

# Sistemas de Contacto con Membranas: Tecnología de Membranas más allá de la filtración

**Dr. Julio Romero**

Laboratorio de Procesos de Separación por Membranas  
Departamento de Ingeniería Química  
Universidad de Santiago de Chile

Av. Lib. Bdo. O'Higgins 3363 – Estación Central, Santiago de Chile  
Tel.: (56 2) 681 23 98 / Fax: (56 2) 681 71 35 / E-mail: [juromero@lauca.usach.cl](mailto:juromero@lauca.usach.cl)  
Web: <http://diq.usach.cl>

# Presentación

Creado el año 2000, el Laboratorio de Procesos de Separación por Membranas (LPSM) está constituido por investigadores que forman parte del Departamento de Ingeniería Química de la USACH.

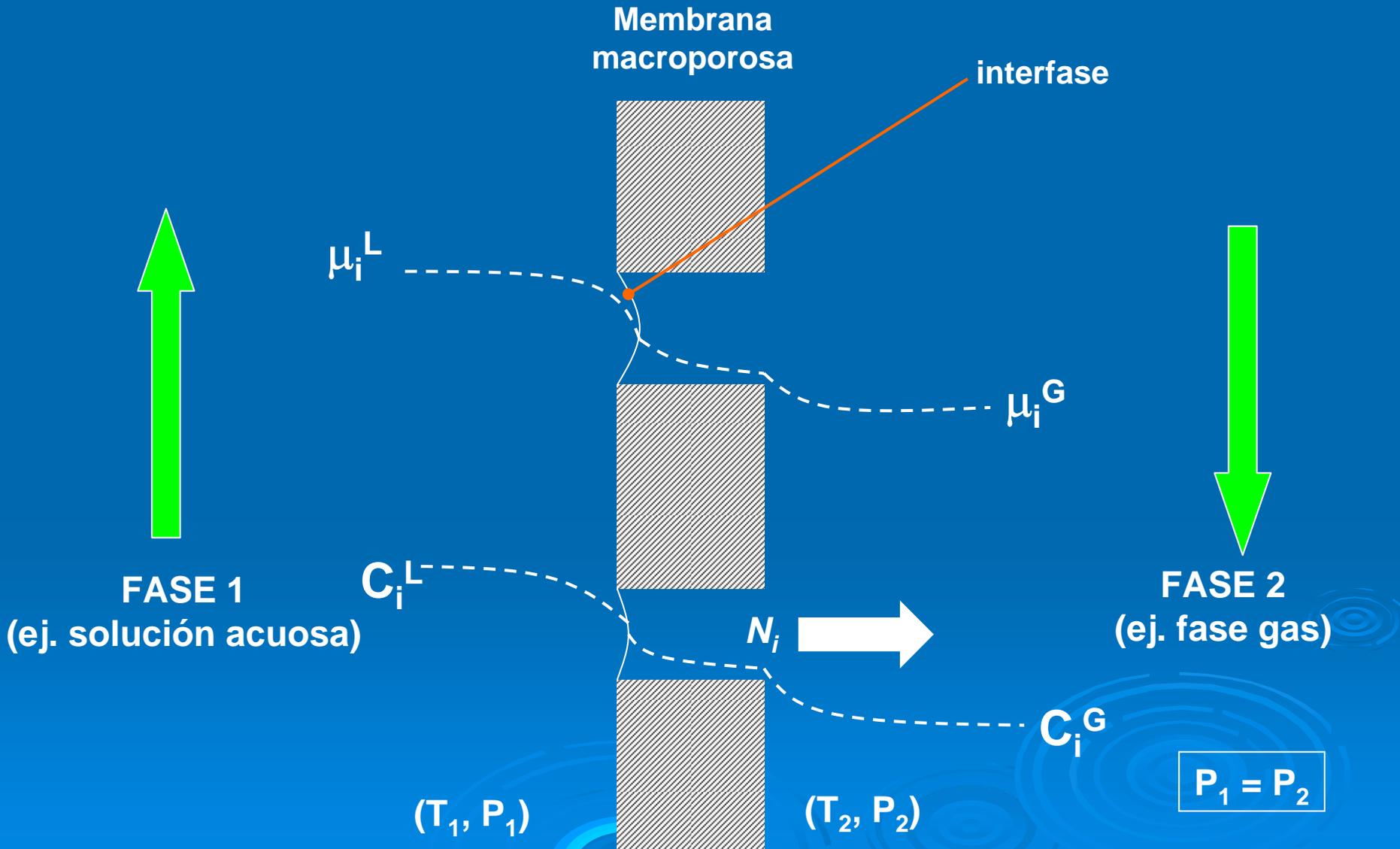
Su formación obedece a un interés creciente en el desarrollo de nuevos materiales y operaciones en el ámbito de la Tecnología de Membranas.

- La finalidad de este equipo de investigación es el estudio de nuevos procesos y materiales ligados a la Tecnología de Membranas.
- Optimizar técnicas que permitan establecer nuevas aplicaciones industriales.
- El análisis científico de estas tecnologías define las labores de investigación y educación de este grupo.

# Líneas de Investigación

- **Procesos de contacto con membranas:** Destilación Osmótica (OD), Destilación con Membranas (MD y VMD), contactores líquido-líquido
- **Procesos acoplados: medios porosos / fluidos supercríticos (SCF)** (Separación de mezclas a alta presión utilizando membranas microporosas; operaciones de contacto con membranas)
- **Desarrollo de nuevas membranas híbridas orgánicas / inorgánicas**
- **MF** de soluciones agroalimentarias a través de membranas cerámicas, **UF** asistida de pre-tratamiento fisicoquímico para purificación de aguas, Tratamiento de residuos industriales utilizando **OI**

