



Cinvestav



# Fundamentos y aplicaciones de los sensores virtuales

Salvador Carlos Hernández  
Cinvestav Saltillo

Querétaro, Méx; 23 de octubre de 2008

- ① Comentarios preliminares
- ② Sensores virtuales
- ③ Observadores de estado
- ④ Ejemplos de aplicaciones
  - Proceso biológico
  - Proceso mecánico
- ⑤ Conclusiones



# Comentarios preliminares

- Procesos que deben trabajar de manera ininterrumpida
- Condiciones de operación complejas
- Sistemas de supervisión, control y detección de fallas para garantizar un funcionamiento de acuerdo a las necesidades de los usuarios.

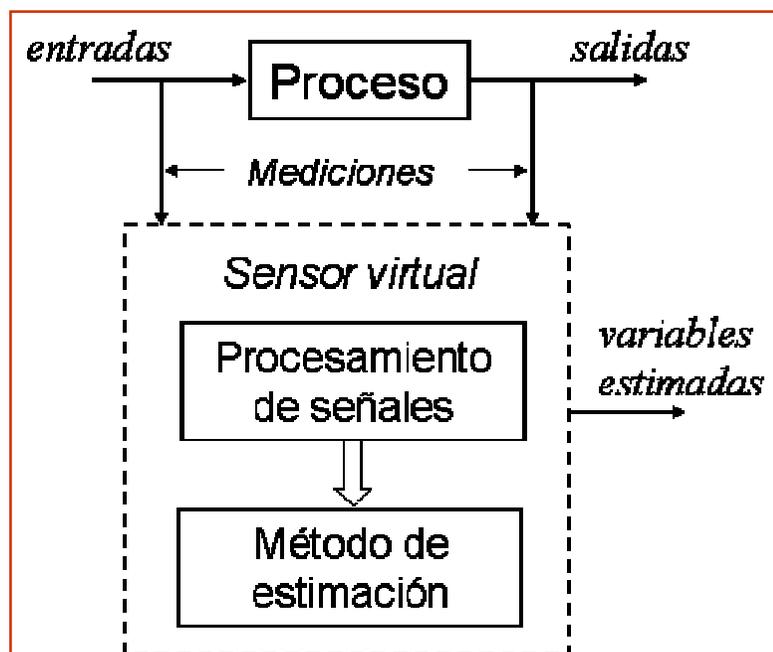
## □ Automatización de procesos:

- Sensores adecuados
- Medición de variables generando señales eléctricas
- a) Para algunas variables no existen sensores adecuados
- b) Condiciones hostiles requiriendo altos estándares de calidad y procedimientos rigurosos de mantenimiento (altos costos)
- c) Variables determinadas fuera de línea mediante análisis de laboratorio



# Sensores virtuales

- ❑ Mecanismo que emplea la información disponible de un proceso para deducir variables cuya medición presenta restricciones técnicas o económicas



- Normalización de señales
- Representación matemática

## ❑ Modelos estadísticos

- Requieren grandes cantidades de datos provenientes del proceso considerado; el objetivo es clasificarlos y encontrar correlaciones entre variables para inferir información a partir de tales datos

## ❑ Modelos dinámicos

- Permiten representar los fenómenos que ocurren en un proceso determinado y su complejidad está en función del nivel de aproximación a los fenómenos reales que se requiera alcanzar

## ❑ Modelos basados en inteligencia artificial

- Deducir la estructura de un proceso a partir de señales de entrada y salida o del conocimiento empírico

