

- IndPenSim: Un Modelo de Simulación Industrial para la Fermentación de Penicilina y su Potencial en Inteligencia Artificial
- 1. IndPenSim: Un modelo de fermentación industrial basado en principios matemáticos
 - 1.1 Propósito del modelo
 - 1.2 Estructura del modelo
 - 1.3 Fases del proceso de fermentación en IndPenSim
 - 1. Inicio del proceso
 - 2. Fase de crecimiento exponencial
 - 3. Fase de producción de penicilina
 - 4. Fase de mantenimiento y cosecha
- 2. Aplicación de Inteligencia Artificial en IndPenSim
 - 2.1 Implementación de redes neuronales recurrentes (RNNs) en la fermentación industrial
 - 2.1.1 Predicción en tiempo real de variables críticas
 - 2.1.2 Detección temprana de fallos en la fermentación
 - 2.1.3 Control adaptativo del proceso
 - 2.2 Comparación entre control tradicional y control basado en RNN
- 3. Conclusión y futuro de la investigación

IndPenSim: Un Modelo de Simulación Industrial para la Fermentación de Penicilina y su Potencial en Inteligencia Artificial

El modelo **IndPenSim** es una simulación de fermentación industrial de **Penicillium chrysogenum**, desarrollada en MATLAB, que permite investigar el **crecimiento celular, producción de penicilina y estrategias de control avanzado**. Su desarrollo ha permitido evaluar **tecnologías analíticas de procesos (PAT)** y algoritmos de detección de fallos mediante datos obtenidos de biorreactores de **100,000 litros**.

Para iniciar una investigación seria sobre **cómo aplicar redes neuronales recurrentes (RNNs) en este tipo de fermentaciones**, es fundamental entender el **diseño del sistema, los métodos de control existentes y los datos que se pueden extraer**. A continuación, se detallan los aspectos más relevantes de IndPenSim y

cómo puede aprovecharse para avanzar en investigaciones en inteligencia artificial aplicada a bioprocesos.

1. IndPenSim: Un modelo de fermentación industrial basado en principios matemáticos

1.1 Propósito del modelo

IndPenSim fue desarrollado para:

1. **Simular la producción industrial de penicilina** en condiciones realistas, utilizando datos de un biorreactor de **100,000 L**.
 2. **Evaluar estrategias de control de procesos avanzadas**, incluyendo el uso de sensores espectroscópicos (*Raman spectroscopy*).
 3. **Optimizar la detección de fallos** a lo largo de un año de producción utilizando métodos de análisis de datos e inteligencia artificial.
 4. **Servir como plataforma de investigación** para desarrollar e implementar técnicas de aprendizaje automático para mejorar el control de fermentaciones.
-

1.2 Estructura del modelo

IndPenSim **integra diferentes modelos matemáticos** para representar la fermentación de penicilina:

- **Modelo de Crecimiento Celular:** Considera el crecimiento, metabolismo y degeneración de la biomasa en el biorreactor.
- **Modelo de Producción de Penicilina:** Relaciona la conversión de sustrato en penicilina bajo condiciones de oxígeno limitado.
- **Modelo de Control de Procesos:** Usa **controladores PID** y tecnologías PAT para ajustar parámetros clave como pH, temperatura y oxígeno disuelto.
- **Modelo de Espectroscopía Raman:** Simula un sensor de espectroscopía Raman que mide en tiempo real la biomasa, el sustrato y la concentración de

penicilina.

Cada uno de estos modelos permite simular **diferentes estrategias de control y monitoreo**, lo que hace que IndPenSim sea ideal para aplicar **inteligencia artificial y redes neuronales** en bioprocesos.

1.3 Fases del proceso de fermentación en IndPenSim

La simulación sigue un esquema **fed-batch**, donde se controla la adición de sustrato para **maximizar la producción**:

1. Inicio del proceso

- Se inocula el biorreactor con *Penicillium chrysogenum*.
- Se introducen **sustrato, ácido fenilacético (PAA) y fuentes de nitrógeno**.

2. Fase de crecimiento exponencial

- Se optimiza la alimentación de **glucosa y aceite de soja** para maximizar el crecimiento celular.
- Se monitorean variables como **oxígeno disuelto (DO₂), temperatura y pH**.

