

Tema 7 - Reactores

CI4102 Ingeniería Ambiental
Profesora Ana Lucia Prieto



1

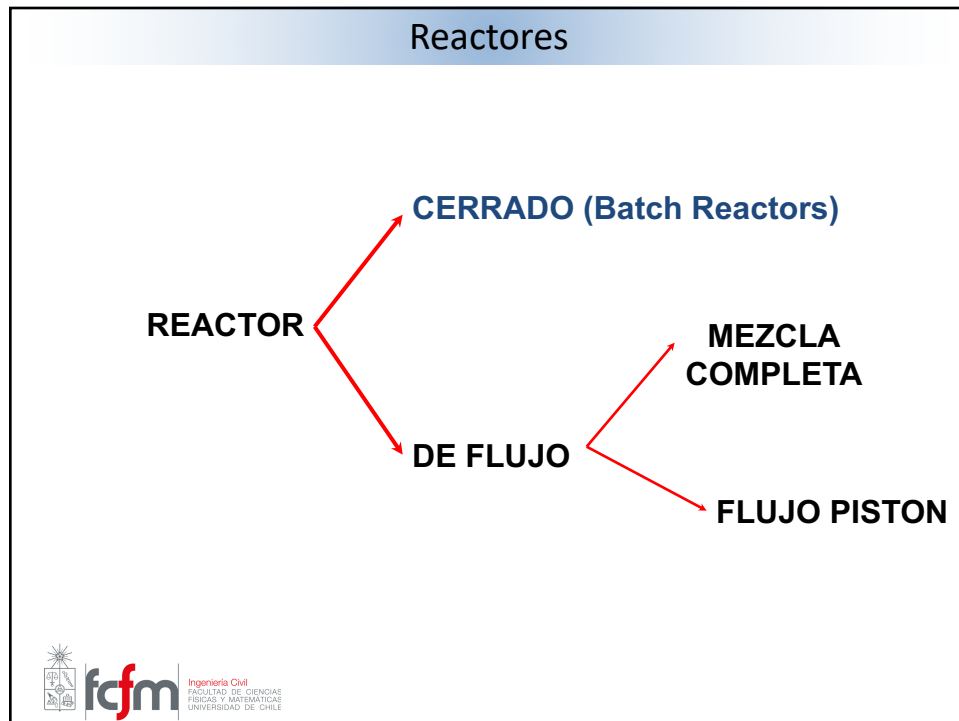
Reactores

Un número elevado de métodos de **tratamientos físicos** (sedimentación, filtración, ecualización), **químicos** (precipitación, coagulación, ablandamiento), y **bioquímicos** (lodos activados, digestión anaeróbica) son utilizados en ingeniería ambiental. Ellos se llevan a cabo generalmente en dispositivos que se denominan *reactores*.

Los reactores generalmente son tanques donde se producen reacciones físicas, químicas y biológicas (bioquímicas). Estos pueden ser divididos en dos grandes tipos dependiendo de las características del flujo y de las condiciones de mezclado: **reactor cerrado y de flujo**.

