

## Low order modeling of a biomass throated gasification reactor

Luis Santamaria-Padilla\*, Luis Canales-Meza\*,  
Jesus Alvarez \*\* and Luis Alvarez-Icaza\*

\* *Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería,  
Ciudad de México, 04510, México*

\*\* *Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, Departamento de  
Ingeniería de Procesos e Hidráulica, Ciudad de México, 09340, México*

---

**Abstract:** As first step towards the consideration of the associated control-estimator design problem, in this study the problem of drawing a low-order finite-dimensional DA model of the bi/tristable OPDE one of a spatially distributed throated biomass gasification reactors is addressed, with focus on the description of the practical steady state (SS) of highest conversion. The reactor is described by 15 nonlinear PDEs, which are numerically solved using finite differences to discretize the spatial domain. The number and placement of nodes along the axial direction of the reactor act as degrees of freedom that must be carefully chosen. In this study, a node location method, initially developed for a different class of reactors, is applied to the throated reactor. It was found that the desired SS can be effectively described by relocating some nodes using the adaptive mesh method, which results in a model order smaller than the case with an uniform node distribution. It was also observed that one must be mindful of the discretization near the air entrance, as excessive discretization in that zone can lead to poor descriptions of the desired SS or increase unnecessarily the model order (and consequently, the number of equations to be solved online). The results presented here lay the groundwork for improving the adaptive mesh location method to extend its application to throated gasifiers, thereby ensuring accurate numerical solutions for control and estimation tasks.

**Keywords:** throated gasifier, exothermic tubular reactor, distributed system, model order reduction, adaptive mesh, PDE numerical method.

---

### 1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, la gasificación se destaca como una excelente opción para la generación de bioenergía debido a su alta eficiencia, disponibilidad de diversas materias primas y su operación relativamente simple (Heidenreich y Foscolo, 2015). Este proceso se lleva a cabo en reactores tubulares espacialmente distribuidos, siendo las configuraciones estratificada (suministro de biomasa y aire en la parte superior) y estrangulada (suministro de biomasa en la parte superior y aire inyectado en una zona de estrangulamiento) las más comunes a escala piloto e industrial (Patra y Sheth, 2015).

Los hechos observados a nivel industrial (Dasappa et al., 2011; Ruíz et al., 2013; Shwe y Roberts, 2016) y en equipos experimentales de pequeña y mediana escala (Reed y Markson, 1985; Manurung y Beenackers, 1993; Barrio, 2002; Yucel y Hastaoglu, 2016) muestran que: (i) los eventos de apagado indeseado del reactor, (ii) la alta sensibilidad del transitorio de encendido sobre la composición del gas de síntesis, (iii) el ajuste de parámetros, (iv) el escalamiento dimensional y (v) los problemas de rendimiento, confiabilidad y desempeño, representan desafíos para la operación continua del reactor, además de existir variabilidad en la producción del gas de síntesis acorde a las demandas energéticas. De acuerdo

con los estudios de Amundson y Arri (1978), Badillo-Hernandez et al. (2019) y Santamaria-Padilla et al. (2022), los reactores de gasificación: (i) presentan multiplicidad de estados estacionarios (EE) y fenómenos de bifurcación y (ii) operan la mayor parte del tiempo alrededor de un EE de ignición (Milligan, 1994; Barrio, 2002; Shwe y Roberts, 2016). El entendimiento y modelado adecuado del proceso es parte esencial de la formulación y resolución mediante técnicas avanzadas de los problemas de estimación de estados y control de los procesos químico-energéticos en general y de los reactores de gasificación en particular.

En Canales-Meza et. al. (2017) se presenta el caso de reducción de orden de modelo para un reactor estratificado, encontrando que una malla con 5 nodos (distribuidos de manera no uniforme de acuerdo con un algoritmo adaptable a las necesidades específicas del punto de operación de interés) brinda una descripción cuantitativamente confiable del EE de interés. Para gasificadores estrangulados (también llamados Imbert), el EE de interés se ha descrito utilizando modelos de orden reducido con mallas de: (i) 21 nodos distribuidos uniformemente (Santamaria-Padilla et. al., 2022) y (ii) 13 nodos distribuidos no uniformemente de manera heurística (Santamaria-Padilla et. al., 2016).

Las consideraciones anteriores motivan el presente trabajo de modelado de bajo orden del reactor de gasificación, como primer paso -necesario- en el subsecuente tratamiento de los problemas de estimación y control mediante técnicas avanzadas. La contribución radica en la aplicación, por primera vez, del algoritmo de malla adaptable (desarrollado para reactores estratificados sin reciclo de calor)) (Canales-Meza et al., 2017) al reactor Imbert (con flujo estrangulado y reflujo de calor).

