

1 Resumen

A lo largo de este proyecto se desarrolla un estudio para la implementación de una estrategia de control que controle correctamente la temperatura en la sal de salida de la sala de células donde se realiza el proceso de electrólisis de dicha sal. Para alcanzar este objetivo se dispone de dos variables de control: un caudal de sal recirculado desde la salida de la sala de células hasta un par de intercambiadores de calor, colocados en paralelo entre sí, así como otro caudal de un circuito externo de agua destinado a otros dos intercambiadores de calor también colocados en paralelo entre sí.

Con el objeto de analizar el sistema de control se diseñan modelos teóricos de los intercambiadores de calor así como de la sala de células. Dichos modelos se ajustan a partir de datos reales obtenidos directamente de la planta, determinando parámetros desconocidos y minimizando el error entre modelo y realidad. A partir de estos modelos se configuran otros modelos reducidos que se emplean en el diseño del sistema de control.

Se plantea una estrategia de control con dos controladores en cascada: uno primario que controla la temperatura de salida de la sal en la sala de células y otro controlador secundario en lazo interno que actúa sobre los intercambiadores de calor. El controlador primario se plantea como un PID con estructura “antiwindup” y parámetros variables establecidos mediante diseño por “gain scheduling” (GS). La solución propuesta se hace necesaria ya que el sistema planteado es un sistema de control en cascada en el que existe algún elemento integrador por lo que, como se demuestra, aparece el efecto de “windup” integral debido a la saturación de los intercambiadores de calor, en este caso. Por otro lado, en base al conocimiento de parte de la señal de perturbación para la sala de células, se diseña una solución “feedforward” sobre el controlador primario.

Por otra parte, el controlador secundario se diseña como un PI de parámetros constantes en base a criterios de diseño robusto, solución que se muestra como suficiente y adecuada.

Finalmente se analiza la simulación, se realiza la validación de modelos y se dispone la puesta en marcha sobre control distribuido Rosemount.





2 Sumario

Sumario de la memoria

1	<u>RESUMEN</u>	<u>1</u>
2	<u>SUMARIO</u>	<u>3</u>
3	<u>GLOSARIO</u>	<u>5</u>
3.1	GLOSARIO DE TÉRMINOS QUÍMICOS	5
3.2	ÍNDICES	6
3.3	GLOSARIO DE TÉRMINOS TERMODINÁMICOS	7
3.4	GLOSARIO DE TÉRMINOS GENERALES EN EL PROYECTO	8
3.5	GLOSARIO DE TÉRMINOS DE CONTROL	8
3.6	GLOSARIO DE SÍMBOLOS DE ESTE PROYECTO	10
3.7	GLOSARIO DE UNIDADES	11
4	<u>PREFACIO</u>	<u>13</u>
4.1	ORIGEN DEL PROYECTO	13
4.2	MOTIVACIÓN	13
5	<u>INTRODUCCIÓN</u>	<u>15</u>
5.1	OBJETIVO Y METODOLOGÍA PROPUESTA	15
5.2	METODOLOGÍA PROPUESTA	15
6	<u>REGULACIÓN ACTUAL DE TEMPERATURA. ESTRATEGIA DE CONTROL</u>	<u>17</u>
6.1	SALA DE CÉLULAS ELECTROLÍTICAS	18
6.2	CONTROL DE TEMPERATURA DE SAL EN SALA DE CÉLULAS	24
7	<u>ANÁLISIS DE LOS INTERCAMBIADORES DE CALOR</u>	<u>27</u>
7.1	GENERALIDADES, HIPÓTESIS DE PARTIDA Y METODOLOGÍA	28
7.2	CONCEPTOS PRELIMINARES	29
7.2.1	BALANCES	29
7.3	ANÁLISIS INTERCAMBIADOR DE CALOR A CONTRACORRIENTE	32
7.4	MODELADO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR	36



7.5 IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS	40
7.5.1 DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS	41
<u>8 ANÁLISIS DE LA SALA DE CÉLULAS ELECTROLÍTICAS</u>	<u>45</u>
8.1 GENERALIDADES, HIPÓTESIS DE PARTIDA Y METODOLOGÍA	46
8.2 CRITERIOS Y CONCEPTOS QUE SE EMPLEARÁN	47
8.2.1 POLÍTICA DE CONTROL	49
8.3 ANÁLISIS DE UNA CELDA ELECTROLÍTICA	51
8.4 MODELADO DE UNA CELDA ELECTROLÍTICA	53
<u>9 ALGORITMO DE CONTROL</u>	<u>57</u>
9.1 MODELOS SIMPLIFICADOS DE PLANTA	58
9.1.1 MODELO SIMPLIFICADO DE INTERCAMBIADORES	59
9.1.2 MODELO SIMPLIFICADO DE SALA DE CÉLULAS	64
9.2 IMPLEMENTACIÓN DE CONTROLADORES	68
9.2.1 DISEÑO DEL CONTROLADOR PRIMARIO O “MASTER”	70
9.2.2 DISEÑO DEL CONTROLADOR SECUNDARIO O ESCLAVO	72
9.2.3 DISEÑO DE “FEEDFORWARD”	79
9.2.4 DISEÑO “ANTI WINDUP” EN CONTROLADOR PRIMARIO	81
<u>10 MODELADO EN SIMULINK E IMPLEMENTACIÓN</u>	<u>85</u>
10.1 BREVE ANÁLISIS GENERAL	86
10.2 ESQUEMA DE CONTROLADORES	87
10.3 ESQUEMA DE MODELOS	89
10.3.1 INTERCAMBIADORES DE CALOR	89
10.3.2 SALA DE CÉLULAS ELECTROLÍTICAS	91
10.3.3 CORRECCIÓN DE “SETPOINT”	92
10.4 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN	93
10.5 PUESTA EN MARCHA	95
<u>11 PRESUPUESTOS</u>	<u>97</u>
<u>12 CONCLUSIONES</u>	<u>99</u>
<u>13 AGRADECIMIENTOS</u>	<u>101</u>
<u>BIBLIOGRAFÍA</u>	<u>103</u>
<u>ANEXOS</u>	<u>109</u>



3 Glosario

3.1 Glosario de términos químicos

- CCsímbolo de corriente continua
- Dflujo de intensidad eléctrica entre ánodo y cátodo (kA/m^2)
- d_{ac}distancia entre ánodo y cátodo (mm)
- e^-símbolo de partícula electrón
- Fconstante Faraday; $1F=96487c$
- Epotencial de electrodo (v)
- Eepotencial de equilibrio (v)
- Erpotencial eléctrico reversible de un electrodo (v)
- Eopotencial reversible estándar del electrodo (v)
- E_{TN}potencial termoneutro (v)
- E_aenergía de activación de una reacción química (J/mol)
- E_dtensión de electrólisis, U , para flujo de intensidad extrapolado a valor nulo (v)
- E_{Cl_2/Cl^-}potencial eléctrico de ánodo (v)
- E_{Na/Na^+}potencial eléctrico de cátodo (v)
- $f.e.m$fuerza electromotriz (v)
- ΔGentalpia libre o de Gibbs (J)
- gentalpia libre o de Gibbs molar (J/mol)
- Hentalpia (J)
- hentalpia molar (J/mol)
- Iintensidad eléctrica (kA)
- I_xintensidad eléctrica debido al compuesto x (A)
- iintensidad de reacción entre electrodo y solución (A)
- i_{dir}intensidad directa de reacción (A)
- i_{inv}intensidad inversa de reacción (A)
- i_{inter}intensidad de intercambio iónico (A)



i_0	intensidad de intercambio o de equilibrio de reacción (A)
i_r	intensidad residual o de cloroactivo (A)
i_x	intensidad originada por la formación del compuesto x. (A)
k'	parámetro de la ley de Tafel
M	masa molecular (kg/mol)
N	número partículas
Pe	fuerza peso (N)
U	tensión de electrólisis (v)
v	velocidad de reacción (A/c)
η_x	rendimiento de corriente del compuesto x
$[X]$	concentración de producto X (kg/kg)
Y	sobretensión (v)

3.2 Índices

$z \in [C, H, S, A]$	C : región fría de intercambiador. H : región caliente intercambiador. S fluido sal. A : fluido agua
$y \in [C, H]$	C : región fría de intercambiador. H : región caliente intercambiador.
$x \in [IN, OUT]$	IN : entrada. OUT : salida.
k	elemento k -ésimo.
j	índice que toma valores [primario;secundario] para términos de control
w	toma valores [1,2] para dos puntos espaciales cualesquiera.