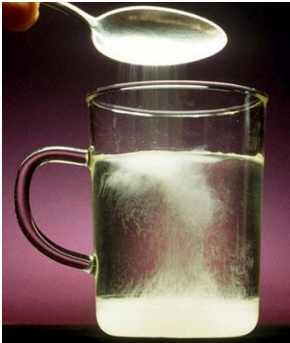


2



3

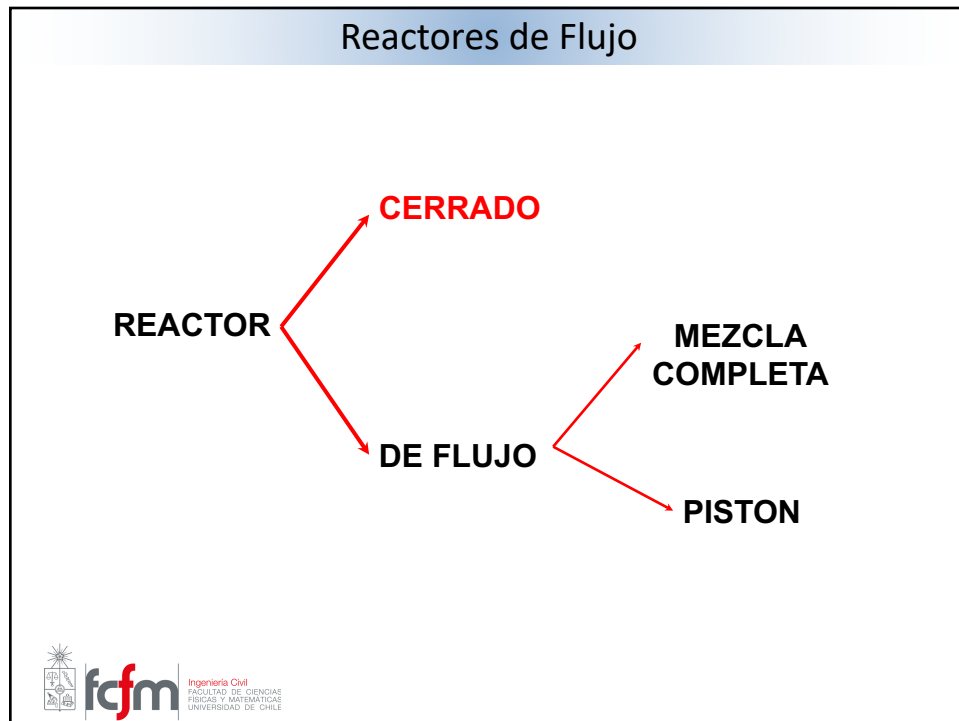
Condiciones de Mezclado



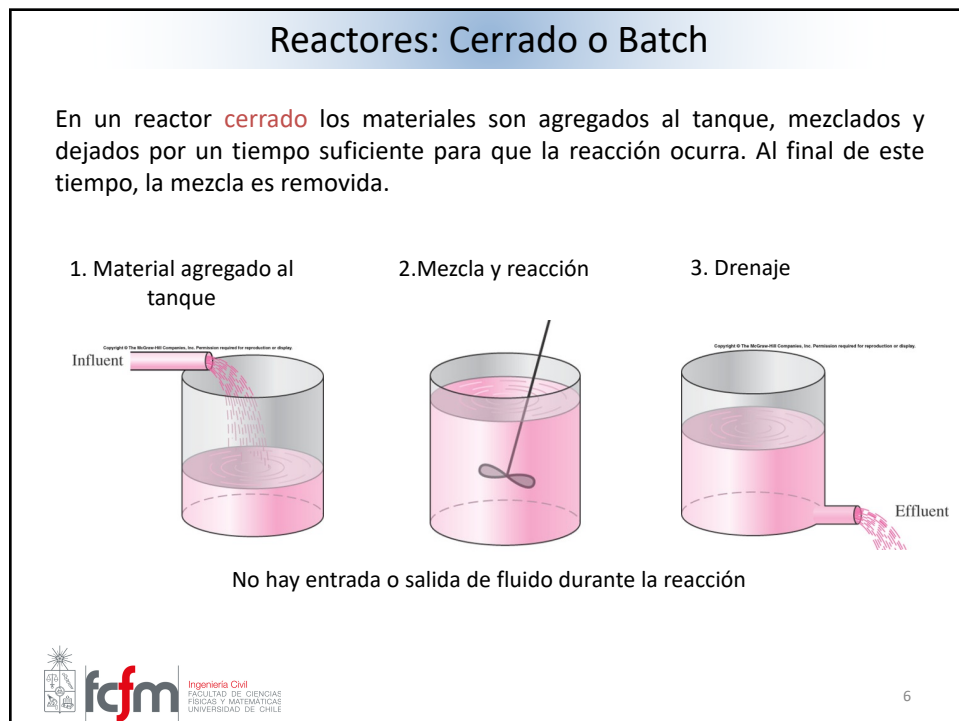



Mezcla completa (complete mix) – la mezcla es completamente homogénea. La concentración del compuesto o del contaminante es la misma a través del reactor.