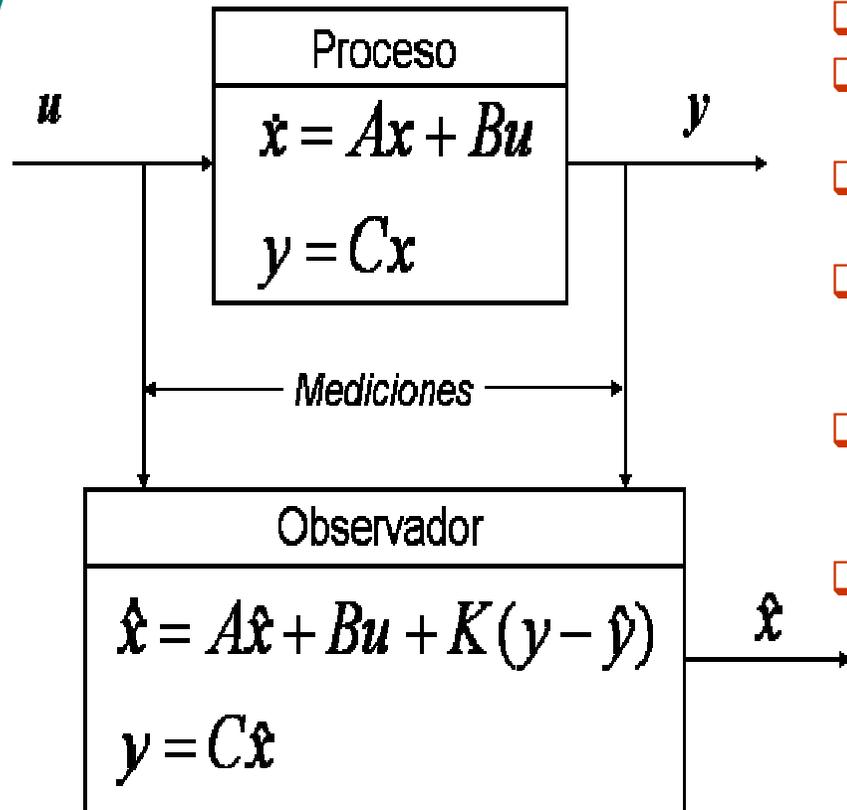
## □ Método de estimación

- Modelos dinámicos: aceleración de dinámicas mediante observadores de estados
- Modelos estadísticos: deducción estadística a través de análisis multivariable como el análisis de componentes principales o la proyección a estructuras latentes.
- Modelos basados en inteligencia artificial: se emplean inferencias difusas y neuronales.
- En ocasiones se combinan estos métodos con otras técnicas para mejorar la calidad de la estimación de variables

# 3

## Observadores de estado

- ❑ Estado: información necesaria (aparte de las entradas) para determinar de forma única el comportamiento del sistema
  
  
  
  
  
  
  
  
  
  
- ❑ Variables de estado: conjunto más pequeño de variables que permiten predecir de manera única, la evolución del sistema



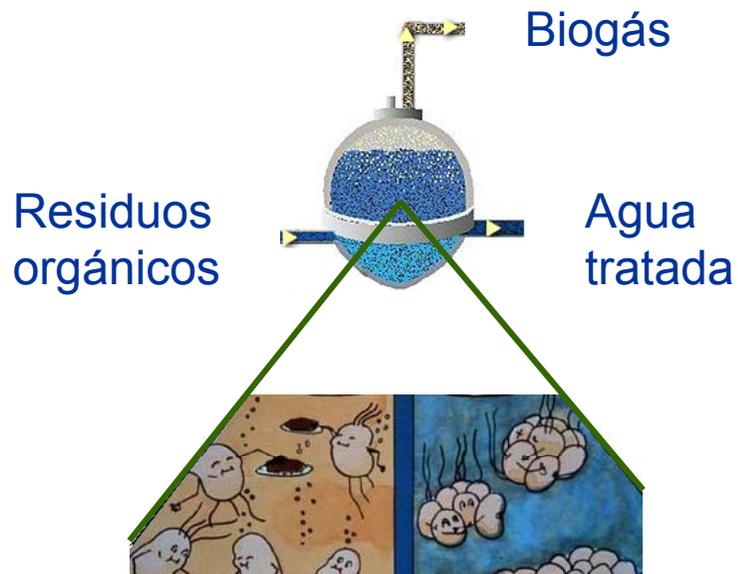
- Aceleración de la dinámica del proceso
- Representación de estados reproducida con una dinámica más rápida
- Acelerar la dinámica del observador, mediante un vector de ganancias  $K$
- $K$  con magnitud pequeña: asegura la estabilidad, pero generar tiempos de convergencia largos
- $K$  con gran magnitud: corto tiempo de convergencia, pero sensible a señales de ruido.
- Compromiso entre el tiempo de convergencia y la calidad de la estimación.

