \times CT$$

$$Y = F_R (\tau\alpha)_n \times \frac{F'_R}{F_R} \times \frac{(\tau\alpha)_{\text{av}}}{(\tau\alpha)_n} \times \bar{H}_t N \times \frac{A_c}{L}$$



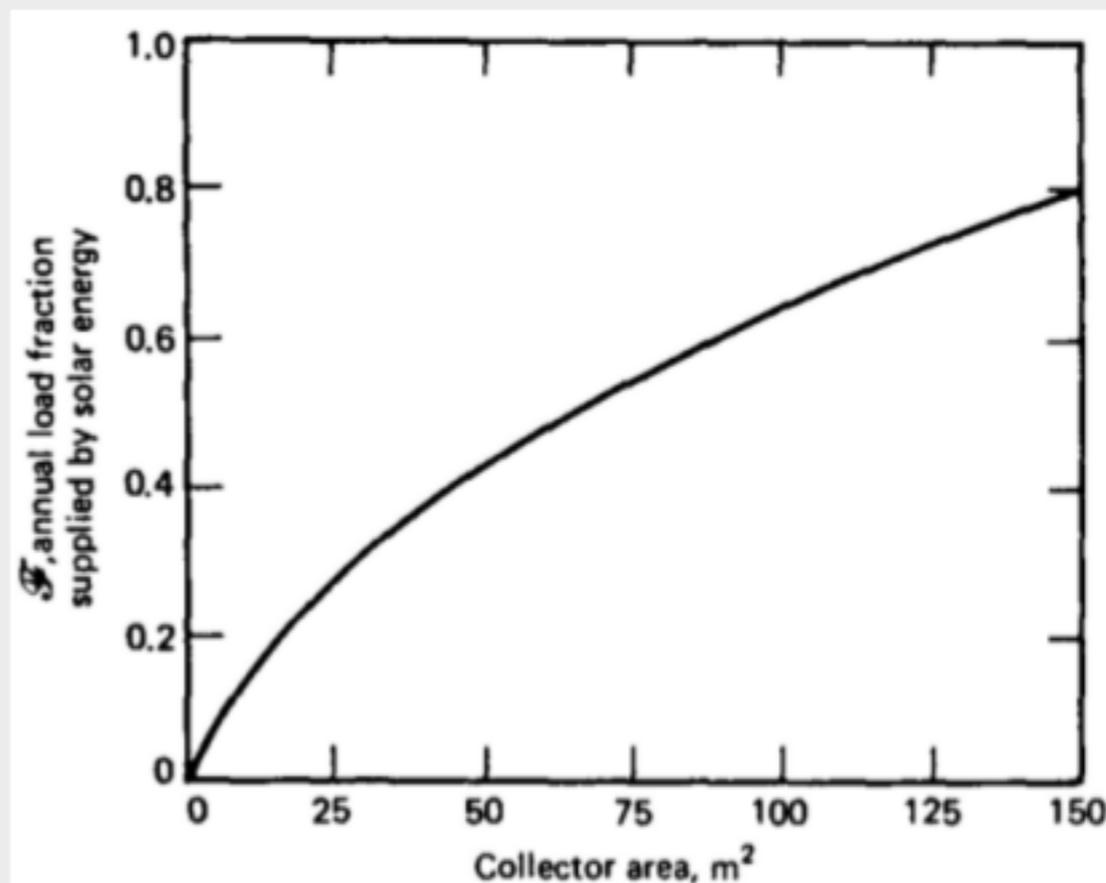
Fracción solar mensual:  $f_i = 1,029 Y_i - 0,065 X_i - 0,245 Y_i^2 + 0,0018 X_i^2 + 0,0215 Y_i^3$

## FRACCIÓN SOLAR ANUAL

$$\mathcal{F} = \frac{\sum_1^{12} f_i L_i}{\sum_1^{12} L_i}$$

LA FRACCIÓN SOLAR CRECE CON EL TAMAÑO DE LA INSTALACIÓN (área de colección)

NO SE DEBE APUNTAR A UNA FRACCIÓN SOLAR DE 100% (riesgo de sobrecalentamiento)



# EJERCICIO F-CHART

Una vivienda de Montevideo, tiene un consumo diario de medio de 280 litros de agua a 45 °C.

a) Calcular de la demanda de energía en agua caliente sanitaria de la vivienda para cada mes del año.

$$L_{\text{dia}}^{\text{ACS}} = V_{\text{ACS}} \rho c_p (T_o - T_i)$$

Demanda de energía por día

TEMPERATURA DE AIRE AMBIENTE Y TEMPERATURA DE AGUA FRÍA

Lugar	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	Año
Montevideo	22.7	22.3	20.5	17.2	13.9	11.0	10.7	11.5	13.2	15.7	18.3	16.5	16.5
Artigas	25.4	24.6	22.5	18.9	15.7	12.9	13.1	14.4	16.0	18.7	21.4	19.0	19.0
Rivera	24.1	23.5	21.6	18.1	15.3	12.3	12.3	13.4	15.0	17.9	20.5	18.1	18.1
Paysandú	24.8	23.7	21.6	18.0	14.8	11.7	11.8	12.9	14.6	17.5	20.4	17.9	17.9
Melo	23.2	22.8	20.8	17.2	13.9	11.1	11.5	12.4	14.1	16.9	18.9	17.0	17.0
Mercedes	24.3	23.3	20.9	17.2	13.9	10.9	11.1	12.1	13.9	16.8	19.8	17.3	17.3
T. Y Tres	22.9	22.5	20.6	17.2	13.9	11.2	11.3	12.2	13.8	16.3	18.7	16.8	16.8
Colonia	23.7	22.9	21.2	17.9	14.8	11.7	11.4	12.2	14.1	16.8	19.5	17.4	17.4
Rocha	21.7	21.5	19.9	16.6	13.7	11.1	10.9	11.4	12.7	15.1	17.6	16.0	16.0
<b>Agua OSE</b>													
Montevideo	28.4	28.5	26.1	21.7	16.6	12.0	9.3	9.2	11.7	16.1	21.3	18.9	18.9