4

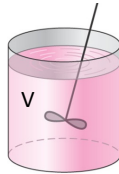


5



6

Balance de masa para un reactor cerrado



Donde A es la masa de la sustancia de interés

$$dA/dt = \text{In} - \text{Out} + \text{Producción} - \text{Consumo}$$

$$\frac{dA}{dt} = \underbrace{Q_0 C_{in}}_0 - \underbrace{Q_0 C_{out}}_0 \pm rV \quad r \text{ depends on the reaction order}$$

$$\frac{dC}{dt} = \pm r$$

Asumiendo una reacción de consumo:

Orden 0: $\frac{dC}{dt} = -k \quad \int_{C_0}^C dC = -k \int_0^t dt \quad \boxed{C - C_0 = -kt}$

Asumiendo una reacción de producción:

1^{er} orden: $\frac{dC}{dt} = kC \quad \int_{C_0}^C \frac{dC}{C} = k \int_0^t dt \quad \ln \frac{C}{C_0} = kt \quad \boxed{C = C_0 e^{kt}}$



7

7

Reactores: Cerrado o Batch

Si consideramos una reacción química de orden n, podemos determinar el balance de masas en un reactor cerrado como sigue:

$$\frac{d}{dt}(V \cdot C_{sis}) = V \cdot r_n = -V \cdot k_n \cdot C_{sis}^n$$

Si integramos esta ecuación diferencial, suponiendo que el volumen se mantiene constante, obtenemos el siguiente resultado:

$$C_t^{-n+1} - C_0^{-n+1} = -(n+1) \cdot k_n \cdot t$$

donde C_t y C_0 son la concentración dentro del reactor en los tiempo t e inicial (t=0).



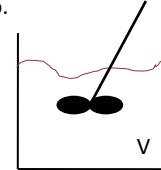
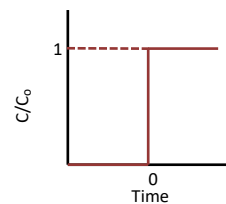
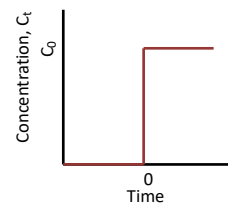
8

Reactores: Cerrado o Batch

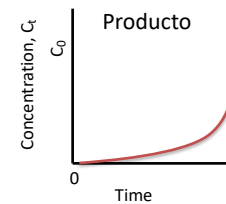
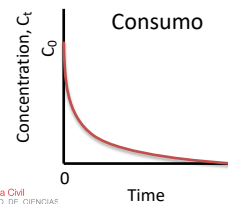
Acerca del reactor cerrado...

- Comunes en estudios de laboratorio. Son relativamente fáciles (\$\$\$) de contruir.
- En la industria se usan para tratamiento de volúmenes relativamente pequeños.
- Fácil operación. Se puede monitorear completamente el efluente tratado.

Si una **sustancia conservativa** ingresa a un reactor cerrado:



