

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Química

Herramientas para el estudio de los
procesos químicos
Balance de masa

Introducción

En esta clase se revisarán

- Diseño de procesos: análisis y síntesis.
- Determinación de los grados de libertad para realizar el balance de materia para equipos y procesos.
- Resolución de un caso general de balance de materia para la obtención de benceno a partir de tolueno.

Análisis vs. Síntesis

- Dadas las entradas y el sistema.



- Encontrar efectos en las salidas.
- Tareas:
 - Descomposición
 - Modelado
 - Simulación

- Dadas las entradas y salidas.



- Diseñar el sistema
- Tareas:
 - Integración de componentes
 - Evaluación
 - Optimización

Síntesis de Procesos

Elección de alternativas de Procesamiento.

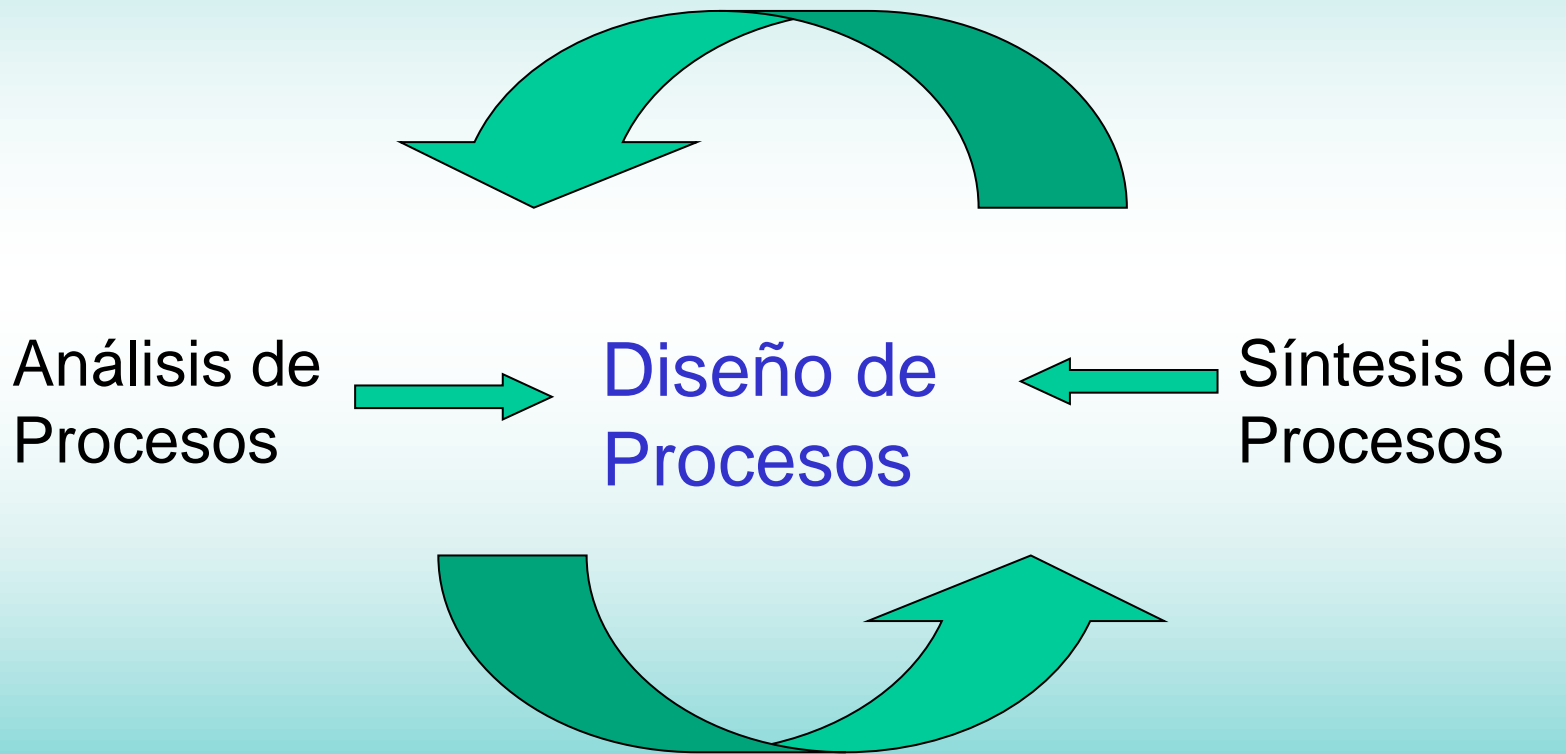
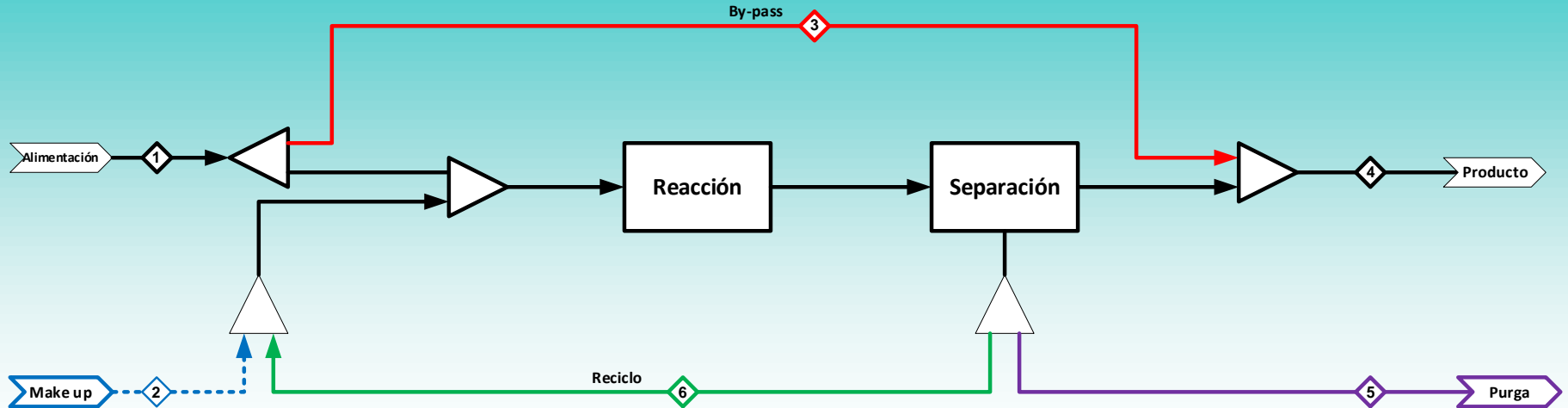


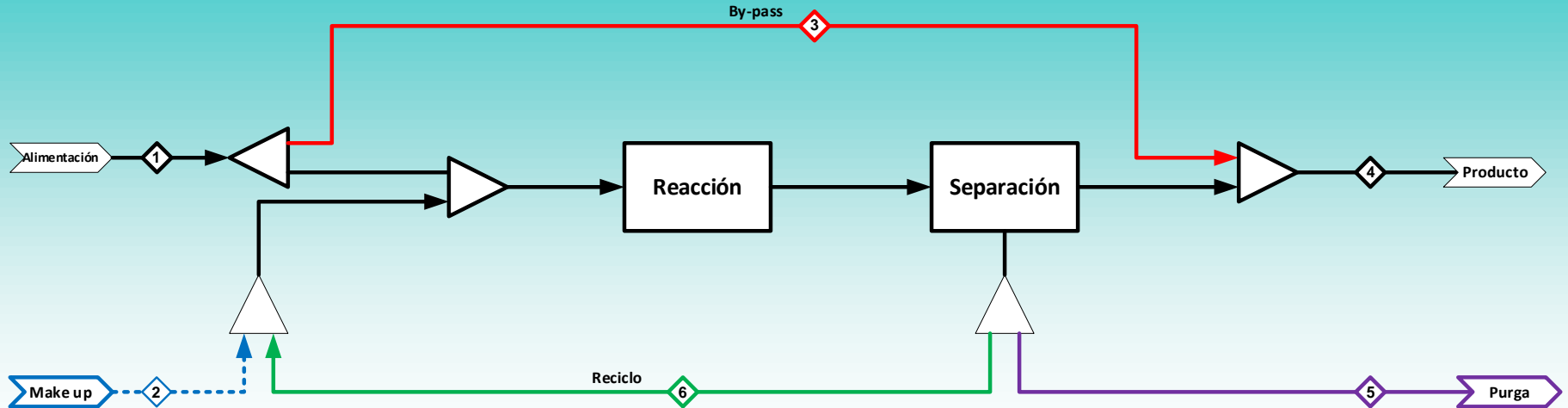
Diagrama de flujo de bloques (BFD)



Reciclo: es la operación o paso del proceso mediante el cual una parte o fracción del producto del proceso se devuelve y se mezcla con la alimentación fresca que se alimenta a la sección de reacción. En un proceso con reacción química, generalmente hay algo de material de alimentación sin reaccionar en la corriente que contiene el producto. Para reducir costos y aumentar la conversión general, el material que no ha reaccionado a menudo se separa y se reutiliza. Otras razones para reciclar parte de la corriente incluyen la recuperación de materiales valiosos, como catalizadores, un mejor control de la temperatura durante un proceso y una disminución de residuos de fluido de trabajo.

Purga: es una corriente para eliminar una acumulación de inertes o material no deseado que de otro modo podría acumularse en la corriente de reciclaje. La corriente de purga se encuentra a menudo junto con la corriente de reciclo, ya que el reciclo hace que el proceso sea particularmente susceptible a la acumulación de especies no deseadas. La corriente de purga generalmente es sólo un pequeño porcentaje del caudal de reciclo.

Diagrama de flujo de bloques (BFD)



By pass: Es una corriente que salta una o más etapas de otro proceso y va directamente a otra etapa aguas abajo. El by-pass (derivación) es útil, por ejemplo, para disminuir el grado de conversión de los compuestos de entrada o para lograr un mejor control sobre las temperaturas de la corriente.

Make up: Se requiere una corriente de reposición para reemplazar las pérdidas por fugas o pérdidas de materiales en el circuito de reciclo. El tamaño y la ubicación adecuados de las corrientes de by-pass (reposición) y purga pueden evitar muchos problemas dentro de la planta de proceso..

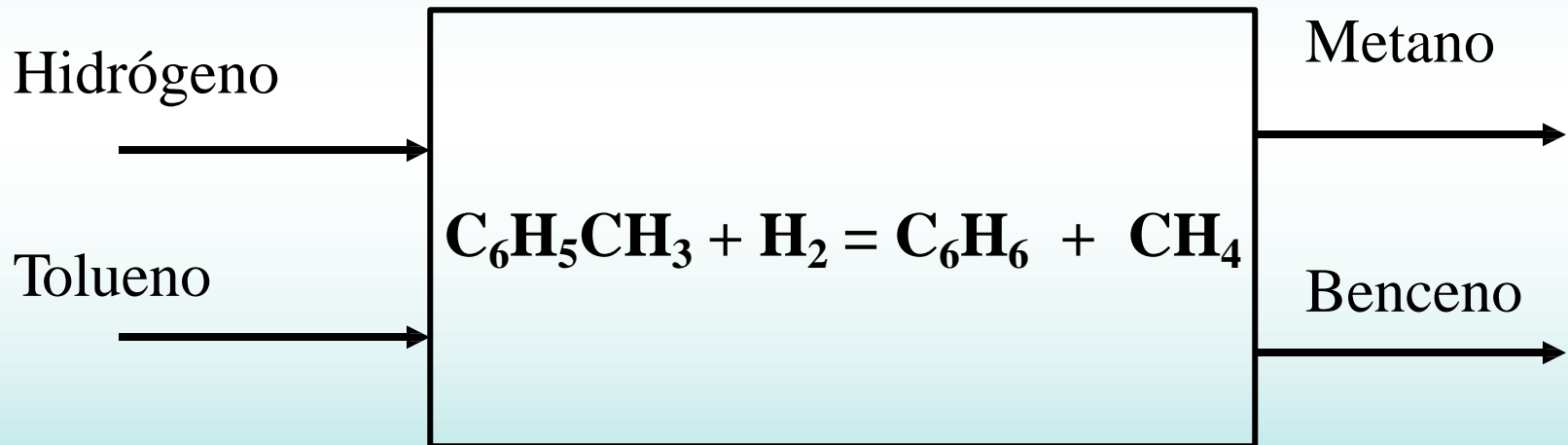
A veces también faltará cierta cantidad de componentes en la corriente de flujo. Por lo tanto, se requiere un flujo de reposición para reemplazar las pérdidas por fugas; a veces habrá algunas fugas y habrá algunas pérdidas de ese material.

Análisis de un **caso base**

El **tolueno** y el **hidrógeno** reaccionan para producir **benceno** y metano. La reacción no es completa, se requiere un exceso de tolueno. Los gases no condensables son separados y descargados. El benceno y el tolueno que no reaccionan son luego separados por destilación, después el tolueno es reciclado al reactor y el benceno sale en una corriente de salida.

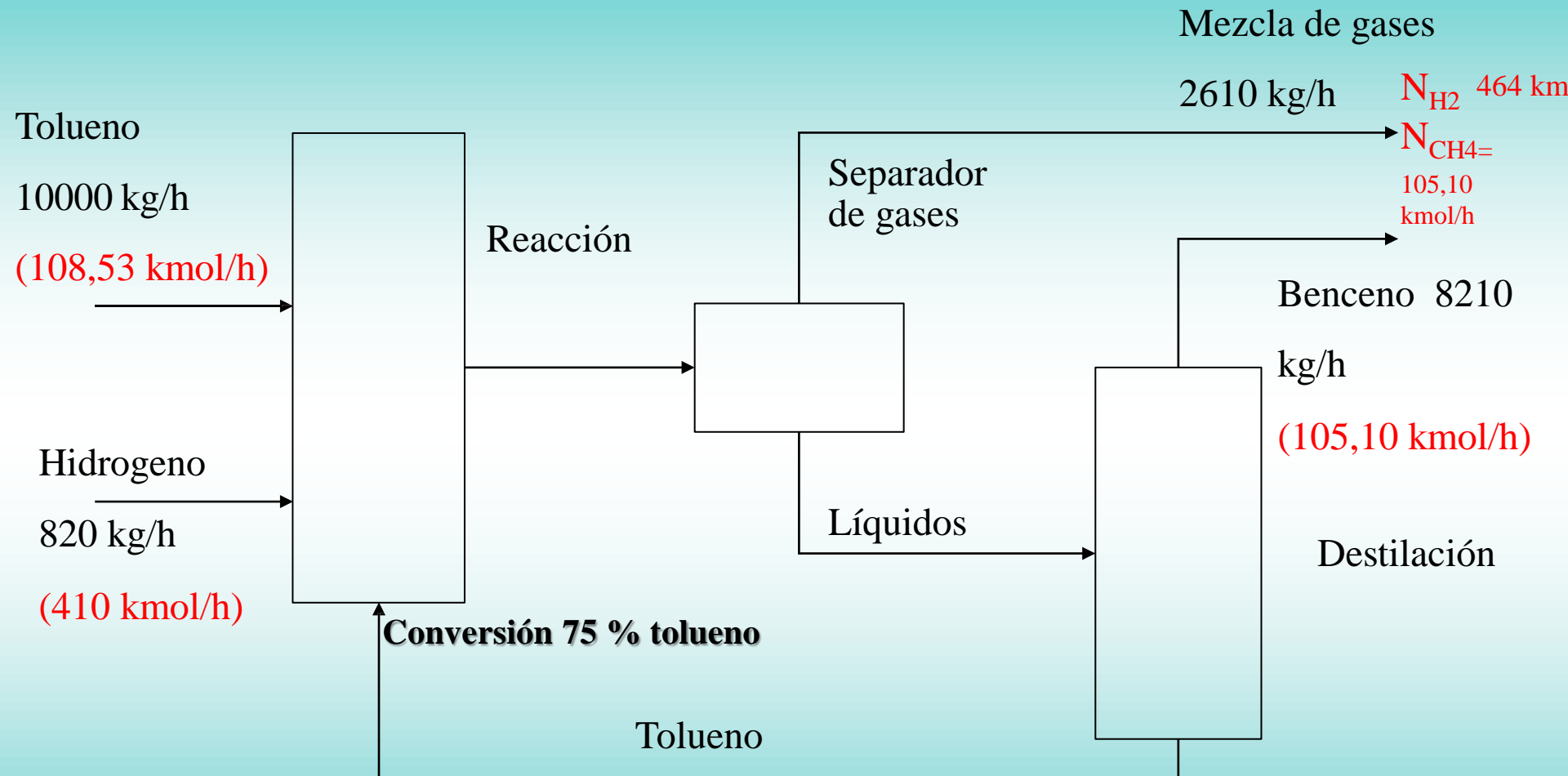
Diagrama entrada – salida (in-out)

Se trata de la primera etapa de diseño de un proceso, donde el ingeniero de procesos representa diagrama de bloques con la alimentación y los productos.