3.3 Glosario de términos termodinámicos

A, A_K	.....sección global, sección de un elemento k -ésimo (m^2)
C_p, C_{pz}	.....calor específico, calor específico en característica z (kcal/kg, °C)
E_c	.....energía cinética másica (kcal/kg)
E_p	.....energía potencial másica (kcal/kg)
$F, F_x, F_y, F_K, F_z, F_{x,y}$	.....caudal, caudal en características x, y, k, z (m^3/h)
h	.....término convectivo de transmisión de calor ($kcal/m^2 \cdot ^\circ C$)
i, i_x	.....entalpía másica, entalpía másica en característica x (kcal/kg)
k	.....término conductivo de transmisión de calor ($kcal/m^2 \cdot ^\circ C$)
K_k	.....factor K en la celda k -ésima.
m, m_y	.....masa acumulada, masa en característica y (kg)
N	.....número de elementos finitos.
P	.....presión (Pa)
\dot{q}	.....potencia calórica (kcal/h)
q “y” Q	.....energía calórica (kcal)
\dot{q}_p	.....potencia calórica a presión constante (kcal/h)
q_p	.....energía calórica a presión constante (kcal)
R	.....constante termodinámica de los gases ($R=1.98 \cdot 10^{-3} kcal/mol \cdot K$)
s, s_w	.....espacio, espacio en característica w (m)
S	.....entropía (J/K)
t	.....tiempo (h., min. “o” s.)
$T_{X,Y}, T_{k,Y}$	.....temperatura en características x, y, k
T_{ref}, T_{amb}	.....temperatura de referencia, temperatura ambiente (°C)
u'	.....energía interna másica (kcal/kg)
U	.....coeficiente de transferencia global de calor ($kcal/m^2 \cdot h \cdot ^\circ C$)
$U_{S-302/1}$ y 2	.....U para intercambiadores sal-sal
$U_{S-302/3}$ y 4	.....U para intercambiadores sal-agua
V	.....volumen (m^3)
W_c	.....trabajo másico realizado por un fluido (kcal/kg)



Z	.....impedancia eléctrica (v/kA, es decir, $m\Omega$)
$\overline{\Delta T}$	.....incremento de temperatura en media logarítmica ($^{\circ}C$)
a	.....Porcentaje de apertura de válvula (%)
a'	.....tanto por uno de sal que no reacciona electrolíticamente
b	.....tanto por uno de caudal de sal en una celda electrolítica
ε	.....tanto por uno de sal a la salida de una celda electrolítica
Φ	.....tanto por uno de caudal de sal respecto el total de entrada
ρ	.....densidad (kg/m^3)

3.4 Glosario de términos generales en el proyecto

p.e.....	por ejemplo
t.q.....	tal que
().....	abreviatura
[,].....	rango de valores

3.5 Glosario de términos de control

$\underline{R(t)}$	.....vector consigna de entrada
$\underline{T_x(t)}$	.....vector de temperaturas ($^{\circ}C$)
$\underline{U(t)}$	.....vector de entradas
$u(t)$	.....componente j del vector $\underline{U(t)}$ para $j:1..N$
$\underline{X(t)}$	.....vector de variables de estado
$\underline{\dot{X}(t)}$	.....vector de derivadas de $X(t)$
$\underline{Y(t)}$	.....vector de salidas
OUT	.....señal a la salida de un controlador



PV, PV_j	.....señal de realimentación hacia controlador
SP	.....consigna de entrada
$U_2(t)$	.....región de comportamiento deseado
ε	.....señal de error
X^{FF}	.....señal que incluye efecto de “feedforward”
K	.....ganancia de planta
Kc	.....ganancia de controlador
τ	.....constante temporal de sistema o “tau” (min. “o” s.)
τ_i, τ_d	.....tau de la parte integral, tau de la parte derivada, ambas de un controlador tipo PID.
τ_c	.....tau de comportamiento deseado anillo cerrado.
τ_{IC}	.....tau del modelo reducido de intercambiadores
τ_V	.....tau para válvulas del circuito
θ	.....retraso de sistema (min “o” s)
θ_{IC}	.....retraso para modelo intercambiadores
δ	.....perturbación
AIMC	.....técnica “adaptive internal mode control”
CND	.....control numérico distribuido
EE	.....espacio de estados
FF	.....“feedforward”
IF	.....Índice de funcionamiento de un sistema
IMC	.....técnica “internal mode control”
FFreal	.....señal de “feedforward” calculada
GS	.....técnica “gain scheduling”
G(s)	.....función de transferencia en espacio de Laplace
Lag	.....function de transferencia de primer orden
LPV	.....“lineal parameters varying”
MIMO	.....sistema tipo “multiple input, multiple output”
Offset	.....desviación
PE	.....punto de equilibrio del sistema
PID	.....controlador proporcional, integral, derivativo
RE	.....representación externa de un sistema
RI	.....representación interna de un sistema



SISOsistema tipo “single input single output”
 SLsistema lineal
 SNLsistema no lineal
 Stepsalto escalón en una señal
 Tuning.....calibración
 Tagindicador o referencia a señal o dispositivo
 VSvariable de “scheduling”

\underline{A}_{Nx1} vector A de dimensión Nx1
 \underline{M}_{NxM} matriz M A de dimensiones NxM
 \underline{W}^{PE} variable vectorial W evaluada en el PE, para $\underline{W} \in [\underline{X}, \underline{U}]$
 $\exp r|_A$ expresión evaluada en A
 ψ constante a determinar

3.6 Glosario de símbolos de este proyecto

$f(x)$ Función de la variable x.
 \dot{W} $\dot{W} = \frac{\partial W}{\partial t}$
 W^* W transpuesto
DZincremento o acumulación de la propiedad Z.
dZdiferencial del parámetro Z.
 ∂Z diferencial del parámetro Z respecto el tiempo
 \sum sumatorio
 -o-indicador de fin de una ampliación de información en anexo,
 cuando existen varias citasiones a un mismo apartado.
 \propto proporcionalidad
 $*$ producto vectorial
 \bullet producto escalar
 \forall valor cualquiera
 \equiv definición
 \rightarrow consecuencia
 \xrightarrow{E} consecuencia aplicando la expresión E



- \leftrightarrow condición si y solo si
 $\langle R \rangle_p$ expresión R para la serie de datos p
 \subset contenido o pertenencia

3.7 Glosario de unidades

- c unidad de carga eléctrica en culombios
 mol unidad equivalente 6.023×10^{23} partículas
 ppb unidad de concentración
 s, h unidades temporales
 v unidad de potencia eléctrica
 A unidad de intensidad eléctrica
 $kcal, J$ unidades de energía
 m, mm, m^2, m^3 unidades de espacio, sección y volumen.
 Kg unidad de masa
 N unidad de fuerza
 $^{\circ}C, K$ unidades de temperatura
 $GWh, kcal/h$ unidades de potencia.
 kg/kg unidades de concentración
 Pa unidad de presión
 m^3/h caudal
 $puntosK$ factor K





4 Prefacio

4.1 Origen del proyecto

El proyecto que se presenta surge bajo el acuerdo entre responsables del complejo que Solvay Ibérica tiene en Martorell y el autor de este proyecto. A tal efecto, además del autor, este documento presenta la colaboración de un tutor de empresa y un tutor de ETSEIB por la UPC:

- Dr.Ingeniero Industrial Superior y responsable “advanced process control” (APC) del servicio AMRA del complejo Solvay Martorell, *Sergio Melas*
- Dr.Ingeniero Industrial e investigador para CSIC, *Jordi Riera*

Se presenta el estudio de una solución de control para un proceso de electrólisis que tiene lugar en el complejo Solvay Ibérica de Martorell.

Debido a motivos de confidencialidad de empresa, el proyecto presentado y expuesto en ETSEIB prescinde de:

1. Series de datos recogidos en planta y empleados por los programas incluidos en el CD complementario.
2. Una imagen de una celda electrolítica abierta.
3. Información del sistema de control sobre las celdas electrolíticas.

La inclusión de estos puntos podría dar lugar a la obtención de información relevante de la empresa, lo que representa un riesgo inconveniente para la misma.

4.2 Motivación

Este estudio sobre el control de la temperatura de la sal a la salida de la sala de células electrolíticas surge bajo la necesidad de la empresa de optimizar el rendimiento del proceso de electrólisis sobre la misma, proceso para el que el parámetro de



temperatura resulta primordial. Esta acción se enmarca en el proceso continuado de modernización y automatización de las instalaciones del complejo Solvay Ibérica en Martorell.

Dicho complejo es uno de los principales consumidores de energía eléctrica en Cataluña siendo el segundo principal consumidor tras el ayuntamiento de Barcelona. Se estima que el consumo de energía eléctrica del complejo ronda los 730 GWh/año. De toda esta energía unos 600GWh/año son consumidos solo por la planta UE del complejo, es decir que de entre las tres plantas que forman el complejo, este consumo de 600GWh representa aproximadamente un 80% del consumo total. Casi la totalidad de esta energía consumida por la planta UE va a parar a la sala de células, de la que se dan más detalles en el Anexo *B.III.Células de mercurio (Hg)*, en la página 119.

Debido a este gran consumo energético se disponen grandes recursos y esfuerzos en la automatización continuada en base a la mejora del proceso y a la optimización de recursos, especialmente energéticos.

Enmarcado dentro de este proceso continuado de optimización de recursos, este proyecto plantea una solución de automatización de dicha sala de células electrolíticas, en el ámbito concreto del control de temperatura de la misma.



5 Introducción

5.1 Objetivo y metodología propuesta

El objetivo es realizar un estudio sobre el control de temperatura de la sal a la salida de la sala de células electrolíticas, de la planta UE del complejo Solvay en Martorell, actuando sobre el caudal de fluido sal que recircula desde dicha sala hacia unos intercambiadores de calor, así como también sobre un caudal de agua que circula por otros intercambiadores. Esta actuación sobre uno u otro caudal va en función de si se debe calentar o enfriar la sal de entrada a la sala de células electrolíticas.