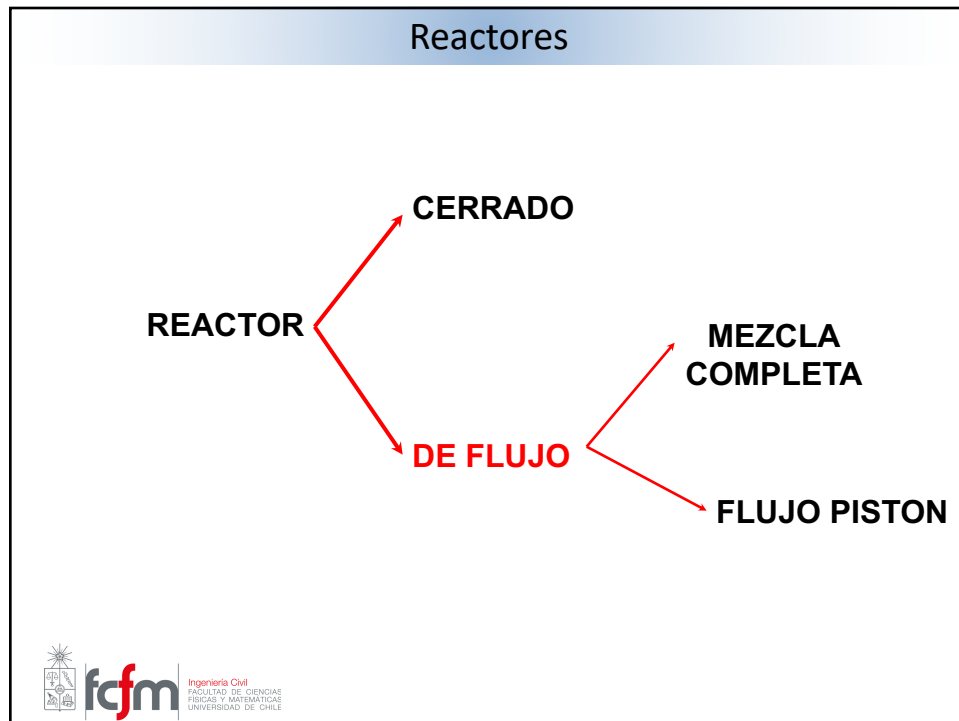
Si una **sustancia no-conservativa** ingresa a un reactor cerrado:



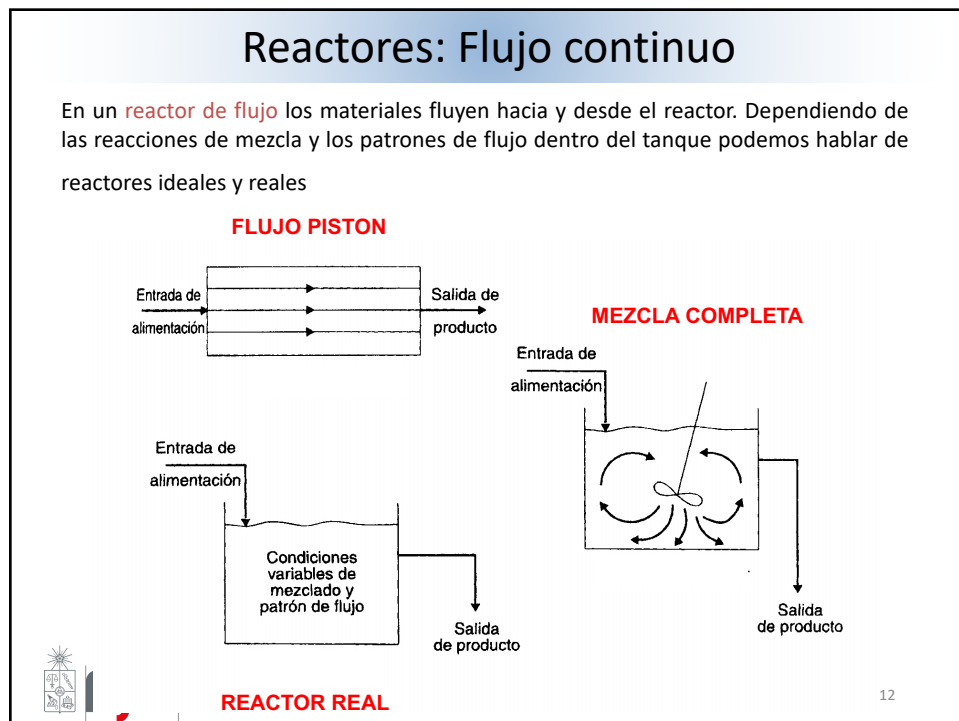
Reactores Cerrados

Determinación de las Tasas de Reacción

Orden	Tasa de Reacción	Ecuación Integrada	Gráfico Lineal	Pendiente
0	$\frac{dC}{dt} = -k_0$	$C_t - C_0 = -k_0 \cdot t$	C versus t	$-k_0$
1	$\frac{dC}{dt} = -k_1 \cdot C$	$\ln\left(\frac{C_t}{C_0}\right) = -k_1 \cdot t$	ln(C) versus t	$-k_1$
2	$\frac{dC}{dt} = -k_2 \cdot C^2$	$\frac{1}{C_t} - \frac{1}{C_0} = k_2 \cdot t$	1/C versus t	k_2
n	$\frac{dC}{dt} = -k_n \cdot C^n$	$C_t^{-n+1} - C_0^{-n+1} = -(-n+1) \cdot k_n \cdot t$	C^{-n+1} versus t	$-(-n+1) \cdot k_n \cdot t$