- Información:
- Materia prima
 - Relación estequiométrica
 - Producto, subproducto, residuos

Diagrama de flujo de bloques (BFD)



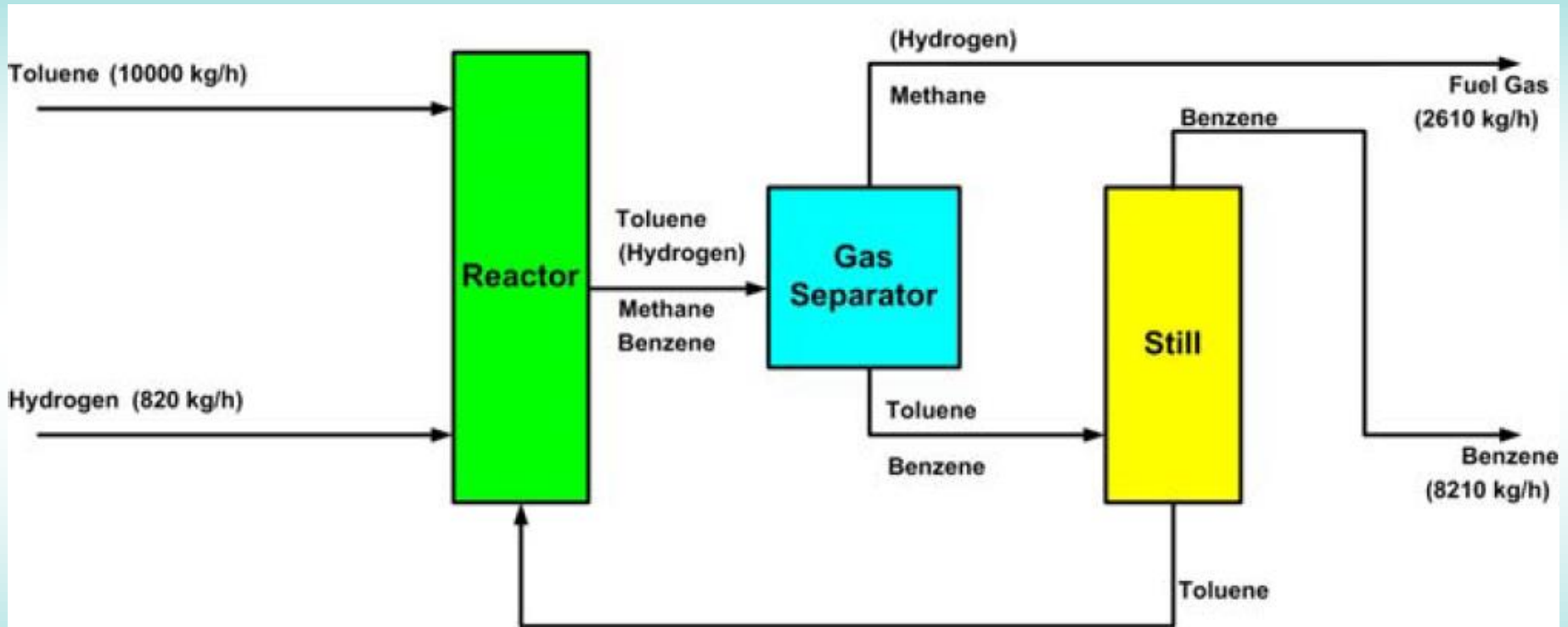
Cada bloque representa una función y puede contener varios equipos de proceso

Diagrama de flujo de bloques (BFD)

Se trata de una serie de bloques conectados por corrientes de entrada y salida.

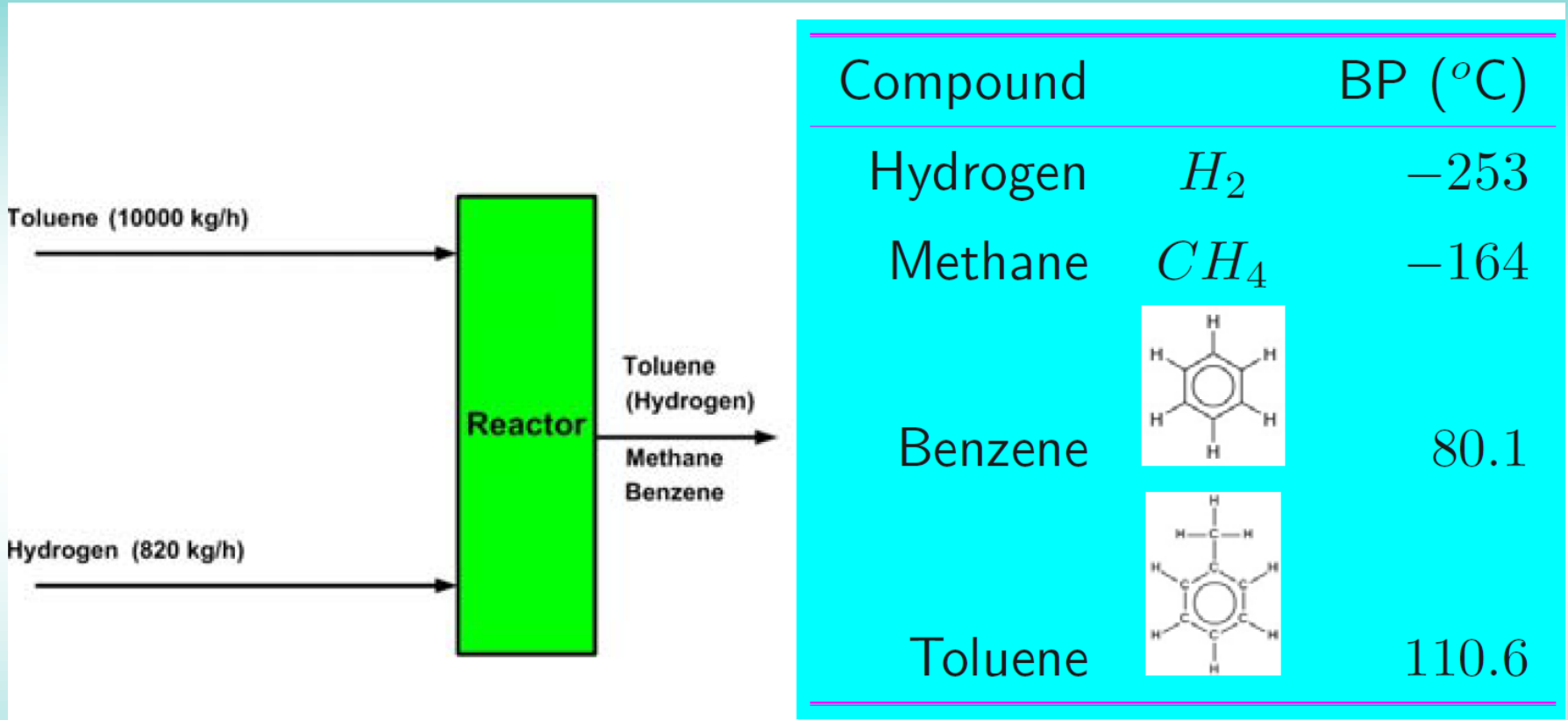
- 1.Las operaciones se representan por bloques.**
- 2.Líneas de flujo (entradas y salidas) principales con flechas que indican la dirección del flujo.**
- 3.Los flujos desde la izquierda a derecha a menos que no sea posible (reciclo).**
- 4.Las corrientes livianas de salida se representan arriba y las pesadas abajo.**
- 5.Información crítica (conversión) para comprender el proceso.**
- 6.Si las líneas se cortan, la horizontal es continua y la vertical es línea cortada.**
- 7.Provee un balance simple de materia.**

Diagrama de flujo de bloques (BFD)



Cada bloque representa una función y puede contener varios equipos de proceso

Diagrama de flujo de bloques (BFD)

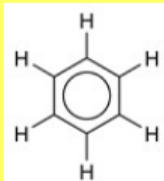
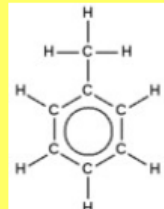
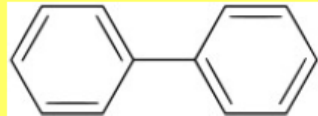


Cada bloque representa una función y puede contener varios equipos de proceso

Diagrama de flujo de bloques (BFD)

$$C_7H_8 + H_2 \rightarrow C_6H_6 + CH_4$$

$$2C_6H_6 \rightleftharpoons C_{12}H_{10} + H_2$$

Compound		BP (°C)
Hydrogen	H_2	-253
Methane	CH_4	-164
Benzene		80.1
Toluene		110.6
Diphenyl		256.0

Cada bloque representa una función y puede contener varios equipos de proceso

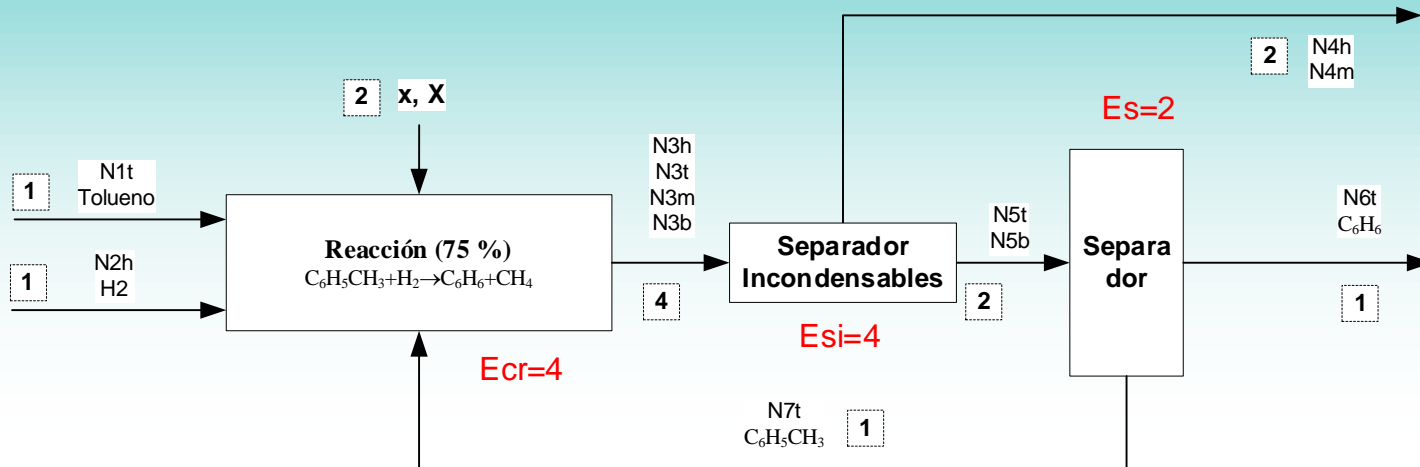
Balance de masa

Tabla de corriente

Descripción	Unidad			1	2	3	4	
				Tolueno	Hidrógeno	Mezcla reacción	Gases	Líquido
Estado físico	S	L	G	L	L	L	S	L
Temperatura	°C	°C	°C					
Presión	kg/cm2	kg/cm2	kg/cm2					
Flujo volumétrico		m3/h						
Flujo másico	t/h	t/h	t/h					
Flujo molar								
Componentes	PM							
Tolueno		g/g	g/L					
Hidrógeno		g/g	g/L					
Benceno		g/g	g/L					
Metano		g/g	g/L					
		g/g	g/L					
		g/g	g/L					
		g/g	g/L					
		g/g	g/L					
		g/g	g/L					
		g/g	g/L					
		g/g	g/L					
		g/g	g/L					
Propiedades								
Density		kg/l	kg/l	kg/m3				
pH								
Viscosity			cP	cP				
STD			kg/L					
Conductivity			mS/cm					
Purity		%						
Moisture (Wet basic)		%g/g						
Parámetros								
Conversión		75 %						
Factor de entrapamiento								

Caso de estudio producción de benceno – BFD

Caudales molares de componentes



$$\text{Variables} = 1+1+4+2+2+1+1+2 (x, X) = 14$$

$$\text{Ecuaciones BM} = 4+4+2 = 10$$

$$\text{Restricción de corrientes} = 0$$

$$\text{Ecuación adicional (conversión)} = 1$$

$$\text{Grados de libertad} = \text{Variables} - \text{Ecuaciones} = 14 - (10+1) = 3$$

N_{ij} : Caudal molar de corriente i y componente j

Sistema de ecuaciones (balance masa)

Ecuaciones balance de materia – BC

Reacción

$$N_{1f} + N_{7f} - N_{3f} + \alpha_r X = 0 \quad (1)$$

$$N_{2h} - N_{3h} + \alpha_h X = 0 \quad (2)$$

$$-N_{3b} + \alpha_b X = 0 \quad (3)$$

$$-N_{3m} + \alpha_m X = 0 \quad (4)$$

Separador incondensables

$$N_{3b} - N_{5b} = 0 \quad (5)$$

$$N_{3m} - N_{4m} = 0 \quad (6)$$

$$N_{3f} - N_{5f} = 0 \quad (7)$$

$$N_{3h} - N_{4h} = 0 \quad (8)$$

Separador

$$N_{5b} - N_{6b} = 0 \quad (9)$$

$$N_{5f} - N_{7f} = 0 \quad (10)$$

Ecuaciones de las corrientes

Ecuaciones adicionales

Conversión

$$x_{pt} = -\frac{\alpha_r X}{N_{1f} + N_{7f}} \quad (11)$$

Balance de masa

Resolución con POE

Bloc de notas
(ecuaciones, pesos y variables)



