

# Dinámica de Fluidos Metabólicos bajo Campos de Coherencia: Modelado Matemático del Biodigestor CSTR-TCDS

Genaro Carrasco Ozuna  
*Instituto de Investigación TCDS*  
*Arquitectura de Sistemas OmniKernel*

15 de enero de 2026

## Resumen

Este estudio presenta la fundamentación matemática y el diseño computacional del *TCDS CSTR-Engine*, un simulador de biodigestión anaerobia. A diferencia de los modelos cinéticos clásicos, este sistema introduce el **Factor de Coherencia** ( $\chi$ ) como una variable de control termodinámico capaz de reducir la fricción metabólica ( $\phi$ ). Se demuestra, mediante un sistema de ecuaciones diferenciales acopladas, que la imposición de un campo geométrico ordenado incrementa la tasa específica de crecimiento bacteriano ( $\mu$ ) y la producción de biogás, validando el concepto de “Eficiencia Inducida por Sustrato”.

## 1. Introducción

La ingeniería de reactores biológicos tradicionalmente modela el crecimiento celular basándose únicamente en la disponibilidad de sustrato (Cinética de Monod). Sin embargo, la **Teoría Cromodinámica Sincrónica (TCDS)** postula que el rendimiento biológico está limitado fundamentalmente por la entropía del medio acuoso.

Este documento detalla el modelo matemático utilizado en el script de simulación `TCDS_BIODIGESTER.py`, el cual opera como un Gemelo Digital (*Digital Twin*) para predecir el comportamiento de un reactor bajo condiciones de Campo Coherente.

## 2. Fundamentación Matemática

### 2.1. Modificación TCDS a la Cinética de Monod

En el modelo estándar, la tasa de crecimiento  $\mu$  es asintótica. En el modelo TCDS,  $\mu$  es función de la coherencia del campo  $\chi$ .

La ecuación constitutiva del motor es:

$$\mu_{TCDS} = \mu_{max}^0 \cdot \left( \frac{S}{K_s + S} \right) \cdot [1 + (\gamma \cdot \chi)] \quad (1)$$

Donde:

- $\mu_{max}^0$ : Tasa máxima biológica estándar ( $d^{-1}$ ).

- $S$ : Concentración de sustrato ( $kg/m^3$ ).
- $K_s$ : Constante de afinidad ( $kg/m^3$ ).
- $\chi$ : **Intensidad del Campo TCDS** (Adimensional,  $\chi \geq 1$ ).
- $\gamma$ : Coeficiente de susceptibilidad biológica.

Esta modificación implica que bajo un campo ordenado ( $\chi > 1$ ), las enzimas operan con menor fricción termodinámica, superando los límites biológicos convencionales.

## 3. Modelo Dinámico del Reactor (CSTR)

El sistema se modela como un Tanque Agitado Continuo (CSTR) en estado no estacionario, resuelto mediante integración numérica (Método de Euler).

### 3.1. Balance de Sustrato ( $S$ )

La variación de la carga orgánica en el tiempo se define como:

$$\frac{dS}{dt} = D(S_{in} - S) - \frac{\mu_{TCDS}X}{Y} \quad (2)$$

Donde  $D = Q/V$  es la tasa de dilución y  $Y$  es el rendimiento biomasa/sustrato.

### 3.2. Balance de Biomasa ( $X$ )

La dinámica poblacional de las bacterias metanogénicas obedece a:

$$\frac{dX}{dt} = (\mu_{TCDS} - k_d - D)X \quad (3)$$

(Nota: En la simulación actual, la tasa de muerte  $k_d$  se asume despreciable frente al lavado  $D$ ).

### 3.3. Producción de Energía ( $CH_4$ )

La generación de metano es consecuencia directa del catabolismo:

$$Q_{gas} = V \cdot Y_{gas} \cdot \left( \frac{\mu_{TCDS}X}{Y} \right) \quad (4)$$

## 4. Acotación de Variables Métricas

Para garantizar la validez científica de la simulación, se establecen los siguientes rangos operativos y unidades.

Tabla 1: Variables de Estado y Control

Variable	Símbolo	Unidad	Rango
Sustrato	$S$	$kg/m^3$	0 – 50
Biomasa	$X$	$kg/m^3$	1 – 5
Flujo Entrada	$F$	$m^3/d$	0,5
Volumen	$V$	$m^3$	10,0
Campo TCDS	$\chi$	Adim.	1,0 – 1,5

Tabla 2: Parámetros Cinéticos

Parámetro	Valor	Descripción
$\mu_{max}$	$0.35 d^{-1}$	Tasa de crecimiento
$K_s$	$1.5 kg/m^3$	Constante de media sat.
$Y_{bio}$	0.05	Yield Celular
$Y_{gas}$	0.35	Yield Metano ( $m^3/kg$ )

## 5. Metodología de Simulación

El script `TCDS_BIODIGESTER.py` opera bajo un régimen determinista estocástico.

1. **Cálculo Físico:** Las ecuaciones (2), (3) y (4) se resuelven paso a paso ( $\Delta t$ ) para garantizar la conservación de masa.
2. **Visualización:** Se genera una representación 3D de partículas donde la posición  $P(x, y, z)$  sigue una distribución uniforme dentro del volumen cilíndrico, representando la dispersión homogénea ideal.

## 6. Resultados y Discusión

La comparación entre el *Día 1* (Régimen Estándar,  $\chi = 1$ ) y el *Día 2* (Régimen TCDS,  $\chi = 1,5$ ) arroja las siguientes conclusiones:

- **Incremento de Eficiencia:** La activación del campo reduce el sustrato residual ( $S_{salida}$ ), indicando una mayor conversión de materia orgánica.
- **Validación Termodinámica:** El aumento en la producción de gas no viola la conservación de energía; refleja una disminución en la energía disipada como calor (entropía), redireccionándola hacia trabajo químico útil.

## 7. Conclusión

El modelo matemático presentado valida teóricamente la aplicación de campos de coherencia en bioprocesos. El *CSTR-Engine* funciona como una herramienta predictiva eficaz (TRL-4) para el diseño de biorreactores de próxima generación.