La estructura del artículo es la siguiente, en la sección 2 se describe el proceso de gasificación en un reactor estrangulado presentando su modelo matemático. La sección 3 aborda el algoritmo de malla adaptable, junto con las métricas de error utilizadas para elegir el orden del modelo reducido. En la sección 4, se muestran las discretizaciones obtenidas mediante el método, así como los errores de discretización y se comparan con los resultados de una distribución uniforme; se investiga cómo conseguir una disminución monótona del error de discretización al aumentar el orden del modelo y se presenta una comparación de perfiles en EE entre el modelo de orden reducido utilizando la malla adaptable y el caso con malla uniforme, identificando las consideraciones relevantes para extender la aplicación del algoritmo a reactores estrangulados. Finalmente, en la sección 5, se presentan las conclusiones con implicaciones para estimación y control.

## 2. REACTOR DE GASIFICACIÓN

En gasificadores Imbert, como el mostrado en la Figura 1, la biomasa sólida (con flujo volumétrico  $Q_{se}$ , tamaño de partícula  $d_{pe}$ , concentración  $C_{se}$  y temperatura  $T_{se}$ ) y el aire frío (con flujo volumétrico  $Q_{ge}$ , concentración  $C_{ge}$  y temperatura  $T_{ge}$ ) son suministrados en la cima y en la zona de estrangulamiento, respectivamente, son convertidos en gas de síntesis (con flujo volumétrico  $Q_{gf}$ , concentración  $C_{gf}$  y temperatura  $T_{gf}$ ) y carbonizado (con flujo volumétrico  $Q_{sf}$ , concentración  $C_{sf}$  y temperatura  $T_{sf}$ ) mediante una red de reacciones químicas (pirólisis, combustión, reducción, craqueo, reformado, desplazamiento del gas de agua) (Di Blasi, 2000). En esta configuración se aprovecha la energía presente en el flujo del gas de síntesis para precalentar el aire que es suministrado, lo cual favorece los fenómenos de transporte de masa y de velocidades de reacción, incrementando la eficiencia global del proceso (Susastriawan et al., 2017).

### 2.1 Modelo general

El gasificador Imbert con precalentamiento de aire ha sido modelado en Santamaria-Padilla et al. (2022), considerando suposiciones estándar de modelado como son: (i) equilibrio térmico entre fases, (ii) estado cuasi-estacionario para gases y (iii) el flujo de gas de síntesis no reacciona en el intercambiador de calor. Lo anterior, permite representarlo

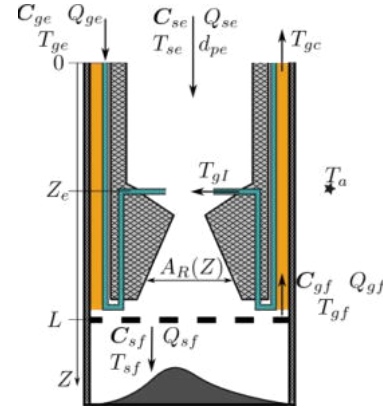


Figura 1. Gasificador Imbert con precalentamiento de aire.

mediante un conjunto de ecuaciones diferenciales ordinarias-parciales (EDOP) en forma general:

$$\partial_t \chi = F_\chi(\chi, \psi, \partial_z \chi, \partial_{zz} \chi, \mathbf{d}, \mathbf{p}) \quad (1a)$$

$$\mathbf{0} = F_\psi(\chi, \psi, \partial_z \psi, \mathbf{d}, \mathbf{p}), \quad 0 \leq Z \leq L, \quad t \geq 0 \quad (1b)$$

con condiciones de frontera e iniciales

$$\mathbf{B}_\chi(\chi, \psi, \partial_z \chi, \mathbf{d}, \mathbf{p}) = \mathbf{0}; \quad \mathbf{B}_\psi(\chi, \psi, \mathbf{d}, \mathbf{p}) = \mathbf{0}; \quad \chi(0) = \chi_0$$

dónde

$$\chi(t) = [\mathbf{C}_s \ T \ T_h]^T(Z, t) \quad (1c)$$

$$\psi(t) = [Q_g \ Q_s \ \mathbf{C}_g^T \ T_c]^T(Z, t) \quad (1d)$$

$$\mathbf{d} = [Q_{se} \ Q_{ge} \ \mathbf{C}_{se}^T \ \mathbf{C}_{ge}^T \ T_{se} \ T_{ge} \ T_a]^T \quad (1e)$$