Se pretende establecer una estrategia de control que permita fijar la temperatura del colector de salida de dicha sala bajo dos criterios principales:

1. Respetar en la medida de lo posible las restricciones de máximos de temperatura para cada celda electrolítica.
2. Tratar que las características de regulación sean independientes de las variaciones de las constantes de tiempo del sistema durante el funcionamiento de la sala.

Se trata de mantener una temperatura de sal a la salida de la sala de células próxima a la temperatura deseada o temperatura de "setpoint" (SP) manteniendo las temperaturas de todas las células activas dentro del rango óptimo de funcionamiento, en la medida de lo posible.

5.2 Metodología propuesta

La metodología a seguir se puede resumir en los siguientes puntos:

1. Estudio teórico y modelado del circuito de sal entorno la sala de células electrolíticas. Dicho modelado se realizará en Simulink de Matlab y se sustentará en base a tres modelos:
 - a. Modelo empírico de potencia calórica de una celda electrolítica.
 - b. Modelo termodinámico de celda electrolítica.



- c. Modelo teórico de intercambiadores de calor a contracorriente.
2. Identificación de parámetros desconocidos en planta.
 3. Establecimiento de modelos detallados del tipo “caja blanca¹” y del tipo “caja gris²”, de planta. Estos modelos permiten realizar y probar las soluciones de control de una manera externa a la planta.
 4. Desarrollo de una estructura de control partiendo del establecimiento de modelos simplificados a partir de los modelos detallados obtenidos con antelación.
 5. Construcción de una regulación con dos controladores en cascada, uno primario del tipo PID con características “gain scheduling” (GS) y otro secundario del tipo PI con parámetros constantes bajo criterio de control robusto. Ambos controladores se diseñan empleando una metodología de caracterización de parámetros basada en estrategia “Internal Model Control” (IMC). Para ambos casos se parte de modelos simplificados del sistema.
 6. Validación y verificación de modelos así como de la estrategia de control diseñada.
 7. Puesta en marcha en planta mediante implementación de la estrategia de control en sistema de control numérico distribuido (CND) Rosemount.

¹ Modelo tipo caja blanca: modelo detallado y basado en principios físicos.

² Modelo tipo caja gris: modelo más conocido y detallado que un modelo caja negra. Sin embargo, se emplean desarrollos teóricos hasta cierto nivel de detalle, generalizando parte de los mismos y tomando algunas suposiciones. Incluye una parte importante de obtención experimental.

Un modelo tipo caja negra es un modelo de origen totalmente empírico.



6 Regulación actual de temperatura. Estrategia de control

Este capítulo proporciona una ligera introducción al entorno industrial en el que se implementarán las soluciones propuestas por este proyecto. También se muestra el estado actual de funcionamiento del control de temperatura de la sal en la sala de células electrolíticas que se encuentra en la planta UE del complejo industrial que Solvay Ibérica tiene en Martorell.

Finalmente se analizan las bases y criterios de regulación que, además de definir la regulación actual, sientan las bases para la estrategia de control futura que se implantará como resultado de este proyecto.



6.1 Sala de células electrolíticas

En las instalaciones del complejo de Martorell se pueden distinguir tres plantas bien diferenciadas:

- UE; encargada del proceso de electrólisis del cloruro sódico o sal. Esta sal llega por vagones desde las minas de Súría y es convenientemente disuelta y depurada antes de entrar al proceso de fabricación.
- Solvin/VC; recoge el Cl_2 gas obtenido en UE y empleando etileno, C_2H_4 , genera cloruro de vinilo, $\text{CH}_2=\text{CHCl}$ (VC)
- Solvin/PVC; recibe el VC y por varios procesos, como p.e. la polimerización, obtiene PVC en polvo.

Cada una de estas tres plantas dispone de una sala de control que gestiona todos los parámetros. En cada una de estas salas de control se encuentra toda la actividad de vigilancia, control y supervisión de procesos que tienen lugar en planta, así como los sistemas de seguridad instrumentados.

Solvay dispone de una red de comunicaciones externa tipo Ethernet así como comunicaciones LAN para la extensa red interna, además de interconexión punto a punto con redundancia para PLC's y demás dispositivos electrónicos en planta. En las salas de control de cada planta se encuentran terminales de CND de Rosemount. Será en Rosemount donde se implementará la estrategia de control propuesta por este proyecto.

Para el caso de la planta UE y en relación al ámbito de este proyecto, a continuación se muestra una de las pantallas que se puede visualizar en la sala de control:



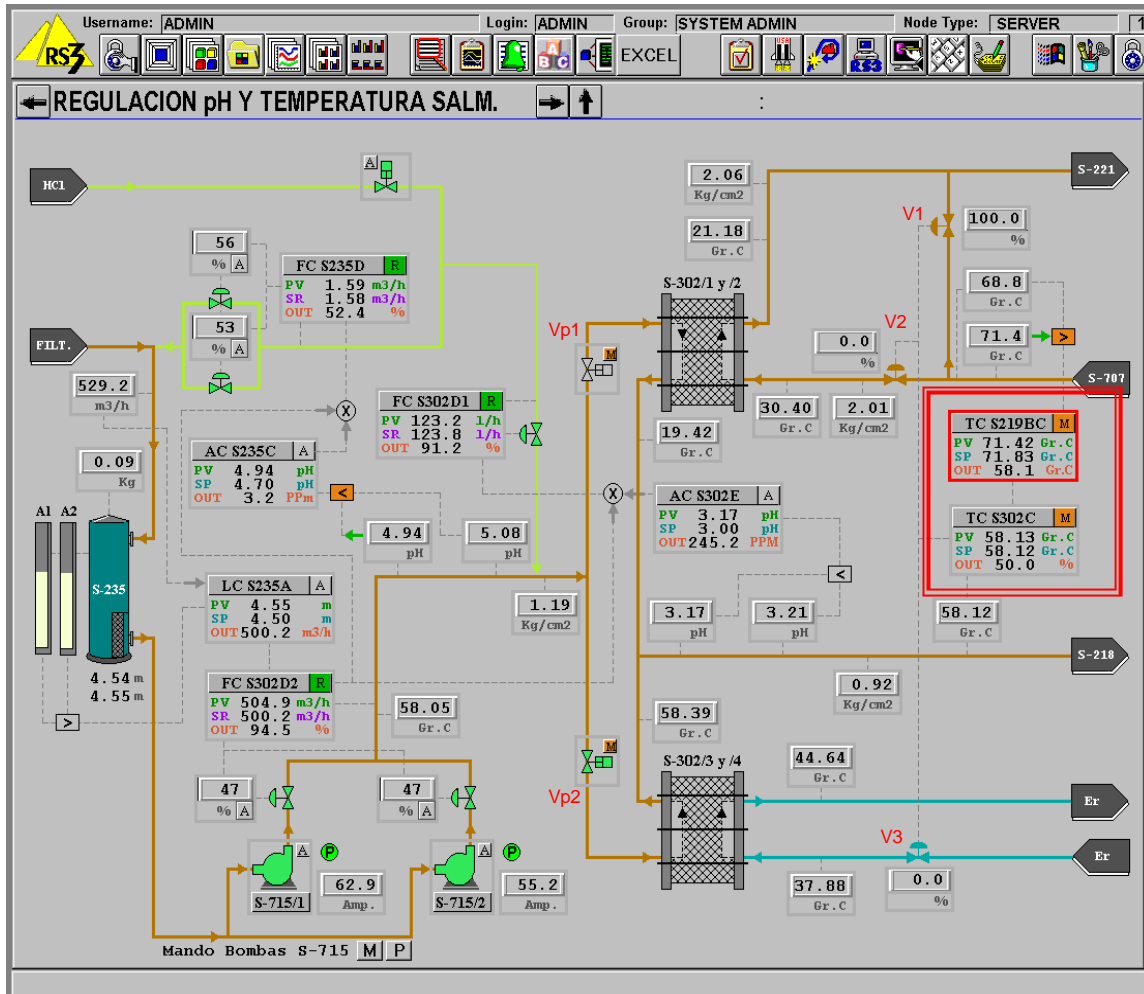


Ilustración 6-1. Pantalla circuito sal de entrada y salida de sala células.

Atendiendo al circuito remarcado de color anaranjado, correspondiente a la sal, se pueden distinguir varios elementos como:

- 4 intercambiadores de calor. Cada icono representa dos intercambiadores de calor idénticos entre sí y colocados en paralelo:
 - S-302/1 y /2 son intercambiadores de calor sal-sal. Estos pertenecen al circuito de calentamiento de la sal de entrada a la sala de células.
 - S-302/3 y /4 son intercambiadores de calor sal-agua. Éstos pertenecen al circuito de enfriamiento de la sal de entrada a la sala de células.
- 2 Válvulas “todo o nada” : se indican como V_{p1} y V_{p2} , sobre la ilustración.
- 3 Válvulas reguladoras de caudal: se indican como V_1 , V_2 y V_3 .



➤ Controlador de temperatura en sal y agua: corresponde al bloque de “tag” TC-S302C. Este bloque gestiona la apertura y cierre de válvulas de los circuitos en los intercambiadores de calor. Este control se rediseña en este proyecto para tener en cuenta el control de la temperatura de la sal de salida de la sala de células. Como se analiza en el capítulo 9, este bloque corresponde con el controlador secundario.