$$L_i^{\text{ACS}} = L_{\text{dia}}^{\text{ACS}} \times N_i$$

Demanda de energía por mes donde  $N_i$  es el número de días del mes  $i$

Una vivienda de Montevideo, tiene un consumo diario de medio de 280 litros de agua a 45 °C.

b) Usando el año meteorológico típico, calcular el recurso solar de cada mes del año para un plano inclinado a 45° (orientación norte).

$$\overline{H_j} = \frac{\Sigma H_i}{N_i}$$

c) Obtener la irradiación media anual sobre el plano inclinado.

$$\overline{H} = \frac{\Sigma \overline{H_j}}{N_j}$$

Proponemos un sistema de de las siguientes características:

- Número de colectores: 2.
- Superficie de apertura de cada colector solar:  $1.9 \text{ m}^2$ .
- Volumen de acumulación:  $V_{ACU} = 300 \text{ lt.}$
- Factor de remoción del calor:  $FR = 0.9$
- Eficiencia óptica del colector en incidencia normal:  $(\tau\alpha)_n = 0.88$ .
- $FR_{UL} = 4.0 \text{ W/m}^2\text{K}$ .
- Modificador del ángulo de incidencia:  $K50 = 0.94$ .
- El caudal másico específico en circuito primario queda definido por: el área del colector, la densidad de la mezcla anticongelante de  $1.03 \text{ kg/lt}$  y caudal volumétrico por colector de  $100 \text{ lt/h}$ .
- Calor específico de la mezcla anticongelante que circula por el circuito primario:  $C_p = 3900 \text{ J/kg K}$ .
- Efectividad del intercambiador:  $\varepsilon = 0,8$

Una vivienda de Montevideo, tiene un consumo diario de medio de 280 litros de agua a 45 °C.

d) Estimar la fracción solar mensual sobre el colector.

Una vivienda de Montevideo, tiene un consumo diario de medio de 280 litros de agua a 45 °C.

d) Estimar la fracción solar mensual sobre el colector.

$$F'_R = F_R \left[ 1 + \left( \frac{A_c F_R U_L}{\dot{m} c_p} \right) \left( \frac{1}{\epsilon} - 1 \right) \right]^{-1}$$

$$CV = \frac{X_c}{X} = \left( \frac{V_{acu}/A_c}{75 \text{ lt/m}^2} \right)^{-0,25}$$

$$CT = \frac{X_c}{X} = \frac{11,6^\circ\text{C} + 1,18 T_w + 3,86 T_m - 2,32 \bar{T}_a}{100^\circ\text{C} - \bar{T}_a}$$

Una vivienda de Montevideo, tiene un consumo diario de medio de 280 litros de agua a 45 °C.

d) Estimar la fracción solar mensual sobre el colector.

$$F'_R = F_R \left[ 1 + \left( \frac{A_c F_R U_L}{\dot{m} c_p} \right) \left( \frac{1}{\epsilon} - 1 \right) \right]^{-1}$$

$$CV = \frac{X_c}{X} = \left( \frac{V_{acu}/A_c}{75 \text{ lt/m}^2} \right)^{-0,25}$$

$$CT = \frac{X_c}{X} = \frac{11,6^\circ\text{C} + 1,18 T_w + 3,86 T_m - 2,32 \bar{T}_a}{100^\circ\text{C} - \bar{T}_a}$$

$$X = F_R U_L \times \frac{F'_R}{F_R} \times (T_{ref} - \bar{T}_a) \times \Delta t \times \frac{A_c}{L} \times CV \times CT$$

$$Y = F_R (\tau\alpha)_n \times \frac{F'_R}{F_R} \times \frac{(\tau\alpha)_{av}}{(\tau\alpha)_n} \times \bar{H}_t N \times \frac{A_c}{L}$$

$$f_i = 1,029 Y_i - 0,065 X_i - 0,245 Y_i^2 + 0,0018 X_i^2 + 0,0215 Y_i^3$$

Una vivienda de Montevideo, tiene un consumo diario de medio de 280 litros de agua a 45 °C.

d) Estimar la fracción solar anual sobre el colector.

$$f_i = 1,029 Y_i - 0,065 X_i - 0,245 Y_i^2 + 0,0018 X_i^2 + 0,0215 Y_i^3$$

$$\mathcal{F} = \frac{\sum_1^{12} f_i L_i}{\sum_1^{12} L_i}$$



**Rodrigo Alonso-Suárez**  
**Gerardo Vitale**

<http://les.edu.uy/>  
<http://les.edu.uy/online/>