$\chi$  (o  $\psi$ ) es el conjunto de perfiles dinámicos (o cuasi-estáticos),  $F_\chi$  (o  $F_\psi$ ) es un operador diferencial en el dominio espacial con condiciones de frontera  $\mathbf{B}_\chi$  (o  $\mathbf{B}_\psi$ ),  $\partial_z \chi$  (o  $\partial_{zz} \chi$ ) es la primera (o segunda) derivada parcial con respecto al dominio espacial  $Z$ ,  $\partial_t$  es la primera derivada parcial con respecto al dominio temporal  $t$ ,  $\chi_0$  es un vector con las condiciones iniciales de los perfiles dinámicos,  $\mathbf{d}$  es un vector con las entradas exógenas,  $\mathbf{p}$  es un vector con los parámetros de cinética-transporte,  $\mathbf{C}_s$  es un vector con los perfiles de especies sólidas (biomasa, contenido de humedad y carbón),  $\mathbf{C}_g$  es un vector con los perfiles de especies gaseosas ( $O_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $H_2O$ , alquitrán),  $T$  es la temperatura del lecho sólido-gas dentro del reactor,  $T_h$  (o  $T_c$ ) es la temperatura del gas de síntesis (o del aire entrante) en la sección anular (o en las tuberías),  $Q_s$  (o  $Q_g$ ) es el flujo volumétrico de sólidos (o gases) y  $T_a$  es la temperatura de los alrededores.

La aplicación de un esquema de discretización por diferencias finitas del dominio espacial (Hundsdorfer and Verwer, 2003) al modelo en EDOP (1), resulta en el sistema de ecuaciones algebraico-diferenciales (EAD) de orden  $N$ :

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}_x(\mathbf{x}, \mathbf{w}, \mathbf{d}, \mathbf{p}, \boldsymbol{\sigma}), \quad \mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0 \quad (2a)$$

$$\mathbf{0} = \mathbf{f}_w(\mathbf{x}, \mathbf{w}, \mathbf{d}, \mathbf{p}, \boldsymbol{\sigma}) \quad (2b)$$

$$\boldsymbol{\pi}_N = [\mathbf{x}_N^T \ \mathbf{w}_N^T]^T \quad (2c)$$

$$n = n_x + n_w \quad (2d)$$

$$\boldsymbol{\sigma} = \{N, \boldsymbol{\zeta}\}, \quad \boldsymbol{\zeta} = \{z_1, \dots, z_N\} \quad (2e)$$

$$z: z_0 = 0 < \dots < z_k < z_N < z_{N+1} = 1$$

dónde:

$$n_x = \dim \mathbf{x} = (n_s + 2)N, \quad n_w = \dim \mathbf{w} = (n_g + 3)N,$$

$\sigma$  es el arreglo de discretización con dos grados de libertad: (i) el número de nodos internos  $N$  (llamado orden del modelo) y (ii) la partición del dominio espacial  $\zeta$ .  $\mathbf{x}$  (o  $\mathbf{w}$ ) es la variable de estado dinámica (o cuasi-estática),  $n_x$  (o  $n_w$ ) es el número de ecuaciones diferenciales (o algebraicas),  $n$  es el número total de ecuaciones diferenciales y algebraicas,  $n_s$  (o  $n_g$ ) es el número de especies sólidas (o gaseosas).

## 2.2 Caso de estudio

Las dimensiones y flujos de alimentación del gasificador de este estudio se detallan en la Tabla 1. La biomasa considerada son chips de madera con un diámetro inicial  $d_{p0} = 1$  cm y un contenido de humedad del 7.28%. En el trabajo de Santamaria-Padilla et. al. (2022), se estudió este reactor y se encontró que un modelo de orden  $N = 21 = N_u^*$  describe el EE de ignición reportado experimentalmente por Yucel y Hastaoglu (2016), de manera equivalente a como lo hace uno de orden  $N_{edp} = 240$  (orden empleado por un resolvidor de EDP).