➤ Bloque TC-S219BC: es el bloque que representa el control de temperatura que se determinará en el proyecto. La imagen muestra un indicador en este bloque con la letra *M* que denota que esta gestión se realiza manualmente hasta que se pongan en funcionamiento las soluciones propuestas. También se puede observar el punteado que une este bloque con el TC-S302C. Este punteado indica relación entre bloques o interconexión siendo el bloque TC-S302C dependiente del bloque TC-S219BC. Como se analiza en el capítulo 9, este último bloque se corresponde con el controlador primario.

➤ Significado del color en líneas:

- Naranja; circuito de sal.
- Azul; circuito de agua. Este es un circuito externo.
- Verde: circuito de ácido para control de pH.

➤ S-218; entrada de sal a la sala de células

➤ S-707; salida de sal de la sala de células. Parte del calor se podrá recuperar o no en función de lo que establezca la ley de control.

➤ S-221; salida de sal del sistema. Esta sal se reintroduce a la entrada de todo de proceso, reconcentrándose con sal nueva.

➤ Er; entrada y salida de agua desde el exterior para el circuito de refrigeración de la sal. Esta agua se recircula de manera que únicamente se recoge agua nueva en la proporción necesaria para reponer las pérdidas debido a purgas y evaporación.

➤ Los valores numéricos relacionados con los flujos son valores de temperatura, pH y concentración que se dan en los puntos indicados en el circuito. Los valores de porcentaje representan el grado de apertura o cierre de válvulas.



Como regla general para cada bloque, como p.e. el bloque TCS219BC, se pueden distinguir cuatro partes bien diferenciadas:

➤ Título; indicador del tipo de controlador o analizador así como de la referencia o “tag” de identificación. La letra que acompaña a la derecha toma valores de *M*, si el funcionamiento es manual, *A* si funcionamiento es automático o *R* si el funcionamiento es remoto.

➤ *PV*; valor de realimentación del controlador. Se desea que $PV=SP$

➤ *SP*; entrada del controlador o “setpoint”. Debido a la estructura en cascada se puede corresponder con el *OUT* del controlador anterior.

➤ *OUT*; acción de control. Es el valor de salida del controlador.

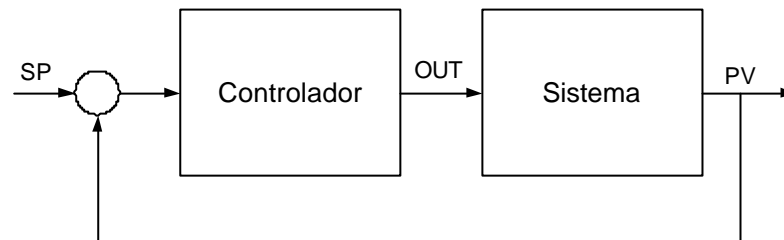


Ilustración 6-2. Interpretación gráfica de simbología de control.

La interconexión entre módulos se representa por una línea punteada. Sin embargo, esta unión se puede también comprobar viendo si la salida *OUT* de un controlador coincide con la entrada *SP* del controlador siguiente. Esto se debe al encadenamiento tipo cascada entre sistemas de control. Este es el caso, como se ha comentado, de los bloques TCS219BC y TC-S302C.

A continuación se muestra un esquema del sistema físico de control. Se recuerda que los bloques de control se gestionan manualmente hasta la puesta en marcha de las soluciones de este proyecto. Interpretense los circuitos en función de los colores y tipo de líneas comentados anteriormente.



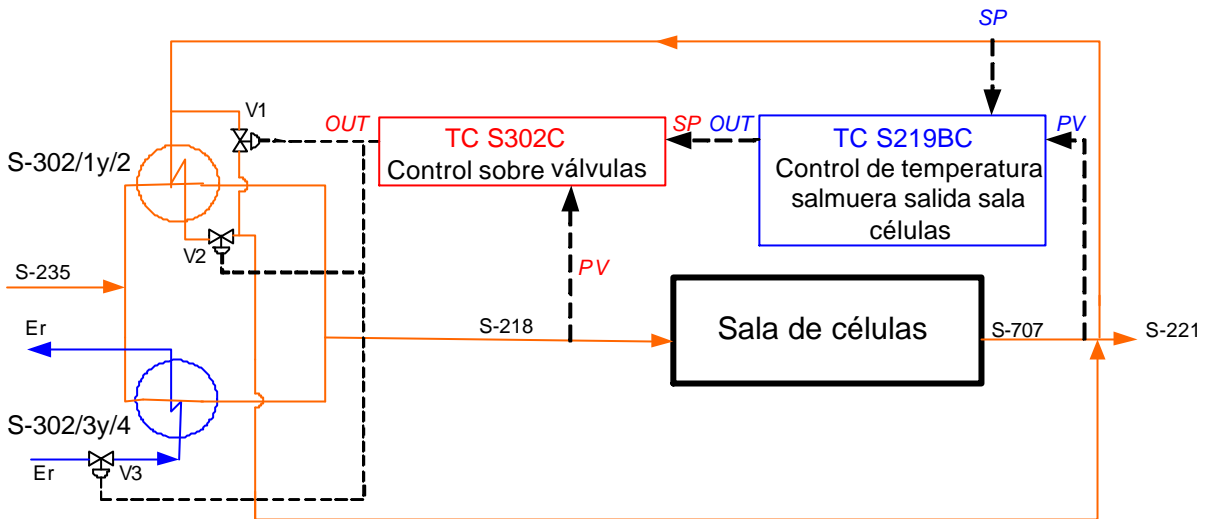
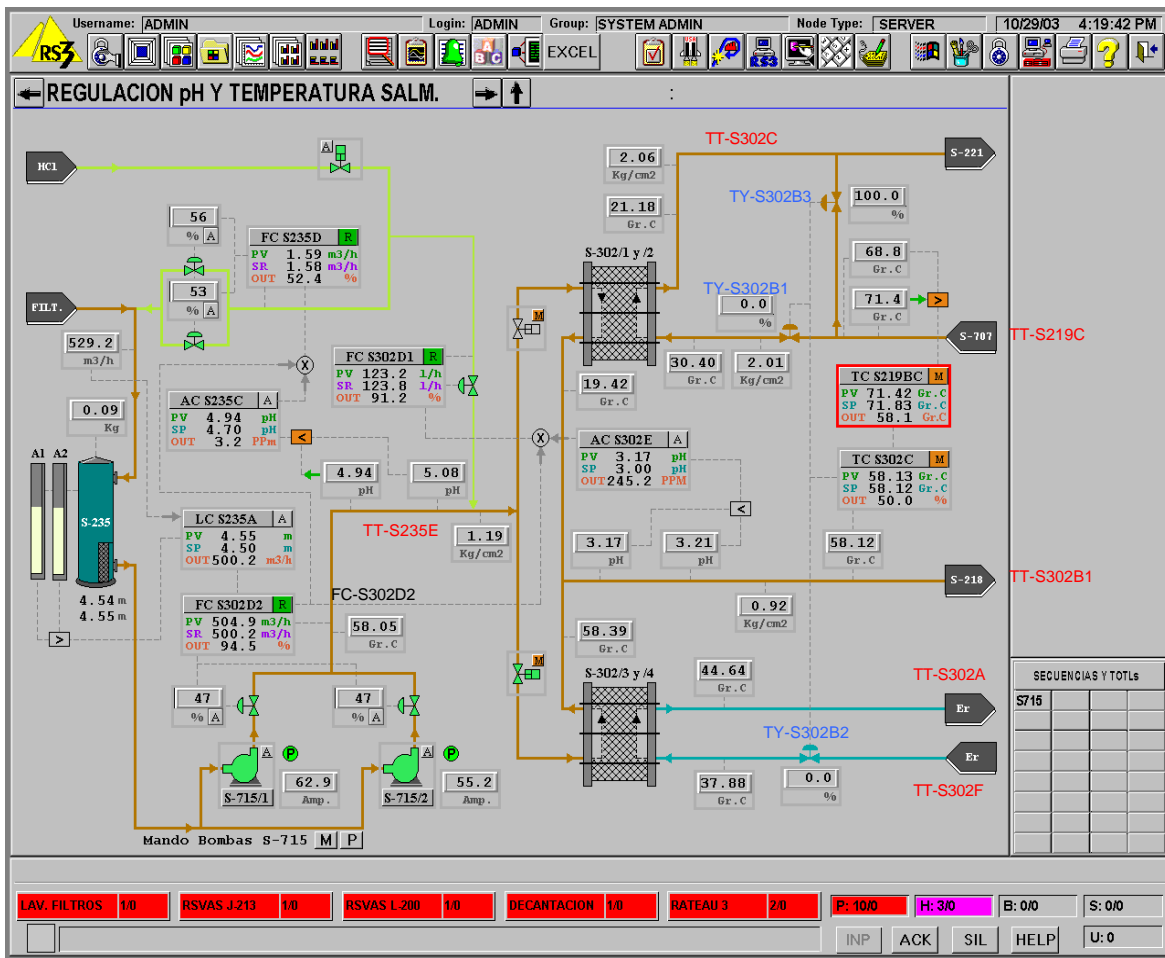


Ilustración 6-3. Esquema del proceso actual de control de temperatura

Respecto a la *Ilustración 6-1*, a continuación se muestra la misma pantalla sobre la cual se indican “tag” que se emplearán en sucesivos apartados de este proyecto:



- “tags” referidos a sensores de temperatura circuito sal:

TT-S235ETemperatura sal a la entrada de intercambiadores de calor.