POE

- Matriz diagonalizada (MD)
- Selección heurística

Iteración
Subsistemas



Orden de resolución
(Mathcad / Excel)

Resolución con POE (sistema 11 x 11 – Balance componente)

Secuencia

```

2022.BN...
File Edit Format View Help
e1
1 N7t
1 N3t
1 X

e2
1 N3h
1 X

e3
1 N3b
1 X

e4
1 N3m
1 X

e5
1 N3b
1 N5b

e6
1 N3m
1 N4m

e7
1 N3t
1 N5t

e8
1 N3h
1 N4h

e9
1 N5b
1 N6b

e10
1 N5t
1 N7t

e11
1 N7t
1 X
    
```



```

POE 1.0
Archivo Ayuda
MD SH
e1
1 N7t
1 N3t
1 X

e2
1 N3h
1 X

e3
1 N3b
1 X

e4
1 N3m
1 X

e5
1 N3b
1 N5b

e6
1 N3m
1 N4m

e7
1 N3t
1 N5t

e8
1 N3h
1 N4h

e9
1 N5b
1 N6b

e10
1 N5t
1 N7t

e11
1 N7t
1 X

|
    
```



```

POE 1.0
Archivo Ayuda
MD SH
=====
Ordenación por Selección Heurística
para variables de iteración.
=====
Subsistema independiente N°: 0
=====
Matriz MFX
Columnas
1 N7t
1 X
1 N3t
1 N5t
1 Ver0
1 N3h
1 N4h
1 N3b
1 N5b
1 N3m
1 N4m
1 N6b

ItVer0
1 N7t

e11
1 X

e1
1 N3t

e7
1 N5t

e10
1 Ver0

e2
1 N3h

e8
1 N4h

e3
1 N3b

e5
1 N5b

e4
1 N3m

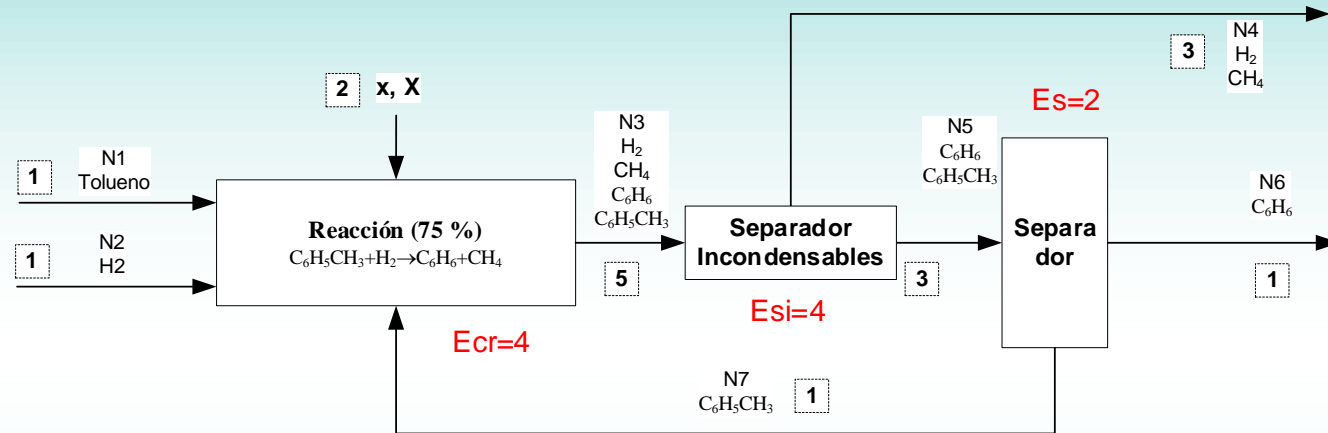
e6
1 N4m

e9
1 N6b
    
```

- ItVer0**
- 1 N7t
- e11
- 1 X
- e1
- 1 N3t
- e7
- 1 N5t
- e10
- 1 Ver0**
- e2
- 1 N3h
- e8
- 1 N4h
- e3
- 1 N3b
- e5
- 1 N5b
- e4
- 1 N3m
- e6
- 1 N4m
- e9
- 1 N6b

Caso de estudio producción de benceno – BFD

Caudales molares y fracción molar



Variables = $1+1+5+3+3+1+1+2$ (x, X) = 17

Ecuaciones BM = $4+4+2 = 10$

Restricción de corrientes = $1+1+1 = 3$

Ecuación adicional (conversión) = 1

Grados de libertad = Variables – Ecuaciones = $17 - (10+3+1) = 3$

Sistema de ecuaciones (balance molar)

Ecuaciones de balance de materia/

Reacción

$$N_1 + N_7 - N_3 x_{3t} + \alpha_i X = 0 \quad (1)$$

$$N_2 - N_3 x_{3h} + \alpha_b X = 0 \quad (2)$$

$$-N_3 x_{3b} + \alpha_b X = 0 \quad (3)$$

$$-N_3 x_{3m} + \alpha_m X = 0 \quad (4)$$

Separador incondensables

$$N_3 x_{3b} - N_5 x_{5b} = 0 \quad (5)$$

$$N_3 x_{3m} - N_4 x_{4m} = 0 \quad (6)$$

$$N_3 x_{3t} - N_5 x_{5t} = 0 \quad (7)$$

$$N_3 x_{3h} - N_4 x_{4h} = 0 \quad (8)$$

Separador

$$N_5 x_{5b} - N_6 = 0 \quad (9)$$

$$N_5 x_{5t} - N_7 = 0 \quad (10)$$

Ecuaciones de las corrientes

$$x_{3h} + x_{3m} + x_{3t} + x_{3b} = 1 \quad (11)$$

$$x_{4h} + x_{4m} = 1 \quad (12)$$

$$x_{5t} + x_{5b} = 1 \quad (13)$$

Ecuaciones adicionales

Conversión

$$x_{pt} = -\frac{\alpha_i X}{N_1 + N_7} \quad (14)$$

Balance de masa

Resolución con POE


Bloc de notas
(ecuaciones, pesos y variables)



POE

- Matriz diagonalizada (MD)
- Selección heurística

Iteración
Subsistemas



Orden de resolución
(Mathcad / Excel)

Resolución con POE (sistema 14 x 14 – Balance materia)

```

2022.BN. BENC...
File Edit Format View Help
e1
1 N7
1 N3
1 x3t
1 X

e2
1 N3
1 x3h
1 X

e3
1 N3
1 x3b
1 X

e4
1 N3
1 x3m
1 X

e5
1 N3
1 x3b
1 N5
1 x5b

e6
1 N3
1 x3m
1 N4
1 x4m

e7
1 N3
1 x3t
1 N5
1 x5t

e8
1 N3
1 x3h
1 N4
1 x4h

e9
1 N5
1 x5b
1 N6

e10
1 N5
1 x5t
1 N7
    
```



```

POE 1.0
Archivo Ayuda
MD SH
1 x3t
1 X

e2
1 N3
1 x3h
1 X

e3
1 N3
1 x3b
1 X

e4
1 N3
1 x3m
1 X

e5
1 N3
1 x3b
1 N5
1 x5b

e6
1 N3
1 x3m
1 N4
1 x4m

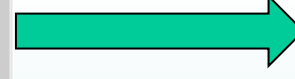
e7
1 N3
1 x3t
1 N5
1 x5t

e8
1 N3
1 x3h
1 N4
1 x4h

e9
1 N5
1 x5b
1 N6

e10
1 N5
1 x5t
1 N7

e11
1 x3h
1 x3m
1 x3t
1 x3b
    
```



```

POE 1.0
Archivo Ayuda
MD SH
Ordenación por Selección Heurística
para variables de iteración.
-----
Subsistema independiente N: 0
-----
Matriz MFX
Columnas
1 N3
1 x3t
1 N5
1 x5t
1 N7
1 X
1 Ver3
1 x3b
1 x3m
1 x3h
1 Ver2
1 N4
1 x4m
1 x4h
1 Ver1
1 x5b
1 Ver0
1 N6

ItVer0
1 N3

ItVer2
1 x3t

ItVer3
1 N5

e7
1 x5t

e10
1 N7

e1
1 X

e14
1 Ver3

e3
1 x3b

e4
1 x3m

e11
1 x3h

e2
1 Ver2

ItVer1
1 N4

e6
1 x4m

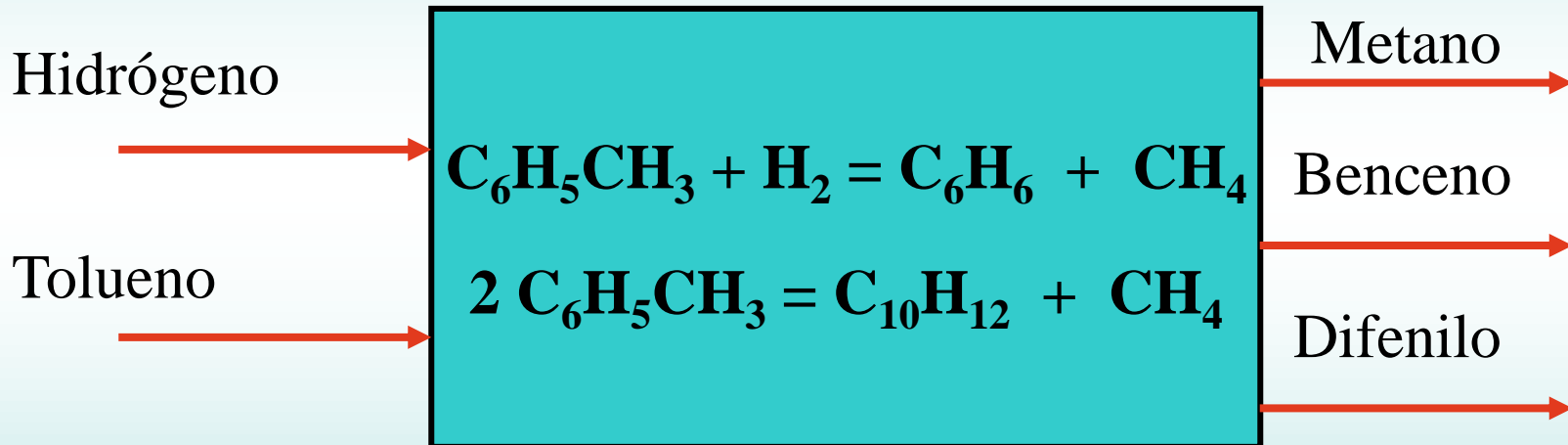
e8
1 x4h

e12
1 Ver1
    
```

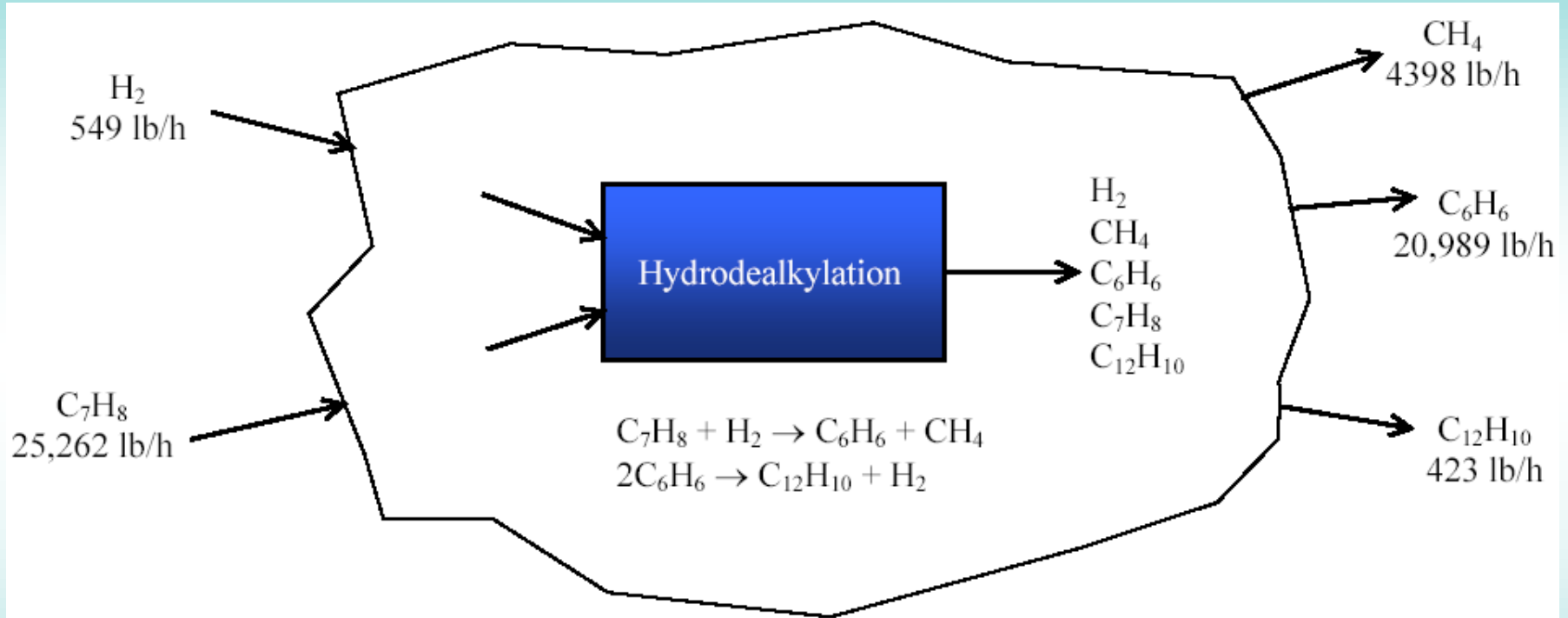
Secuencia

- ItVer0
- 1 N3
- ItVer2
- 1 x3t
- ItVer3
- 1 N5
- e7
- 1 x5t
- e10
- 1 N7
- e1
- 1 X
- e14
- 1 Ver3
- e3
- 1 x3b
- e4
- 1 x3m
- e11
- 1 x3h
- e2
- 1 Ver2
- ItVer1
- 1 N4
- e6
- 1 x4m
- e8
- 1 x4h
- e12
- 1 Ver1
- e5
- 1 x5b
- e13
- 1 Ver0
- e9
- 1 N6

