

# **Termovalorización de desechos municipales en reactores químicos**



**Fanny Ingrid Marín Trujillo<sup>a</sup>**

**Luis Ángel Santamaría Padilla<sup>b</sup>**

**Lisette Samarti Rios<sup>a</sup>**

**Sebastián Alexander Andrade Becerra<sup>b</sup>**

**Luis Álvarez-Icaza Longoria<sup>b</sup>**

**Jesús Álvarez Calderón<sup>a</sup>**

<sup>a</sup>**División de Ciencias Básicas e Ingeniería (CBI),  
Universidad Autónoma Metropolitana, Iztapalapa.**

<sup>b</sup>**Instituto de Ingeniería, UNAM**

## Resumen

Se reseña el proceso de termovalorización de desechos agrícolas y municipales para la generación de energía útil en reactores químicos de carbonización y gasificación, con perspectiva que incluye: (i) el contexto nacional e internacional, (ii) la recientemente arrancada planta de termovalorización de la Cd. De México y (ii) el conocimiento asimilado y generado en la investigación en ciencias de la ingeniería de un grupo interdisciplinario de estudiantes y profesores de posgrados en Ingeniería Química de la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM) y en Ingeniería Eléctrica-Control de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

**Palabras claves:** reactores químicos, carbonización, gasificación, dinámica no lineal.

## Abstract

The thermal valorization process of agricultural and municipal waste for the generation of useful energy in carbonization and gasification chemical reactors is reviewed, with a perspective that includes: (i) the national and international context, (ii) the recently started thermal valorization plant in Mexico City, and (ii) the knowledge assimilated and generated in the research in engineering sciences of an interdisciplinary group of students and professors of graduate programs in Chemical Engineering from the Autonomous Metropolitan University (UAM) and in Electrical Engineering-Control from the National Autonomous University of Mexico (UNAM).

**Keywords:** chemical reactors, carbonization, gasification, nonlinear dynamics.

## Introducción

Los retos ambientales, económicos y sociales que enfrenta la sociedad, han motivado el diseño o rediseño de tecnologías para la termovalorización energética de biomasa (desechos agrícolas y municipales). La termovalorización se lleva a cabo en plantas industriales donde la biomasa se transforma en combustible sólido o gaseoso con contenido energético utilizable.

Las plantas termovalorizadoras son de dos tipos: (i) de **carbonización hidrotermal**, donde mediante una reacción química de pirólisis (rompimiento térmico de moléculas) se produce carbón vegetal sólido, denominado hidrocarbón, como combustible y (ii) **de gasificación**, donde mediante reacciones químicas de pirólisis, combustión y reducción, se produce un combustible gaseoso, denominado gas de síntesis, compuesto mayormente por monóxido de carbón, metano e hidrógeno.

En la Figura 1 se muestra el diagrama de una planta termovalorizadora, similar a la que recientemente se ha inaugurado en la Ciudad de México (Boletín CDMX, 2023). Esta planta cuenta con: (i) un reactor de carbonización que convierte la basura orgánica en carbón vegetal que se envía a una carboeléctrica y (ii) un reactor de gasificación que convierte los desechos de poda de árboles y jardinería en gas combustible que se utiliza para calentamiento del reactor de carbonización y generación de energía eléctrica.

Según la Comisión Federal de Electricidad (CFE) (Boletín CFE-BP224/21f publicado el 17 de noviembre de 2021): (i) en México, el 6.87% de la energía se generó a partir de combustibles fósiles (carbón y petróleo), mientras que en China esta cifra fue del