## □ Cálculo de $K$ ,

- a) Desplazamiento de polos: calcular  $K$  en función de la matriz de estados y el vector de salidas (polos de observador menores que los del proceso original)
- b) Filtro de Kalman: calcular una  $K$  óptima en función de la varianza de los ruidos,
- c) LQR: obtener una  $K$  óptima que mediante la expresión minimiza el siguiente índice de desempeño:

# 4

## Ejemplos de aplicaciones



- ✓ Alta eficiencia para tratar materia orgánica
- ✓ Aporte ambiental y energético
- ✗ Diferentes fenómenos y dinámicas
- ✗ Sensible a variaciones (pH, Temperatura, Sobrecargas)
- ✗ Variables difíciles de medir

## Variables indicadoras de la actividad biológica

- Biomasa (bacterias)
- Sustrato (DQO)
- Sensores no adecuados y costosos
- Medición fuera de línea, análisis químico

## Modelo dinámico

$$\frac{dX_1}{dt} = (\mu_1 - k_{d1})X_1$$

$$\frac{dS_1}{dt} = -R_6\mu_1 + D(S_{1in} - S_1)$$

$$\frac{dX_2}{dt} = (\mu_2 - k_{d2})X_2$$

$$\frac{dS_2}{dt} = -R_3\mu_2X_2 + R_4\mu_1X_1 + D(S_{2in} - S_2)$$

$$\frac{dIC}{dt} = R_2R_3\mu_2X_2 + R_5\mu_1X_1 - \lambda R_1R_3\mu_2X_2 + D(IC_{in} + b_{inc} - IC)$$

$$\frac{dZ}{dt} = D(Z_{in} + b_{inc} - Z)$$

$$Q_{CH_4} = R_1R_2\mu_2X_2$$

$$Q_{CO_2} = \lambda R_3R_2\mu_2X_2$$

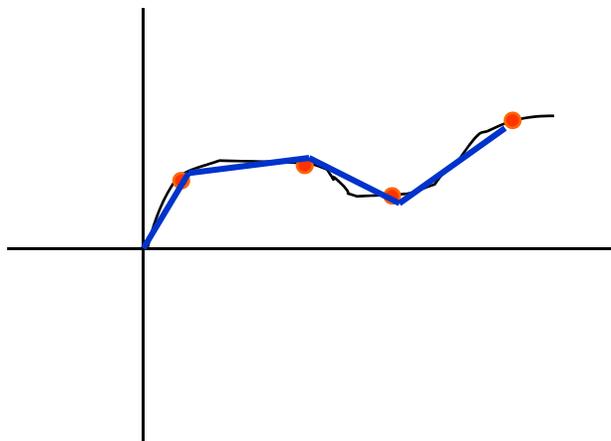
X1, X2: biomasa  
S1, S2: sustrato  
IC: carbono inorgánico  
Z: cationes