Obtención de Benceno

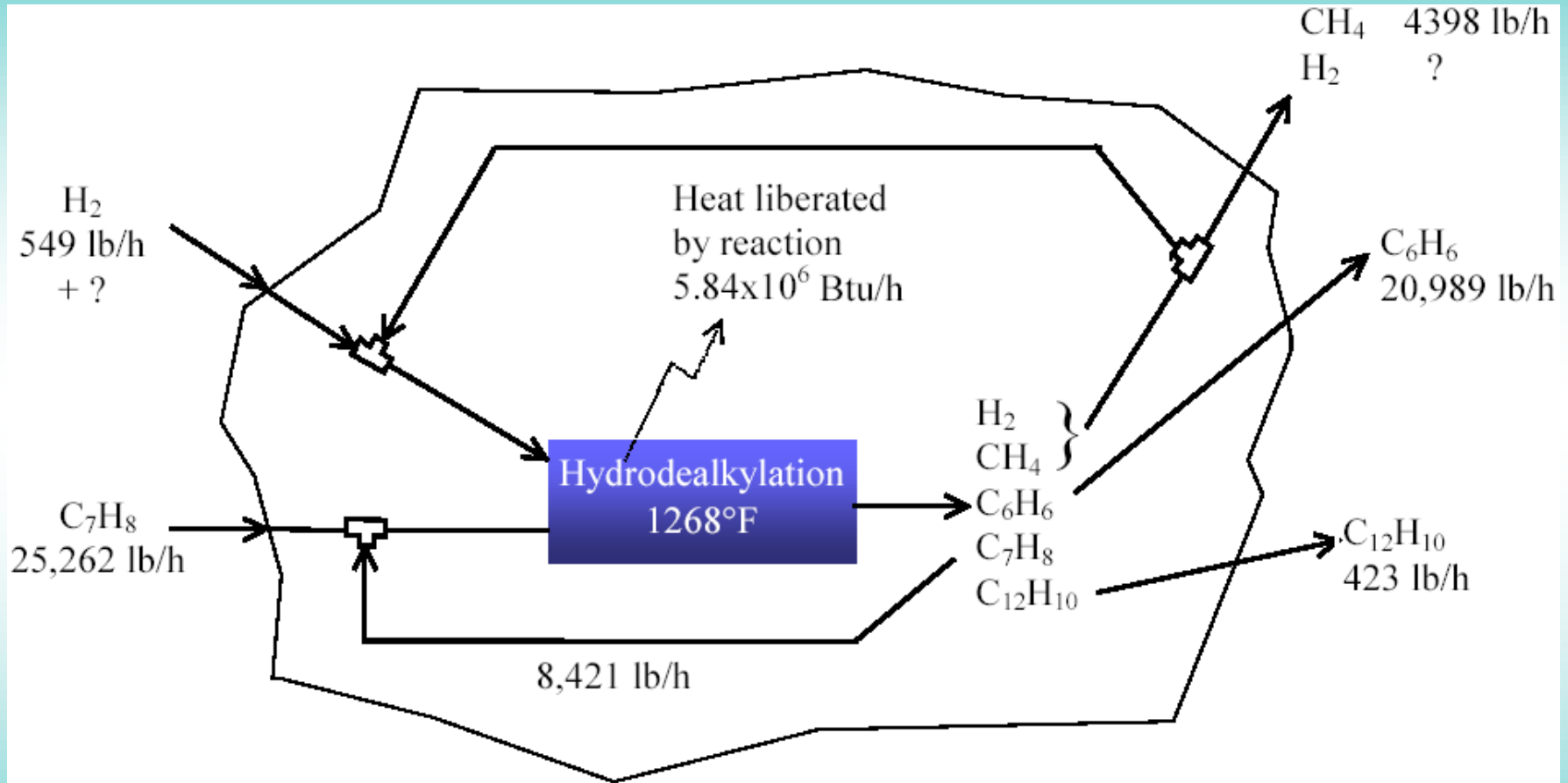


Obtención de benceno



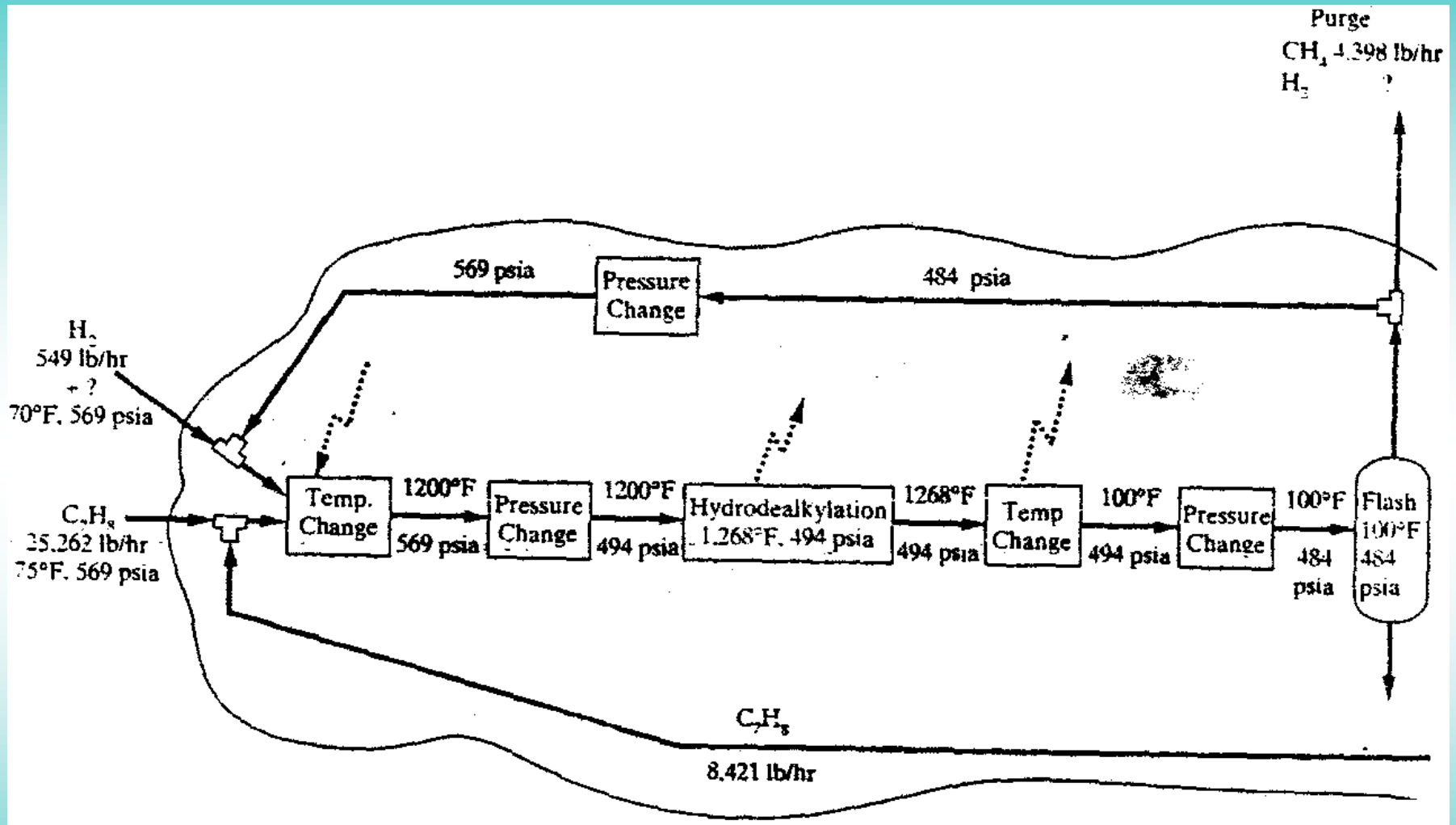
Reacciones químicas para la obtención del benceno a partir del tolueno

Obtención de benceno



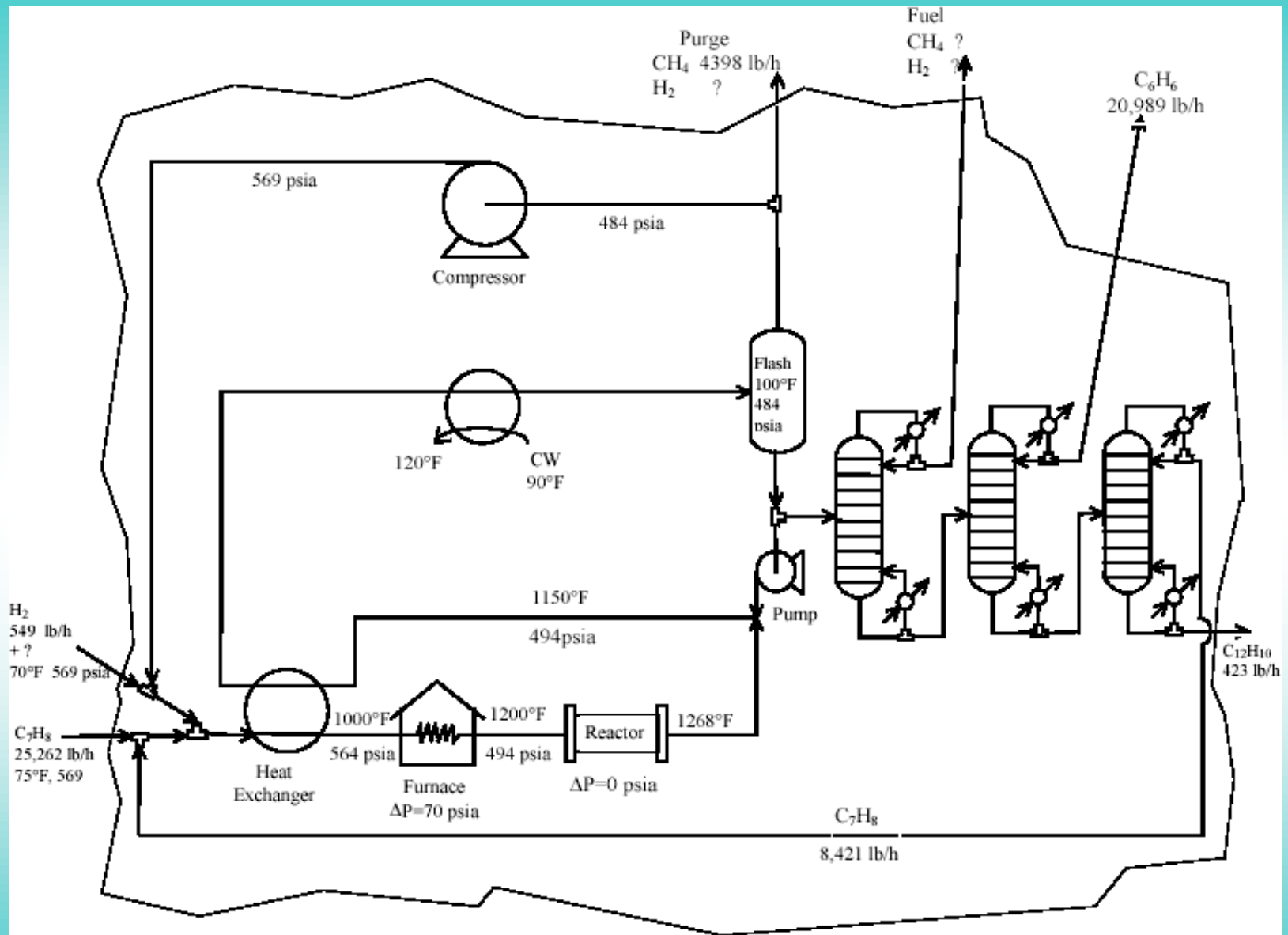
Separación de componentes para el proceso de obtención del benceno.

Obtención de benceno



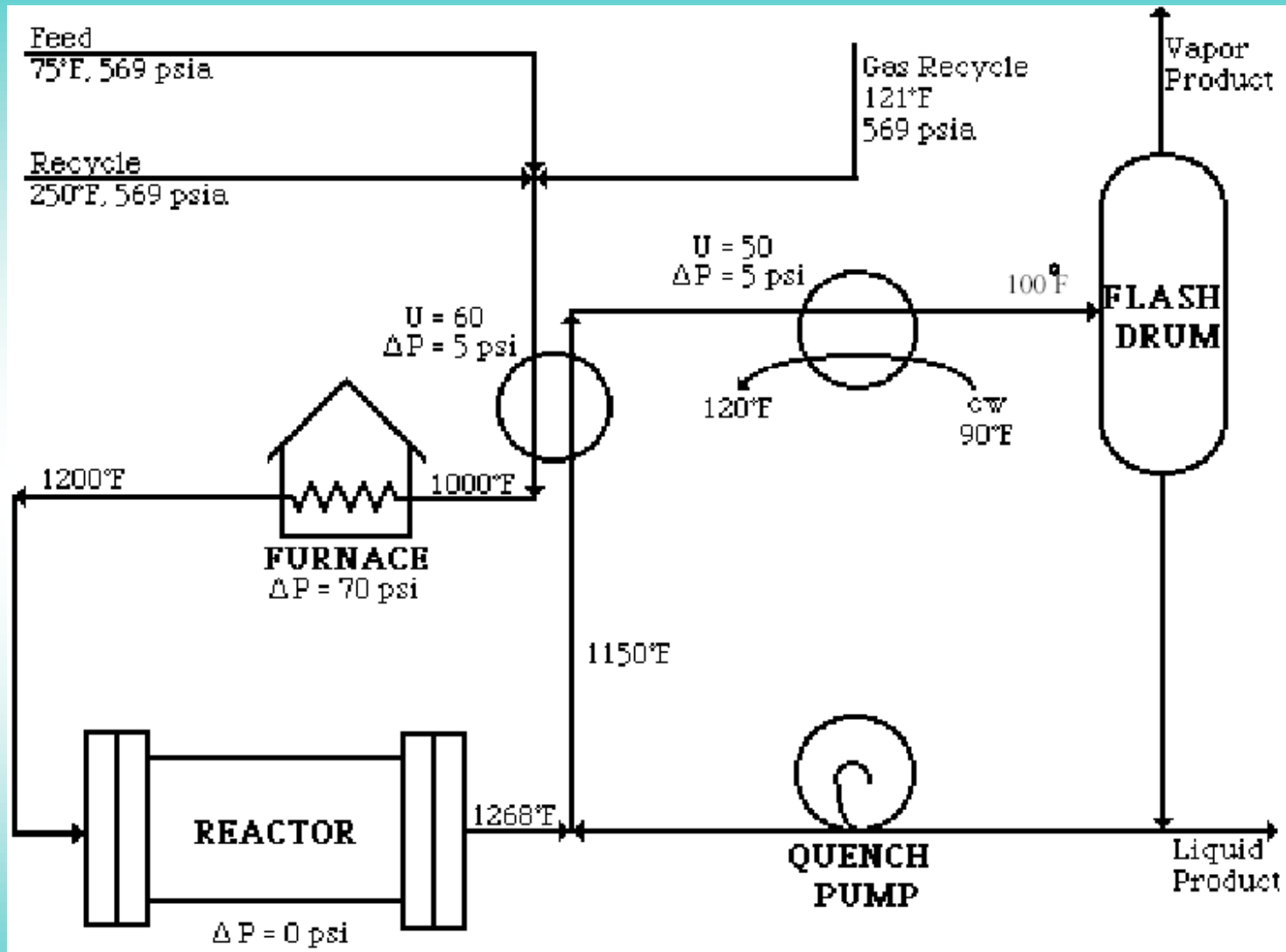
Sección de reacción. Temperatura, presión y operaciones de cambio de fase.