TT-S302B1.....Temperatura sal a la entrada de sala de células electrolíticas.

TT-S219CTemperatura sal a la salida de la sala de células electrolíticas.

TT-S302CTemperatura sal a la salida de intercambiadores fase calentamiento.

TT-S302FTemperatura entrada de agua a intercambiadores fase enfriamiento.

TT-S302ATemperatura salida de agua de intercambiadores fase enfriamiento.

- “tags” referidos a actuadores de válvulas:

TY-S302B3Grado apertura válvula V1

TY-S302B1Grado apertura válvula V2

TY-S302B2Grado apertura válvula V3

los valores que toman los grados de apertura oscilan entre 0, para válvula cerrada, y 100, para válvula abierta.

- “tags” referidos a caudal de sal:

FC-S302D2Caudal de sal de entrada a circuito intercambiadores-sala de células.



6.2 Control de temperatura de sal en sala de células

El funcionamiento se caracteriza por la necesidad de calentar o enfriar la sal antes de entrar a la sala de células. Evidentemente solo se plantean dos posibilidades excluyentes entre sí: la necesidad de aumentar o disminuir temperatura. A tal efecto se disponen 4 intercambiadores de calor: dos para calentar, S-302/1y/2, y dos para enfriar, S-302/3y/4, conectados en paralelo entre sí. De este funcionamiento excluyente se encargan las dos válvulas V_{p1} y V_{p2} que son válvulas “todo o nada”

Respecto a la función de calentamiento o enfriamiento, además de determinarse por el accionamiento de estas dos válvulas, intervienen las válvulas V_1 , V_2 y V_3 , representadas sobre la Ilustración 6-4 en página 22. La manera de actuar se puede esquematizar de la siguiente manera.

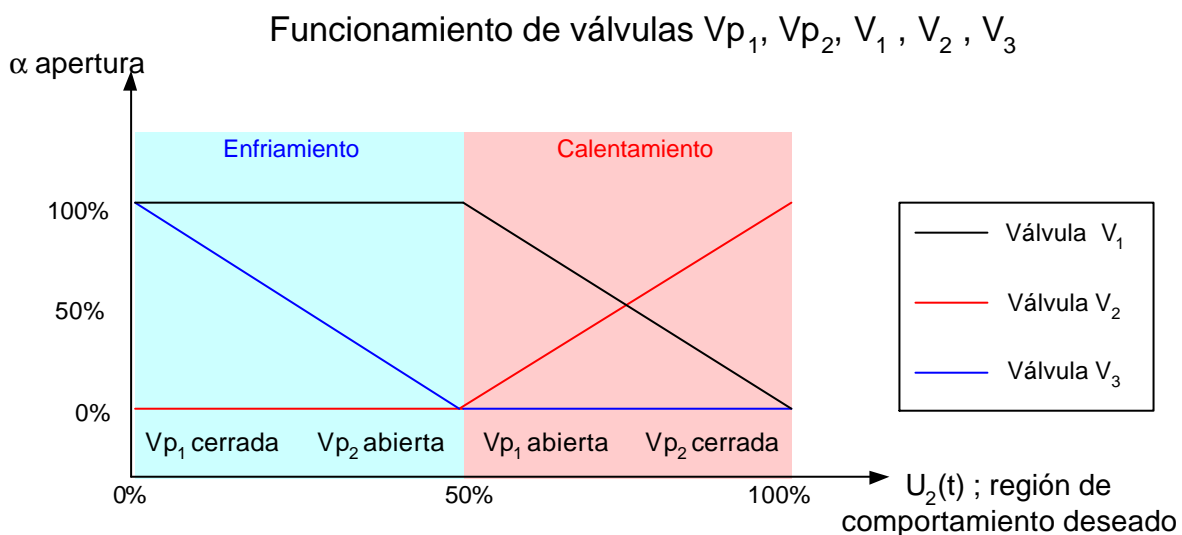


Ilustración 6-5. Estrategia de gestión coordinada de válvulas en circuito sal.

De esta ilustración se distinguen dos regiones de funcionamiento: una fría y una caliente. Las ordenadas muestran el grado de apertura (α) de válvula mientras que las abscisas muestran la posición del sistema, en porcentaje, dentro de la región de comportamiento deseada. Como se puede comprobar las válvulas V_1 y V_2 son de accionamiento complementario una de otra.

El funcionamiento que se desprende de esta ilustración muestra los criterios actuales de funcionamiento y sientan la base de la estrategia que se programará en Rosemount para la gestión de las válvulas a través del controlador de temperatura TC_S302C.



En una visión global del sistema desde el punto de vista del control, el circuito de sal que se estudia se puede esquematizar así:

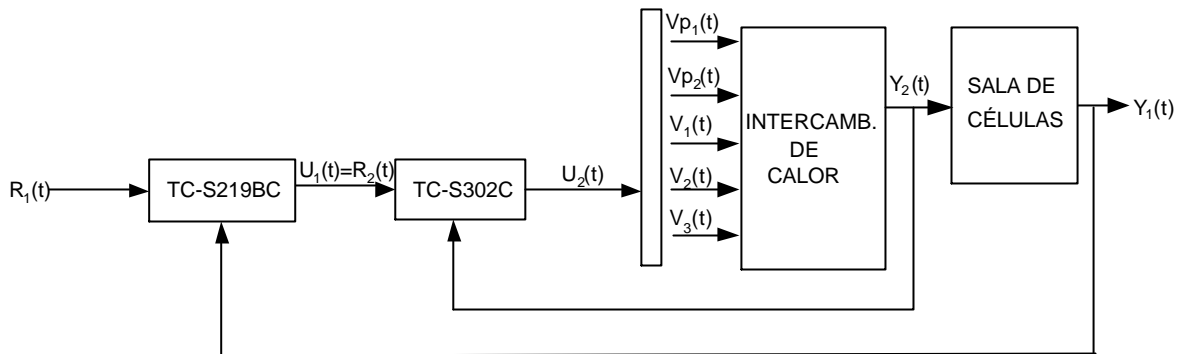


Ilustración 6-6. Esquema de control propuesto.

donde:

- $R_x(t)$; consigna de entrada al controlador; SP en pantallas de control de sala UE.
- $U_x(t)$; señal de control que devuelve el controlador correspondiente para la consigna que recibe y la entrada $R_x(t)$ actual. En este caso para x tomando valores 1 y 2; Out en pantallas de control de sala UE.
- $Y_x(t)$; señal de salida del sistema así como también es la señal de realimentación hacia el correspondiente controlador, para x tomando valores de 1 y 2; PV en pantallas de control de sala UE.
- $V_1(t)$, $V_2(t)$, $V_3(t)$; porcentaje de apertura, en función del tiempo, en el que se encuentran las válvulas V_1 , V_2 y V_3 , respectivamente. Se recomienda observar la *Ilustración 6-1*.

Se puede comprobar que el diseño es el de una cascada de controladores aunque cabe remarcar que esta representación solo concierne al control de temperatura del circuito de sal a la entrada y salida de la sala de células. Existen otros lazos, como p.e. el lazo de control de pH, que no son objeto de estudio en este proyecto.





7 Análisis de los intercambiadores de calor

Este capítulo contempla un estudio detallado de los intercambiadores de calor a contracorriente, situados a la entrada de la sala de células, con el fin de obtener un modelo detallado de los mismos. A tal efecto se realiza un estudio teórico complementado con la determinación de algunos parámetros empíricamente.

Como se podrá apreciar, en el primer apartado se realiza el análisis de todos aquellos conceptos que se emplean no solo en el presente capítulo sino también en el próximo.

El modelo obtenido se simula en Simulink, formando parte del modelo completo de planta. Será en este sistema simulado sobre el que se realizará el estudio, validación y verificación de los controladores propuestos antes de implementarlos en planta. Es por esto que este modelo se trata con elevado detalle en busca de un comportamiento muy próximo al de la planta real.

Cabe destacar que el modelo de intercambiadores correspondería a lo que se denomina “modelo caja blanca”, a diferencia del modelo que se obtiene en el capítulo 8 para la sala de células, correspondiente a un “modelo caja gris”.

Finalmente se realiza la validación del modelo.



7.1 Generalidades, hipótesis de partida y metodología

En principio para modelar el comportamiento de un intercambiador de calor se debe relacionar la energía calórica (q) con parámetros como las temperaturas de entrada (T_{in}) y de salida (T_{out}), el coeficiente global de transferencia de calor (U) y la superficie (A) a través de la cual se transfiere esta energía.

Estas relaciones se pueden establecer mediante el estudio de balances másicos y energéticos para fluido caliente y fluido frío en el seno de intercambiadores binarios, ya sean a contracorriente o mismo sentido de corriente. Como los elementos objeto de estudio son intercambiadores a contracorriente este proyecto se centrará únicamente en el análisis de este tipo.