# Definición de contactor de membrana



# Definición de contactor de membrana

**Definición de membrana:  
“Barrera selectiva que separa dos fases”**

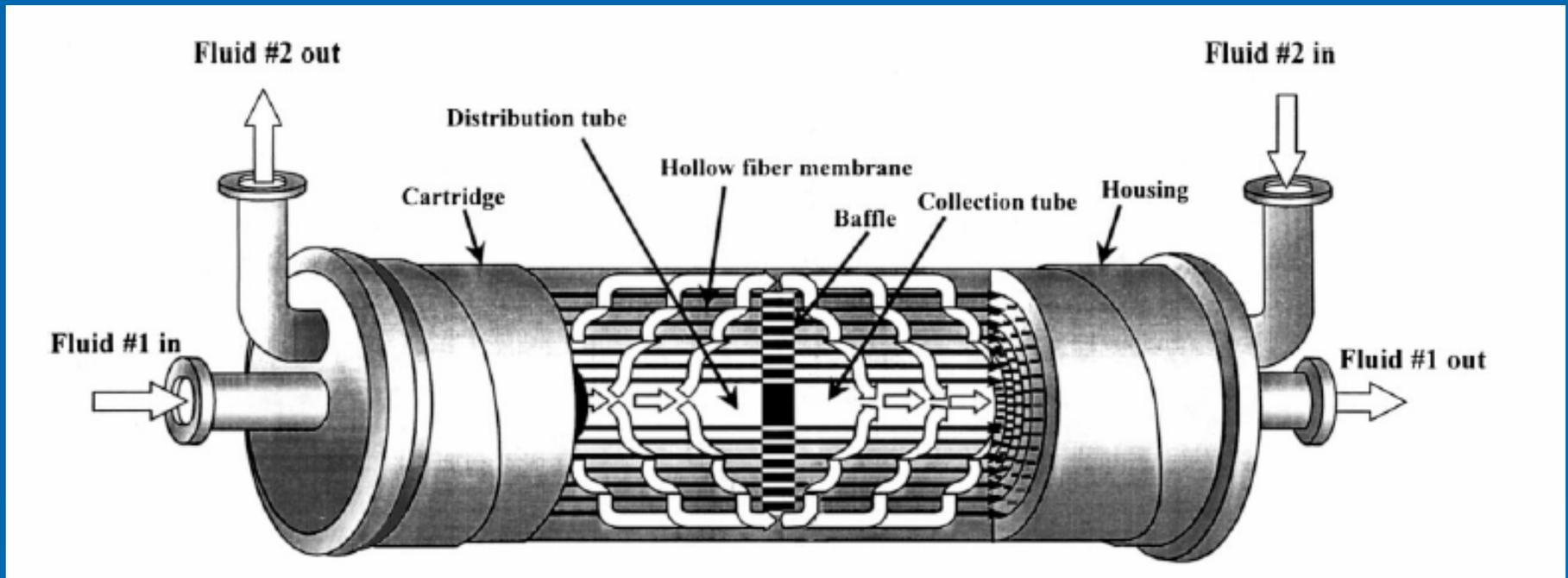
El término “selectiva” es una propiedad intrínseca de la membrana (Procesos de MF, UF, NF, OI, ED....etc)

En un contactor de membrana la **selectividad está dada principalmente por el equilibrio termodinámico** que se establece en la interfase entre dos fases de naturaleza física diferente. La membrana sólo juega un rol de soporte de la(s) interfase(s)

# ¿Por qué utilizar este tipo de sistemas?

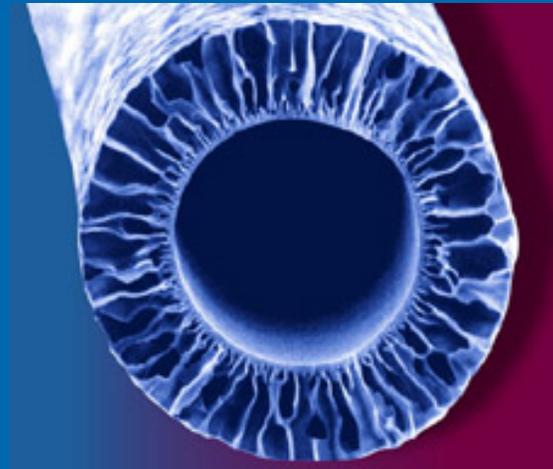
- ✓ Fácil control de proceso debido a estabilización de interfases
- ✓ Independencia de la densidad de las fases para establecer diversas configuraciones
- ✓ Permite diseño modular
- ✓ Gran incremento en el valor de la razón (área / volumen), el cual varía entre **1600 - 6600 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>** cuando se utilizan **módulos de fibras huecas** (columna empacada: 30 a 300 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>)

# Contactador de membrana de fibras huecas



Esquema de un módulo de contacto de fibras huecas tipo Extra Flow Liqui-cel con baffle central fabricado por Celgard LLC (Gabelman and Hwang, 1999)

# Contactador de membrana de fibras huecas (CMFH)



## CARACTERISTICAS

**Membrana:** porosa (hidrofílica o hidrofóbica) o densa

**Espesor:** 20 – 100  $\mu\text{m}$

**Diámetro de poro:** 0.05 – 1.0  $\mu\text{m}$

**Materiales:** PTFE, Polipropileno, silicona

# Contactor de membrana de fibras huecas (CMFH)

## Aplicaciones G → L

- Absorción de SO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub> desde gases
- Absorción de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S desde gas natural
- Absorción de CO<sub>2</sub> desde biogas
- Oxigenación de sangre y procesos de fermentación aeróbica
- Inyección de CO<sub>2</sub> en bebidas
- Remoción de COV
- Remoción de NH<sub>3</sub> de aire
- Separación de etano/etileno
- Ozonización de agua

## Aplicaciones L → G

- Extracción de bioproductos volátiles (alcoholes y aromas)
- Remoción de O<sub>2</sub> de agua

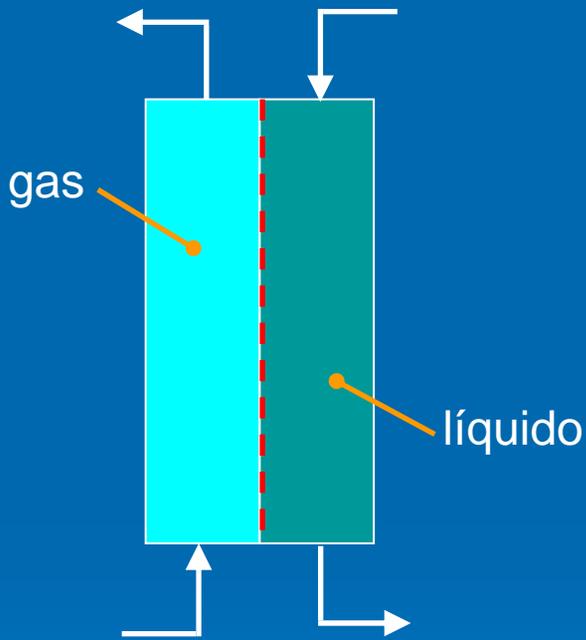
## Aplicaciones L → L

- Remoción de metales pesados (sistema c/reacción química)
- Extracción de productos de fermentación (ácido cítrico, acético, láctico y penicilina)
- Extracción de compuestos fenólicos

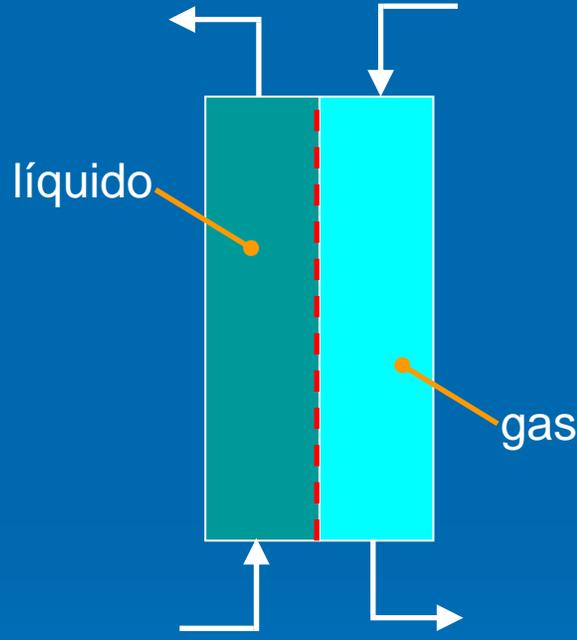
# Fabricantes de CMFH

Fabricante	Materiales			Diámetro de fibras (mm)	Superficie (m <sup>2</sup> )	Diámetro de poros	Largo del módulo (cm)
	Fibras	Carcasa	Sellos				
<b>Celgard</b>	PP, PVDF	Policarbonato PVC, etc	Epoxy etc	0.25 – 0.3	0.2 - 220	0.2 μm	12 – 116.3
<b>A/G Technology</b>	Polisulfona	Polisulfona	Epoxy	0.5 – 3	0.015 – 28	0.65 μm	18.5 - 120
<b>Koch Membrane Systems</b>	Polisulfona, poliacrilonitrilo carbono	PVC, Polisulfona Inox 316 ARMYLOR®	Epoxy	0.5 – 3.2	0.019 – 69.7	0.2 μm	17.8 – 182.9
<b>Microdyn Technologies</b>	PP Sulfonated polyether	PP Inox 316	Poliuretano PP	0.2 – 5.5	0.02 - 25	0.4 μm	25 – 304.9
<b>Millipore</b>	Polisulfona	Polisulfona	Epoxy poliuretano	0.5 – 1.1	0.03 - 5	0.1 μm	63.8 – 109.2