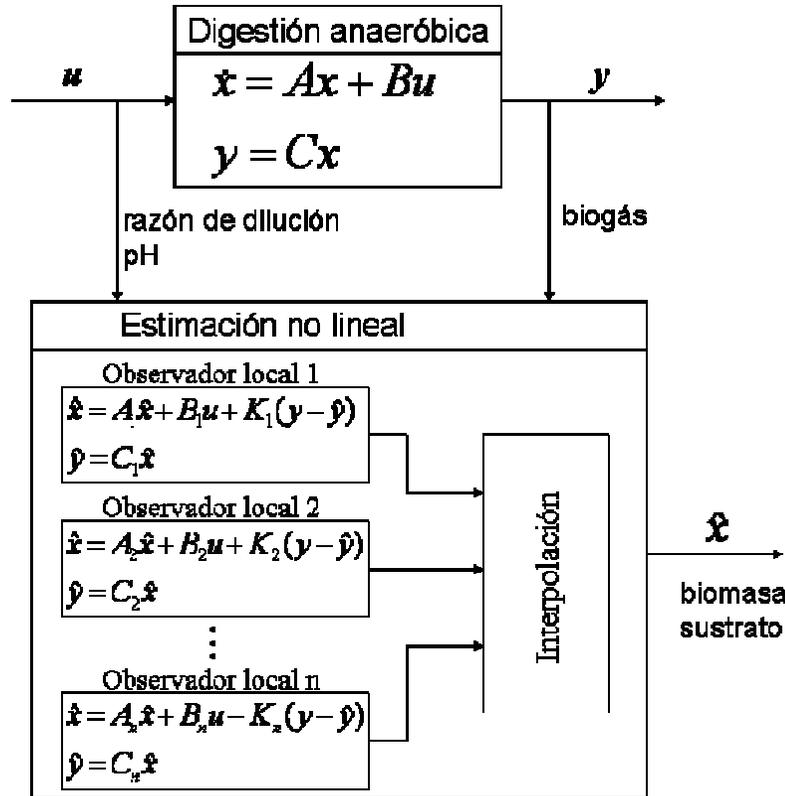
### • Razones de crecimiento

$$\mu_1 = \frac{\mu_{1max}S_1}{K_{S_1} + S_1 + \frac{S_1HS}{K_{i1}}}$$

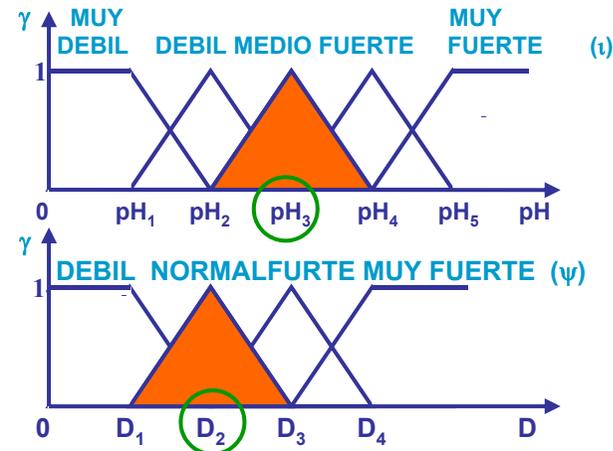
$$\mu_2 = \frac{\mu_{2max}HS}{K_{S_2} + HS + \frac{HS^2}{K_{i2}}}$$

- ❑ Linealización del modelo en varios puntos de operación
- ❑ Observador local (lineal): válido en la región cercana al correspondiente punto.
- ❑ Interpolación de las variables estimadas por los observadores locales para reconstruir dinámica no lineal





- Las mediciones en línea determinan los observadores locales que se encuentran activos en un instante determinado

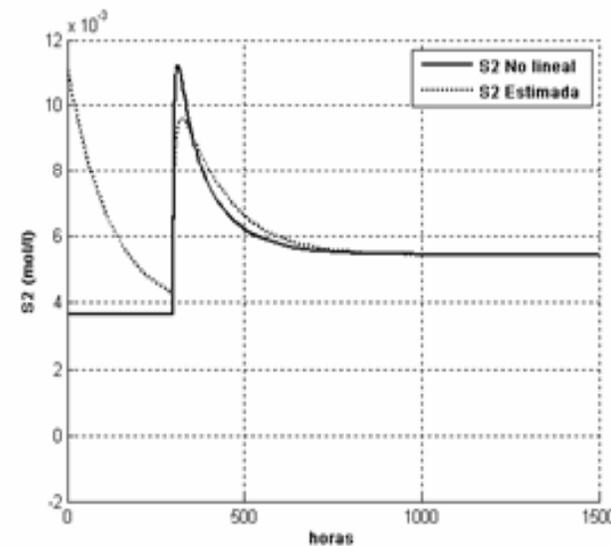
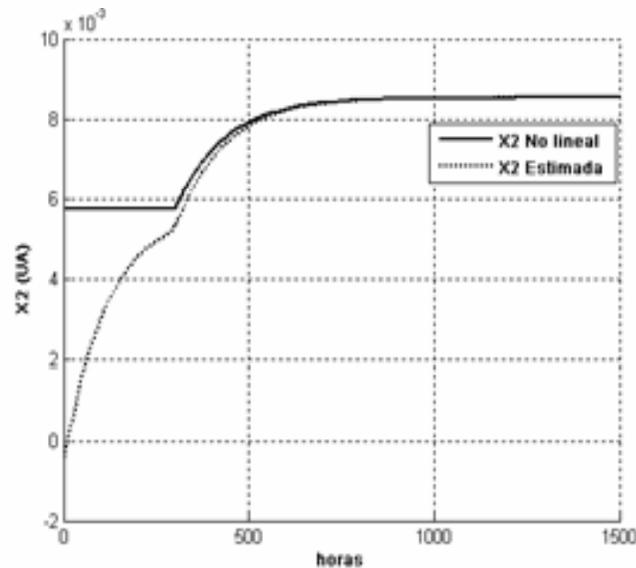