En todo lo que atañe a este apartado se tendrán en cuenta las siguientes suposiciones la mayoría contempladas en [Incropera y De Witt 1999,p.431]:

- La energía calórica que se transfiere entre fluido frío y fluido caliente es suficientemente elevada como para poder despreciar las pérdidas energéticas del intercambiador con el entorno.
- La conducción axial de energía calórica en un elemento finito del intercambiador es insignificante.
- Los cambios de energías potencial y cinética son despreciables.
- Los términos de calores específicos de los fluidos (C_p) son constantes.

La metodología que se propone se basa en el estudio de todas aquellas expresiones analíticas que se emplean para obtener, en última instancia, las expresiones en términos de control que reflejan el comportamiento de los intercambiadores de calor. De esta manera se presentan los resultados más importantes que se obtienen del análisis de distintos balances sobre los intercambiadores recordando al lector que la aplicación conjunta de estos resultados tendrá lugar en el apartado titulado *7.3. Análisis intercambiador de calor a contracorriente* de la página 32.



7.2 Conceptos preliminares

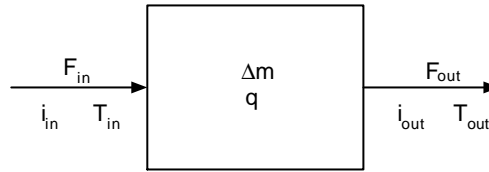


Ilustración 7-1 Criterios para balances másicos y energéticos

Con el fin de establecer un criterio común para todos los balances y análisis posteriores así como para facilitar la interpretación al lector, se aconseja atender a la *Ilustración 7-1* donde aparecen el flujo de caudal de entrada y de salida (F_{in} y F_{out}) junto con la entalpía másica (i), la masa acumulada (Δm) así como las temperaturas de entrada y salida y la energía calórica.

En lo referente al estudio de balances se añaden tres hipótesis a las genéricas planteadas en la página 28.

- a. Fluido incompresible; hipótesis aplicable a la mayoría de fluidos líquidos como el caso, p.e., de la solución de sal y agua que se encuentra en las células electrolíticas.
- b. Mezcla correctamente agitada dentro del sistema. De este modo características como la temperatura son uniformes en el volumen escogido.
- c. No se producen acumulaciones de materia dentro del mismo. En el ámbito energético sí que se da lugar a acumulaciones o pérdidas energéticas, lo que se refleja en variaciones de temperatura.

7.2.1 Balances

Para la buena comprensión de estos balances se recomienda atender a la imagen de la *Ilustración 7-1*, expuesta en la página anterior. En este apartado únicamente se mostrarán los resultados finales a fin de no distorsionar la comprensión. El desarrollo completo de estos balances se puede encontrar en el Anexo *D_Intercambiadores de calor* en la página 133.



7.2.1.1 Balance másico

Atendiendo al desarrollo realizado en Anexo *D.I.Desarrollo del balance másico* en página 133 y a las siguientes dos hipótesis:

- No existe acumulación de materia
- Incorporación del efecto temporal para introducir términos de caudal.

se concluye la siguiente ecuación:

$$F_{in} = F_{out} = F \quad \text{Ec. 7-1}$$

7.2.1.2 Balance energético

En cuanto al balance energético se distinguen dos casos distintos con los que se plantean soluciones a dos tipos de problemas que se caracterizan como; problema a) y problema b). Estos dos casos contemplan:

a) Intercambio de calor por conducción entre un fluido que atraviesa el sistema y el propio sistema, que sería el entorno del fluido.

b) Transmisión de calor por convección y por conducción a través de una pared metálica.

Atendiendo al primer problema, en el Anexo *D.II. Desarrollo del balance energético* en página 133 se presenta un estudio de la variación energética que experimenta el fluido del sistema al atravesar el intercambiador, concluyéndose el siguiente resultado :

$$\dot{q}_p = F \cdot r \cdot C_p \cdot (T_{in} - T_{out}) \quad \text{Ec. 7-2}$$

donde se muestra la relación entre la potencia calórica a presión constante (\dot{q}_p), el flujo de caudal y las temperaturas de entrada y salida para un único flujo fluido, así como la densidad (r) del fluido.



Respecto al segundo problema planteado al inicio de este apartado y remitiendo al lector al Anexo citado con antelación, se puede concluir el siguiente resultado:

$$\dot{q} = U \cdot A \cdot \Delta T$$

Ec. 7-3

donde el término ΔT hace referencia al incremento de temperatura mientras que el producto $U \cdot A$ se asocia a una resistencia térmica. En este caso el término U es un coeficiente global de transferencia de calor que incluye intercambio por conducción y por convección tal y como se demuestra en el apartado del Anexo ya comentado. Se plantea por hipótesis U invariante en el tiempo.

La Ec. 7-3 se aplicará posteriormente en el análisis de intercambiadores tomando el espacio discretizado en elementos finitos. Esta aplicación se fundamenta en que se tomaran elementos finitos tan pequeños que permitan asumir la utilización de la expresión anterior, expresión válida para elementos infinitesimos. Para ese caso la sección (A) se presentará como (A_k) o sección del elemento finito k-ésimo.

Sin embargo, para el cálculo estimado del coeficiente global de transferencia de calor, esta ecuación no es adecuada ya que se analiza el intercambiador en bloque, sin discretizarlo. Es por esto que no se empleará la anterior expresión en el apartado 7.5. Identificación de parámetros en la página 40, en este mismo capítulo.

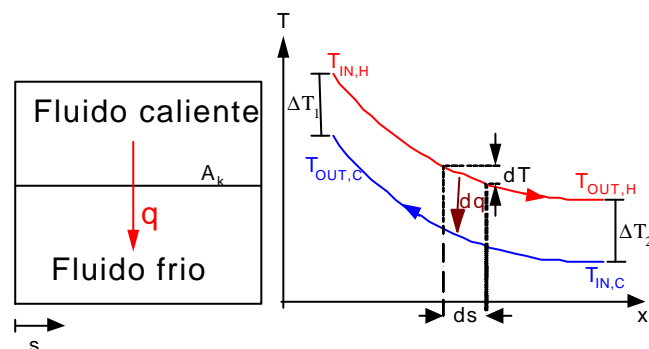


Ilustración 7-2. Transmisión de calor entre dos flujos a contracorriente

Sea $T_{X,Y}$ la temperatura de la parte caliente (H) y/o fría (C) del intercambiador, siendo $x \in [IN, OUT]$ según si se sitúa en la entrada o salida del flujo al sistema, así como $y \in [C, H]$.

Para este último caso planteado y observando que el valor de ΔT varía con la posición en el espacio (s), ver *Ilustración 7-2*, se tomará un valor medio logarítmico con lo que la Ec. 7-3 se expresa [Incropera 1999,p.587] :



$$\dot{q} = U \cdot A \cdot \overline{\Delta T} \quad \text{Ec. 7-4}$$

donde el término $\overline{\Delta T}$ hace referencia a la media logarítmica comentada.

La demostración de este término se encuentra en el Anexo *D.II.Desarrollo del balance energético* en página 133. El resultado que se concluye es el que se muestra a continuación:

$$\overline{\Delta T} = \frac{(\Delta T_2 - \Delta T_1)}{\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right)} \quad \text{Ec. 7-5}$$

siendo $\Delta T_1 = T_{IN,H} - T_{OUT,C}$ y $\Delta T_2 = T_{OUT,H} - T_{IN,C}$ para intercambiadores de fluidos a contracorriente.

7.3 Análisis intercambiador de calor a contracorriente

Una vez justificada toda la base teórica necesaria se comienza a analizar el problema de plantear un modelo que represente los fenómenos térmicos y energéticos que tienen lugar en el seno de un intercambiador de calor a contracorriente, para lo que se analizará la dinámica interna con respecto a la variación de temperatura.

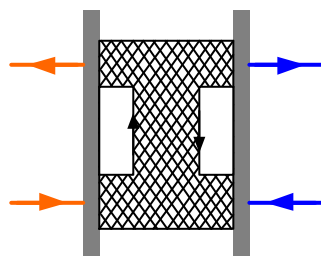


Ilustración 7-3. Representación intercambiador en planta Solvay

Esta ilustración muestra un intercambiador a contracorriente tal y como se muestra en las pantallas de la sala de control de la planta UE.

Para alcanzar este objetivo se opta por el análisis en elementos finitos. Así se plantea una discretización en elementos finitos asumiendo que son suficientes en número



como para poder utilizar la Ec. 7-3., válida para elementos infinitésimos. Esta es la manera por la que se ha optado para el estudio de este problema, continuo en el espacio y tiempo. Como se puede observar a continuación, se discretiza el volumen del intercambiador en $2N$ elementos ($S_{i,j}$) o nodos. El significado de los subíndices se comenta más adelante.

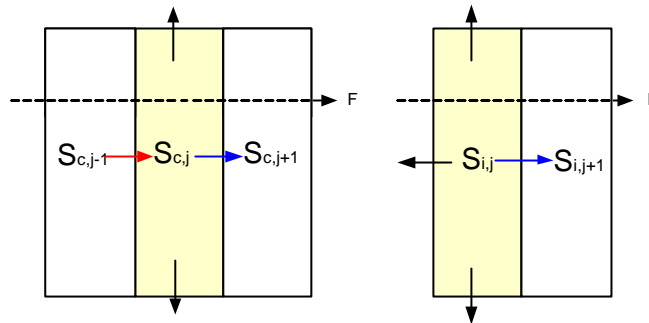


Ilustración 7-4. Nodos frontera e interior

En esta discretización hay que distinguir dos tipos de nodos: nodos internos, correspondiente a la imagen de la izquierda, y nodos frontera, la imagen derecha de la ilustración anterior. Se han indicado con flechas rojas las entradas de flujo de calor al nodo, en flechas azules las salidas de calor y en negro el flujo de calor del fluido con el entorno del intercambiador, flujo que por hipótesis se tomará como despreciable. Las flechas punteadas indican dirección de caudal de fluido que atraviesa los nodos. En realidad, como se podrá comprobar más adelante, esta distinción se denotará en las matrices del modelo del sistema intercambiadores así como también en la definición de valores iniciales.