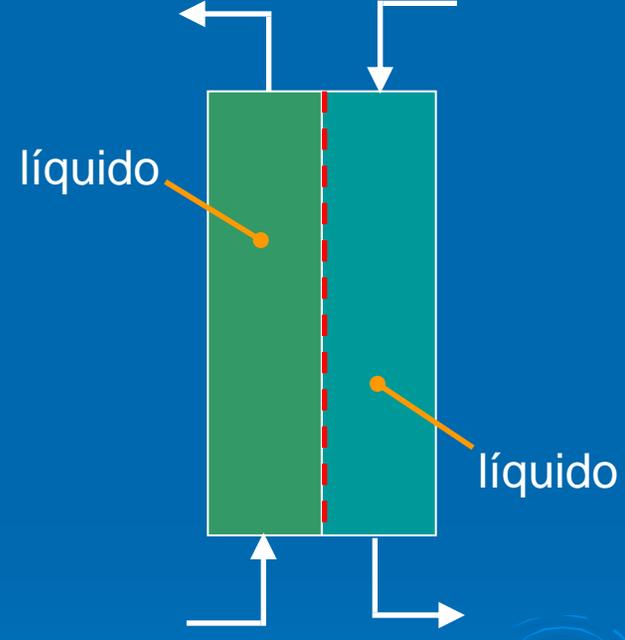
# Configuraciones de los CMFH



Gas-líquido



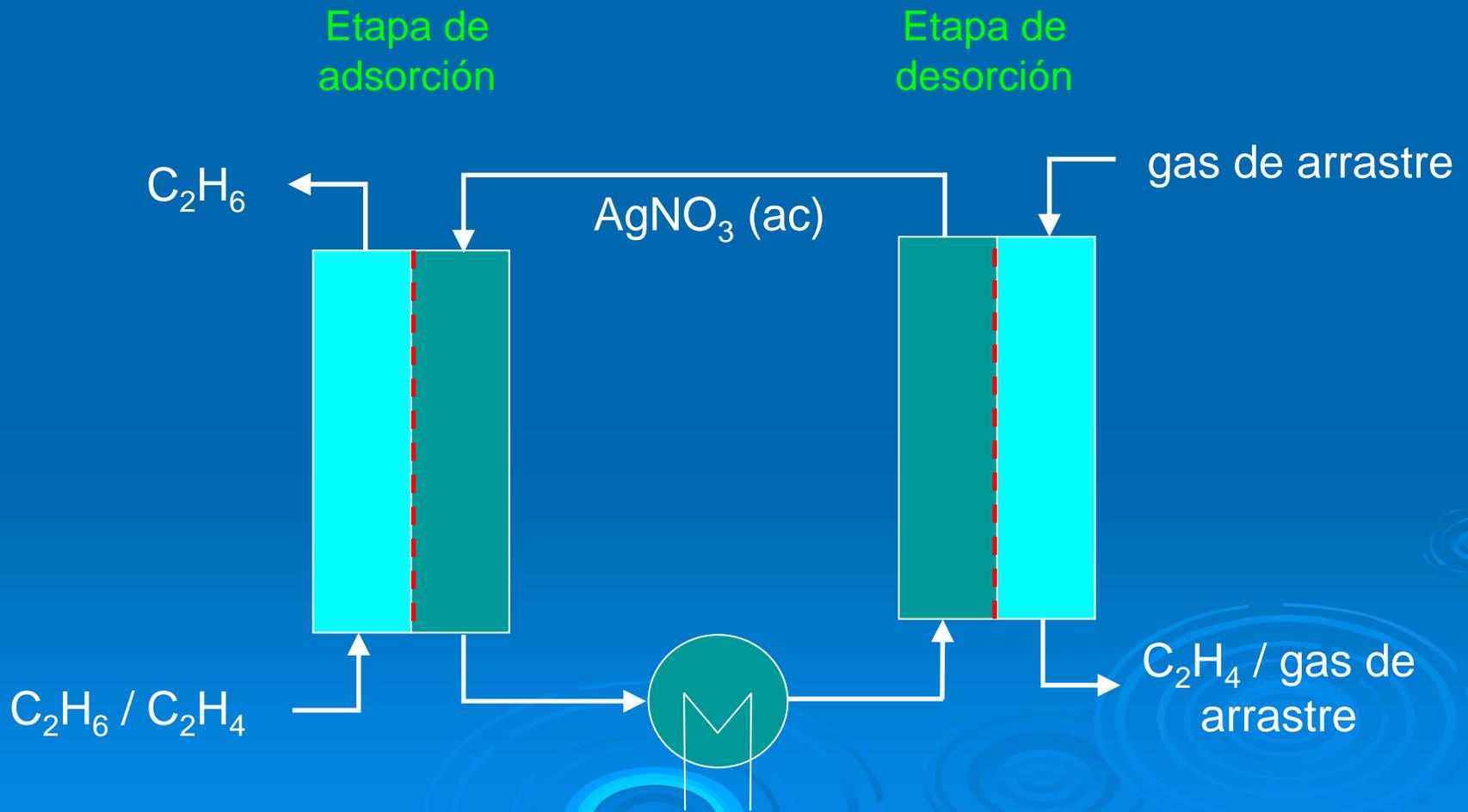
Líquido-gas



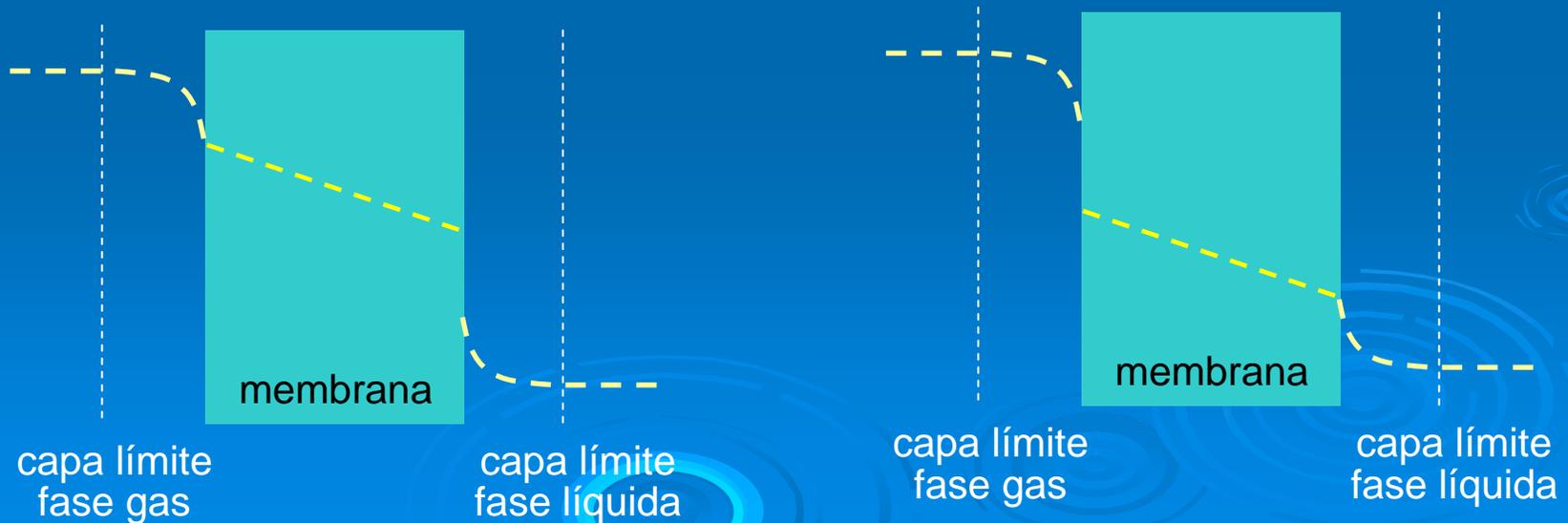
Líquido-líquido

# Configuraciones de los CMFH

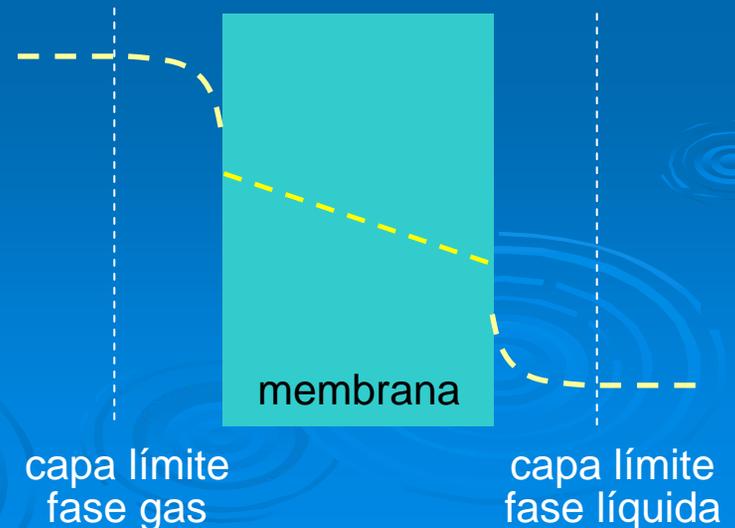