- Si  $pH$  es  $pH(i)$  y  $D$  es  $D(\psi)$  entonces el estado estimado es

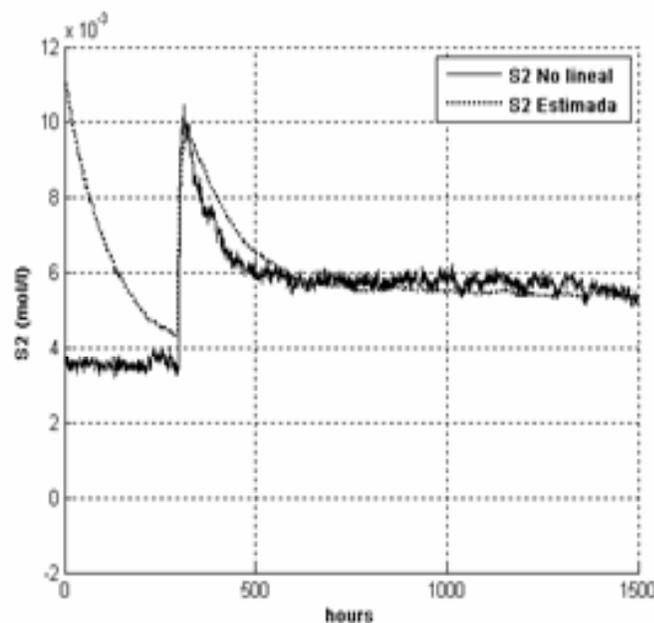
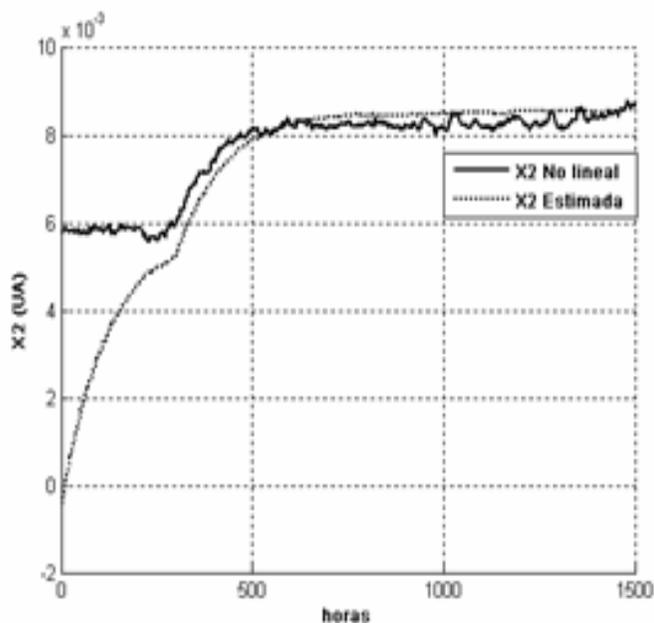
$$\hat{X}_{dj} = F_j \hat{X}_{dj} + G_j u + K_j (y - \hat{Y}_j)$$

$$\dot{\hat{x}}_d = \frac{\sum_{j=1}^R \gamma_j (F_j \hat{X}_{dj} + G_j u + K_j (y - \hat{Y}_j))}{\sum_{j=1}^R \gamma_j = 1}$$

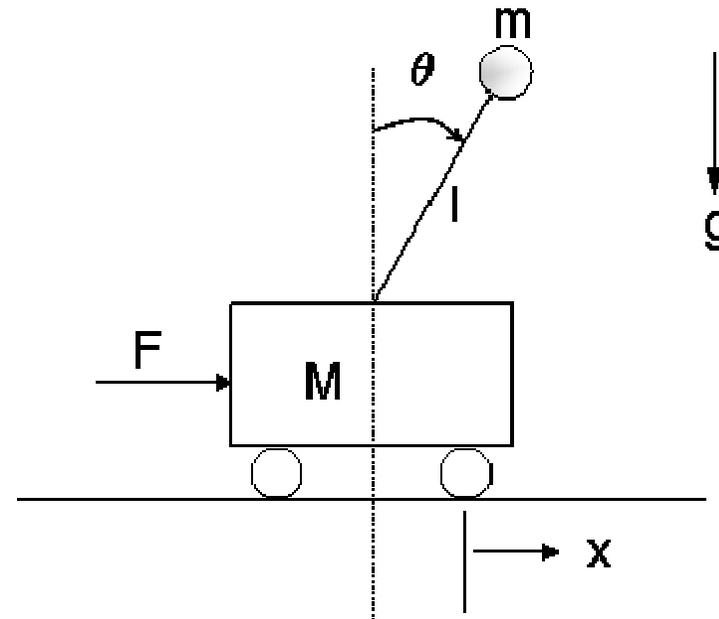
- ❑ Variación en las entradas del proceso
- ❑ Observador inicializado arbitrariamente
- ❑ X2 estimada de manera adecuada
- ❑ S2 estimada adecuadamente, aunque se percibe un error cuando se presenta la variación en las entradas.
- ❑ La interpolación de los observadores locales no alcanza a reconstruir completamente la dinámica no lineal.
- ❑ Más observadores locales.