Obtención de benceno



Integración del proceso

Obtención de benceno

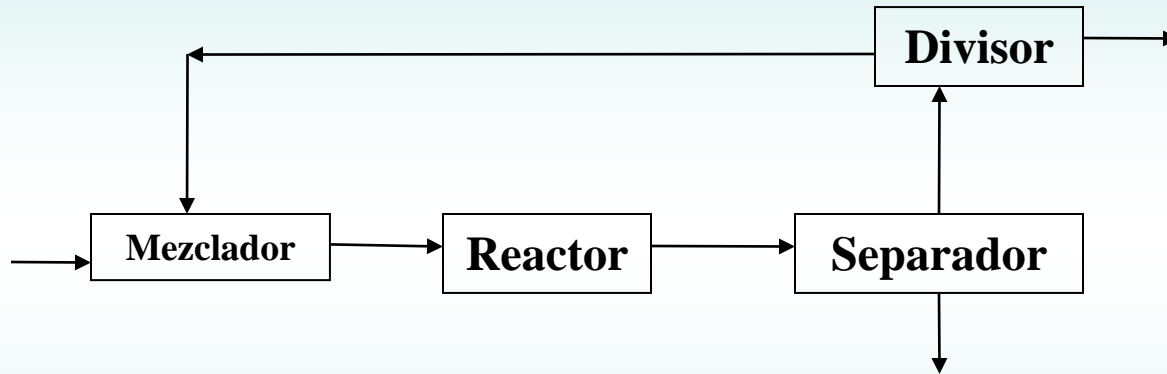


Sección del reactor

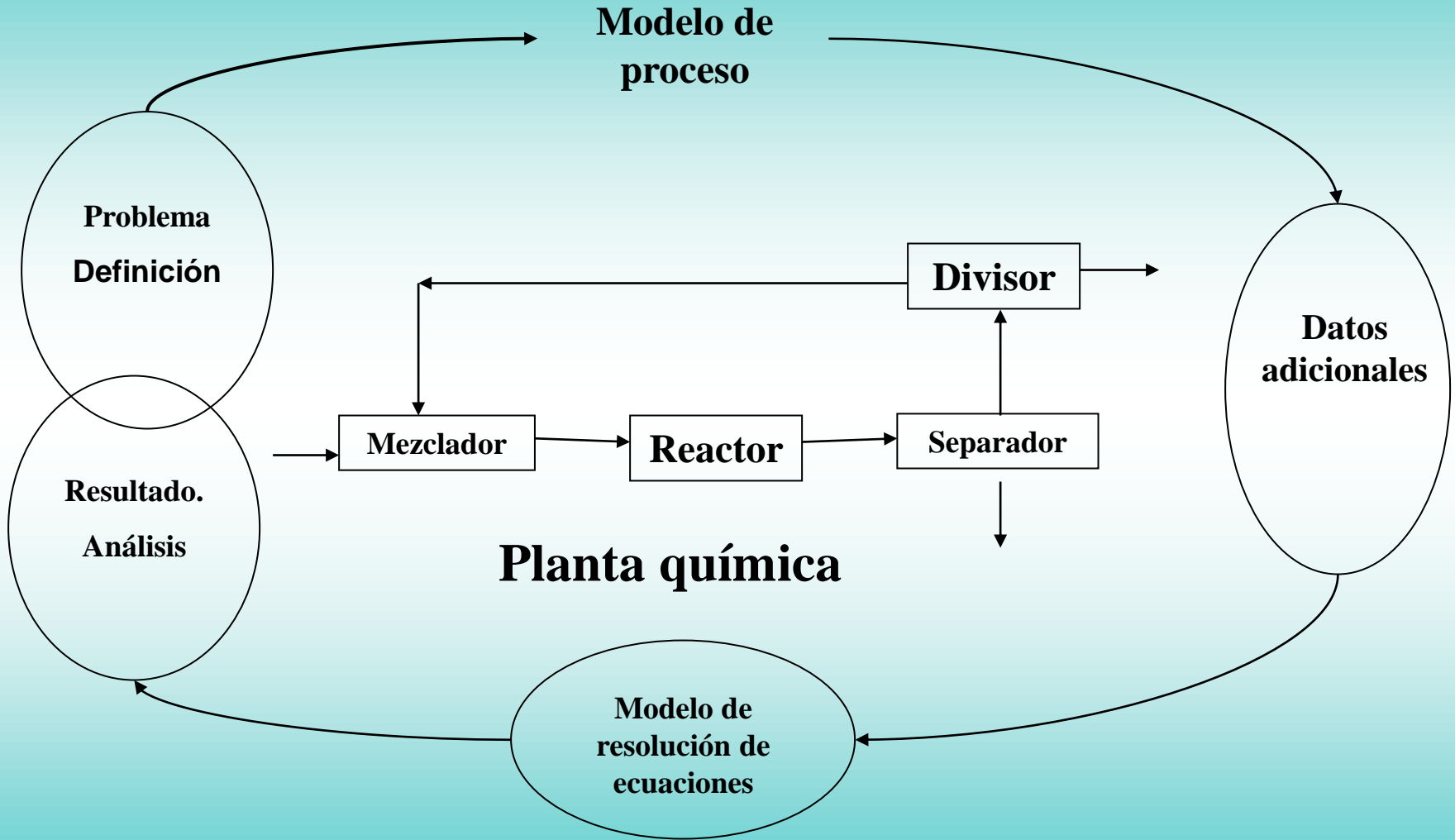
Ideas en Procesos

- Producir una materia prima costosa u obtenerla al mínimo costo.
- Convertir un subproducto de desecho en un producto de valor.
- Crear un material completamente nuevo.
- Encontrar un nuevo camino de reacción para fabricar un producto existente. Por ejemplo, producir un catalizador nuevo, o desarrollar una alternativa de bioprocesamiento.
- Desarrollar o utilizar una nueva tecnología. Por ejemplo; membranas, biotecnología, sistemas expertos, robótica, etc.
- Desarrollar o utilizar un nuevo material de construcción en un equipo de proceso. Por ejemplo; polímeros, anticorrosivos o materiales que soporten altas T^a y P , etc.
- Desarrollar un tratamiento de efluentes contaminantes a bajo costo.