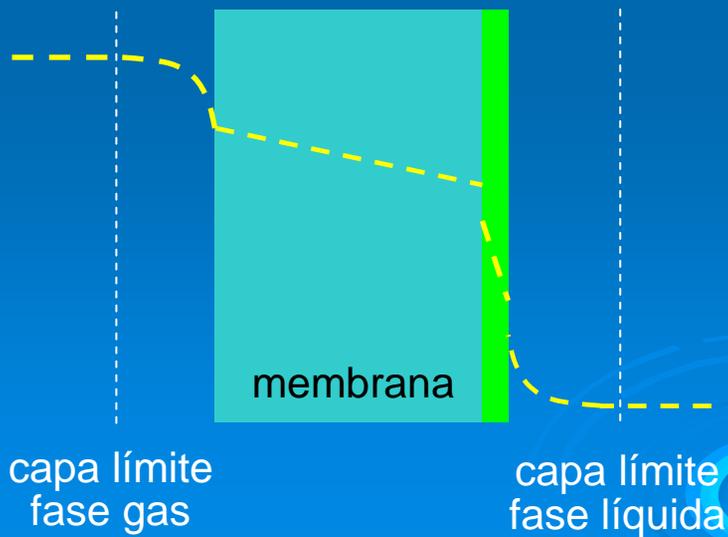
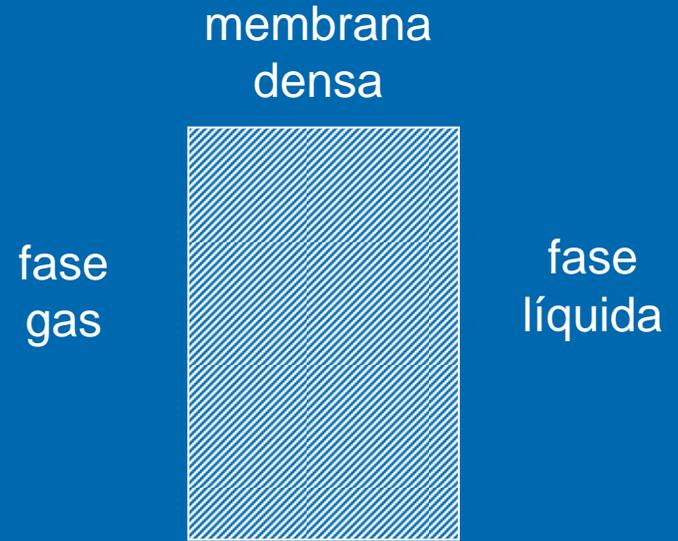
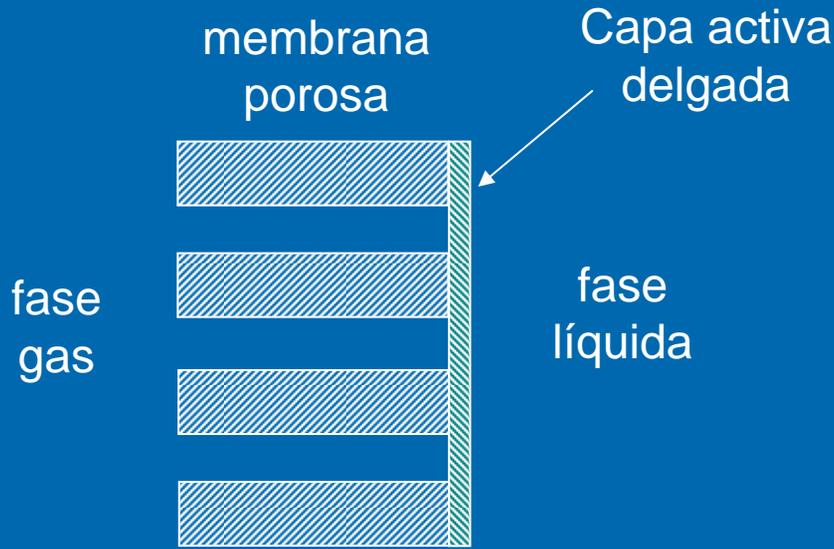
Esquema de la separación de etano/etileno en sistema de contacto con membranas de adsorción/desorción (Mulder, 1998)



