

## Startup design of biomass gasification reactors

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

\* *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 a fundamental step for open and closed-loop design and operation, the problem of designing the initial temperature profile for the startup operation of a spatially distributed throated gasifier (described by 10 to 20 nonlinear ordinary and partial differential equations) so that the high energetic yield steady-state is robustly reached is addressed. The problem is solved with efficient partial-to-ordinary differential equation discretization and approximation of the initial torch-induced temperature profile with a rectangular one with: (i) the same sensible heat content (area) as the torch one, and (ii) the pulse start-end-height triplet as design degree of freedom. A sampled search yields the start-end-height triplet that describes the experimental data and explains the manufacturer's specifications and operation guide, systematizing (with scalability) the startup operation.

**Keywords:** throated gasifier, startup, transient behavior, initial conditions, methodology.

### 1. INTRODUCCIÓN

La gasificación es un proceso termoquímico que transforma materiales carbonosos en gas de síntesis (mezcla de hidrógeno  $-H_2-$ , monóxido de carbono  $-CO-$  y metano  $-CH_4-$ ) y carbón vegetal (You et al., 2017). Esta tecnología es especialmente atractiva para la eliminación con termovalorización (generación de energía útil) de residuos orgánicos municipales e involucra cuatro subprocesos: (i) secado, se evapora el contenido de humedad en la biomasa (vapor de agua  $-H_2O-$ ), (ii) pirólisis, se liberan los gases volátiles y se obtiene carbón vegetal, (iii) combustión, se quema parcialmente el carbón generando  $CO$  y  $H_2O$  y (iv) reducción, donde el carbón caliente continua reaccionando con dióxido de carbono ( $CO_2$ ) y con el  $H_2O$ , para producir  $H_2$ ,  $CO$  y  $CH_4$ . En escala industrial el proceso se lleva a cabo en reactores químicos tubulares, denominados gasificadores.

Los gasificadores de corriente descendente, donde los flujos de gases y sólidos se dirigen en la misma dirección, son los más utilizados en pequeña escala (Yan et al., 2018) y los hay de dos tipos: (i) estratificados, tienen una sección transversal constante, los sólidos y gases se suministran por la parte superior y (ii) estrangulados, los sólidos se suministran por la parte superior, mientras los gases entran en una zona donde la sección transversal se estrecha, lo cual favorece las reacciones de combustión.

Para el arranque de gasificadores estrangulados, en estudios experimentales se reporta que siguiendo las indicaciones del fabricante consiguen una operación exitosa (Huchon et al., 2020), sin indicar si probaron alguna rutina distinta. Desde la perspectiva de modelado existe una cantidad reducida de trabajos donde se reproduce el arranque, en los cuales no se describen las condiciones iniciales (CI) usadas en los modelos matemáticos (Yucel y Hastaoglu, 2016) o no se justifica la relación entre la CI del perfil de temperatura utilizada y la operación experimental del gasificador (Perez et al., 2012; Janajreh y Shrah, 2013).

Recientemente, con discretización espacial eficiente de entre 10 y 20 ecuaciones diferenciales ordinarias y parciales (EDOP) no lineales, se ha descrito mediante un modelo de ecuaciones algebraico-diferencial (EAD), con orden y carga computacional considerablemente menor que la de resolutores numéricos convencionales, la dinámica no lineal compleja de gasificadores estratificados (Badillo-Hernandez et al., 2019) y estrangulados (Santamaria-Padilla et al., 2022) bi (o tri) estables con: (i) 2 (ó 3) estados estacionarios (EE) estables, (ii) 1 (ó 2) EEs inestables, (iii) sin ciclos límite y (iv) bifurcación con respecto a flujo de aire y contenido de humedad del sólido alimentado.

Del análisis de operación en EE de gasificadores estrangulados se ha mostrado que existe multiplicidad de EEs (sin ciclos límite) y bifurcación con respecto al flujo de aire suministrado, mientras que el comportamiento transitorio se ha simulado para verificación de la triestabilidad (Santamaria-Padilla et al., 2022) con: (i) 3 EEs estables, nominal (de alta conversión, en el cual se opera), rejilla (de mediana conversión) y extinción con (nula conversión) y (ii) 2 EEs inestables (alta y baja conversión). En particular para el arranque, al momento no hay estudios teóricos para analizarlo y con ello sistematizar la elección de las rutinas que aseguran un arranque exitoso en lazo abierto o cerrado. Este trabajo es un avance fundamental en dicha dirección.

La descripción del arranque mediante modelos numéricos conlleva un problema de condicionamiento numérico, ya que la elección incorrecta de CIs puede impedir la resolución del problema. Por lo tanto, es importante contar con estrategias que simplifiquen la elección de CIs, asegurando que tengan sentido físico y estén relacionadas con la operación del sistema. Esto es crucial para obtener una solución numérica que respete las leyes de conservación de masa y energía.

En este trabajo se da un procedimiento para elegir el ancho y la altura de un perfil de temperatura rectangular equivalente

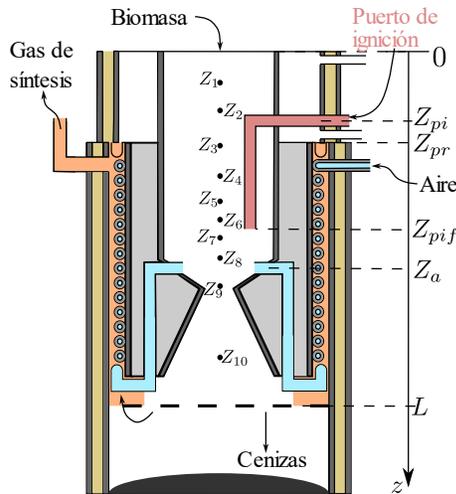


Figura 1. Reactor de gasificación.