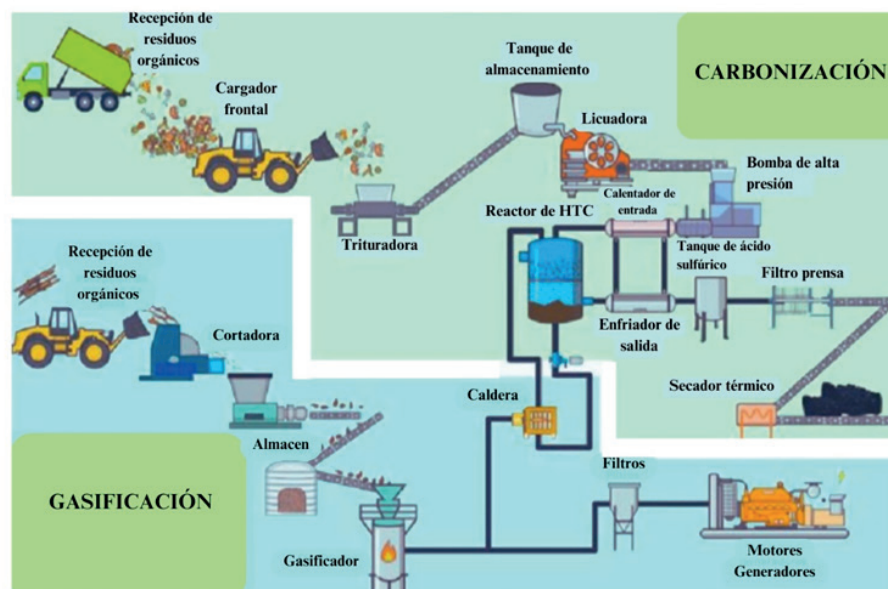


Figura 1. Planta termovalorizadora con unidades de carbonización y gasificación.

84%, (ii) México cuenta con 3 carboeléctricas, en comparación con las 946 de China y (iii) el aprovechamiento eficiente de todas las fuentes de energía contribuye a la transición energética, la reducción de emisiones a la atmósfera y el cumplimiento de acuerdos internacionales. La termovalorización está en el conjunto de alternativas viables para simultáneamente procesar desechos orgánicos generando energía.

Los beneficios son: (i) económicos por el valor *per se* de la energía generada y el ahorro en el tratamiento de desechos, así como por acceso a subsidios nacionales o internacionales tipo “bono verde” y (ii) estratégicos y sociales por la protección del ambiente.

En la última década se ha conformó un grupo de investigación interdisciplinario (ingeniería química y eléctrica-control) con estudiantes y profesores de la División de Ciencias Básicas e Ingeniería (CBI) de la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM) unidad Iztapalapa (I) y el Institu-

to de Ingeniería (II) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). El grupo ha estudiado los reactores de carbonización hidrotermal y de gasificación de manera teórica y experimental.

En este trabajo: (i) se explica el funcionamiento de los reactores de carbonización hidrotermal y gasificación de biomasa, (ii) se discute el papel que el modelado matemático tiene en el valor económico de la tecnología de los reactores y (iii) se muestran algunos resultados obtenidos por el grupo de investigación UAM-UNAM.

### Tipos de reactores químicos

Los procesos químicos industriales (que incluyen a los reactores de termovalorización) son de tipo **lote** o **continuo**. Las operaciones en modo lote y continuo se pueden ejemplificar con la elaboración casera y microindustrial de tortillas, respectivamente. En el caso casero, la harina de maíz húmeda en forma de disco se cuece en un comal por un tiempo determinado, hasta

obtener la tortilla completamente cocida. En el caso microindustrial, por un extremo se alimentan los discos de harina húmeda a un horno de manera continua y mediante una banda transportadora salen las tortillas completamente cocidas en la banda.

En el reactor de termovalorización tipo **lote**, se cargan los materiales, reaccionan durante un tiempo predeterminado y se descarga la mezcla con el producto de interés. Al procedimiento repetitivo de carga, reacción, descarga y limpieza se le denomina producción intermitente en horizonte lote-a-lote. La operación por lote es un transitorio sostenido (siempre en cambio) no tiene punto de equilibrio sino punto terminal. En el reactor **continuo** los reactivos ingresan en la corriente de alimentación, reaccionan en el tanque y se produce una corriente efluente con el producto de interés. La operación en continuo ocurre en la vecindad de un punto de equilibrio. La conversión del reactor lote la determina la duración del lote y la del reactor continuo la determina el tiempo de residencia (el cociente del volumen a flujo de alimentación). Los reactores lote o continuo de termovalorización requieren intercambio de calor para regular la temperatura.

### **Modelado**

Un modelo es una descripción matemática (mediante ecuaciones) del comportamiento de un fenómeno físico en general y un proceso químico en particular. Los hay de dos tipos: los empíricos y los de primeros principios (también denominados *Ab initio*). Los empíricos se construyen correlacionando directamente causas y efectos en base a observaciones o determinaciones experimentales. Los modelos de primeros principios, debidamente validados con datos experimentales: (i) se construyen

en base a leyes fundamentales de conservación de materia y energía, transporte (masa, calor y cantidad de movimiento) y cinética química, (ii) tienen mayor capacidad de descripción-explicación a diferentes escalas y condiciones de operación y (iii) permiten diseños y rediseños de procesos más sistemáticos y eficientes.