Tabla 1. Dimensiones y flujos del gasificador

Propiedad	Valor
Longitud de reactor, $L$	0.55 m
Entrada de aire, $Z_e$	0.27 m
Flujo de sólidos, $Q_{se}$	3.8 kg/h
Relación aire/biomasa	1.2

## 2.3 Problema metodológico

Se tomará el modelo del gasificador estrangulado (2) y se le aplicará el algoritmo de malla adaptable de Canales-Meza et. al. (2017) (las ideas principales se presentan en la sección 3) para valores de  $N \in [4, 21]$ , con la finalidad de generar distribuciones no uniformes de nodos que describan el EE de ignición de los datos experimentales de Yucel y Hastaoglu (2016), con esos resultados se retomarán las nociones de modelado eficiente de reactores tubulares propuesta por Badillo-Hernandez et. al. (2019) y se determinará un modelo de orden  $N_a^* < N_u^* = 21 \ll N_{edp}$ .

## 3. DISCRETIZACIÓN CON MALLA ADAPTABLE

Con el objetivo de aprovechar los dos grados de libertad de  $\sigma$ :  $N$  como el número de nodos internos y  $\zeta$  como la distribución espacial de los mismos, se plantea una metodología que permite equilibrar estos dos parámetros considerando la cobertura espacial del dominio y la cobertura de las zonas de mayor cambio de los perfiles del punto de operación de interés.

### 3.1 Algoritmo de malla adaptable

A continuación, se detalla el procedimiento para el cálculo de la malla adaptable:

a) Se calcula una solución de referencia  $\bar{\pi}^+$  que represente el perfil del EE de interés, considerando un arreglo  $\sigma^+ = \{N^+, \zeta_u\}$ :  $N$  lo suficientemente alto ( $N^+ > 100$ ) y  $\zeta_u$  particionado de manera uniforme.

b) Con  $\bar{\pi}^+$  se genera un vector de cambios con dimensión  $(N^+ - 1) \times 1$  que concentra las variaciones en EE de todos los perfiles a lo largo del reactor.

c) Se elige un número de  $N^- \ll N^+$  y se genera una partición del dominio no uniforme  $\zeta_{nu}$  de  $N^-$  elementos cuya ubicación espacial de la partición homogénea del área bajo la curva entre el vector de cambios y el dominio espacial del reactor. Dado que los perfiles de cada estado  $\mathbf{x}$  y  $\mathbf{w}$  son cualitativa y cuantitativamente diferentes para cada estado, la partición  $\zeta$  regularmente será una espacialmente no uniforme.

d) Con el mismo valor de  $N^-$  se crea una partición uniforme  $\zeta_u$ .

e) Finalmente, con los valores de  $\zeta_u$  y  $\zeta_{nu}$  se genera una malla adaptable  $\zeta_a$  equilibrando la ubicación de cada uno de los nodos  $z$ .

### 3.2 Métrica de error

La forma en la que se evalúa el desempeño de la solución de baja dimensión  $\pi^-$  es a través de una métrica de error  $|\cdot|$ , donde el error de discretización  $\varepsilon_d$  se desvanece cuando  $N \rightarrow \infty$  (LeVeque, 2007). El error de discretización ( $\varepsilon_d$ ) entre la solución de referencia  $\bar{\pi}^+$  y su contraparte de modelo reducido  $\bar{\pi}$  se obtiene comparando numéricamente los valores de cada estado en la ubicación  $\zeta_a$ , es decir:

$$\varepsilon_d = |\bar{\pi}_r^+ - \bar{\pi}^-| \quad (3)$$

donde:  $\bar{\pi}_r^+ = \bar{\pi}^+\{\zeta_a\}$ .

El error de discretización admisible ( $\varepsilon_{du}$ ) para este trabajo, se obtiene al comparar el modelo de orden  $N_u^* = 21$  contra el modelo de orden  $N_{edp} = 240$ , ambos considerando una distribución uniforme de los nodos, por lo que

$$\varepsilon_{du} = 0.0172 \quad (4)$$

### 3.3 Orden eficiente

La intersección del error admisible  $\varepsilon_{du}$  con la curva generada al calcular el error de discretización  $\varepsilon_d(N)$  para  $N \in [4, 21]$ , proporciona el orden eficiente  $N_a^*$ , que describe el EE de interés de una forma equivalente a la que modelos de orden  $N_u^*$  o  $N_{edp}$  lo hacen. Para mayores detalles sobre las nociones del modelado eficiente de reactores tubulares, consultar el trabajo de Badillo-Hernandez et. al. (2019).