- ❑ Ruido en las mediciones.
- ❑ Biomasa y sustrato estimados correctamente



- ❑ Brazo rígido atado en uno de sus extremos, pero con libertad de movimiento, a un soporte móvil o fijo.
- ❑ Su dinámica presenta aspectos muy interesantes
- ❑ Teoría aplicada en diversos sistemas
- ❑ Mecatrónica: referencia en el movimiento de los humanoides
- ❑ Sismología: estudiar el comportamiento de edificios altos en temblores



- ❑ Objetivo: mantener en posición vertical al péndulo ante el movimiento de la masa de base
- ❑ Se requiere a cada instante:
  - Velocidad de la masa
  - Angulo de la barra
- ❑ Sensores virtuales: manera práctica y económica para el desarrollo de estrategias estabilizantes

## Modelo:

- leyes de Newton se obtienen
- dos ecuaciones no lineales

$$(M + m)\ddot{x} + b\dot{x} + ml\ddot{\theta}\cos\theta - ml\dot{\theta}^2\sin\theta = F$$

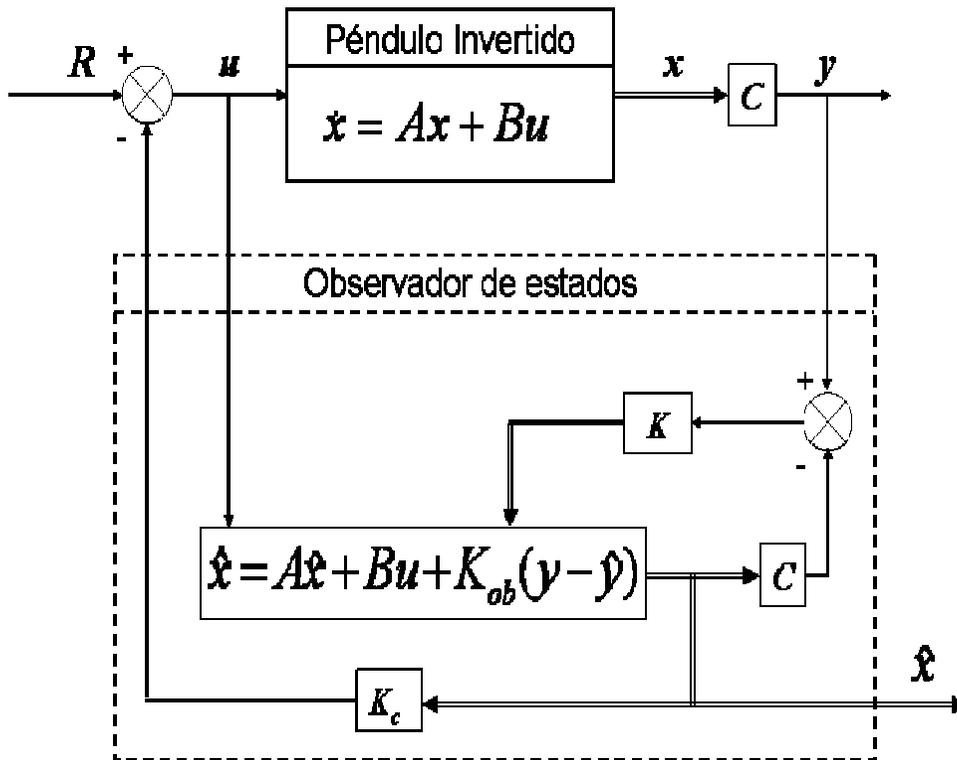
$$(I + ml^2)\ddot{\theta} + mgl\sin\theta = -m\dot{x}\cos\theta$$

## Linealización alrededor de $\theta = \pi$

- Se supone  $\theta = \pi + \varphi$  ( $\varphi$  ángulo pequeño desde la vertical)
- $\cos(\theta) = -1$ ,  $\sin(\theta) = -\varphi$ , y  $(d\theta/dt)^2 = 0$