3. Fase de producción de penicilina

- Se reducen los niveles de **sustrato** para inducir la producción de penicilina.
- Se ajusta la alimentación de **PAA**, ya que es el precursor de la penicilina.

4. Fase de mantenimiento y cosecha

- Se mantienen las condiciones para evitar **la degradación del producto**.
 - La penicilina se cosecha y el biorreactor se limpia para el siguiente ciclo.
-

2. Aplicación de Inteligencia Artificial en IndPenSim

El modelo IndPenSim genera una gran cantidad de datos, lo que permite el uso de técnicas de **aprendizaje automático y redes neuronales** para mejorar la **predicción, detección de fallos y optimización de procesos**.

2.1 Implementación de redes neuronales recurrentes (RNNs) en la fermentación industrial

Las **redes neuronales recurrentes (RNNs)** pueden ser usadas en IndPenSim para **mejorar el control y la optimización del proceso de fermentación**. Las áreas clave donde pueden aplicarse incluyen:

2.1.1 Predicción en tiempo real de variables críticas

Las RNNs pueden ser entrenadas con datos históricos de fermentaciones para **predecir valores futuros de variables clave**, como:

- **Concentración de penicilina** en el medio de cultivo.
- **Oxígeno disuelto (DO₂)** y su impacto en el metabolismo celular.
- **Crecimiento de biomasa** basado en espectros Raman.

🔴 **Caso de uso:** Implementar una **Long Short-Term Memory (LSTM)** para predecir **concentraciones de penicilina** basándose en datos de **temperatura, pH y oxígeno disuelto**.

2.1.2 Detección temprana de fallos en la fermentación

Las RNNs pueden identificar patrones anómalos en:

- **Fluctuaciones en la alimentación de sustrato.**
- **Desviaciones en sensores de pH y temperatura.**
- **Datos espectroscópicos Raman inusuales.**

📌 **Caso de uso:** Usar una **Gated Recurrent Unit (GRU)** para predecir fallos en el **sistema de aireación**, permitiendo **acciones correctivas antes de que se vea afectada la producción**.

2.1.3 Control adaptativo del proceso

Las RNNs pueden ser usadas en **aprendizaje por refuerzo** para **ajustar automáticamente los parámetros de control**, como:

- **Tasa de alimentación de sustrato** para maximizar la producción.
- **Regulación del pH** basada en la predicción de fluctuaciones futuras.
- **Optimización del tiempo de cosecha** en función del rendimiento del lote.

📌 **Caso de uso:** Un sistema basado en RNN podría aprender a **ajustar dinámicamente la alimentación de ácido fenilacético (PAA)** en función de la producción de penicilina.

2.2 Comparación entre control tradicional y control basado en RNN

Característica	Control tradicional (PID)	Control basado en RNN
Adaptabilidad	Baja (requiere ajuste manual)	Alta (se ajusta dinámicamente)
Manejo de ruido	Sensible a mediciones inexactas	Puede aprender a filtrar ruido
Capacidad de predicción	No predictivo	Predice valores futuros


Característica	Control tradicional (PID)	Control basado en RNN
Eficiencia energética	No optimizada	Puede reducir consumo energético


Esto muestra que las **redes neuronales recurrentes (RNNs)** pueden mejorar **significativamente la eficiencia del proceso**, permitiendo que **IndPenSim** evolucione hacia un sistema autónomo de fermentación.

3. Conclusión y futuro de la investigación

IndPenSim es una plataforma de simulación **altamente avanzada**, ideal para probar **estrategias de control inteligente** en fermentaciones industriales. El uso de **redes neuronales recurrentes (RNNs)** puede mejorar la **predicción, detección de fallos y optimización de procesos**, permitiendo:

- **Mayor estabilidad en la producción** de penicilina.
- **Menos consumo energético y de materias primas.**
- **Automatización inteligente del control del proceso.**

 **Línea de investigación recomendada:** Implementar una arquitectura híbrida combinando **modelos físicos de IndPenSim con redes neuronales recurrentes**, creando un **gemelo digital inteligente** para la fermentación industrial.

 **Impacto esperado:** Desarrollo de **biorreactores autónomos con control basado en IA**, optimizando la **industria farmacéutica y biotecnológica**.