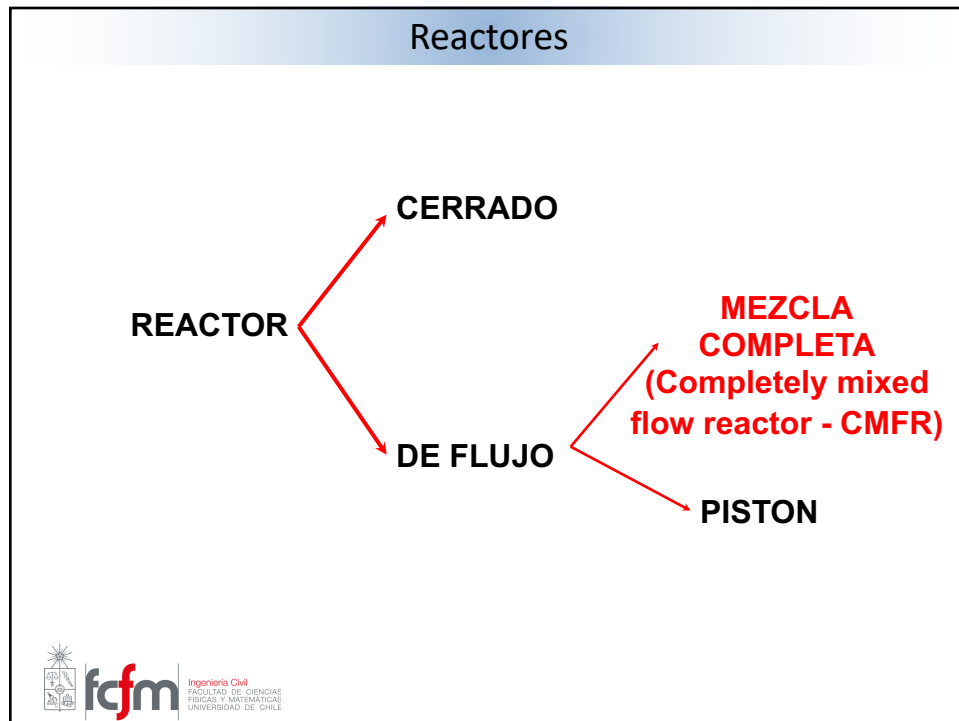


11



12

12



13

Reactores de Mezcla Completa (RMC) o CMFR

Consideremos el caso de un reactor de flujo de mezcla completa (medios mecánicos son utilizados para mantener el reactor completamente mezclado), al cual se encuentra ingresando un caudal constante Q con una concentración C_0 .



14

Balance de masa para un RMC

Considerando la entrada de una sustancia **no-conservativa A** al reactor:

$$dA/dt = \text{In} - \text{Out} + \text{Producción} - \text{Consumo}$$

$$\frac{dA}{dt} = QC_{\text{in}} - QC_{\text{out}} \pm rV$$

Usualmente se asume condiciones estacionarias para para RMC (la composición del afluente es constante)

$$QC = QC_0 \pm rV$$

Asumiendo una reacción de consumo:

Orden 0: $QC = QC_0 - kV$ $C = C_0 - k \frac{V}{Q}$

$$C = C_0 - k \theta_H$$

Asumiendo una reacción de producción:

1^{er} orden: $QC = QC_0 + kCV$ $C(Q - kV) = QC_0$

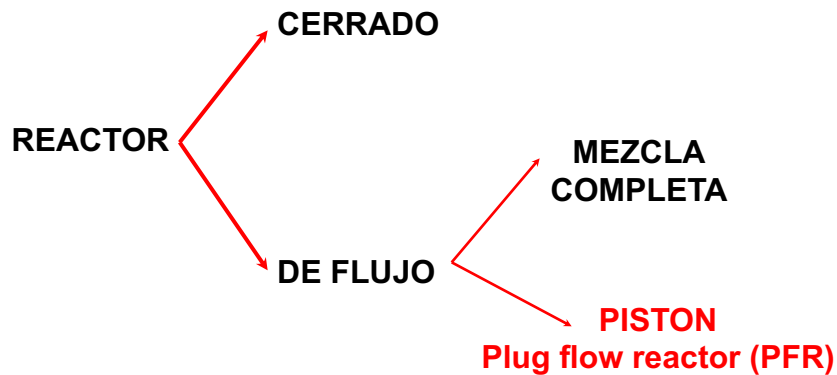
$$C = \frac{C_0}{1 - k \theta_H}$$

Donde θ_H es el **Tiempo de Retención Hidráulico**, o el tiempo que pasa cualquier partícula del fluido en el reactor

$$\theta_H = V/Q$$

15

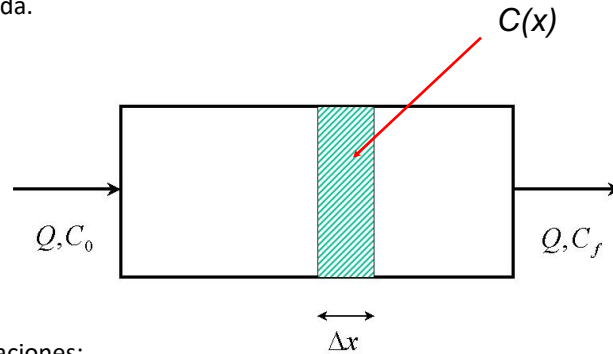
Reactores de Mezcla Completa



16

Reactores de Flujo Pistón

Consideremos el caso de un reactor de flujo pistón, en el cual se produce la entrada de material por la izquierda y la salida por la derecha. **No existe mezcla interna**, de tal manera que la concentración al interior del estanque no es conocida.



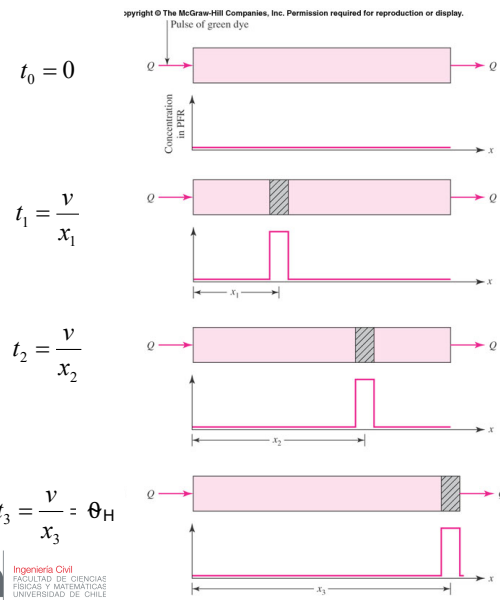
Consideraciones:

- La mezcla ocurre sólo en el pistón.
- No hay mezcla a lo largo del reactor → la concentración varía en la longitud.

17

Reactores de Flujo Pistón

Si adicionamos una **substancia conservativa** en un PFR:



18

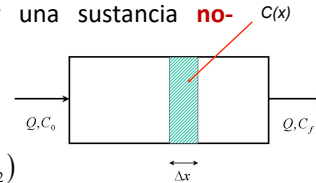
18

Reactores de Flujo Pistón

Si consideramos un esquema como el planteado en la figura se puede escribir una ecuación de balance a nivel de un elemento (pistón) de volumen de ancho Δx , área seccional A y una sustancia **no-conservativa**:

BM bajo condiciones estacionarias:

$$Q \cdot C_x = Q \cdot C_{x+\Delta x} + \Delta x \cdot A \cdot r(C_{x+\Delta x/2})$$



Reordenando esta expresión se tiene:

$$\frac{Q \cdot C_x - Q \cdot C_{x+\Delta x}}{\Delta x} = A \cdot r(C_{x+\Delta x/2})$$