## 4. RESULTADOS

### 4.1 Funcionamiento del algoritmo

Para la aplicación del algoritmo al caso de estudio, se generó una solución de referencia  $\bar{\pi}^+$  con  $\sigma^+ = \{240, \zeta_u\}$ . Siguiendo

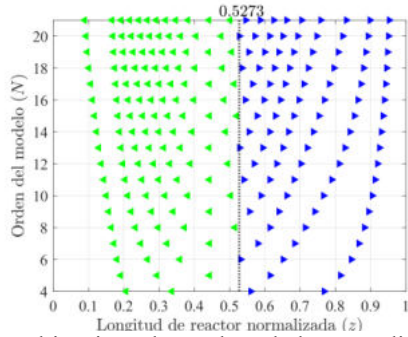


Figura 2. Ubicación de nodos dado por distribución no uniforme adaptable.

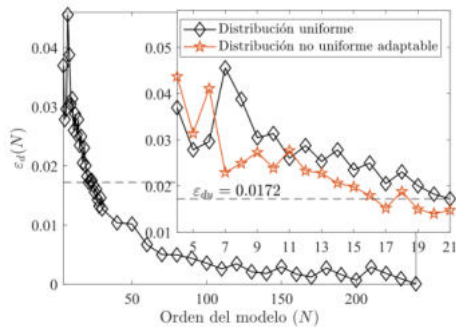


Figura 3. Error de aproximación contra orden de modelo para distribuciones uniforme y no uniforme adaptable.

la metodología, con  $\bar{\pi}^+$  se obtiene el vector de cambios (un ejemplo se muestra en la Figura 4). A continuación, se generan las particiones uniformes  $\zeta_u$  y adaptables  $\zeta_a$  con  $N \in [4, 21]$ . En la Fig. 2 se muestran las distribuciones  $\zeta_a$  de los nodos que el método de malla adaptable entrega, el eje vertical representa el orden de modelo  $N$ , la recta vertical discontinua indica la ubicación donde se inyecta el aire, mientras que los marcadores ◀ (o ▶) corresponden con la ubicación de los nodos atrás (o delante) de la entrada de aire a lo largo del reactor (longitud normalizada).

Se realizaron simulaciones numéricas con el modelo (2) utilizando las distribuciones no uniformes adaptables (DNUA) de nodos mostradas en la Fig. 2, en todos los casos se alcanzó el EE de ignición  $\bar{\pi}$ , con los resultados obtenidos se calculó el error de discretización  $\varepsilon_d(N)$  (3) para  $N \in [4, 21]$ . En la Fig. 3 se dibujan los errores de discretización  $\varepsilon_d$  para DNUA y se comparan contra los errores obtenidos al considerar una distribución uniforme (DU).

Para la DU, los  $\varepsilon_d$  en general exhiben una tendencia a decrecer conforme  $N$  se incrementa, sin embargo, se observan casos donde el  $\varepsilon_d$  crece respecto a alguna discretización de menor orden y después vuelve a disminuir. Usando la DNUA, se observa que el  $\varepsilon_d$  también tiende a decrementarse conforme  $N$  se incrementa y en general lo hace con una magnitud menor a la del caso de la DU, pero hay algunos casos (para  $N = 11, 18$ ) donde  $\varepsilon_d$  se incrementa y vuelve a seguir la tendencia que previamente tenía, lo anterior indica que la distribución de

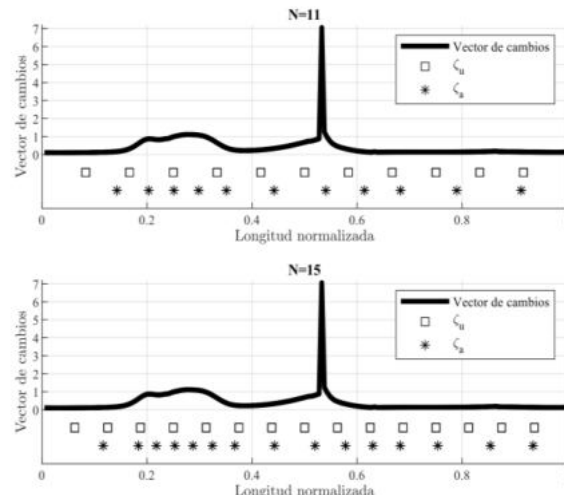


Figura 4. Vector de cambios (-) y comparación de la distribución uniforme  $\zeta_u$  (□) y adaptable  $\zeta_a$  (\*) a la largo del reactor para  $N = 11$  (arriba) y  $N = 15$  (abajo) nodos.