# Estabilización de la interfase en contactor G-L



# Configuraciones de los CMFH



# Transferencia de masa

$$N_i = K_{T,i} \Delta C_i$$

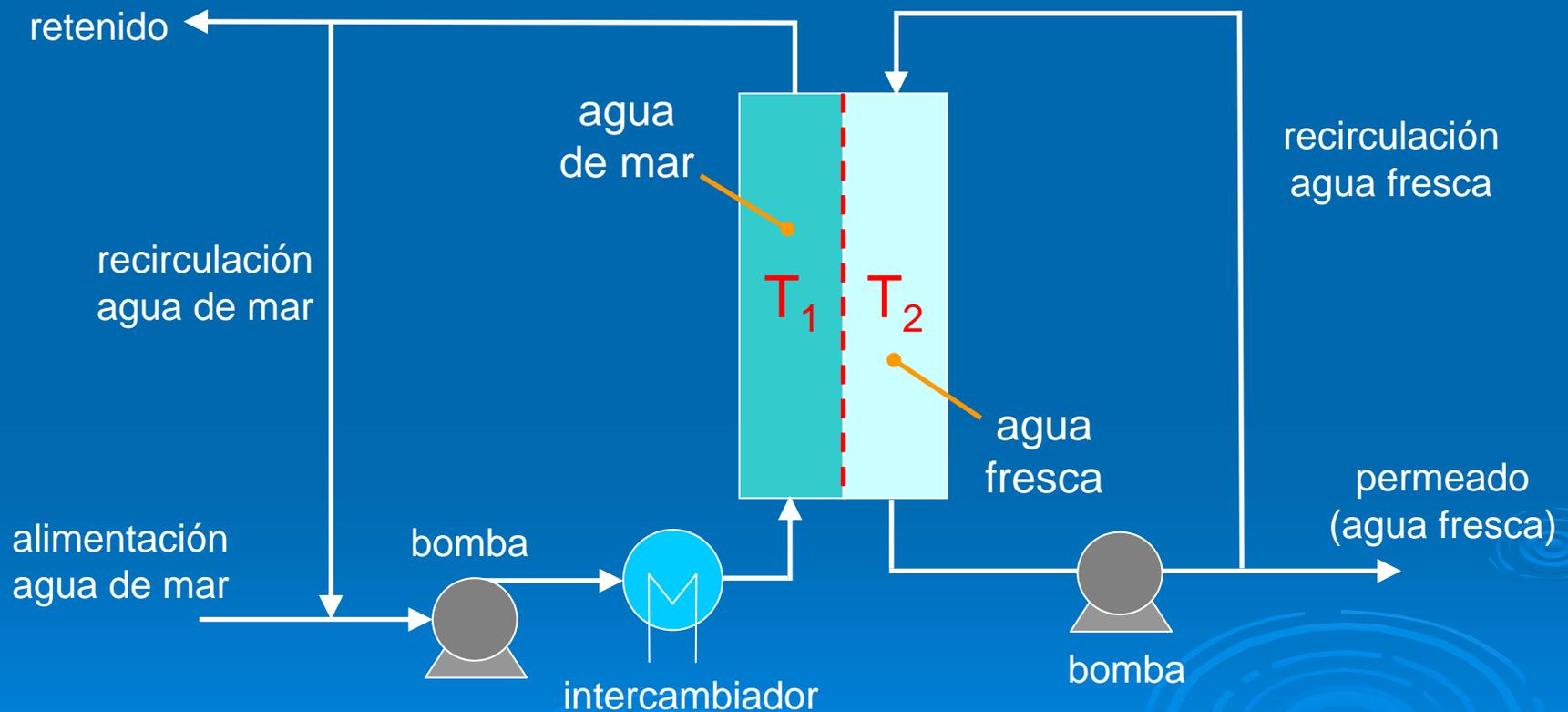
$$\frac{1}{K_{T,i}} = \frac{1}{k_i(\text{alimentación})} + \frac{1}{k_i(\text{membrana})} + \frac{1}{k_i(\text{fase receptora})}$$

Se debe considerar en la estimación de  $K_{T,i}$  un **término de distribución** que introduzca la discontinuidad del perfil de concentración en la interfase

En muchos de estos sistemas, la transferencia de calor puede jugar un rol importante en el desempeño del proceso

# Potencial de los sistemas de contacto con membranas

Destilación con membranas para desalinización (Sirkar y Li, 2003)