El valor de una tecnología industrial depende en buena medida del tipo de modelo que la soporta. En la industria química hay 4 niveles, del 1 al 4, ordenados según su valor tecnológico. El Nivel 1 tiene como modelo una correlación o receta empírica, el Nivel 4 tiene un modelo de primeros principios y los Niveles 2 y 3 tienen modelos con componentes empíricos y de primeros principios. De ahí la importancia de estudiar y entender con modelado a primeros principios el comportamiento de los reactores (de carbonización y gasificación) empleados en la termovalorización de desechos agrícolas y municipales.

El modelado a primeros principios y su aplicación a la asimilación, dominio y mejora de la tecnología, así como para el desarrollo de sistemas de automatización, ha sido tema de investigación por más de una década del equipo interdisciplinario UAM-UNAM, del cual los coautores son parte, a través de tesis de posgrado y difusión abierta de resultados.

### **Dinámica**

La dinámica es una disciplina de las matemáticas que estudia el devenir en equilibrio y tiempo de fenómenos descritos por ecuaciones diferenciales. En el caso de los reactores químicos, se refiere al estudio y análisis de cómo cambian las variables de operación del reactor (como la temperatura, la concentración de reactivos y pro-

ductos, la presión, etc.) con el tiempo en respuesta a diversas condiciones y perturbaciones. Es importante destacar que los reactores químicos son sistemas dinámicos no lineales, lo cual significa que ante cambios pequeños en alguno de sus parámetros o variables de entrada pueden presentar cambios grandes en su comportamiento. Este campo de estudio es crucial para entender y controlar el comportamiento del reactor en diferentes situaciones.

El estado estacionario (EE) o punto de equilibrio de un proceso continuo, es un régimen de operación que no cambia en el tiempo, puede ser único (unicidad) o múltiple (multiplicidad), estable o inestable. Un EE es estable si al recibir perturbaciones externas su comportamiento transitorio regresa al mismo EE, en caso de que se aleje se dice que es inestable. Un ciclo límite (CL) es un régimen estacionario con variación periódica y sostenida, pudiendo ser estable o inestable. El fenómeno de bifurcación es la creación o destrucción de EEs o CLs mediante cambio natural o inducido de algún parámetro del sistema. La multiplicidad y bifurcación son fenómenos altamente no lineales, que ocurren en “la globalidad” y no en la localidad del EE de interés. Dícese que la dinámica es compleja si hay multiplicidad y/o bifurcación.

Los fenómenos de bifurcación y multiplicidad se presentan en sistemas de diversas naturalezas, por ejemplo, detrás de los interruptores (“switches”) biológicos hay bifurcación de reacciones bioquímicas y detrás de los relojes biológicos (circadianos) hay reacciones bioquímicas con CL como en el funcionamiento periódico de la respiración y el corazón de un ser vivo (Figura 2a). Un marcapasos corrige anomalías del corazón. La bifurcación, como su etimología lo indi-