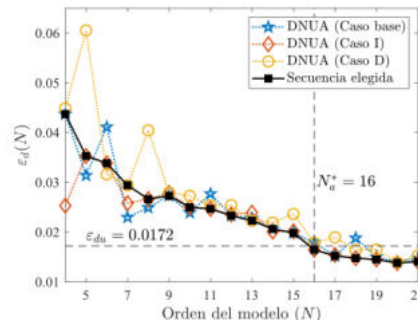


Figura 5. Error de aproximación contra orden de modelo (corrigiendo distribuciones).

los nodos no fue la mejor, sin embargo, tenemos el grado de libertad de modificarla para obtener una tendencia clara en la disminución de  $\varepsilon_d(N)$ .

#### 4.2 Análisis de errores para DNUA

Para entender que provoca los incrementos de  $\varepsilon_d$  cuando se usa la DNUA, en la Fig. 4 se muestra la curva de cambios que el método de malla adaptable utiliza (Paso b) para  $N = 11$  y  $N = 15$ . El marcador (o \*) indica la ubicación de los nodos de la partición uniforme  $\zeta_u$  (o adaptable  $\zeta_a$ ), se observa que en ambas gráficas hay un nodo muy cercano a la zona de mayor cambio que es donde se inyecta el aire (ver Fig. 2), sin embargo, para el caso con  $N = 11$  esto produce que  $\varepsilon_d$  se incrementa, mientras que para  $N = 15$  el  $\varepsilon_d$  sigue la tendencia esperada (se reduce con respecto a  $N = 14$ ). Es importante mencionar que hay casos donde no hay nodos en la zona de mayor cambio ( $N = 5, 7, 9$ ) y el  $\varepsilon_d$  tampoco sigue la tendencia esperada.

En gasificadores estratificados se ha observado que el  $\varepsilon_d$  decrece monótonamente conforme el orden del modelo incrementa, para distribuciones uniformes (Badillo-



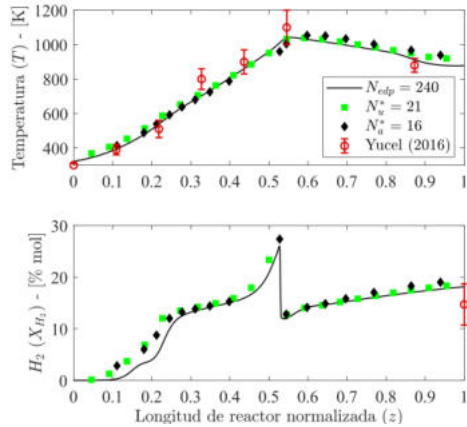


Figura 6. Perfiles en EE de temperatura y  $H_2$

Hernandez et. al., 2019) y no uniformes (Canales-Meza et. al., 2017). Para gasificadores Imbert, vale la pena mencionar que en el modelo (2) el nodo en el cual se considera que se inyecta el aire no está fijo (se elige como el más cercano a la ubicación  $Z_e$ ) y cambia para cada discretización, lo cual (además del cambio en la geometría interna y la naturaleza no lineal del proceso) provoca que no se tenga una tendencia monótonamente decreciente del  $\varepsilon_d$  al incrementar  $N$  (Fig. 3). Sin embargo, puede ser que, con una distribución no uniforme más adecuada, lo anterior se consiga.

#### 4.3 Corrección de ubicaciones

Como una primera aproximación para tratar de mejorar los resultados obtenidos con la DNUA, se decidió desplazar algunos nodos para que coincidan con el punto de inyección de aire, manteniendo a los demás en su ubicación previa. Se consideran 2 casos: (i) moviendo el nodo anterior (a la izquierda) a la entrada de aire (Caso I) y (ii) moviendo el nodo posterior (a la derecha) a la entrada de aire (Caso D).

Se repitieron las simulaciones numéricas y se cuantificó el  $\varepsilon_d$  correspondiente para cada una de ellas, los resultados se muestran en la Fig. 5 comparándolos contra el caso de la DNUA obtenido previamente (Caso Base). Es posible observar que tanto el Caso I y el Caso D, exhiben errores comparables con los del Caso Base, sin embargo, tampoco muestran la tendencia monótonamente decreciente deseada. Hay que recordar que la ubicación de nodos es un grado de libertad y lo mostrado es sólo una pequeña muestra de las infinitas combinaciones posibles. Por lo anterior, se resalta en marcador ■ (con unión en línea continua de color negro), una combinación de las distribuciones puestas a prueba que exhiben una tendencia monótonamente decreciente.