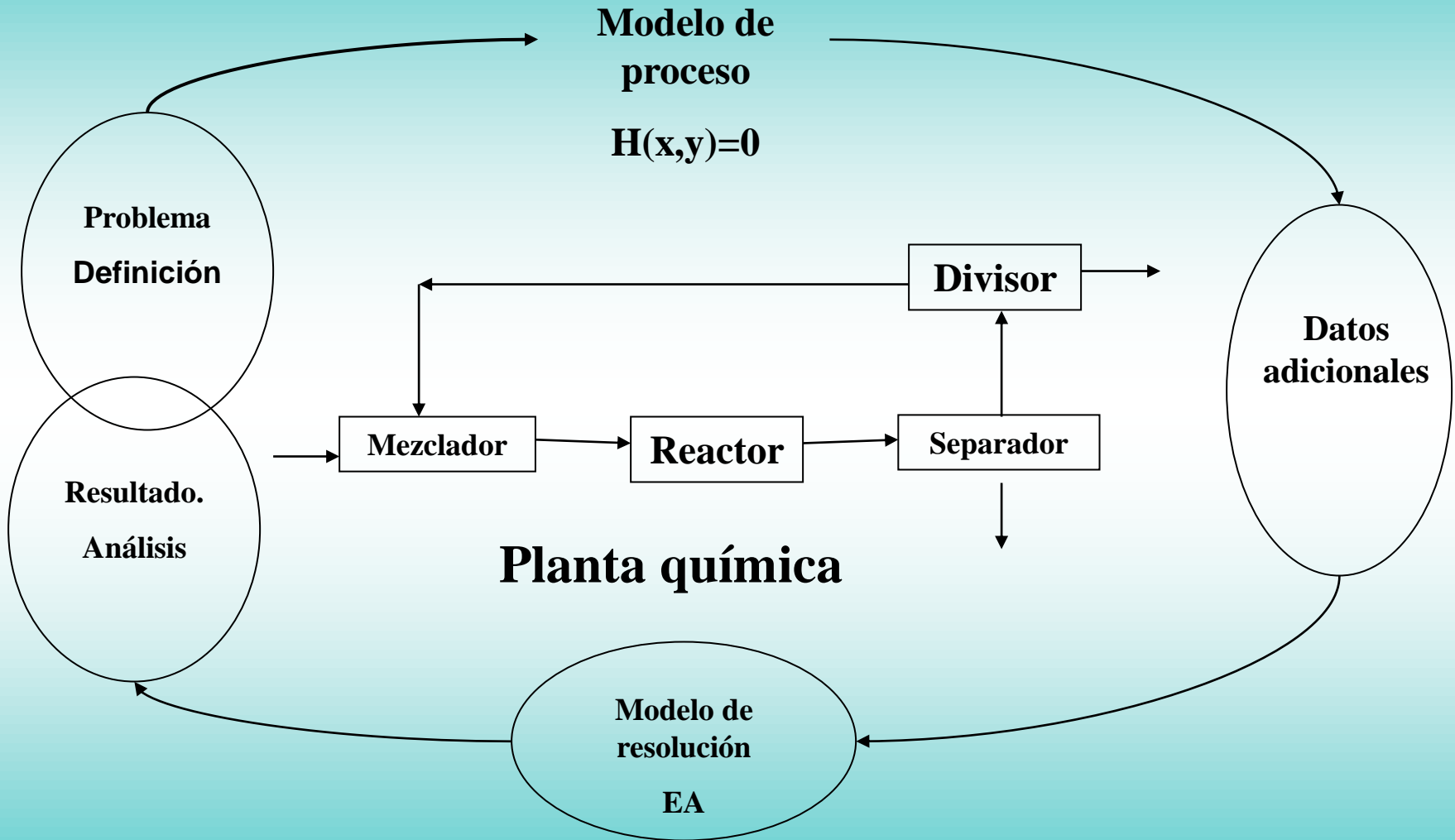
Planta química



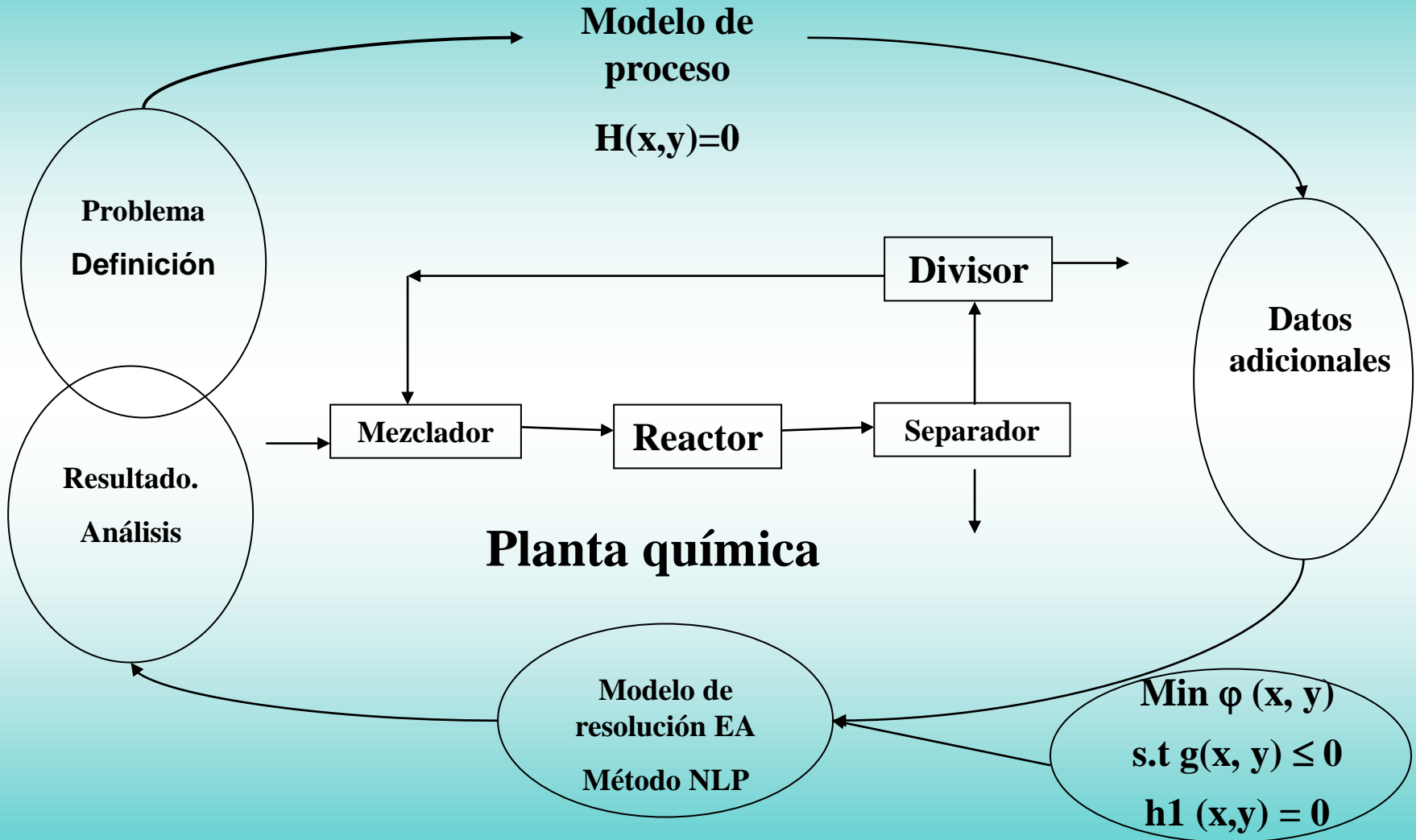
Secuencia de cálculo



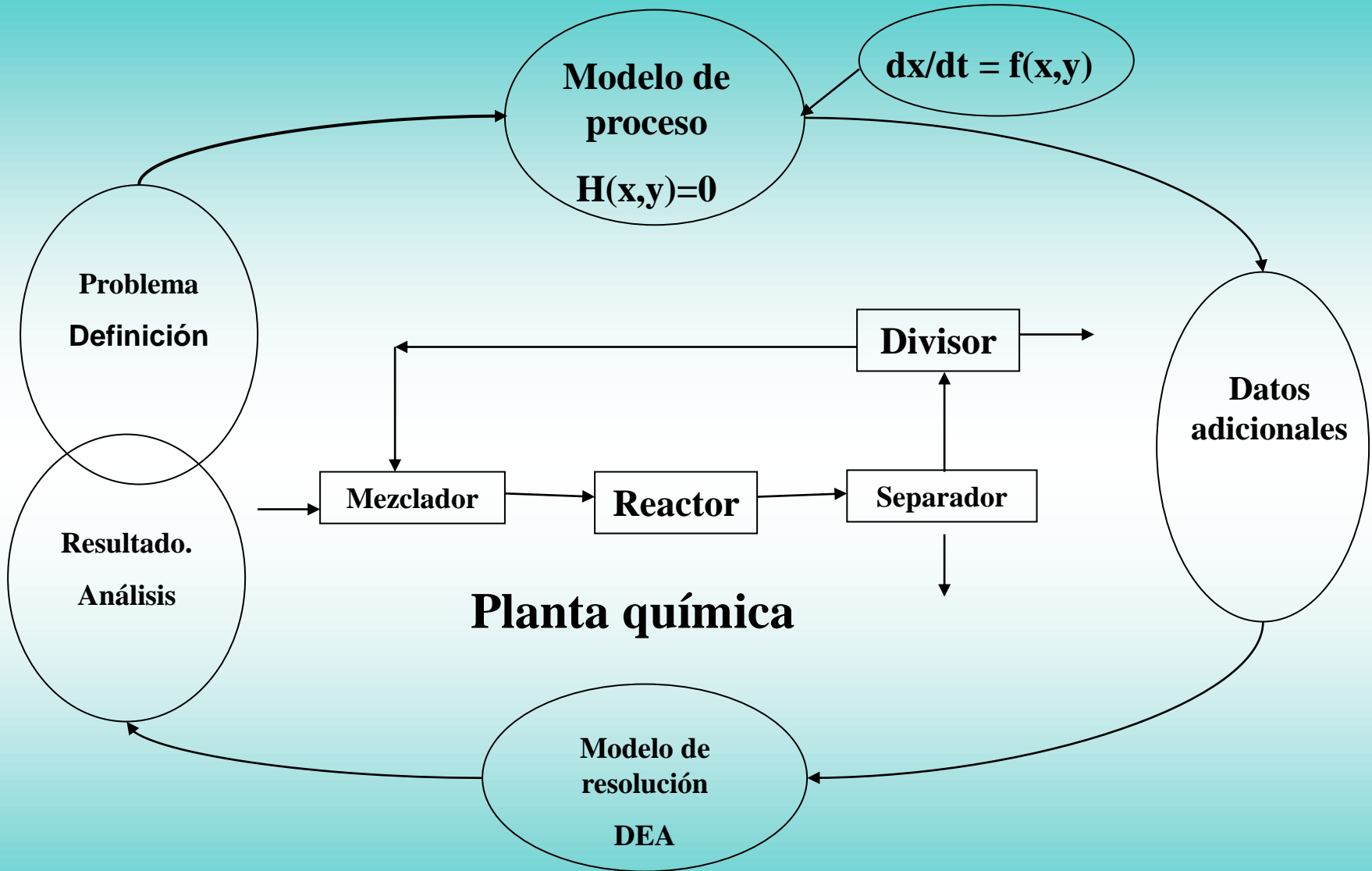
Estado estacionario – Ecuaciones algebraicas



Problema de optimización – FO y restricciones

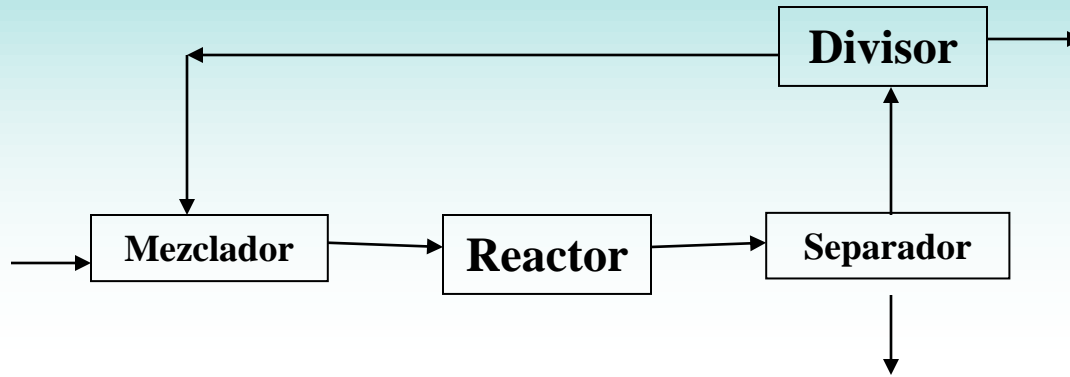


Estado dinámico – Ecuaciones diferenciales

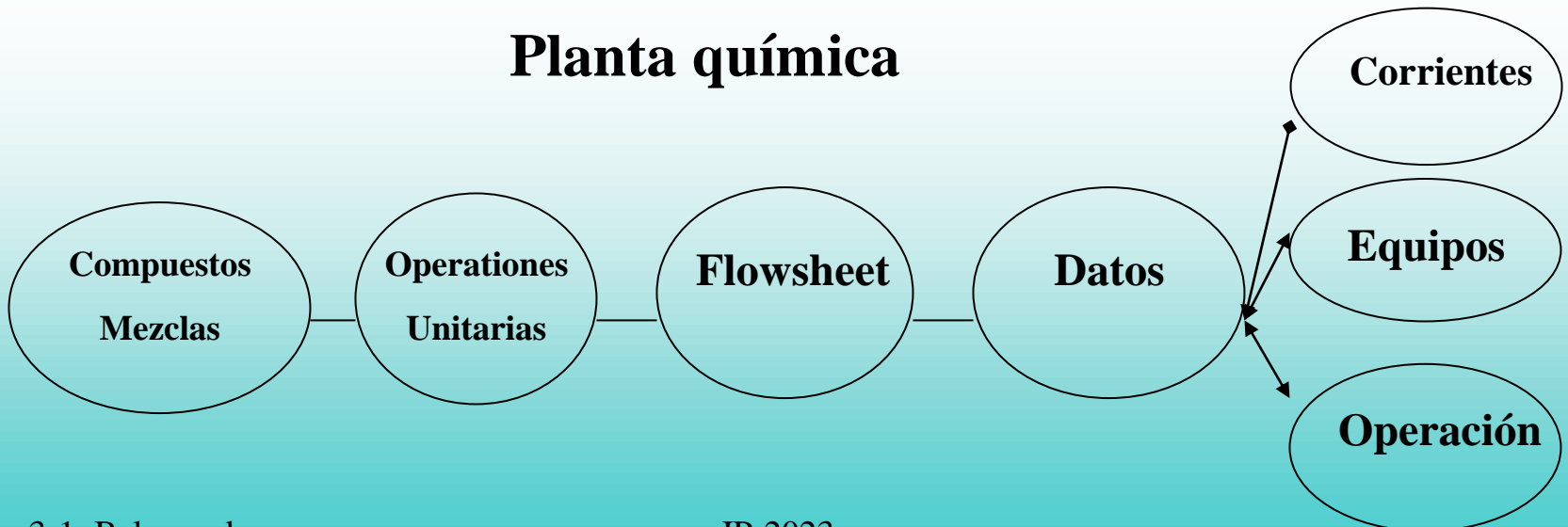


Definición del problema

¿Qué información necesito?



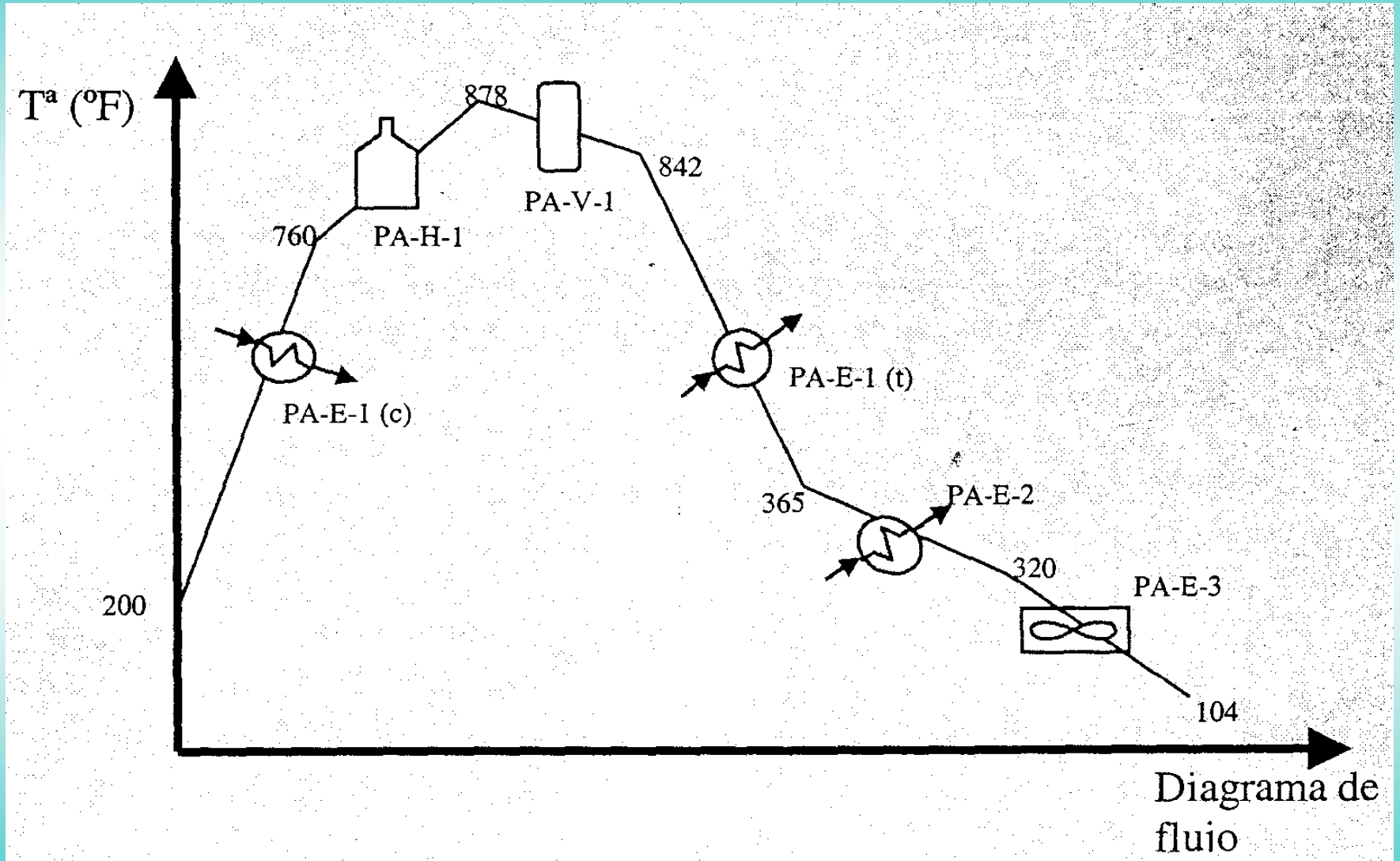
Planta química



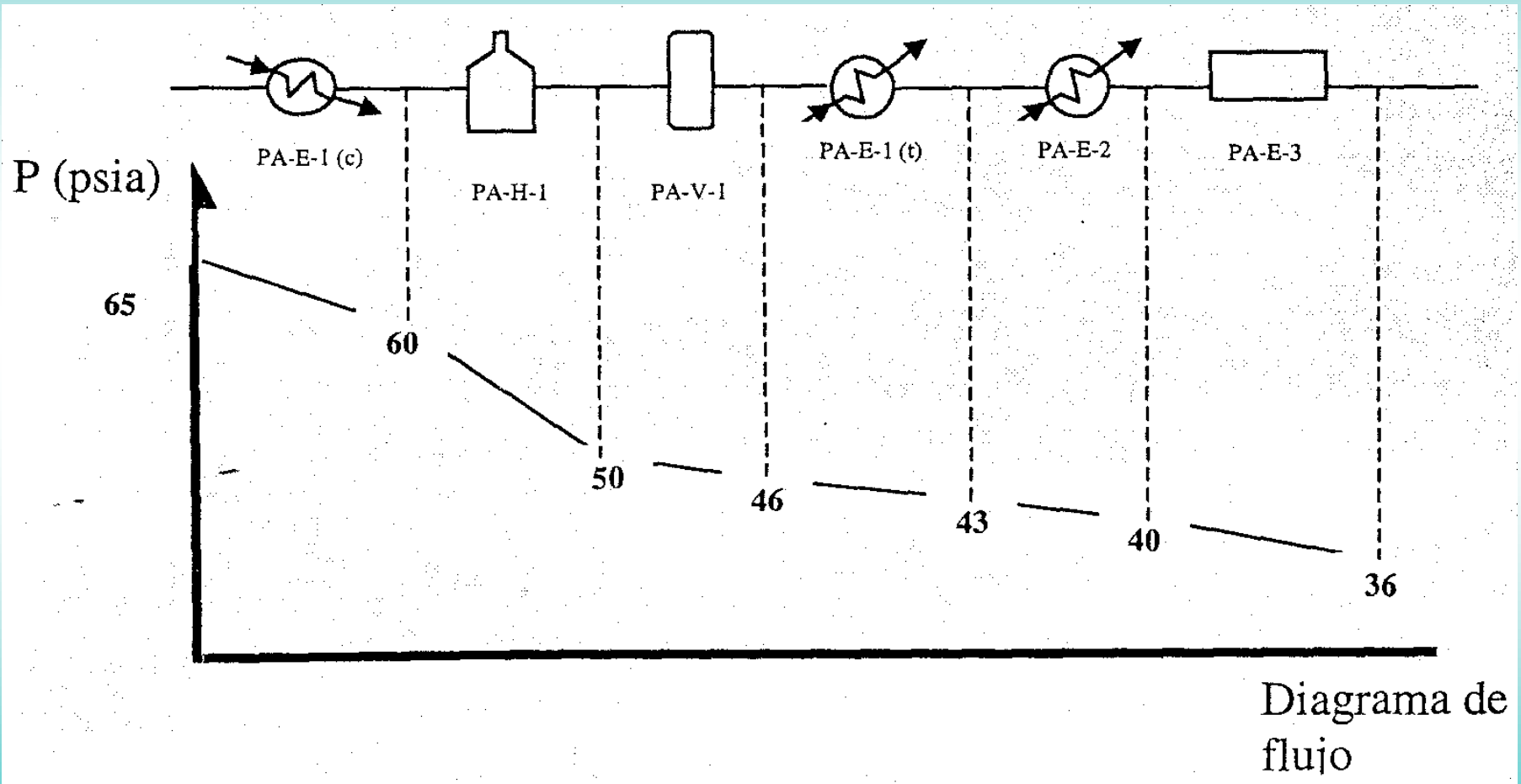
Seguimiento del proceso

- Durante la operación rutinaria de la planta se toman datos de temperatura y de presión.
- Los perfiles de presión, temperatura y composición son herramientas útiles para realizar el análisis de cada unidad.
- La utilidad de los perfiles es:
 - Visualizar las pérdidas de carga y los saltos térmicos
 - Determinar los posibles ensuciamientos en equipos.
 - Prever posibles cuellos de botella para ampliaciones futuras.
 - Realizar estudios de integración energética.
 - Realizar balances de materia y energía

