



## **PRÁCTICA 3: VENSIM**

Teoría de sistemas

Universidad rey Juan Carlos

Pablo Casals Higuera

## Indice contenidos

1. introducción.....	3
2. ESTADO DEL ARTE .....	3
3. OBJETIVOS DEL TRABAJO .....	3
4. METODOLOGÍA .....	3
5. CONTRIBUCIÓN DEL TRABAJO (MODELADO) .....	4
6. RESULTADOS Y EVALUACIÓN .....	6
7. CONCLUSIONES .....	7

## Tabla Contenidos

1. [Figura 1: Modelo Vensim](#)
2. [Figura 2: Graph Deposito baterías](#)
3. [Figura 3: Graph Material recuperado](#)

## 1. introducción

El trabajo actual examina un sistema de economía circular que tiene como eje el reciclaje de baterías de litio, elemento fundamental para avanzar hacia la movilidad eléctrica. La logística de almacenamiento y procesamiento no es la única fuente de dificultad en este proceso, sino también su susceptibilidad a factores externos del entorno. La idea es examinar, a través de la Dinámica de Sistemas, cómo tanto las condiciones climáticas como las probabilísticas impactan el flujo de materiales específicamente en Madrid, con el objetivo de comprender la estabilidad del abastecimiento de metales recuperados.

## 2. ESTADO DEL ARTE

La Dinámica de Sistemas es una metodología que se creó en el MIT con Jay Forrester en la década de 1950, y posibilita la modelación de sistemas complejos a través del reconocimiento de estructuras de niveles y flujos, así como de bucles de realimentación. Esta herramienta es esencial para prever comportamientos no lineales en el campo de la gestión de residuos tecnológicos. Investigaciones anteriores han evidenciado que la eficiencia química para recuperar litio y cobalto depende en gran medida de las condiciones termodinámicas del ambiente, lo cual hace necesario contar con un modelo que combine variables operativas y físicas.

## 3. OBJETIVOS DEL TRABAJO

El objetivo general es desarrollar un modelo de Dinámica de Sistemas que represente el proceso de recuperación de metales en una planta de tratamiento de residuos en Madrid. Y en lo específico relacionado a la asignatura son varios: Modelar un sistema de dos niveles jerárquicos (Deposito y Material recuperado), Cuantificar el impacto de las fugas térmicas y las condiciones climáticas (temperaturas  $> 30^{\circ}\text{C}$ ) en la eficiencia del sistema y evaluar la capacidad de respuesta de la planta ante diferentes volúmenes de entrada de residuos

## 4. METODOLOGÍA

Para la elaboración de este modelo se ha seguido el procedimiento estándar de creación de modelos de simulación. El primer paso era la conceptualización que es la definición de la frontera del sistema (planta de reciclaje) y sus componentes

principales, el segundo era el Diagrama Causal (Sinérgico) que es la identificación de las relaciones de influencia (+) y (-) entre variables. El tercero, el diagrama de Forrester que es la Construcción del modelo de flujos y niveles en el software Vensim. Y por último la formulación matemática, Implementando las ecuaciones diferenciales e instrucciones lógicas (IF THEN ELSE) y la validación y simulación del escenario en vensim.

## 5. CONTRIBUCIÓN DEL TRABAJO (MODELADO)

**Enunciado del ejercicio:** Una planta de tratamiento de residuos tecnológicos en el sur de Madrid recibe mensualmente entre 5.000 y 12.000 kg de baterías de litio usadas procedentes de puntos limpios. Estas baterías se almacenan en un Depósito baterías: Debido a la manipulación y el estado de descarga, entre el 2% y el 5% de las baterías almacenadas sufren fugas térmicas, quedando totalmente inservibles y siendo enviadas directamente a una planta de tratamiento de residuos peligrosos externa. La planta procesa mensualmente para su desmantelamiento entre el 60% y el 85% del inventario disponible en el depósito.