De la Fig. 5, se interseca la curva en color negro de  $\varepsilon_d(N)$  con el error admisible  $\varepsilon_{du}$  y se determina que un modelo de orden  $N_a^* = 16$  (con la DNUA de nodos) será capaz de describir los datos experimentales de Yucel y Hastaoglu (2016). En la Fig. 6 se muestran los perfiles en EE para temperatura y

concentración de  $H_2$ , comparando los resultados de los modelos con la DU de  $N_u^* = 21$  (Santamaria-Padilla et. al., 2022), la DNUA de orden  $N_a^* = 16$  (este trabajo), contra un modelo de orden  $N_{edp} = 240$ , es posible observar que en todos los casos se representan los datos experimentales de manera razonable.

#### 4.4 Discusión del ajuste con distribución no uniforme adaptable

Profundizando en los resultados mostrados en la Fig. 5 y observando la relación que poseen con la distribución de nodos de la Fig. 2 se observó lo siguiente:

1. Desplazar el nodo anterior (o posterior) a la zona de inyección de aire (Caso I [o Caso D]), en general hace que el  $\varepsilon_d$  se reduzca (o se incremente) con respecto al caso base de la DNUA.

2. Poseer un nodo en la zona de inyección de aire en general favorece la reducción del  $\varepsilon_d$ , pero hay que tener cuidado con la ubicación de los nodos alrededor de este.

Analizando los resultados para el Caso D (el nodo a la derecha de  $\bar{Z}_e = 0.5273$  se desplaza a esa ubicación), se observa que para  $N = 8, 15, 17$  el  $\varepsilon_d$  se incrementa con respecto a la tendencia que parecía adoptar. Observando la Fig. 2, se puede notar que en los casos anteriores se tendrá un nodo muy cercano a  $\bar{Z}_e$ , lo cual parece contribuir a que se incremente el  $\varepsilon_d$ , ya que para casos donde hay una mayor separación (hacia atrás) de nodos, el  $\varepsilon_d$  mantiene su tendencia decreciente. Para el Caso I (el nodo a la izquierda de  $\bar{Z}_e$  se desplaza a esa ubicación), se observa que para  $N = 11, 13, 15$  el  $\varepsilon_d$  es similar (o incrementa) con respecto a al caso con un nodo menos ( $N = 10, 12, 14$ , respectivamente), examinando la Fig. 2 se puede notar que se tendrá un nodo muy cercano a  $\bar{Z}_e$  hacia delante, el cual parece tener poca contribución para conseguir que la tendencia decreciente de  $\varepsilon_d$  continúe, pero al menos la mantiene. Para el caso de  $N = 13$ , adicionalmente se observa que la zona anterior a  $\bar{Z}_e$  queda descuidada, lo cual también puede contribuir a que el  $\varepsilon_d$  se incremente.

De lo anterior se tienen las siguientes recomendaciones para ser implementadas en el algoritmo de malla adaptable para gasificadores estrangulados:

1. Colocar (Fijar) un nodo en la entrada de aire ayuda a reducir el error de discretización.

2. Si se posee un nodo en la entrada de aire, no es conveniente tener un nodo tan cerca de este hacia atrás (o adelante), ya que en general incrementará (o mantendrá) el error de discretización.

3. Considerar el decremento monótono del  $\varepsilon_d$  como un objetivo a alcanzar con la distribución no uniforme adaptable.

## 5. CONCLUSIONES

Utilizando el método de malla adaptable desarrollado para gasificadores estratificados, se logró reducir el orden del modelo de un gasificador estrangulado en un 23% en

comparación con una discretización uniforme, pasando de  $N_u^* = 21$  (105 EDO y 210 EA) a  $N_a^* = 16$  (80 EDO y 160 EA), mientras que comparando con el modelo de orden  $N_{edp} = 240$  (1200 EDO y 2400 EA), se tiene una reducción del 93%. Además de conseguir reducción del orden del modelo, el empleo de malla adaptable mejora el condicionamiento numérico del modelo discreto. Lo anterior permitió una descripción adecuada de los datos experimentales de Yucel y Hastaoglu (2016).

Se encontró que es importante evitar la sobrediscretización en la zona anterior a la entrada de aire, ya que esto incrementa el error de discretización  $\varepsilon_d$ . Sin embargo, al sobrediscretizar después de la entrada de aire, el  $\varepsilon_d$  no cambia significativamente. Además, se observó que el  $\varepsilon_d$  no disminuye de manera monótona al incrementar el orden del modelo con una distribución uniforme de nodos. Sin embargo, mediante una distribución no uniforme adaptable y una colocación adecuada de los nodos, es posible lograr una reducción del  $\varepsilon_d$ .