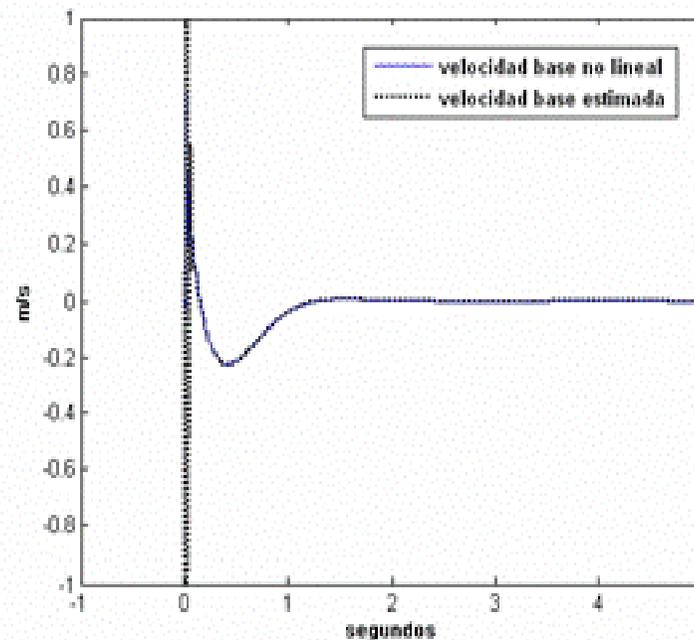
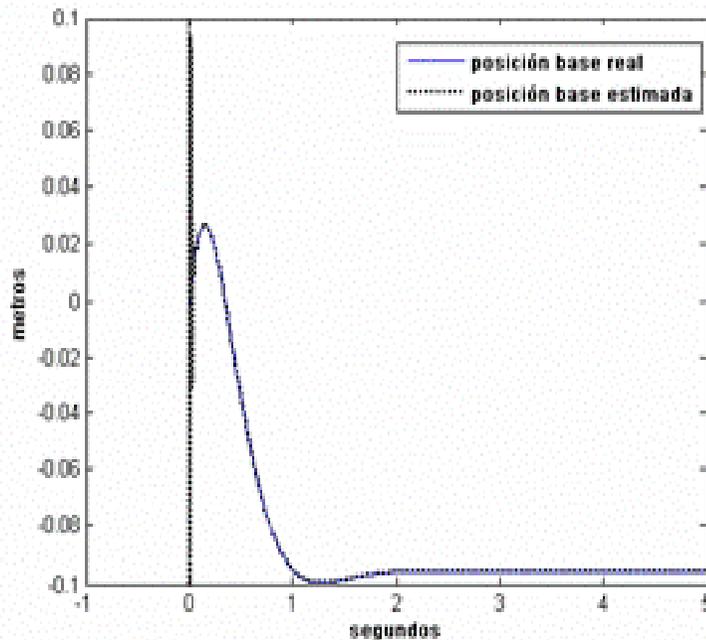
$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \ddot{x} \\ \dot{\Phi} \\ \ddot{\Phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-(I+ml^2)b}{I(M+m)+Mml^2} & \frac{m^2gl^2}{I(M+m)+Mml^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{-mlb}{I(M+m)+Mml^2} & \frac{mg(M+m)}{I(M+m)+Mml^2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \Phi \\ \dot{\Phi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{I+ml^2}{I(M+m)+Mml^2} \\ 0 \\ \frac{ml}{I(M+m)+Mml^2} \end{bmatrix} u$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \Phi \\ \dot{\Phi} \end{bmatrix}$$