Tras el proceso de trituración y tratamiento químico, las baterías procesadas pasan a un segundo estado llamado Material Recuperado en este proceso de transformación, se logra extraer de forma efectiva entre el 70% y el 90% del peso en metales valiosos (litio, cobalto, níquel). El resto se pierde como residuo inerte. Existe una variable ambiental: si la temperatura de la planta supera los 30°C (lo cual ocurre con una probabilidad del 15% en Madrid), la eficiencia química baja y las pérdidas de material aumentan un 4% adicional. Finalmente, la planta vende a fabricantes de coches eléctricos entre el 90% y el 95% del material recuperado acumulado cada mes.

El sistema se ha estructurado en dos niveles principales interconectados:

Nivel 1: Depósito de Recepción

Entrada: Entrada baterías (Valores entre 5.000 y 12.000 kg/mes).

Salidas: Pérdida/Fugas (2-5% del stock) y Procesamiento (60-85% del stock).

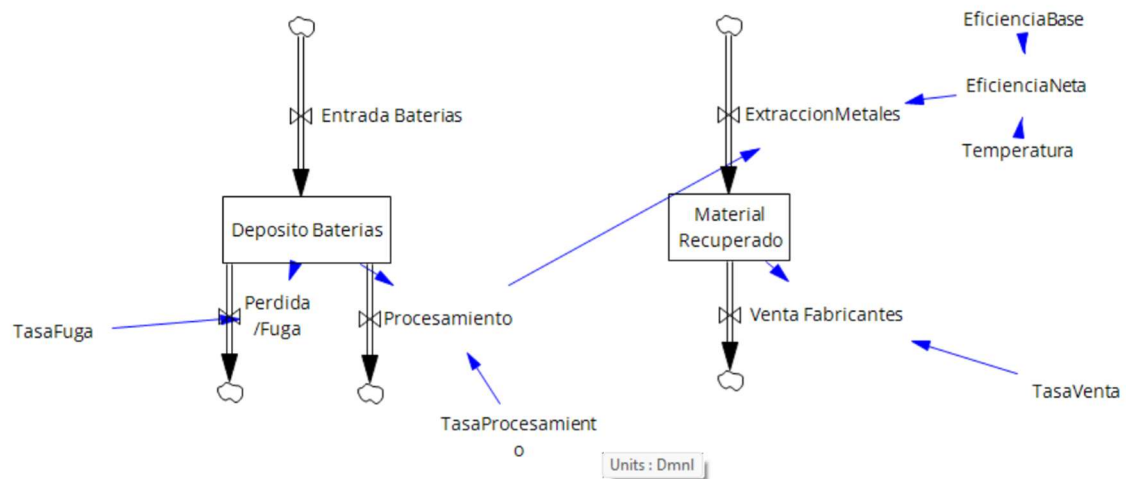
Nivel 2: Material Recuperado

Entrada: ExtraccionMetales (Dependiente de la eficiencia química y el flujo de procesamiento).

Salida: Venta Fabricantes (90-95% del material acumulado).

Lógica de Control (Variable Ambiental): Se ha implementado una variable auxiliar de temperatura que, al superar los 30°C (probabilidad del 15%), reduce la Eficiencia en un 4% fijo, modelando así el impacto real del clima en la planta.

Figura 1



Modelo Vensim

### Modelo matemático:

Entrada baterías = 8500

Deposito baterías = Entrada baterías – Fuga – Procesamiento

Tasa Fuga = 0,035

Fuga = Deposito baterías \* Tasa fuga

Tasa Procesamiento = 0,0725

Procesamiento = Deposito baterías \* Tasa procesamiento

extracción metales = Procesamiento\*Eficiencia Neta

Eficiencia base = 0,8

Temperatura = 32

Eficiencia neta = IF THEN ELSE (Temperatura>30, Eficiencia Base- 0.04 , Eficiencia Base )

Material recuperado = ExtraccionMetales-Venta Fabricantes

Venta fabricantes = Material Recuperado\*Tasa Venta

Tasa venta = 0,925

## 6. RESULTADOS Y EVALUACIÓN

Tras ejecutar la simulación en Vensim, se observan los siguientes comportamientos:

Estabilidad del Stock: Con una entrada media de 8.500 kg, el Deposito Baterias tiende al equilibrio, siempre que la tasa de procesamiento supere el 70%.