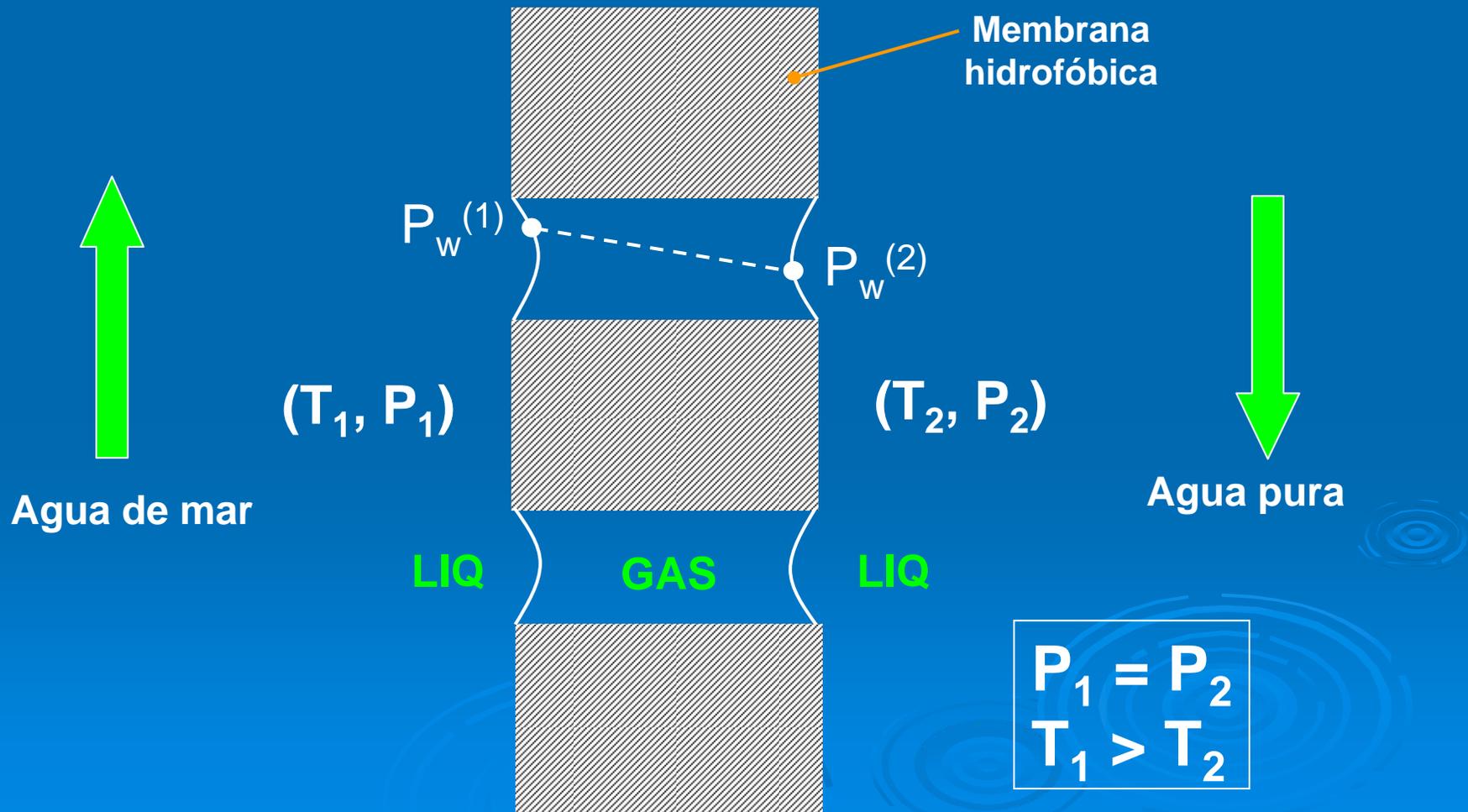


$$T_1 > T_2$$

$$P_{w1} > P_{w2}$$

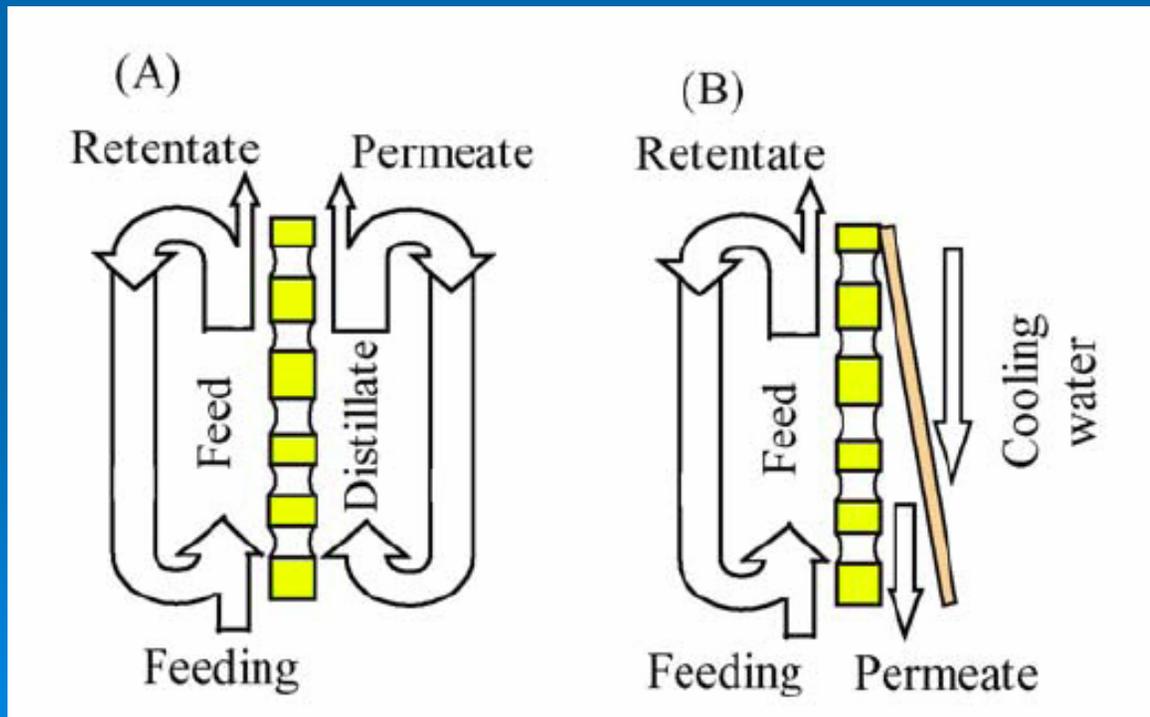
# Potencial de los sistemas de contacto con membranas

Destilación con membranas para desalinización (Sirkar y Li, 2003)



# Potencial de los sistemas de contacto con membranas

## Destilación con membranas y sus variantes (Gryta, 2005)



A) DCMD: Destilación con membranas de contacto directo

B) DCMD: Destilación con membranas de contacto directo con capa líquida

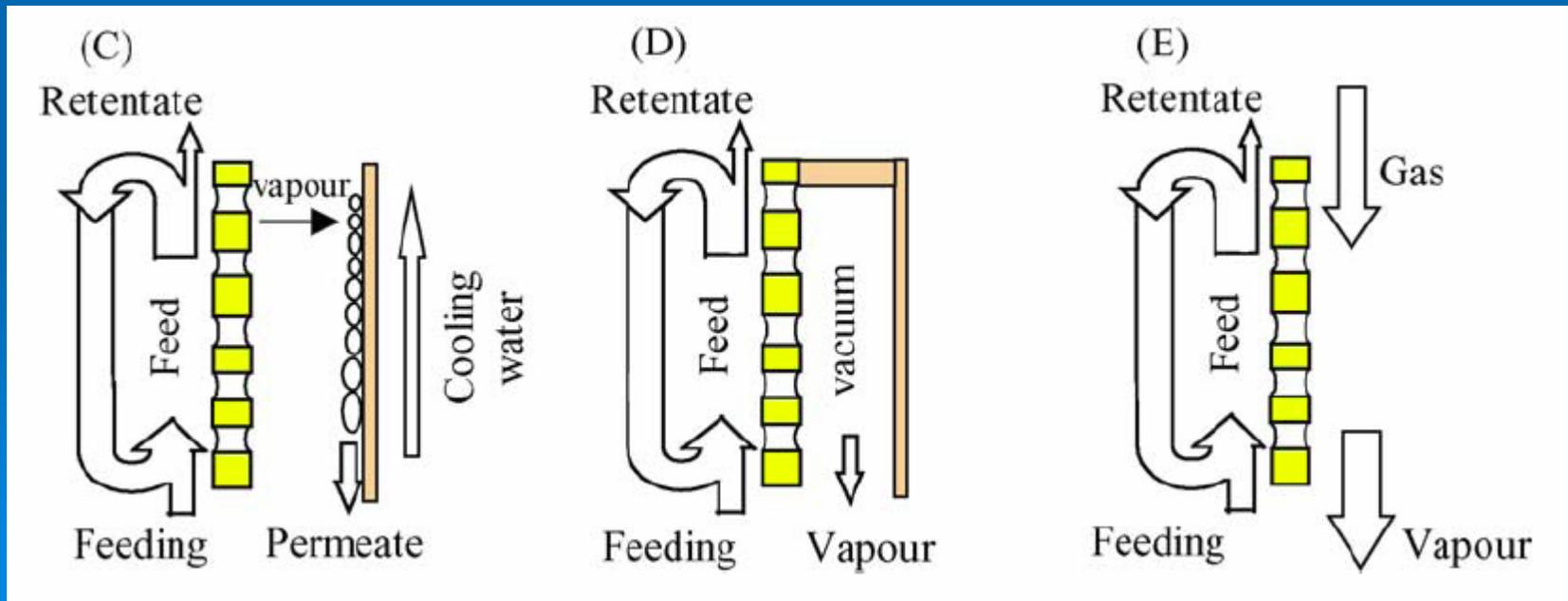
# Potencial de los sistemas de contacto con membranas