Perfil de temperatura

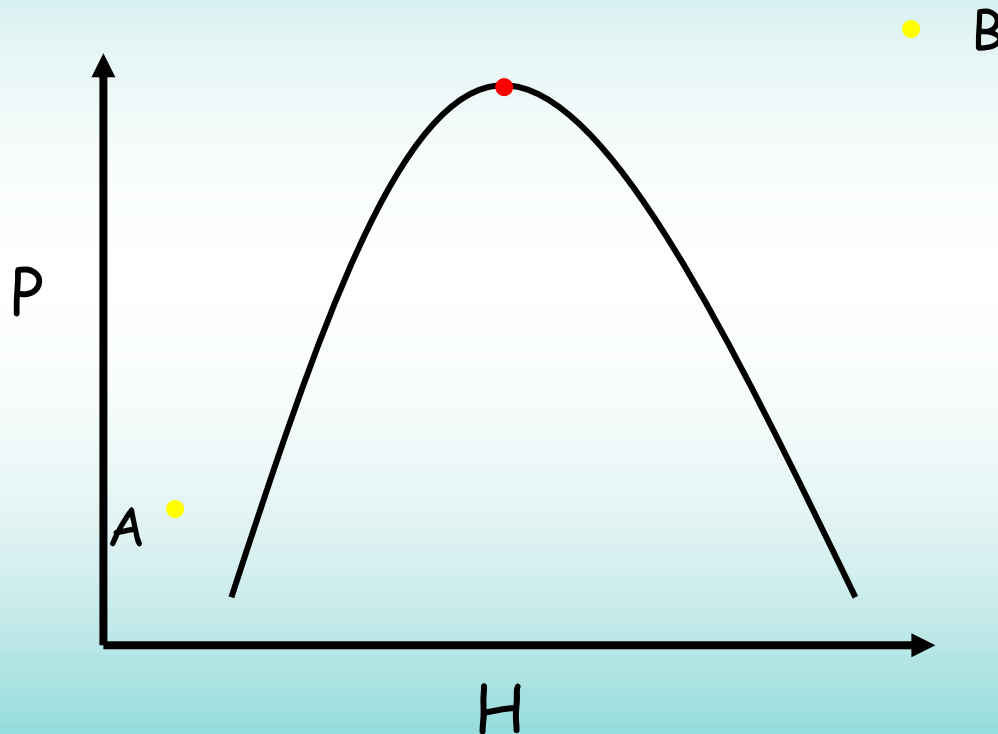


Perfil de presiones

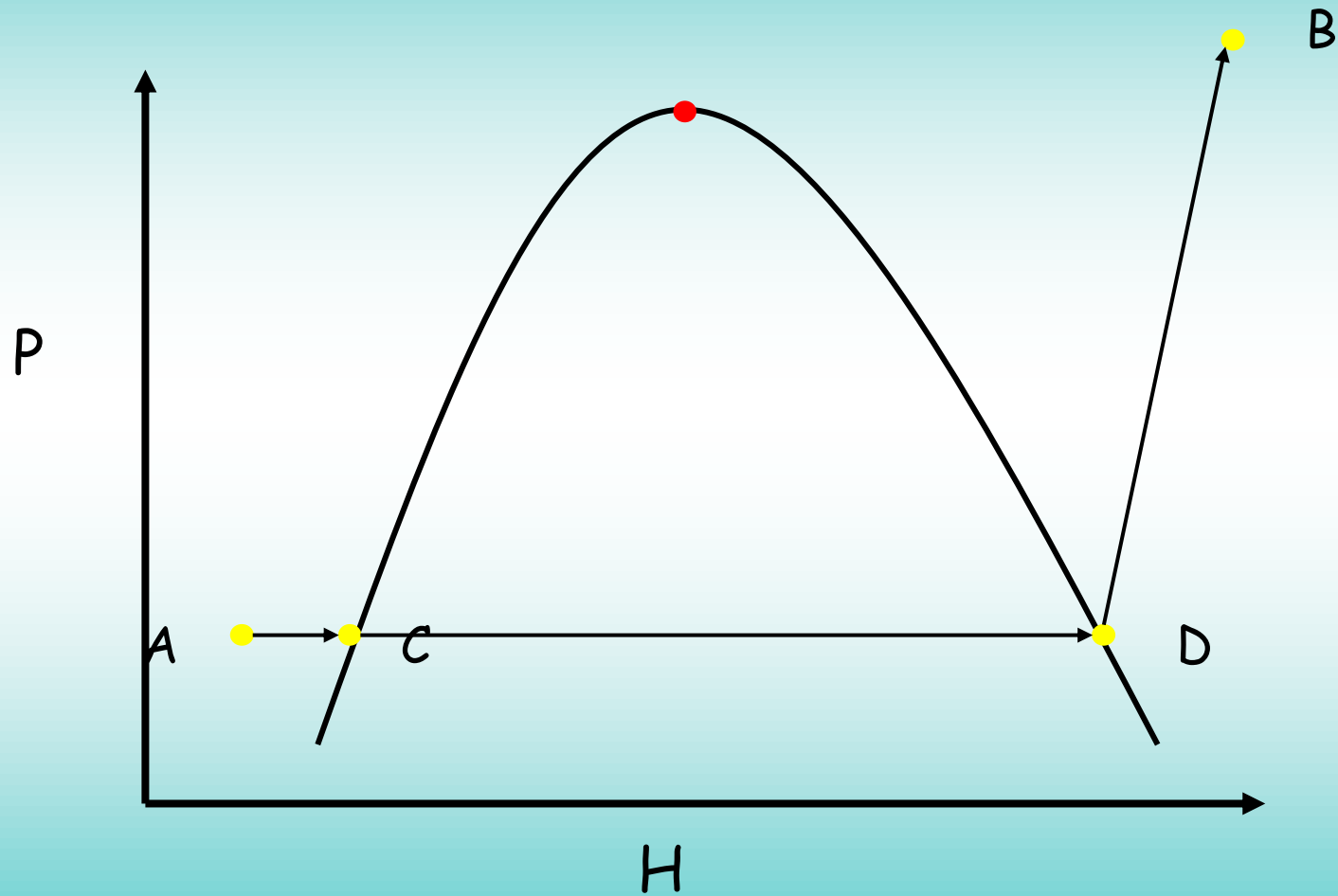


Bombear o comprimir

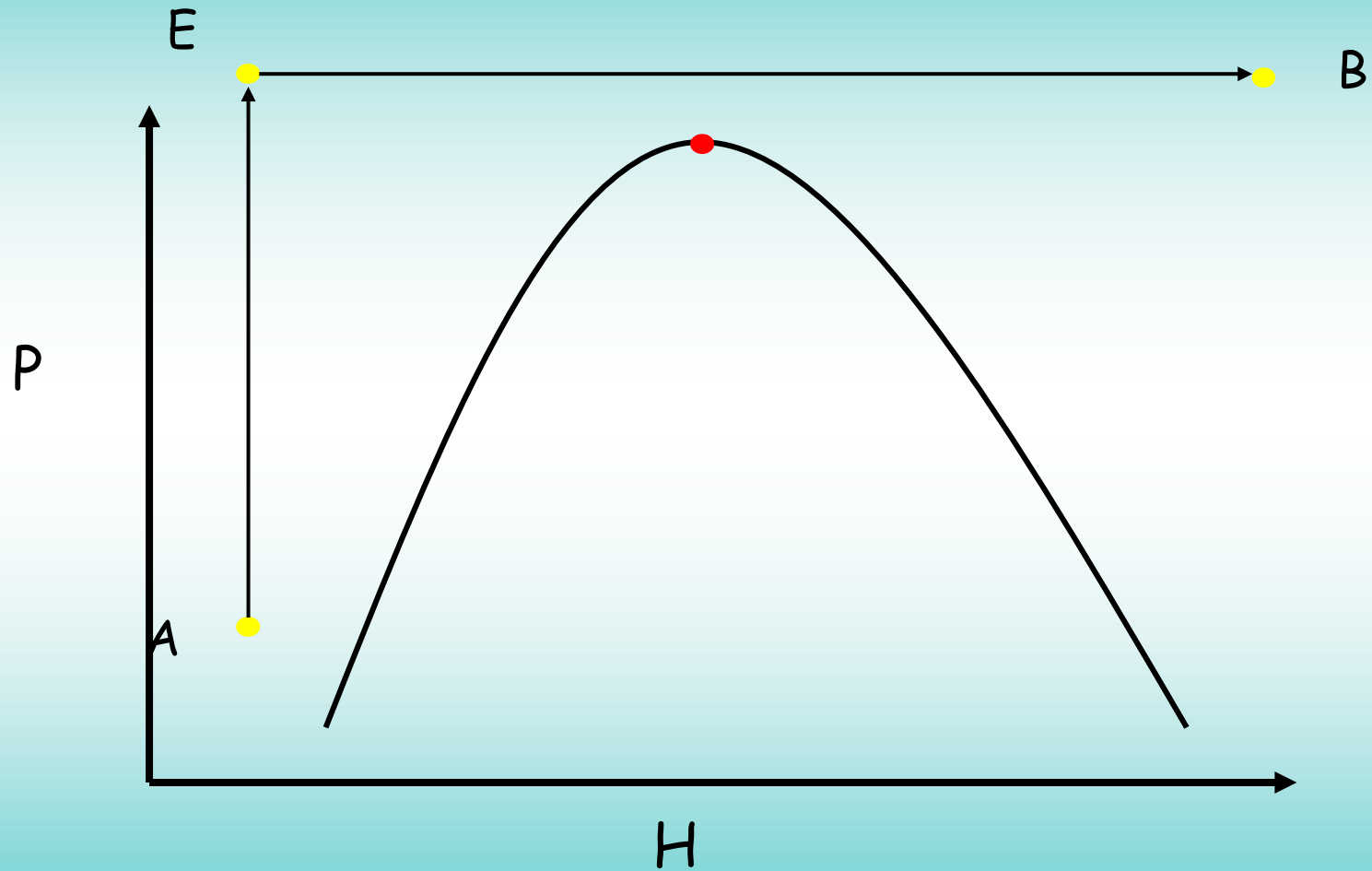
- Para ir del punto A a B. ¿cuál de las alternativas es más económica?



Alternativa 1



Alternativa 2



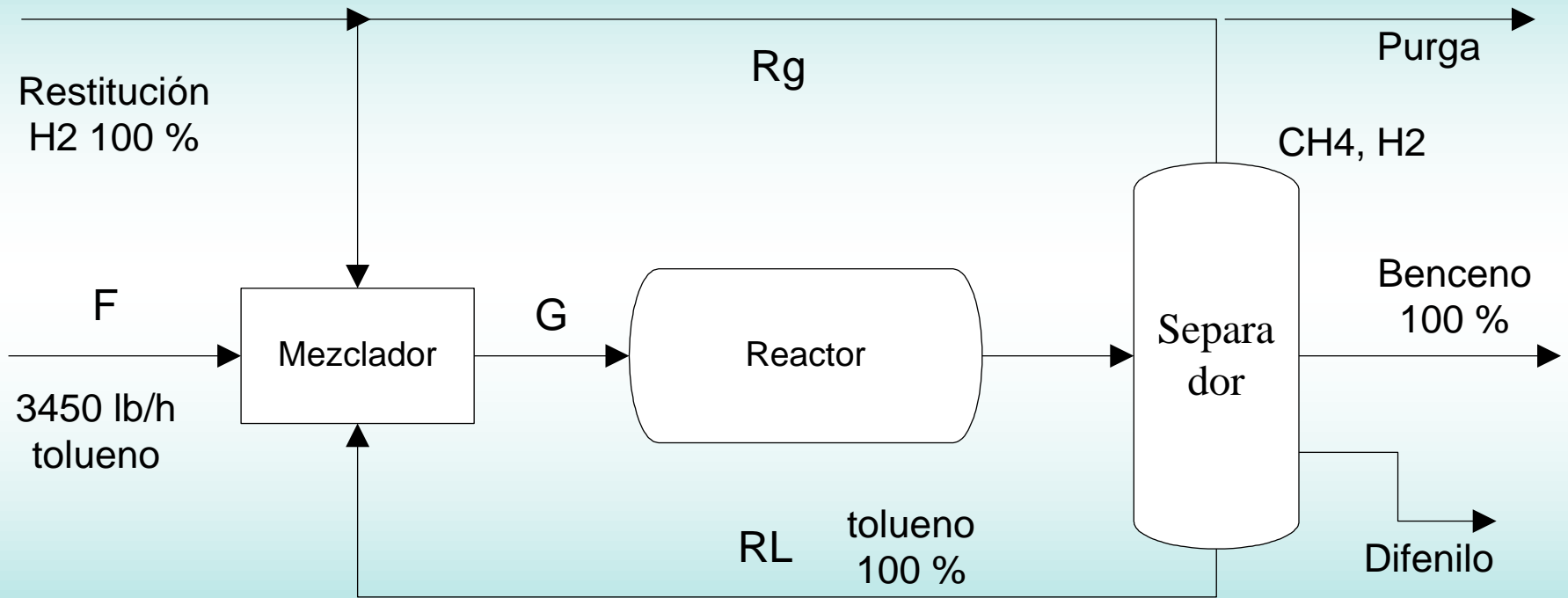
Balance de masa

Obtención de benceno

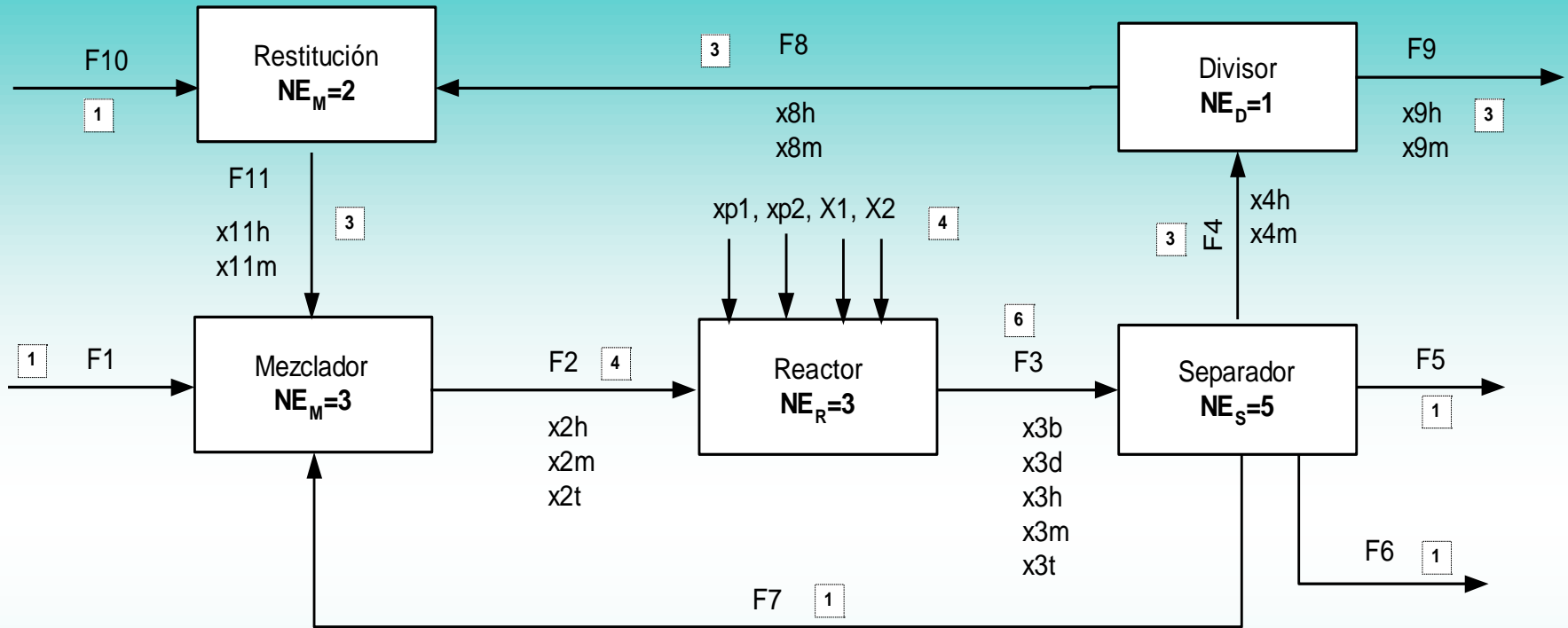
El tolueno reacciona con el H_2 para formar benceno, pero ocurre una reacción secundaria en la que se forma como subproducto el difenilo. El proceso se muestra en la figura. Se agrega H_2 al flujo de reciclaje del gas para hacer que la razón H_2/CH_4 sea 1:1 antes de que el gas ingrese en el mezclador. La razón entre el H_2 y el tolueno en la entrada del reactor es 4:1 (G). La conversión de tolueno a benceno en una pasada por el reactor es del 80 %, y la conversión de tolueno en el subproducto difenilo es del 8 % en la misma pasada. Calcule los moles de R_G y R_L por hora.