Figura 2

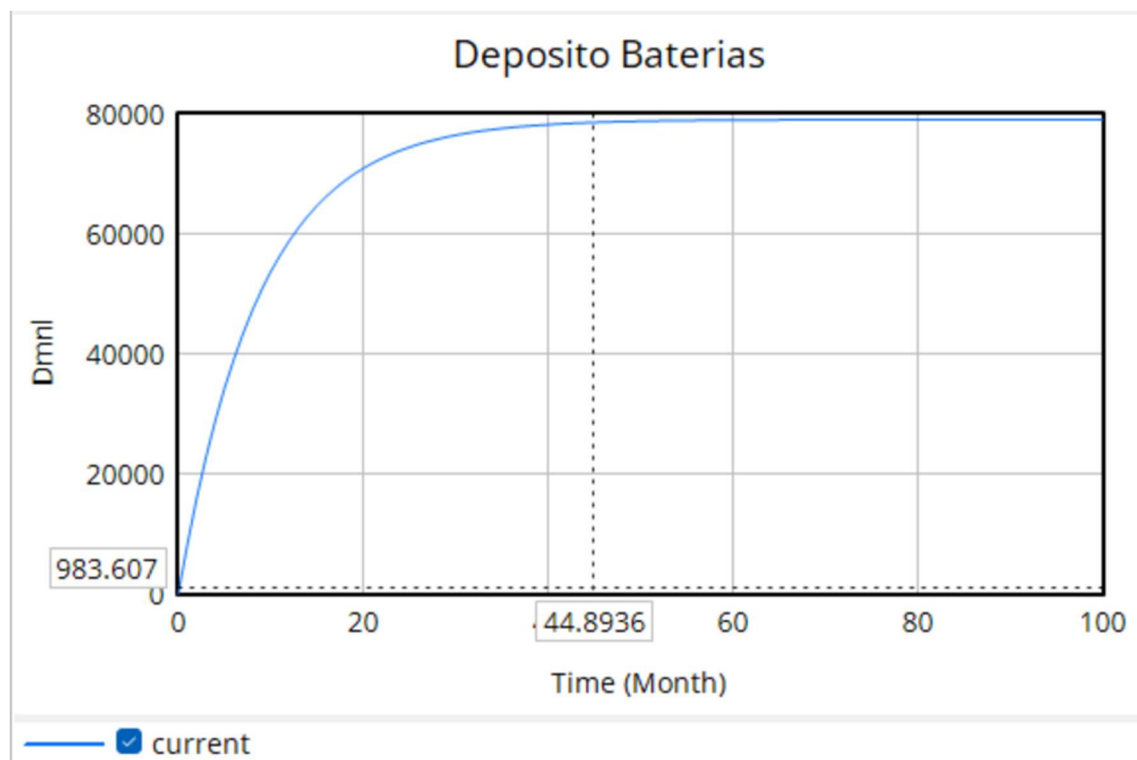
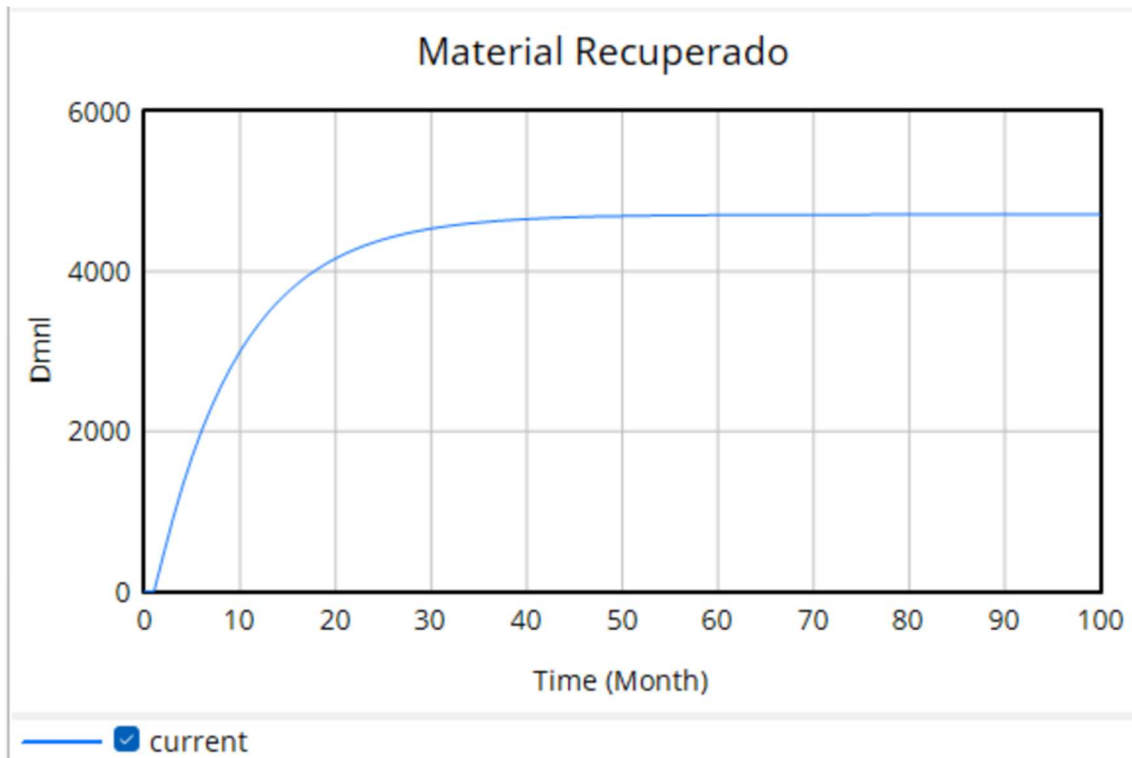