## Destilación con membranas y sus variantes (Gryta, 2005)

C) AGMD: Destilación con membranas con capa de aire

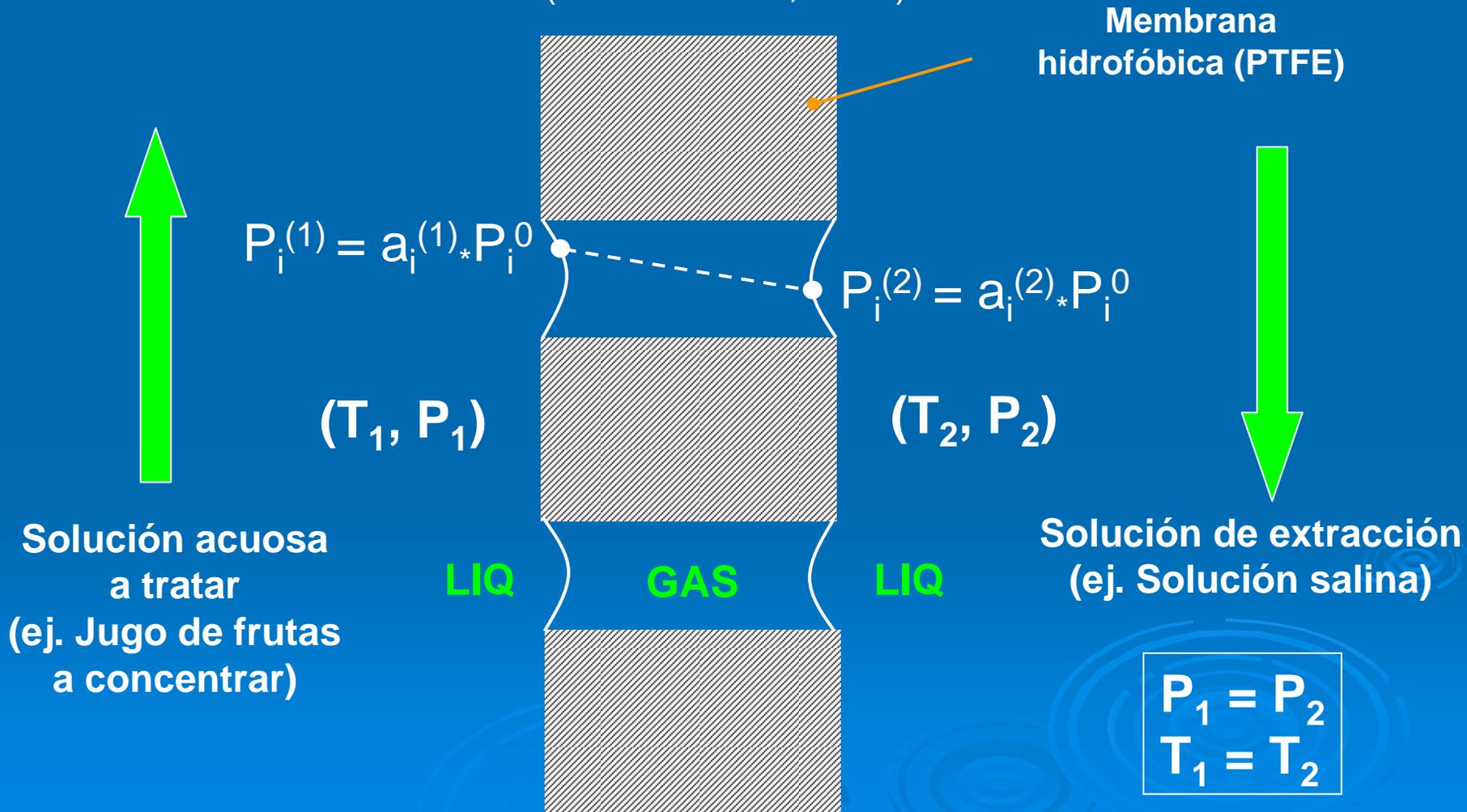
D) VMD: Destilación con membranas bajo vacío

E) SGMD: Destilación con membranas con gas de arrastre



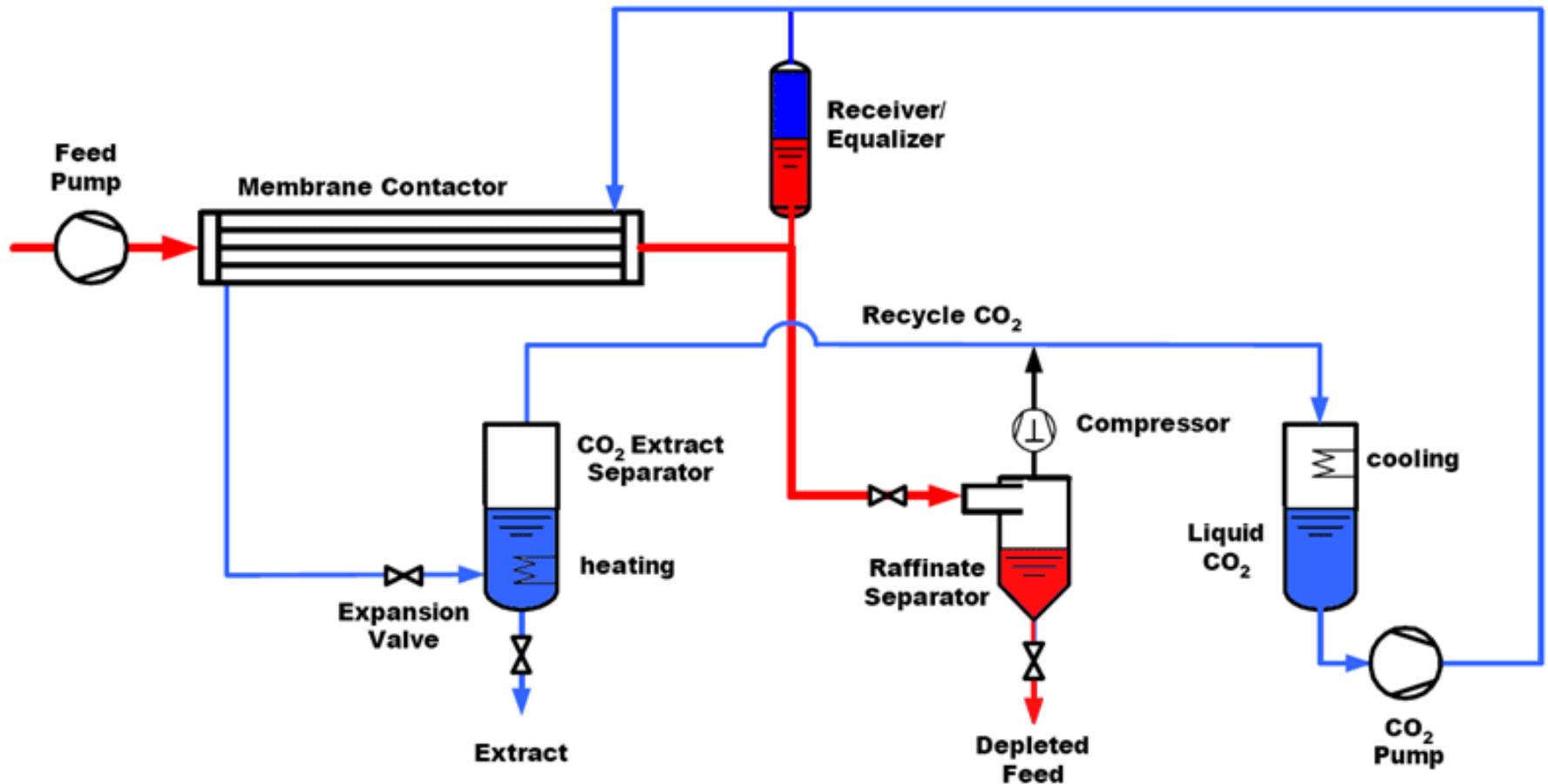
# Potencial de los sistemas de contacto con membranas