Para la discretización de un intercambiador hay que distinguir entre dos partes, la parte caliente (H) y la parte fría (C). Es por esto que se propone una discretización de $2N$ elementos, en base a la necesidad de distinguir la región caliente de la fría. Esta diferenciación entre parte caliente y fría se puede apreciar en la siguiente figura.

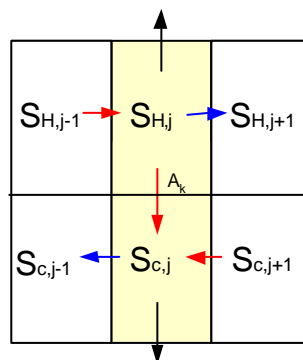


Ilustración 7-5. Discretización diferenciando parte caliente (H) y parte fría (C)



En esta representación destacan las siguientes características y nomenclaturas:

- $S_{y,k}$; representación simbólica del elemento o nodo k-ésimo, en su parte caliente o fría según y tome valores H “o” C.
- El significado de los colores de las flechas ya se ha comentado con antelación
- A_k indica la sección transversal que separa la parte caliente y la parte fría, es decir, los nodos $S_{C,k}$ (vs) $S_{H,k}$ para k tomando valores [1,N].

Para comenzar se aplican los resultados ya obtenidos de sendos balances másicos y energéticos con los que se puede concluir:

- Del balance másico para cada flujo se puede establecer que $F_{IN,H} = F_{OUT,H} = F$
- Del balance energético para cada elemento finito se puede determinar la existencia de dos tipos de intercambio calórico:

- Con el nodo vecino horizontal; transporte de energía por un fluido:

$\dot{q}_p = F_k \cdot r \cdot C_p \cdot (T_{K-1} - T_K)$ asociada a la Ec. 7-2 y particularizada para un elemento finito de un intercambiador según la *Ilustración 7-5* de la página anterior.

- Con el nodo vecino vertical a través de una pared metálica, por conducción y convección: $\dot{q}_k = U \cdot A_k \cdot \Delta T_k$, correspondiente a la Ec. 7-3.

Para un elemento finito se establece una relación entre acumulación energética (dq) y las entradas y salidas de energía calórica, tal y como se muestra a continuación, [Incropera y De Witt 1999,p13]:

$$dq_{in} - dq_{out} = dq \xrightarrow{\cdot \cancel{1}} \frac{\partial q_{in}}{\partial t} - \frac{\partial q_{out}}{\partial t} = \frac{\partial q}{\partial t} \xrightarrow{\frac{dq_{in} \equiv q}{dt}} \dot{q}_{in} - \dot{q}_{out} = \frac{\partial q}{\partial t} \quad \text{Ec. 7-6}$$

Cabe observar que en esta expresión no aparece ningún término referente a generación de energía ya que el sistema intercambiador no genera energía por sí solo; únicamente relaciona niveles energéticos entre dos fluidos [W.L.Luyben, 1989, p.24]



Partiendo de estos resultados a continuación se plantean las ecuaciones de difusión de calor por un nodo k. Estas expresiones presentan tres términos claramente diferenciados cuyo sentido térmico es el siguiente. Sea la expresión del tipo $A+B=C$ donde:

➤ A ; término de potencia calórica de un nodo con su vecino horizontal en dirección según la que dictamina el flujo de fluido dentro de la misma región. Esto es, la aplicación de la *Ec. 7-2* de la página 30.

➤ B ; término de potencia calórica de un nodo con su homónimo en la región opuesta a través de una pared metálica, es decir, transmisión del nodo caliente k-ésimo al nodo frío k-ésimo. Es la aplicación de la *Ec. 7-3* de la página 31.

➤ C ; término que hace referencia a la variación de la potencia calórica del nodo k-ésimo. Este término es el que se debería anular si se estudiara el sistema en estado estacionario ya que incluye la dinámica del sistema intercambiador.

Respecto al segundo término comentado hay que remarcar una puntualización; al trabajar con elementos finitos suficientes como para asumir la *Ec. 7-3* no es necesario aplicar la media logarítmica de temperaturas, con lo que el término de incremento de temperaturas recupera un sentido más natural, es decir, el de una diferencia entre dos temperaturas. Es por esto que no se aplica la *Ec. 7-4*.

Se concluye que las ecuaciones que muestran las leyes que rigen el intercambio calórico para un elemento k-ésimo en su parte fría y caliente, respectivamente, son:

$$F_C(t) \cdot r_C \cdot Cp_C \cdot (T_{k+1,C}(t) - T_{k,C}(t)) + A_k \cdot U \cdot (T_{k,H}(t) - T_{k,C}(t)) = \frac{\partial T_{k,C}(t)}{\partial t} \cdot V_k \cdot r_C \cdot Cp_C \quad \text{Ec. 7-7}$$

$$F_H(t) \cdot r_H \cdot Cp_H \cdot (T_{k-1,H}(t) - T_{k,H}(t)) - A_k \cdot U \cdot (T_{k,H}(t) - T_{k,C}(t)) = \frac{\partial T_{k,H}(t)}{\partial t} \cdot V_k \cdot r_H \cdot Cp_H \quad \text{Ec. 7-8}$$

donde aparecen los términos temporal (t) y de volumen de un elemento k-ésimo (V_k) [F.G.Shinsky, 1996, p.402]

Se recomienda atender al Anexo *D.III_Análisis intercambiadores de calor a contracorriente* en página 139, donde se analiza más detenidamente la concepción de las dos expresiones anteriores.



Para comprobar los subíndices es muy recomendable atender a la siguiente figura, en concreto al sentido propuesto para los flujos de caudal, marcados por las flechas.

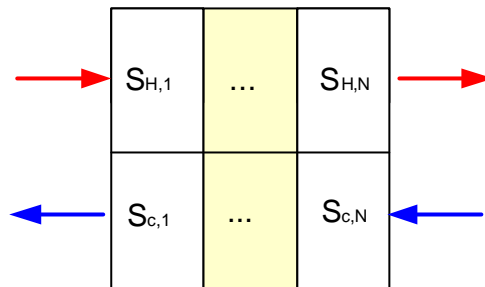


Ilustración 7-6. Sentidos de caudal propuestos.

Como se puede apreciar no se han tenido en cuenta efectos de intercambio con el entorno ya que se consideran despreciables por hipótesis.

Una comprobación que se puede realizar sobre las dos últimas ecuaciones consiste en un rápido análisis de unidades, que se adjunta en el Anexo *D.III_Análisis intercambiadores de calor a contracorriente*.

7.4 Modelado de un intercambiador de calor

En este punto, establecidas unas ecuaciones que muestran las leyes que rigen el intercambio calórico, se procede a expresar en términos de control los resultados obtenidos. A priori se podría pensar en tratar de estudiar el sistema como un sistema lineal. Sin embargo, tras los razonamientos que se exponen en el Anexo *D.IV.Análisis de la representación en términos de control* en página 140, se llega a la conclusión que la mejor solución es tratar el sistema en su verdadera naturaleza, es decir, como sistema no lineal. Por lo tanto se analizará un sistema MIMO (“multiple input multiple output”) en su representación interna (RI).

Retomando las *Ec. 7-7* y *Ec. 7-8*, realizando la siguiente identificación de términos, se obtienen dos ecuaciones en términos de control, ecuaciones de las que previamente se comentará la nomenclatura y dimensiones propuestas:

$$\blacktriangleright \underline{U}(t) = \begin{pmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \\ u_3(t) \\ u_4(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_{IN,H}(t) \\ F_{IN,C}(t) \\ T_{IN,H}(t) \\ T_{IN,C}(t) \end{pmatrix} \text{ vector } 4 \times 1 \text{ de entradas del sistema.}$$



$$\triangleright \underline{Y}(t) = \begin{pmatrix} T_{OUT,H}(t) \\ T_{OUT,C}(t) \end{pmatrix} \text{vector } 2 \times 1 \text{ de salidas del sistema}$$

$$\triangleright \underline{X}(t) = \begin{pmatrix} \underline{X}_1(t) \\ \underline{X}_2(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{T}_1(t) \\ \underline{T}_2(t) \end{pmatrix} \text{ donde } T_x(t) = \begin{pmatrix} T_{x,1}(t) \\ \dots \\ T_{x,N}(t) \end{pmatrix} \text{ para } x \text{ tomando}$$

valores de 1 "o" 2 según el nodo esté en la parte caliente o fría del sistema. Este vector de estados tiene dimensión $2N \times 1$ para N elementos finitos en que se divide el intercambiador físicamente.

Según lo planteado, el lector puede concluir que se está delante de un problema de control de un sistema MIMO de 4 entradas y 2 salidas, con un total de $2N$ variables de estado.