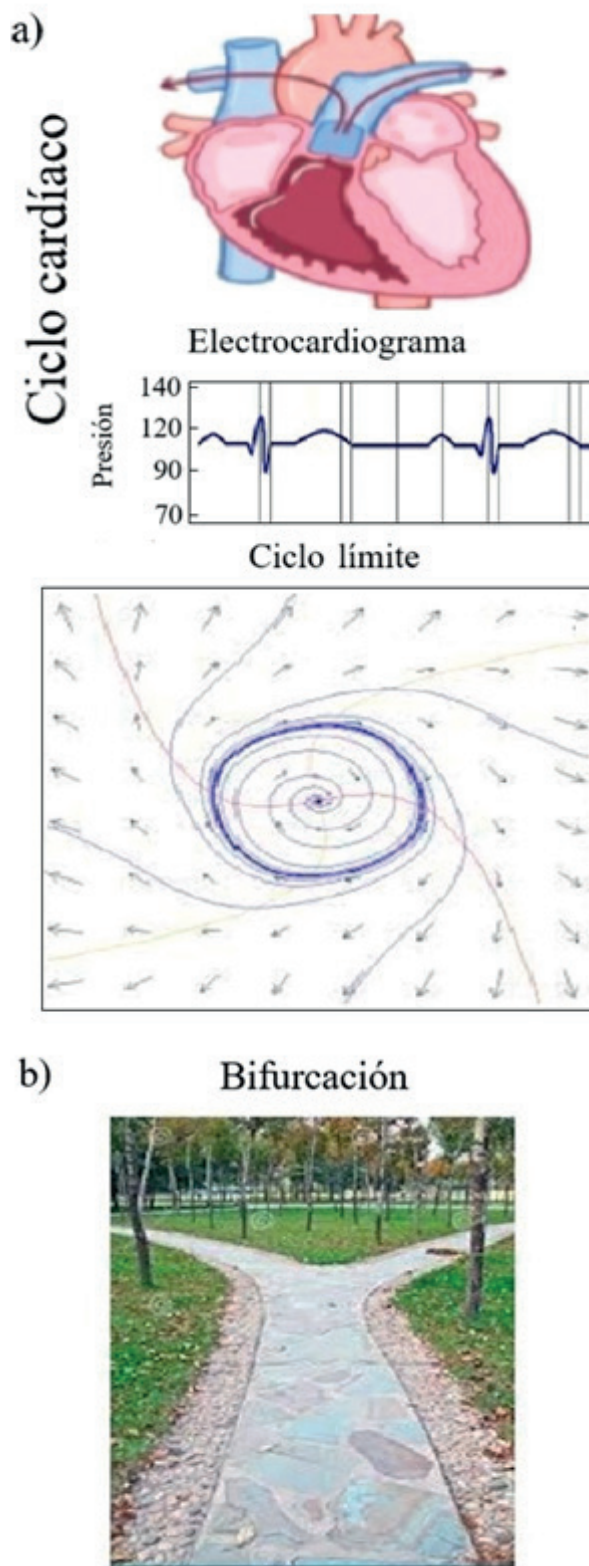


Figura 2. Ciclo límite cardíaco (a) y bifurcación de un camino (b).



ca, significa separación o unión de comportamientos cualitativamente diferentes, por ejemplo, cuando en un camino se llega a un punto y se convierte en dos (Figura 2b), mientras que en ciencia política se le conoce como efecto mariposa (un pequeño cambio en la circunstancia presente produce un gran cambio en el devenir futuro).

De la ingeniería de reactores exotérmicos (así como los de carbonización y gasificación) y la práctica industrial (Morud, J. C., & Skogestad, S. 1998) se sabe que: (i) la operación continua la subyacen fenómenos no lineales perjudiciales y benéficos, para que la operación sea segura, confiable y rentable, como lo son la multiplicidad de EEs y CLs, así como bifurcación y (ii) la operación en lote no tiene EEs y la subyace un estado en devenir sostenido. En las siguientes secciones se darán detalles específicos para los reactores de termovalorización.

### Reactor de carbonización

La carbonización hidrotermal (HTC, por sus siglas en inglés) es un proceso termoquímico mediante el cual se producen componentes ricos en carbono (técnicamente denominado hidrocarbón -HC-) a partir de biomasa residual húmeda. Un ejemplo casero es la carbonización de una tortilla fresca (compuesta de biomasa con moléculas orgánicas grandes y agua) en un comal con flama cuidadosamente regulada para lograr deshidratación (secado) y pirólisis. Otro ejemplo familiar de carbonización de biomasa es la producción de carbón vegetal a partir de leña, ver Figura 3. Pirólisis (del griego “isis” romper, “piros” fuego) es la reacción que, en ausencia de aire y a alta temperatura, fragmenta las moléculas “grandes” (de biomasa) en “pequeñas” (de HC).

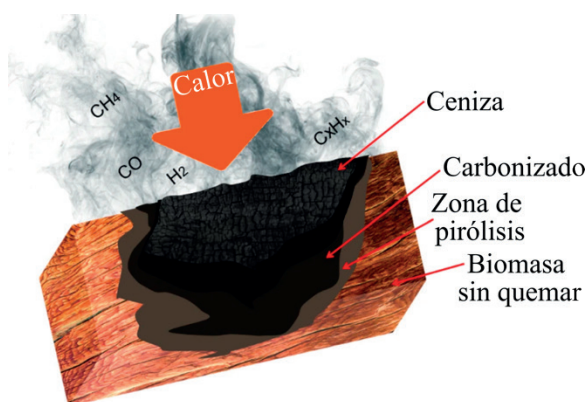


Figura 3. Pirólisis de madera.

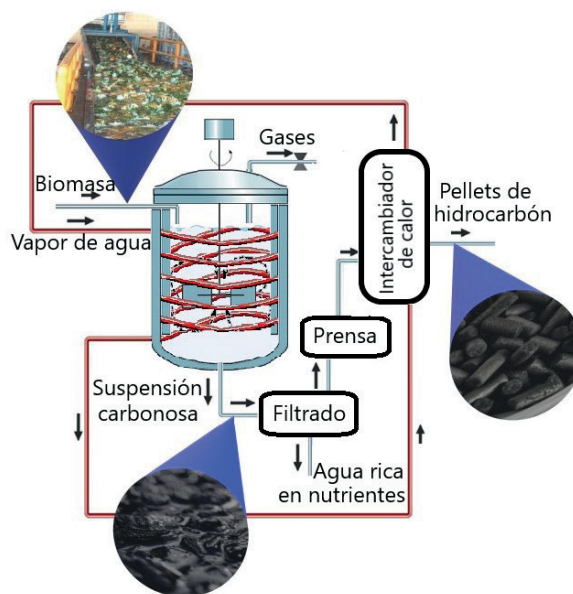


Figura 4. Carbonización en un reactor continuo tipo tanque agitado.