Obtención de benceno



Variables y ecuaciones



Número de variables: 31

F1, F2, F3, F4, F5, F6, F7, F8, F9, F10, F11, x_{2h} , x_{2m} , x_{2t} , x_{3b} , x_{3d} , x_{3h} , x_{3m} , x_{3t} , x_{4h} , x_{4m} , x_{8h} , x_{8m} , x_{9h} , x_{9m} , x_{11h} , x_{11m} , x_{p1} , x_{p2} , X_1 y X_2 .

Número de ecuaciones: 28

F1, F2, F3, F4, F5, F6, F7, F8, F9, F10, F11, x_{2h} , x_{2m} , x_{2t} , x_{3b} , x_{3d} , x_{3h} , x_{3m} , x_{3t} , x_{4h} , x_{4m} , x_{8h} , x_{8m} , x_{9h} , x_{9m} , x_{11h} , x_{11m} , x_{p1} , x_{p2} , X_1 y X_2 .

Ecuaciones de Balance de materia

Mezclador

$$F_1 + F_7 + F_{11} = F_2 \quad 1$$

$$F_1 + F_7 = F_2 x_{2t} \quad 2$$

$$F_{11} x_{11h} = F_2 x_{2h} \quad 3$$

Divisor

$$F_4 = F_8 + F_9 \quad 14$$

Restitución

$$F_8 + F_{10} = F_{11} \quad 15$$

$$F_8 x_{8m} = F_{11} x_{11m} \quad 16$$

Reactor

$$F_3 = F_2 + \sum_{i=1}^5 \alpha_{1i} X_1 + \sum_{i=1}^5 \alpha_{2i} X_2 \quad 4$$

$$F_3 x_{3m} = F_2 x_{2m} + \alpha_{1m} X_1 + \alpha_{2m} X_2 \quad 5$$

$$F_3 x_{3b} = \alpha_{1b} X_1 \quad 6$$

$$F_3 x_{3t} = F_2 x_{2t} + \alpha_{1t} X_1 + \alpha_{2t} X_2 \quad 7$$

$$F_3 x_{3h} = F_2 x_{2h} + \alpha_{1h} X_1 + \alpha_{2h} X_2 \quad 8$$

Separador

$$F_3 = F_4 + F_5 + F_6 + F_7 \quad 9$$

$$F_3 x_{3b} = F_5 \quad 10$$

$$F_3 x_{3d} = F_6 \quad 11$$

$$F_3 x_{3t} = F_7 \quad 12$$

$$F_3 x_{3h} = F_4 x_{4h} \quad 13$$

Ecuaciones de adicionales

Ecuaciones de corriente

$$x_{2h} + x_{2m} + x_{2t} = 1 \quad 17$$

$$x_{3b} + x_{3d} + x_{3h} + x_{3m} + x_{3t} = 1 \quad 18$$

$$x_{4h} + x_{4m} = 1 \quad 19$$

$$x_{8h} + x_{8m} = 1 \quad 20$$

$$x_{9h} + x_{9m} = 1 \quad 21$$

$$x_{11h} + x_{11m} = 1 \quad 22$$

Ecuaciones Adicionales

$$x_{p1} F_2 x_{2t} = -\alpha_{1t} X_1 \quad 23$$

$$x_{p2} F_2 x_{2t} = -\alpha_{2t} X_2 \quad 24$$

$$x_{4h} = x_{8h} \quad 25$$

$$x_{4h} = x_{9h} \quad 26$$

$$x_{11h} = x_{11m} \quad 27$$

$$\frac{x_{2h}}{x_{2t}} = 4 \quad 28$$

Grados de Libertad = 31-28 = 3. Se conoce el F1, xp1 y xp2

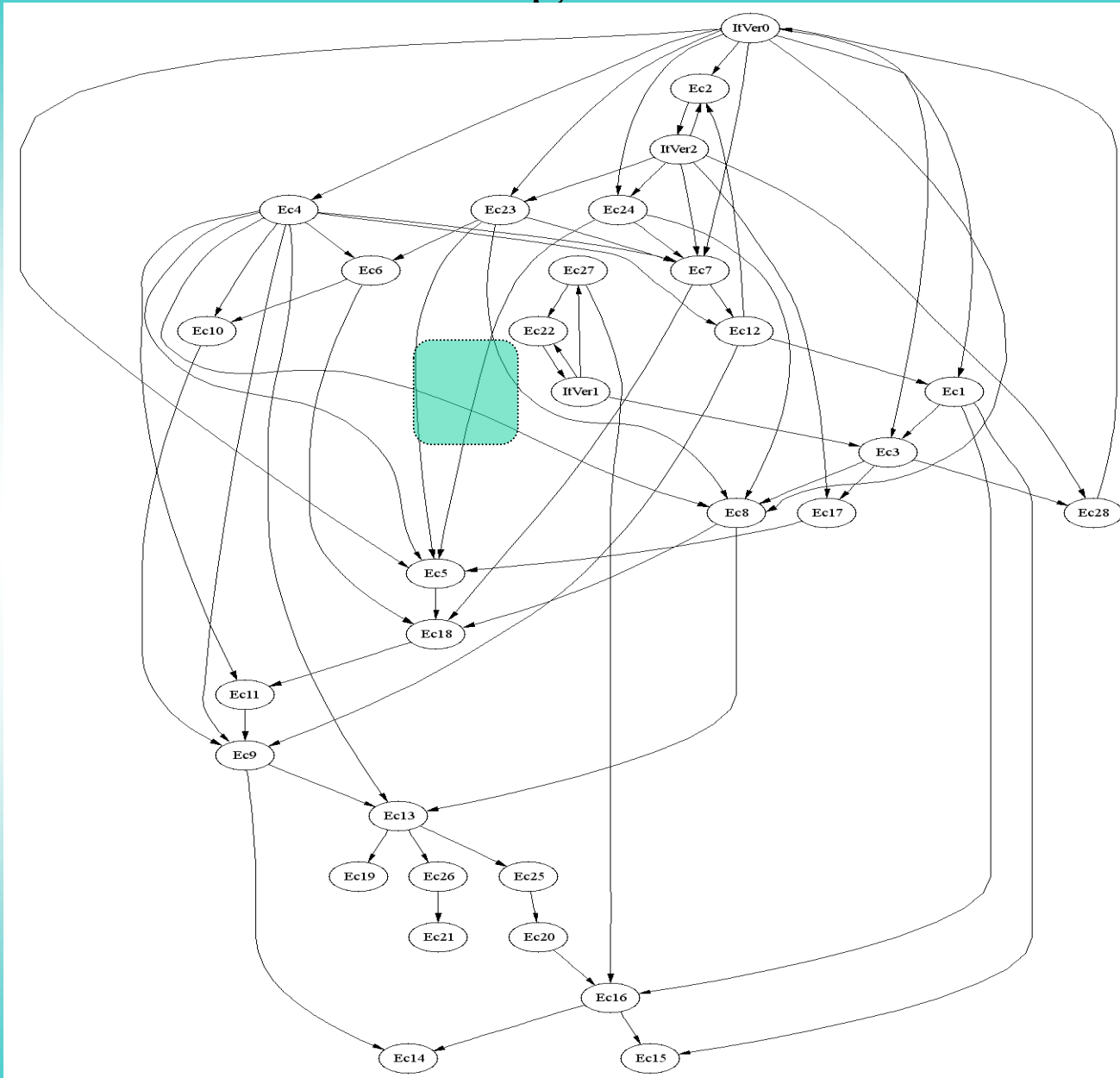
Sistema de ecuaciones - POE

Ec1 1 F7 1 F11 1 F2	Ec6 1 F3 1 x3b 1 X1	Ec10 1 F3 1 F5 1 x3b	Ec16 1 F8 1 x8m 1 F11 1 x11m	Ec22 1 x11h 1 x11m Ec23 1 F2 1 x2t 1 X1
Ec2 1 F7 1 F2 1 x2t	Ec7 1 F3 1 F2 1 x3t 1 x2t	Ec11 1 F3 1 F6 1 x3d	Ec17 1 x2h 1 x2m 1 x2t	Ec24 1 F2 1 x2t 1 X2
Ec3 1 F11 1 x11h 1 F2 1 x2h	1 X1 1 X2 Ec8 1 F3 1 F2	Ec12 1 F3 1 F7 1 x3t	Ec18 1 x3b 1 x3d 1 x3h 1 x3m 1 x3t	Ec25 1 x4h 1 x8h
Ec4 1 F3 1 F2	1 x3h 1 x2h 1 X1 1 X2	Ec13 1 F3 1 F4 1 x3h 1 x4h	Ec19 1 x4h 1 x4m	Ec26 1 x4h 1 x9h
Ec5 1 F3 1 F2 1 x3m 1 x2m 1 X1 1 X2	Ec9 1 F3 1 F4 1 F5 1 F6 1 F7	Ec14 1 F4 1 F8 1 F9	Ec20 1 x8h 1 x8m	Ec27 1 x11h 1 x11m
		Ec15 1 F8 1 F10 1 F11	Ec21 1 x9h 1 x9m	Ec28 1 x2h 1 x2t

Resultado POE

ItVer0 1 F2	ItVer1 1 x11h	Ec8 1 x3h	Ec20 1 x8m
ItVer2 1 x2t	Ec27 1 x11m	Ec6 1 x3b	Ec16 1 F8
Ec23 1 X1	Ec22 1 Ver1	Ec18 1 x3d	Ec14 1 F9
Ec24 1 X2	Ec1 1 F11	Ec11 1 F6	Ec15 1 F10
Ec4 1 F3	Ec3 1 x2h	Ec10 1 F5	Ec26 1 x9h
Ec7 1 x3t	Ec28 1 Ver0	Ec9 1 F4	Ec21 1 x9m
Ec12 1 F7	Ec17 1 x2m	Ec13 1 x4h	Ec19 1 x4m
Ec2 1 Ver2	Ec5 1 x3m	Ec25 1 x8h	

Digrafo



Resolución. Ciclo 2

$$\text{CicloI2}(x_{11h}) := \begin{cases} x_{11m} \leftarrow 1 - x_{11h} \\ x_{11m} - x_{11h} \end{cases}$$

$$x_{11hi} := 0.1$$

$$x_{11h} := \text{root}(\text{CicloI2}(x_{11h}), x_{11hi}, 0, 1)$$

$$x_{11h} = 0.5$$

$$x_{11m} := 1 - x_{11h}$$

$$x_{11m} = 0.5$$

Resolución ciclos anidados. Ciclo 1

$$\begin{array}{l} \text{CicloI1}(F7, x2h) := \\ \quad x2t \leftarrow \frac{x2h}{4} \\ \quad F2 \leftarrow \frac{F1 + F7}{x2t} \\ \quad F11 \leftarrow F2 - (F1 + F7) \\ \quad F11 \cdot x11h - F2 \cdot x2h \end{array}$$

Resolución de ciclos. Ciclo 0

$$F7 := F1$$

$$x2h := 0.5$$

$$\text{CicloI0}(F7) := \left| \begin{array}{l} x2h \leftarrow \text{root}(\text{CicloI1}(F7, x2h), x2h) \\ \\ x2t \leftarrow \frac{x2h}{4} \\ \\ F2 \leftarrow \frac{F1 + F7}{x2t} \\ \\ X1 \leftarrow \frac{xp1 \cdot F2 \cdot x2t}{-\alpha_{\text{Tolueno}}} \\ \\ X2 \leftarrow \frac{xp2 \cdot F2 \cdot x2t}{-\beta_{\text{Tolueno}}} \\ \\ F3 \leftarrow F2 \\ \\ x3t \leftarrow \frac{F7}{F3} \\ \\ F3 \cdot x3t - (F2 \cdot x2t + \alpha_{\text{Tolueno}} \cdot X1 + \beta_{\text{Tolueno}} \cdot X2) \end{array} \right.$$

$$x2t \leftarrow \frac{x2h}{4}$$

$$F2 \leftarrow \frac{F1 + F7}{x2t}$$

$$X1 \leftarrow \frac{xp1 \cdot F2 \cdot x2t}{-\alpha_{\text{Tolueno}}}$$

$$X2 \leftarrow \frac{xp2 \cdot F2 \cdot x2t}{-\beta_{\text{Tolueno}}}$$

$$F3 \leftarrow F2$$

$$x3t \leftarrow \frac{F7}{F3}$$

$$F3 \cdot x3t - (F2 \cdot x2t + \alpha_{\text{Tolueno}} \cdot X1 + \beta_{\text{Tolueno}} \cdot X2)$$

Resultados

$$\underline{F7} := \text{root}(\text{CicloI0}(F7), F7)$$

$$F7 = 2.32 \times 10^3 \frac{\text{mol}}{\text{hr}}$$

$$\underline{x2h} := \text{root}(\text{CicloI1}(F7, x2h), x2h)$$

$$x2h = 0.444$$

$$x2t := \frac{x2h}{4}$$

$$x2t = 0.111$$