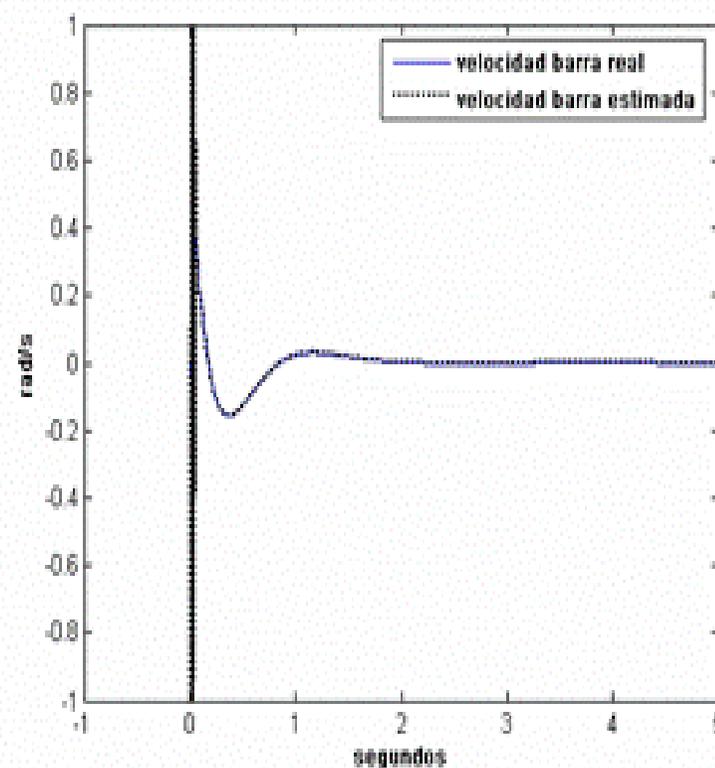
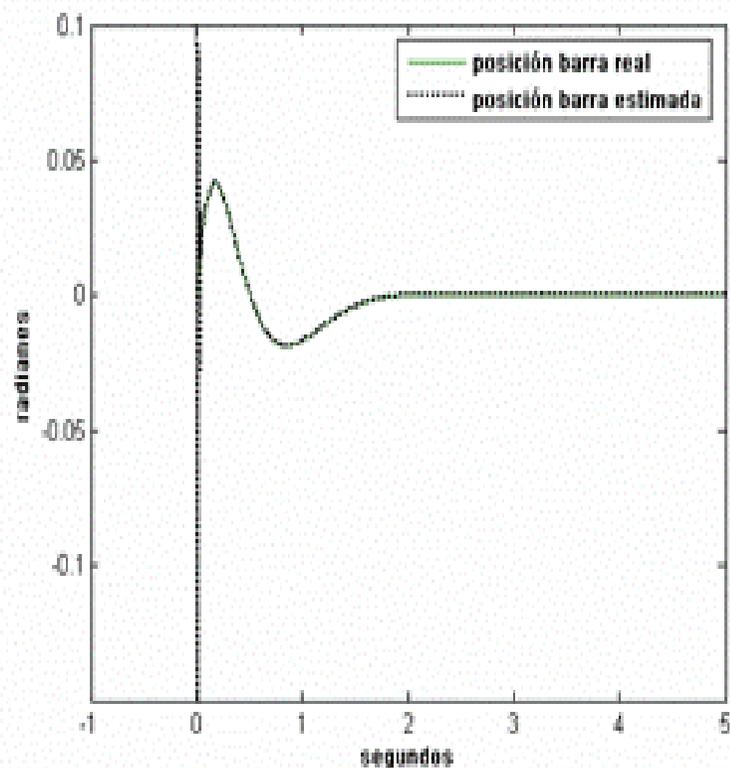


- ❑ Sistema inestable
- ❑ Paso 1: estabilización mediante acción de control
- ❑ Paso 2: Vector de ganancias del observador de estados.
- ❑ R: posición donde se quiere mantener el péndulo
- ❑  $K_c$  es un vector de ganancias que tiene por objetivo estabilizar al proceso

- ❑ Observador inicializado arbitrariamente
- ❑ Correcta estimación de las variables de estado: posición y velocidad de la base, posición y velocidad angular de la barra.



- Posición y velocidad angular de la barra.





# Conclusiones

- ❑ Se presentaron conceptos relacionados con el diseño y aplicaciones de los sensores virtuales.
- ❑ Digestión anaeróbica:
  - Biomasa y Sustrato fueron estimados de manera adecuada
  - Alternativa interesante para obtener de manera inmediata y con bajos costos los valores de dichas variables
  - Problemáticas a resolver:
    - Minimizar la sensibilidad en la estimación del sustrato ante cambios bruscos en las condiciones de operación
- ❑ Péndulo invertido:
  - Alternativa eficaz para estimar las cuatro variables de estado del sistema.
  - Error de estimación mínimo,
  - Problemática a resolver:
    - Disminuir este error mediante aceleración de la dinámica del observador

□ Gracias por su atención

[salvador.carlos@cinvestav.edu.mx](mailto:salvador.carlos@cinvestav.edu.mx)  
Carr. Saltillo-Monterrey km 13.5  
Tel: 844 438 9612