Si tomamos el límite cuando el ancho de nuestra sección de control tiende a cero, i.e. $\Delta x \rightarrow 0$, obtenemos la siguiente expresión diferencial:

$$\frac{dC}{dx} = -\frac{A}{Q} \cdot r(C)$$



19

Reactores de Flujo Pistón

Si reordenamos e integramos a lo largo del reactor obtenemos la siguiente ecuación:

$$\int_{C=C_0}^{C=C_f} \frac{dC}{r(C)} = -\frac{A}{Q} \cdot \int_{x=0}^{x=L} dx$$

donde la concentración a la entrada ($x=0$) es igual a C_0 , mientras que a la salida del reactor ($x=L$) es igual a C_f . Al integrar esta ecuación se obtiene:

$$\int_{C=C_0}^{C=C_f} \frac{dC}{r(C)} = -\frac{A}{Q} \cdot L = -\frac{V}{Q} = -\theta_H$$

En particular, si la reacción es de orden 1 se obtiene la siguiente expresión:

$$\ln\left(\frac{C_0}{C}\right) = k_1 \cdot \theta_H$$



20

Resumen Reactores

Orden	Tasa de Reacción	Mezcla Completa	Flujo Pistón
0	$\frac{dC}{dt} = -k_0$	$C_0 - C = k_0 \cdot \theta_H$	$C_0 - C = k_0 \cdot \theta_H$
1	$\frac{dC}{dt} = -k_1 \cdot C$	$\frac{C_0}{C} - 1 = k_1 \cdot \theta_H$	$\ln\left(\frac{C_0}{C}\right) = k_1 \cdot \theta_H$
2	$\frac{dC}{dt} = -k_2 \cdot C^2$	$\frac{1}{C} \cdot \left(\frac{C_0}{C} - 1\right) = k_2 \cdot \theta_H$	$\frac{1}{C_0} \cdot \left(\frac{C_0}{C} - 1\right) = k_2 \cdot \theta_H$

Ejemplo 1 (extra credit): El radón (Rn) ocurre naturalmente en los suelos y representa un riesgo a la salud en aguas subterráneas. Es la 2ª causa más importante de cáncer de pulmón después del tabaco, de acuerdo con la OMS (WHO en inglés). Una manera de tratar agua con Rn es simplemente almacenándola hasta que la concentración del Rn disuelto disminuya. La cinética de disminución es de primer orden y esta dada por:



Considere un situación en la cual el agua subterránea se use para abastecer a una casa a un caudal de $1 \text{ m}^3/\text{d}$. Para suministro potable, la concentración de Rn debe ser disminuida a 5% del nivel del agua sin tratar.

Qué tan grande debe ser el tanque de almacenamiento si es:

- Un PFR?
- Un CMFR?
- Si el sistema de almacenamiento consiste en dos CMFR en serie, que tan grande debe ser cada uno para obtener la misma eficiencia?

Ejemplo 2 (extra credit): Considere dos reactores de flujo. El reactor A es un PFR con volumen constante de 3 m^3 y un caudal de entrada de $1,5 \text{ m}^3/\text{hr}$. El reactor B es un CMFR con volumen constante de 1 m^3 y caudal de entrada de $0,5 \text{ m}^3/\text{hr}$. El flujo de agua que ingresa a ambos reactores contiene una especie C con concentración inicial C_0 . Dentro de cada reactor, las especies decaen regidas por una cinética de primer orden de constante k . ¿Cuál de los dos reactores tiene un tiempo de retención hidráulico más largo?

23

Ejemplo 3 (extra credit): Un río contaminado con fenol fluye a una tasa de $5000 \text{ m}^3/\text{d}$ a través de un canal de 5 Km con sección transversal de 16 m^2 . Bajo condiciones estacionarias, la concentración de fenol al comienzo del canal es de 800 mg/L . El fenol se oxida a medida que se mueve a lo largo del río a un tasa de $0,5 \text{ d}^{-1}$.

- Determine la concentración al final del canal si no hay mezcla longitudinal.
- Cuál es la concentración al final del canal si se asume mezcla completa a largo de este?

24