En la Figura 4 se ilustra el proceso de carbonización, en donde la unidad principal es el reactor continuo agitado acoplado a tres unidades de proceso (filtrado, prensado e intercambiador de calor), con la finalidad de obtener pellets de HC a temperatura ambiente. El proceso inicia alimentando la biomasa húmeda por la parte superior del reactor, donde se regula la temperatura de la biomasa dosificando un flujo de vapor que se inyecta con un serpentín, produciendo a lo largo del reactor una suspensión de

partículas de carbón en agua a 200°C. La mezcla efluente se transfiere a una unidad de filtrado para generar una pasta de carbón caliente que se peletiza en una unidad de prensado. Finalmente, los pellets se pasan a un intercambiador de calor para enfriarlos hasta temperatura ambiente.

Como primer paso en el diseño o rediseño de reactores industriales de termovalorización, con tecnología de alto valor agregado (Nivel 4, reseñada anteriormente), mediante un modelo matemático se caracteriza la dinámica no lineal del proceso con la finalidad de identificar una condición de operación automatizada, segura, confiable y productiva.

Muchos se preguntarán: ¿Cómo puede uno caracterizar propiedades de la dinámica no lineales como multiplicidad y bifurcación?

En términos geométricos la respuesta es relativamente simple: utilizando el diagrama de Van Heerden, el diagrama de bifurcación y/o el plano fase.

Por ejemplo, para el reactor que hemos estudiado, en la Figura 5a (denominada diagrama de Van Heerden) se muestra una recta y una curva sigmoide, que representan la extracción y generación de calor del reactor, respectivamente, en régimen estacionario y en función de la temperatura. El número de intersecciones corresponden al número de estados estacionarios (EEs). Un EE es estable sí, en su intersección la pendiente de la tangente a la curva es menor que la pendiente de la recta, es decir, cuando la extracción de calor domina a la generación. Según la Figura 5a el reactor tiene tres EEs: (i) un EE nominal de interés (temperatura intermedia) es inestable y (ii) uno estable e indeseable tipo ignición (alta temperatura) y (iii) uno estable e indeseable tipo extinción (baja