Figura 3



**Impacto Climático:** En los meses de alta temperatura, se observa un descenso pronunciado en el acumulado de Material Recuperado. La pérdida del 4% de eficiencia se traduce en una reducción neta de aproximadamente 200-300 kg de metal por mes de calor.

**Toma de Decisiones:** El modelo sugiere que para mantener las cuotas de venta durante el verano, la planta debe incrementar su capacidad de procesamiento un 10% adicional para compensar la caída en la eficiencia química.

## 7. CONCLUSIONES

Se ha cumplido el objetivo de modelar un sistema multinivel para el reciclaje de baterías. La simulación demuestra que el sistema es altamente sensible a las pérdidas iniciales por fugas térmicas, lo que requiere protocolos de almacenamiento más estrictos, la temperatura ambiental en Madrid es un factor crítico que debe integrarse en la planificación financiera de la empresa, ya que afecta directamente al producto final vendible la Dinámica de Sistemas permite anticipar cuellos de botella en la fase de "Material Recuperado" antes de que afecten a los compromisos de entrega con los fabricantes de coches eléctricos.

## 8. Bibliografía

- Aracil, J., y Gordillo, F. (1997). *Dinámica de sistemas*. Alianza Editorial.
- Bertalanffy, L. (1989). *Teoría general de los sistemas: fundamentos, desarrollo, aplicaciones* (7ª reimpr.). Fondo de Cultura Económica.
- Cano, V. (2020). *Análisis de la economía circular en el reciclaje de baterías de ion-litio* [Trabajo de Fin de Grado, Universidad Rey Juan Carlos]. Archivo digital URJC.
- Forrester, J. W. (1999). *Industrial Dynamics*. Pegasus Communications.
- García, J. M. (2017). *Teoría y ejercicios prácticos de Dinámica de Sistemas*. Juan Martín García.
- International Energy Agency. (2022). *The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions*. IEA Publications. <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>
- Meadows, D. H. (2008). *Thinking in Systems: A Primer*. Chelsea Green Publishing.
- Senge, P. M. (2012). *La quinta disciplina: el arte y la práctica de la organización abierta al aprendizaje*. Granica.
- Sterman, J. D. (2000). *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. McGraw-Hill.
- Vensim PLC. (2024). *Vensim documentation: Models and simulation* [Software de simulación]. <https://www.vensim.com/documentation/>