En futuros trabajos, se buscará aplicar los aprendizajes de esta prueba inicial para sistematizar la distribución de nodos y extender el algoritmo de Canales-Meza et al. (2017) a gasificadores Imbert. Los resultados del presente trabajo son punto de partida para en el futuro abordar el problema de diseñar un control dinámico basado en un observador construido a partir del modelo de bajo orden aquí presentado, para garantizar una operación robusta y confiable del gasificador.

AGRADECIMIENTOS: Al proyecto PAPIIT IT100623.

#### REFERENCIAS

- Amundson, N. R., & Arri, L. E. (1978). Char gasification in a countercurrent reactor. *AIChE Journal*, 24(1), 87–101. <https://doi.org/10.1002/aic.690240110>
- Badillo-Hernandez, U., Alvarez, J., & Alvarez-Icaza, L. (2019). Efficient modeling of the nonlinear dynamics of tubular heterogeneous reactors. *Computers and Chemical Engineering*, 123, 389–406. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2019.01.018>
- Barrio, M. (2002). Experimental investigation of small-scale gasification of woody biomass.
- Canales-Meza, L. A., Badillo-Hernandez, U., Alvarez-Icaza, L., & Alvarez, J. (2017). Low order online modeling of a distributed syngas reactor. In *Memorias del Congreso Nacional de la Asociación de México de Control Automático, Monterrey, Nuevo León, México*. 2017.
- Dasappa, S., Subbukrishna, D. N., Suresh, K. C., Paul, P. J., & Prabhu, G. S. (2011). Operational experience on a grid connected 100 kWe biomass gasification power plant in Karnataka, India. *Energy for sustainable development*, 15(3), 231-239.
- Di Blasi, C. (2000). Dynamic behaviour of stratified downdraft gasifiers. *Chemical Engineering Science*, 55(15), 2931–2944. [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(99\)00562-X](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(99)00562-X)
- Heidenreich, S., & Foscolo, P. U. (2015). New concepts in biomass gasification. *Progress in Energy and Combustion Science*, 46, 72–95. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2014.06.002>
- Hundsdorfer, W., & Verwer, J. G. (2003). Numerical Solution of Time-Dependent Advection-Diffusion-Reaction Equations. In *SIAM Review* (Vol. 33).
- LeVeque, R. J. (2007). Finite difference methods for ordinary and partial differential equations: steady-state and time-dependent problems. Society for Industrial and Applied Mathematics
- Manurung, R. K., & Beenackers, A. A. C. M. (1993). Modeling and simulation of an open core down-draft moving bed rice husk gasifier. *Advances in thermochemical biomass conversion*, 288-309.
- Milligan, J. B. (1996). Downdraft gasification of biomass.
- Patra, T. K., & Sheth, P. N. (2015, October 1). Biomass gasification models for downdraft gasifier: A state-of-the-art review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 50, pp. 583–593. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.05.012>
- Reed, T. B., & Markson, M. (1985). Biomass Gasification Reaction Velocities. In *Fundamentals of Thermochemical Biomass Conversion* (pp. 951–965). Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-94-009-4932-4\\_53](https://doi.org/10.1007/978-94-009-4932-4_53)
- Ruiz, J. A., Juárez, M. C., Morales, M. P., Muñoz, P., & Mendivil, M. A. (2013). Biomass gasification for electricity generation: Review of current technology barriers. *Renewable and sustainable energy reviews*, 18, 174-183.
- Santamaria-Padilla, L., Alvarez-Icaza, L., & Alvarez, J. (2016). "Modelado con validación experimental de un gasificador de biomasa." *Memorias del Congreso Nacional de Control Automático, Querétaro, Querétaro, México*. 2016.
- Santamaria-Padilla, L., Badillo-Hernandez, U., Álvarez, J., & Álvarez-Icaza, L. (2022). On the nonlinear dynamics of biomass throated tubular gasification reactors. *Computers & Chemical Engineering*, 107828. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2022.107828>
- Shwe, S. y Roberts, D. (2016). Addressing the barriers to greater penetration of gasification based BioEnergy. BioEnergy Australia Conference 2016.
- Susastriawan, A. A. P., Saptoadi, H., & Purnomo. (2017). Small-scale downdraft gasifiers for biomass gasification: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76(March), 989–1003. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.112>
- Yucel, O., & Hastaoglu, M. A. (2016). Kinetic modeling and simulation of throated downdraft gasifier. *Fuel Processing Technology*, 144, 145–154. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.12.023>