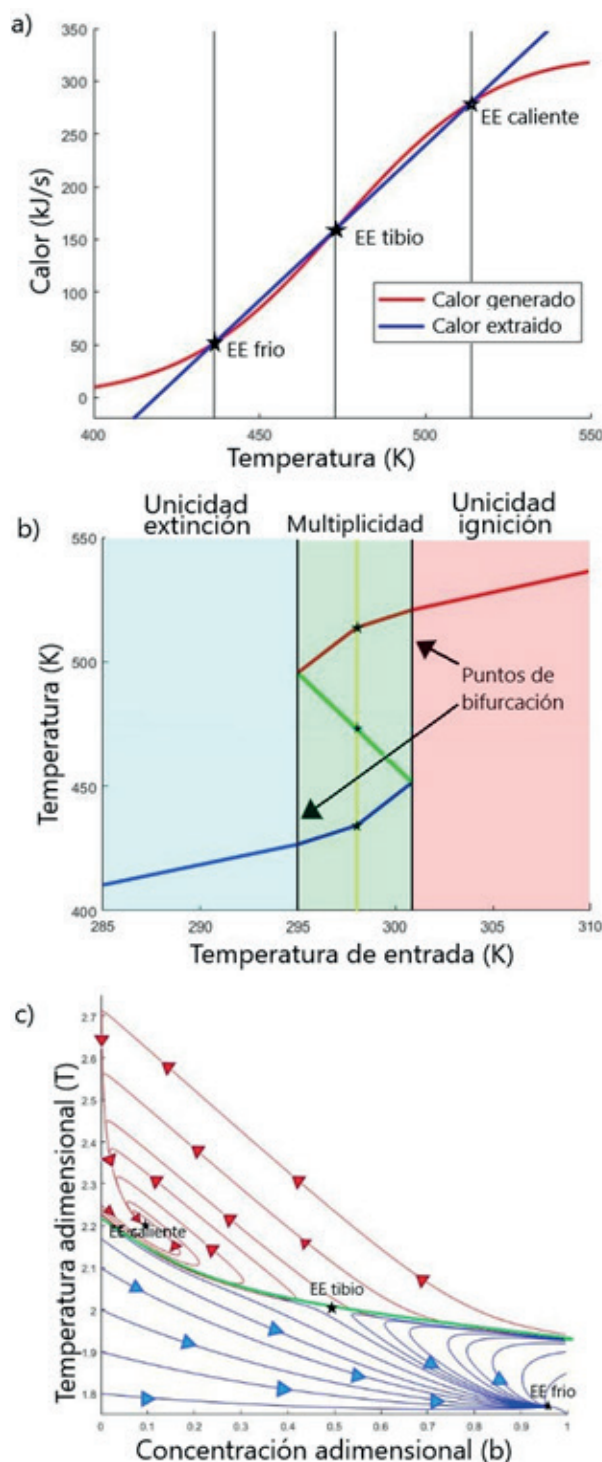


Figura 5. (a) diagrama de Van Heerden, (b) diagrama de bifurcación con respecto a temperatura de entrada y (c) plano fase de un reactor químico.

temperatura). Esto tiene una implicación práctica importante: la operación del reactor en el EE nominal de interés, requiere un control retroalimentado estabilizante.

Para ilustrar el cambio de multiplicidad con el cambio de algún parámetro, es decir el fenómeno de bifurcación, en la Figura 5b se muestra la variación de la temperatura del reactor contra la de la alimentación. De acuerdo con la figura, a cada temperatura de alimentación le pueden corresponder una o varias temperaturas de reactor. Esto determina tres zonas de comportamiento, separadas por dos puntos de bifurcación (creación o destrucción de EEs): (i) zona roja con un EE tipo ignición, (ii) zona verde con tres EEs con la configuración antes descrita (Figura 5a) y (iii) zona azul con un EE tipo extinción. El estado nominal de interés está en la zona verde de multiplicidad.

En la Figura 5c se presenta el plano fase (concentración de biomasa-temperatura) de la operación nominal, mostrando que: (i) el EE de interés es una silla inestable, explicando porque el reactor industrial de la Cd México opera con control retroalimentado estabilizante y (ii) los EEs indeseados de ignición y extinción son atractores tipo foco y nodo, respectivamente.

Como se mencionó anteriormente, en el reactor lote no hay EEs sino un transitorio sostenido en el tiempo del lote. En vez de hablar de la estabilidad de uno o varios EEs, aquí se habla de la estabilidad de una trayectoria en el plano fase. La operación nominal y su seguimiento con control retroalimentado se diseñan conforme a teoría especializada de sistemas dinámicos no autónomos, de tal suerte que la operación sea segura, confiable y rentable

en el sentido de maximización de beneficio económico. Esto incluye componentes de control para seguir una temperatura nominal cambiante en el tiempo y determinar la duración del lote.

La descripción técnica de los diseños de operación nominal y sistema de control trascienden el alcance del presente trabajo. El lector interesado puede consultarlos en la literatura especializada (Andrade et al., 2021). Aquí nos circunscribimos a presentar en la Figura 6 las evoluciones temporales de temperatura, concentración de hidrocarbón y beneficio económico, así como el tiempo de paro que maximiza la rentabilidad del proceso.

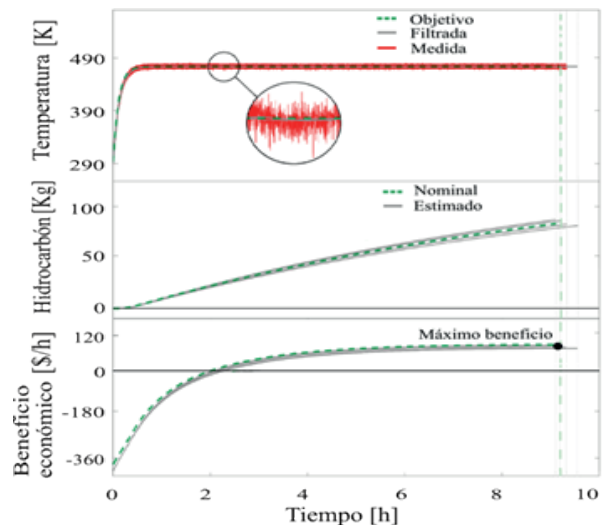


Figura 6. Funcionamiento del reactor lote de carbonización automatizado.