Destilación Osmótica (Romero et al., 2003)

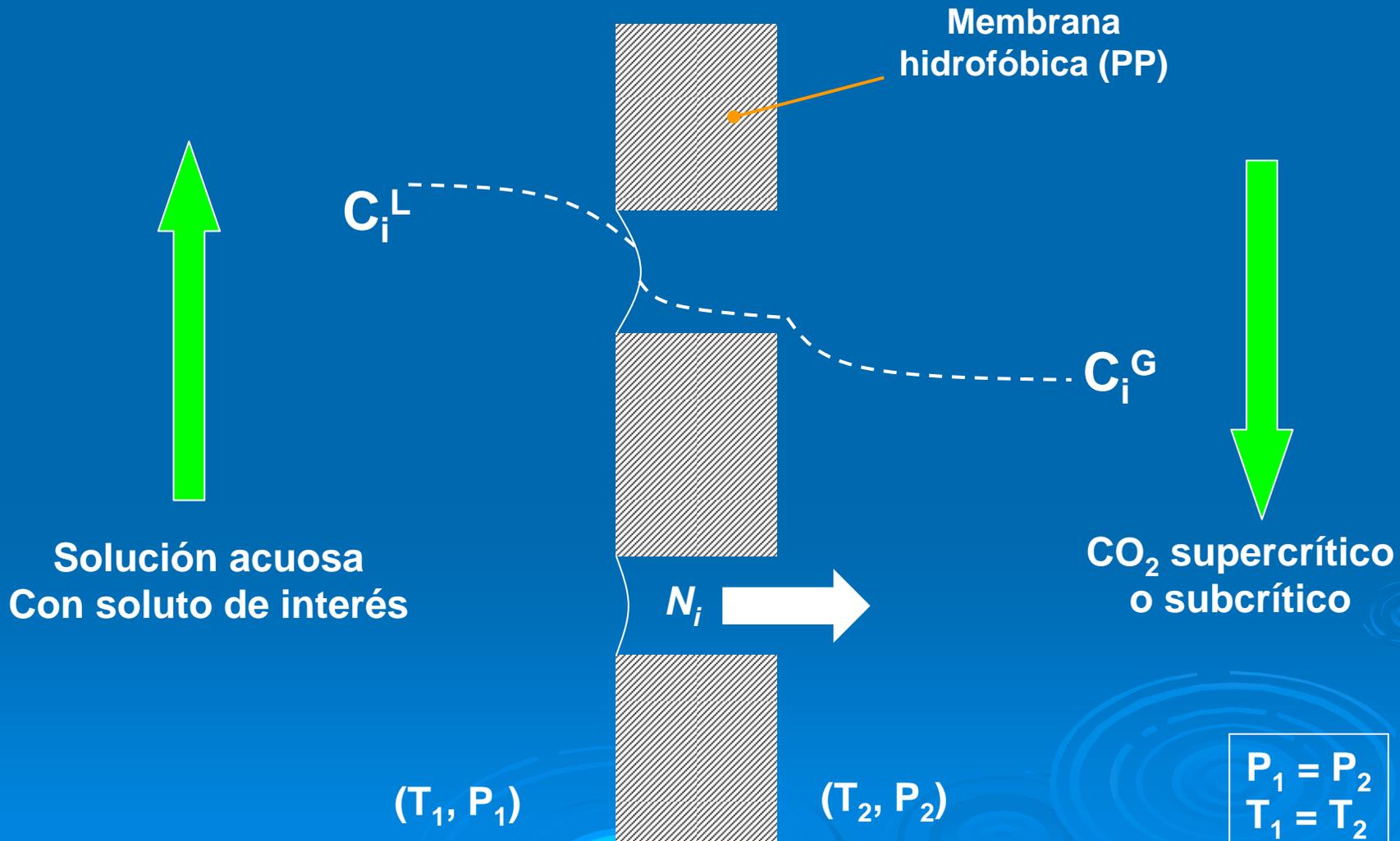


# Extracción supercrítica utilizando CMFH

## Commercial Scale Continuous Countercurrent Porocritical Fluid Extraction/Purification



# Extracción supercrítica utilizando CMFH



# Extracción supercrítica utilizando CMFH

Modelación de la extracción PoroCrit® (Estay y Romero, 2005)

Modelo basado en un sistema constituido por tres resistencias en serie:

- 1) Capa límite de la fase líquida de alimentación
- 2) Capa de gas denso (solvente) estancado en la porosidad ( y ELV)
- 3) Capa límite del gas denso (solvente)

$$\frac{1}{K_W} = \frac{1}{k_W} + \frac{d_i}{d_{ML} k_m m_i} + \frac{d_i}{d_o k_o m_i}$$

$$\Delta C_{ML} = \frac{(C_l - C_{sc}/m_i)_1 - (C_l - C_{sc}/m_i)_2}{\ln \left[ \frac{(C_l - C_{sc}/m_i)_1}{(C_l - C_{sc}/m_i)_2} \right]}$$

$$m_i = \frac{C_{sc}}{C_l} : \text{Coeficiente de distribución}$$

# Extracción supercrítica utilizando CMFH

Condiciones utilizadas para los experimentos y la simulación

Operation conditions of experiments (Bothum et al., 2003)	
Pressure (liquid and gas)	69 bar
Temperature	298 K
Composition of liquid feed ( $X_{\text{EtOH}}$ , $X_{\text{acetone}}$ )	10 % w/w
Structural parameters of the membrane contactor	
Membrane material	Polypropylene
Number of fibers, n	1
Length, L	1.07 m
Internal diameter, $d_{\text{in}}$	0.6 mm
External diameter, $d_{\text{out}}$	1.02 mm
Pore diameter, $d_p$	0.2 $\mu\text{m}$
Porosity, $\varepsilon$	75 %

# Extracción supercrítica utilizando CMFH

Porcentaje de extracción (**EX**) de acetona desde una solución acuosa (10% p/p) mediante extracción Porocrit® en función del flujo de líquido de alimentación (**F**) y la razón de flujos molares de solvente/alimentación (**S/F**) (Estay y Romero, 2005)

<b>F (mL/min)</b>	<b>S/F</b>	<b>EX<sub>EXP</sub> (%)</b>	<b>EX<sub>EST</sub> (%)</b>
0.15	3	96.1 ± 1.8	95.04
0.25	3	89.6 ± 1.8	88.31
0.5	3	68.9 ± 1.8	75.56
1.0	3	67.9 ± 1.8	58.12

# Conclusiones y perspectivas

- ✓ Al analizar procesos L-G, G-L, L-L, L-FSC se debe establecer la etapa de control del proceso considerando todas las resistencias a la transferencia de masa
- ✓ La correcta caracterización de la hidrodinámica de los módulos es requisito necesario para la evaluación del proceso
- ✓ El desarrollo de nuevos materiales permitirá ampliar el número de aplicaciones a través de un aumento notable de la eficiencia y una disminución de los costos de operación
- ✓ El acoplamiento de este tipo de sistemas de separación a otras técnicas (ej. reacción química, energía solar) permitirá diseñar operaciones versátiles, compactas y eficientes

# Gracias por su atención

**Dr. Julio Romero**

Laboratorio de Procesos de Separación por Membranas

Web: <http://diq.usach.cl> E-mail: [juromero@usach.cl](mailto:juromero@usach.cl)