Las expresiones análogas a las *Ec. 7-7* y *Ec. 7-8* en términos de control son:

$$u_2(t) \cdot r_C \cdot Cp_C \cdot (X_{2,k+1}(t) - X_{2,k}(t)) + A_k \cdot U \cdot (X_{1,k}(t) - X_{2,k}(t)) = \frac{\partial X_{2,k}(t)}{\partial t} \cdot V_k \cdot r_C \cdot Cp_C \quad \text{Ec. 7-9}$$

$$u_1(t) \cdot r_H \cdot Cp_H \cdot (X_{1,k-1}(t) - X_{1,k}(t)) - A_k \cdot U \cdot (X_{1,k}(t) - X_{2,k}(t)) = \frac{\partial X_{1,k}(t)}{\partial t} \cdot V_k \cdot r_H \cdot Cp_H \quad \text{Ec. 7-10}$$

En estas dos ecuaciones se muestran dos entradas del sistema. Las dos entradas asociadas a temperaturas de entrada aparecen como condiciones frontera, tal y como se aprecia más adelante en este apartado.

Suponiendo una discretización espacial en elementos finitos iguales, se proponen unos cambios de nomenclatura para obtener unas expresiones más compactadas y fáciles de utilizar:

$$\triangleright \text{Sea } A_k = \frac{A}{N}, \text{ siendo } A \text{ la sección total de placa del intercambiador.}$$

$$\triangleright \text{Sea } V_k = \frac{V}{N}, \text{ por la misma razón anteriormente planteada.}$$

\triangleright Sea N es el número de pares de elemento (H "y" C) en que se discretiza el sistema.

$$\triangleright \text{Sean } \mathbf{a}_x = \frac{U}{Cp_x} \cdot \frac{A}{N} \cdot \frac{N}{V} \cdot \frac{1}{r_x} \text{ es decir } \mathbf{a}_x = \frac{U}{Cp_x} \cdot \frac{A}{V} \cdot \frac{1}{r_x} \quad \text{"y"} \quad \mathbf{b} = \frac{V}{N},$$

donde x toma valores 1 "o" 2 según sea nodo en la región caliente o fría.



Así, las dos últimas ecuaciones planteadas se describen:

$$\frac{1}{b} \cdot [u_2(t) \cdot (X_{2,k+1}(t) - X_{2,k}(t))] + a_2 \cdot (X_{1,k}(t) - X_{2,k}(t)) = \dot{X}_{2,k}(t) \quad \text{Ec. 7-11}$$

$$\frac{1}{b} [u_1(t) \cdot (X_{1,k-1}(t) - X_{1,k}(t))] - a_1 \cdot (X_{1,k}(t) - X_{2,k}(t)) = \dot{X}_{1,k}(t) \quad \text{Ec. 7-12}$$

Al inicio de este apartado se plantea un vector de 4 entradas de las cuales, las dos últimas contemplan las temperaturas de entrada del flujo caliente y frío respectivamente, mientras que el vector de salida tiene dos componentes que contemplan las dos temperaturas de salida de ambos flujos. Esta elección se justifica en la certeza de que se dispone de dichos valores, observables por instrumentación en planta.

En este punto se analizará el sistema no lineal estudiándolo como un sistema cuya representación en espacio de estados (EE), es del tipo:

$$\dot{\underline{X}}(t) = A \cdot \underline{X}(t) + f(B, \underline{X}(t), U(t)) \quad \text{Ec. 7-13}$$

$$\underline{Y}(t) = g(\underline{X}(t), U(t))$$

Se avanza al lector que la primera de ellas, la ecuación dinámica, se mostrará como no lineal e invariante mientras que la ecuación de salida resultará ser lineal e invariante.

Para comenzar se muestra el vector $\dot{\underline{X}}(t)$ según el orden establecido en la nomenclatura de este apartado, véase página 36.

$$\dot{\underline{X}}(t) = \begin{bmatrix} \dot{X}_{1,1}(t) \\ \dots \\ \dot{X}_{1,N}(t) \\ \dot{X}_{2,1}(t) \\ \dots \\ \dot{X}_{2,N}(t) \end{bmatrix} \text{ para } 2N \text{ elementos. Análogamente para el vector de estados.}$$

La ley de control surge de la *Ec. 7-11* y *Ec. 7-12*, en la forma que se plantea en la *Ec. 7-13*.



Seguidamente se muestra la morfología de las matrices A y B del sistema en su representación en EE:

$$A = \begin{array}{c} \begin{array}{cc} \text{N} & \text{N} \\ \left[\begin{array}{cc|cc} -\alpha_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & 0 & -\alpha_1 \\ \hline \alpha_2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & 0 & -\alpha_2 \end{array} \right] & \begin{array}{c} \text{N} \\ \text{N} \end{array} \end{array} \\ \end{array}$$

$$B = \frac{1}{\beta} \begin{array}{c} \begin{array}{cc} \text{N} & \text{N} \\ \left[\begin{array}{cc|cc} -1 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & \dots & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 1-1 \\ \hline 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \dots & -1 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & \dots & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & \dots & -1 \end{array} \right] & \begin{array}{c} \text{N} \\ \text{N} \end{array} \end{array} \\ \end{array}$$

matrices de dimensión $2N \times 2N$

Las *Ec. 7-11* y *Ec. 7-12* se pueden expresar de la siguiente manera:

$$\dot{\underline{X}}(t)_{2N \times 1} = A_{2N \times 2N} * \underline{X}(t)_{2N \times 1} + \left\{ u_1(t) \bullet \begin{bmatrix} I_{N \times N} & 0_{N \times N} \\ 0_{N \times N} & 0_{N \times N} \end{bmatrix} + u_2(t) \bullet \begin{bmatrix} 0_{N \times N} & 0_{N \times N} \\ 0_{N \times N} & I_{N \times N} \end{bmatrix} \right\} * B_{2N \times 2N} * \underline{X}(t)_{2N \times 1} +$$

$$\frac{1}{b} \bullet \left\{ u_1(t) \bullet u_3(t) \bullet \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix} + u_2(t) \bullet u_4(t) \bullet \begin{bmatrix} 0 \\ \dots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \right\} \quad \text{Ec. 7-14}$$

donde $I_{N \times N}$ y $0_{N \times N}$ son las matrices identidad y nula, respectivamente, de dimensiones las indicadas en los subíndices. El último término incluye las condiciones de entrada las cuales no se pueden expresar como términos de la matriz B .

En el caso concreto de la matriz B se debe tener en cuenta que la primera fila y la última son filas críticas ya que, atendiendo a las *Ec. 7-11* y *Ec. 7-12*, existe el requerimiento de dos variables de estado que no pertenecen a la discretización del conjunto, en concreto para los casos:

$$\triangleright \frac{1}{b} \bullet \left[u_1(t) \bullet (X_{1,0}(t) - X_{1,1}(t)) \right] - a_1 \bullet (X_{1,1}(t) - X_{2,1}(t)) = \dot{X}_{1,1}(t) \text{ para la } \text{Ec. 7-11}.$$

En este caso la variable de estado $X_{1,0}(t)$ no se puede expresar en la matriz B ya que no existe en el vector de variables de estado. Esta variable de estado requerida, sin embargo, corresponde a la componente $u_3(t)$ del vector de entradas



$$\triangleright \frac{1}{b} \bullet [u_2(t) \bullet (X_{2,N+1}(t) - X_{2,N}(t))] + a_2 \bullet (X_{1,N}(t) - X_{2,N}(t)) = \dot{X}_{2,N}(t) \text{ para la}$$

Ec. 7-12. En este caso la variable de estado $X_{2,N+1}(t)$ no se puede tampoco expresar en la matriz B por motivos similares al del caso anterior. Esta variable se relaciona directamente con otro valor inicial asignado a la componente $u_4(t)$ del vector de entradas.

Hasta este momento se ha estudiado únicamente la parte dinámica del sistema. Sin embargo, para que este sistema quede totalmente definido se ha de establecer también la ecuación correspondiente a la salida. Esta ecuación será lineal, por lo tanto del tipo: $\underline{Y}(t) = C \bullet \underline{X}(t) + D \bullet \underline{U}(t)$. Concretando, por observación de la definición de vectores realizada en la página 36, se obtiene:

$$\underline{Y}(t)_{2 \times 1} = \begin{bmatrix} [1 & 0 & \dots & 0]_{1 \times N} & 0_{1 \times N} \\ 0_{1 \times N} & [0 & \dots & 0 & 1]_{1 \times N} \end{bmatrix} * \underline{X}(t)_{2N \times 1}$$

Ec. 7-15

Como se puede observar, en este caso no existe relación directa entre la salida y la entrada, es decir, la matriz D es nula.

7.5 Identificación de parámetros

Debido al diseño de planta y a los elementos dispuestos en la misma para reportar el estado del sistema, existe la necesidad de determinar varios parámetros desconocidos. Estos parámetros son:

- \triangleright U o coeficiente global de transferencia de calor. Se calcularán dos valores de U , uno para los intercambiadores de la fase caliente (S-302/1y2) y otro para los de la fase fría (S-302/3y4).
- \triangleright F_C y F_R ; caudales de agua para intercambiadores S_302/3y/4 o de recirculación de sal para intercambiadores S_302/1y/2.