Para finalizar, hemos de mencionar que hay problemas abiertos de investigación en la comunidad científica y tecnológica, entre ellos están los siguientes. Para las operaciones lote y continuo: (i) la extensión al caso multibiomasa con tratamiento cinético basado en teoría de redes de reacción y (ii) el aprovechamiento del modelado en niveles de supervisión y optimi-



zación para actualización de parámetros y puntos o trayectorias de consigna. Para la operación continua: (i) la caracterización de la multiplicidad de la operación en continuo frente a datos experimentales y (ii) el diseño de controladores y estimadores atendiendo a criterios y especificaciones industriales de seguridad, confiabilidad y rentabilidad.

### Reactor de gasificación

La gasificación ocurre secuencialmente en cuatro etapas (ver Figura 7): (i) secado de la biomasa, (ii) pirólisis a alta temperatura, (iii) combustión del carbonizado resultante con producción monóxido de carbono (CO) y H<sub>2</sub>O y (iv) reducción con producción del gas de síntesis.

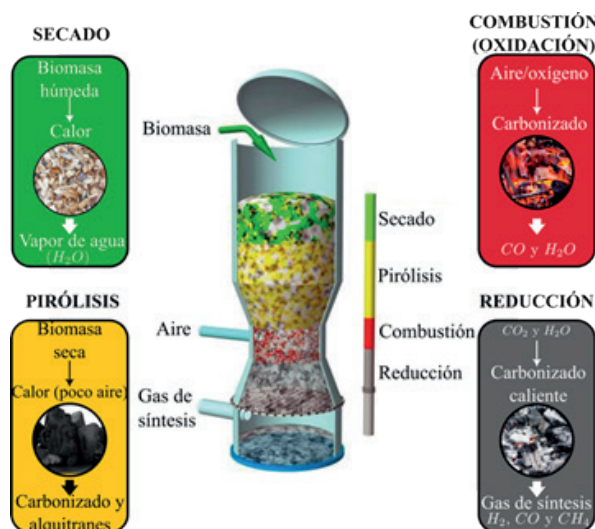


Figura 7. Etapas del proceso de gasificación y reactor tubular de gasificación.

Una situación cotidiana para ejemplificar el proceso de gasificación es la siguiente: imaginemos que estamos asando carne a la parrilla. Cuando se coloca la carne sobre el fuego, el calor comienza a quemar la grasa y los jugos de la carne, generando humo y llamas. Este proceso es similar al de la gasificación de biomasa: así como el

calor en la parrilla provoca que la grasa se descomponga en humo y vapor, en la gasificación, el calor aplicado a la biomasa (como madera o restos vegetales) hace que se descomponga y libere gases combustibles. Al final, tanto en la carne asada como en la gasificación, se produce energía: en el primer caso, en forma de calor y en el segundo en forma de gases que pueden ser utilizados como combustible.

Los informes experimentales y de modelado, disponibles en la literatura abierta (aunque gran parte es confidencial) sobre reactores de gasificación revelan lo siguiente: (i) inconsistencias en la cinética de las reacciones superficiales, y (ii) la existencia de múltiples EEs estables, incluyendo uno denominado “de rejilla”, que es estable pero distinto el nominal. Además, se ha establecido formalmente que un reactor piloto comercial es triestable (con tres EEs estables y dos inestables).

El grupo de trabajo UAM-UNAM desarrolló una metodología para caracterizar la multiplicidad y las bifurcaciones en reactores de gasificación (Santamaria-Padilla et al., 2022). Además, se mejoró la escalabilidad al: (i) proponer un nuevo modelo cinético para las reacciones superficiales en reactores de gasificación de carbón (Sarmati, 2020) y de biomasa (Marín et al., 2023) y (ii) corregir la estequiometría de las reacciones de pirólisis primaria y secundaria (Marín et al., 2023).

En la Figura 8 se presenta la dependencia de la temperatura en estado estacionario contra la dosificación de flujo de aire, mostrando que: (i) el punto de operación (●) está en el EE de interés (el de máxima conversión), es robustamente estable (puede resistir perturbaciones grandes en

el flujo de aire) y está acompañado por 2 EEs estables (de intermedia y nula conversión) y 2 EEs inestables (de alta y baja conversión), (ii) para flujo bajo sólo posee 1 EE estable (zona roja), cuando se va elevando el flujo de aire tiene 3 EEs (zona amarilla con 2 estables y 1 inestable) y 5 EEs (zona verde con 3 estables y 2 inestables), mientras que para flujos mayores vuelve a tener 3 EEs (zona azul con 2 estables y 1 inestable) y (iii) posee 3 puntos de bifurcación (\*), en los cuales se crean o destruyen EEs al incrementar o disminuir el flujo de aire.

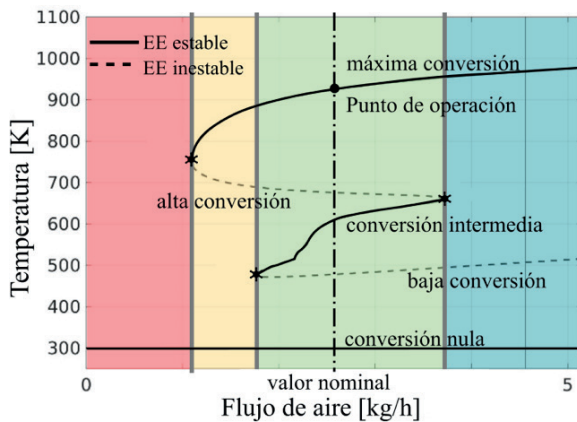


Figura 8. Multiplicidad del reactor tubular de gasificación Imbert en función del flujo de aire.

## Conclusiones

En este trabajo se reseñaron el funcionamiento y modelado de reactores químicos de termovalorización de desechos orgánicos municipales mediante carbonización y gasificación. El objetivo de estos reactores es mitigar el daño ambiental asociado a la generación de desechos orgánicos mediante la conversión de los desechos en combustibles útiles y menos contaminantes.

El material combina el estado del arte en la materia con actividad de investigación de un grupo interdisciplinario (Ing. química y eléctrica-control) e interinstitucional

(UAM-UNAM) formado por estudiantes y profesores, en la vertiente en ciencias de la ingeniería y en el marco de una colaboración científico-tecnológica auspiciado por el gobierno de la Ciudad de México y la Secretaría de Energía.

Como características y resultados relevantes podemos mencionar que los reactores de termovalorización: (i) son una alternativa interesante para la sustentabilidad y el cuidado del ambiente y (ii) exhiben comportamientos altamente no lineales, que desde el punto de vista científico y tecnológico son muy interesantes y retadores para el diseño de la operación segura, confiable y eficiente de los reactores en particular y de los procesos químicos en general.

Los casos de estudio abordados muestran que: (i) el reactor continuo de carbonización tiene tres EEs y su operación requiere un sistema de control, (ii) el reactor continuo de gasificación tiene cinco EEs y aunque puede operar sin control, es recomendable usar un controlador y (iii) el reactor lote de carbonización no tienen EEs sino un transitorio cuyo seguimiento y paro requiere un sistema especializado de control.

Los autores intentaron reflejar una característica de la ingeniería moderna: la ciencia se ocupa de entender los fenómenos naturales, la ingeniería se ocupa de resolver problemas del sector productivo y a mayor entendimiento científico mejores soluciones de ingeniería.

## Referencias

Andrade S., Álvarez J., Álvarez-Icaza, L., y Samarti L., Robust estimation and control of a batch Hydrothermal Carbonization reactor. Memorias Del Congreso Nacional de Control Automático, 4, pp. 166–171, 2021.

Boletín 167/2023 CDMX. Reconoce EUA planta de carbonización hidrotermal de la CDMX como ejemplo mundial de innovación en favor del medio ambiente. 29 marzo del 2023. (<https://acortar.link/AFLkOs>).

Boletín de prensa de la CFE-BP-224/21f, 17 de noviembre del 2021. (<https://goo.su/w5sDA4d>).

Marín I., Álvarez J., Santamaría-Padilla L. y Álvarez-Icaza L. Modelado de la cinética del reactor de gasificación de biomasa, Memorias del Congreso Internacional de Energía de la Academia Mexicana de Energía. (18-22 septiembre) Vol 6, pp. 258-269, 2023. <https://amexen.org/esp/MEM-CIE-2023.pdf>.

Morud, J. C., & Skogestad, S. Analysis of Instability in an Industrial Ammonia Reactor. *AIChE Journal*, 44(4), 888–895 (1998). <https://doi.org/10.1002/aic.690440414>.

Samarti, L. Modelado de la dinámica no-lineal de reactores tubulares de gasificación de carbón. Tesis de maestría en ciencias. Universidad Autónoma Metropolitana (2020).

Santamaria-Padilla, L., Badillo-Hernández, U., Jesús Álvarez, & Álvarez-Icaza, L. On the nonlinear dynamics of biomass throated tubular gasification reactors. *Computers and Chemical Engineering*, (2022).