(PTRE) que permita simular el arranque del gasificador. Las contribuciones son: (i) mostrar que con la elección de un PTRE es posible reproducir datos experimentales de arranque, (ii) explicar la rutina de arranque del fabricante y (iii) contar con un procedimiento sistemático y escalable a otras dimensiones para diseño de arranque a lazo abierto o cerrado.

En la sección 2, se describe el gasificador estrangulado bajo estudio, se enuncia la rutina de arranque dada por el fabricante y se presentan los datos experimentales siguiendo dicha rutina; posteriormente, se presentan los modelos generales en EDOP y en EAD que modelan al gasificador; la sección finaliza estableciendo que el análisis requiere conocer el triplete inicio-fin-altura del PTRE. En la sección 3, se presenta y aplica el procedimiento para aproximar la CI del perfil de temperatura de arranque mediante un PTRE. En la sección 4, se utiliza el PTRE como CI del modelo, se compara el transitorio de arranque calculado contra los datos experimentales; después, analizando los datos experimentales y los resultados de simulación del arranque, se discuten las recomendaciones dadas por el fabricante. Finalmente, en la sección 5, se presentan las conclusiones obtenidas de este trabajo.

## 2. REACTOR DE GASIFICACIÓN

El gasificador estrangulado bajo estudio, forma parte de un sistema de gasificación de escala piloto propiedad del Instituto de Ingeniería UNAM, el cual puede producir hasta 10kW. En la Figura 1 se muestra el diagrama de su geometría interna, mientras que la Tabla 1 detalla algunas de sus dimensiones y la ubicación de los 10 termopares tipo *K* instalados.

La biomasa sólida (con flujo volumétrico  $Q_{se}$ , tamaño de partícula  $d_{pe}$ , concentración  $C_{se}$  y temperatura  $T_{se}$ ) y el aire (con flujo volumétrico  $Q_{ge}$ , concentración  $C_{ge}$  y temperatura  $T_{ge}$ ) son suministrados en la cima ( $z = 0$ ) y en la zona estrecha ( $z = Z_a$ ), 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  $T_{sf}$ ) a través de una red de reacciones químicas (pirólisis, combustión, reducción, craqueo, reformado, desplazamiento del gas de agua) (Di Blasi, 2000).

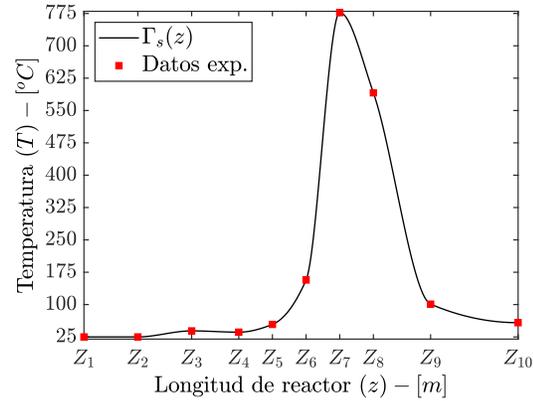


Figura 2. Datos experimentales de perfil de temperatura de arranque en el instante  $t_{ae} = 2.5$  min

La configuración mostrada posee una etapa de precalentamiento para el aire, la cual utiliza el flujo del gas de síntesis, lo anterior incrementa la eficiencia del proceso ya que se favorecen los fenómenos de transporte de masa y de velocidades de reacción (Susastriawan et al., 2017).

Las temperaturas registradas en los termopares se representan en el vector

$$\mathbf{T}_{\text{exp}}(t) = [T_{Z_1}(t), T_{Z_2}(t), \dots, T_{Z_9}(t), T_{Z_{10}}(t)]^T$$

donde  $T_{Z_i}$  es la temperatura medida en el termopar  $Z_i$  correspondiente. El gasificador originalmente sólo disponía de los termopares ubicados en  $Z_9$  y  $Z_{10}$ , el grupo de trabajo instaló los restantes ( $Z_1, \dots, Z_8$ ).

Tabla 1. Dimensiones de reactor (ver Figura 1)

	Ubicación (m)
$[Z_{pi}, Z_{pr}, Z_{pif}, Z_a, L]$	$[0.2, 0.36, 0.46, 0.55, 0.84]$
$[Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, Z_5]$	$[0.105, 0.185, 0.265, 0.335, 0.385]$
$[Z_6, Z_7, Z_8, Z_9, Z_{10}]$	$[0.435, 0.485, 0.535, 0.62, 0.75]$

### 2.1 Operación de arranque

La rutina de arranque (RA) es un procedimiento que se lleva a cabo en lazo abierto, el fabricante (All Power Labs, 2024) establece seguir los siguientes 3 pasos para una RA exitosa:

RA1 Llenar el gasificador con carbón vegetal hasta que falten unos 12.7 cm para alcanzar la cima, lo restante se llena con biomasa.

RA2 Acercar una antorcha por el puerto de ignición en el tiempo  $t_{ai}$  y mantenerla hasta el tiempo  $t_{ae}$  en que  $T_{Z_9} \geq 100$  °C.

RA3 Retirar la antorcha en el instante  $t_{ae}$ , cerrar el puerto de ignición e incrementar el suministro de aire hasta su valor nominal (5.4 kg/h).

Siguiendo la RA y utilizando astillas de madera (con propiedades reportadas en Tabla 2), se obtuvieron los datos experimentales de CI (registrados en el tiempo  $t_{ae} = 2.5$  min) de temperatura de arranque (■), así como su interpolación mediante splines cúbicos (Boor, 2001)  $\Gamma_s(z)$  (—), como se muestra en la Figura 2.

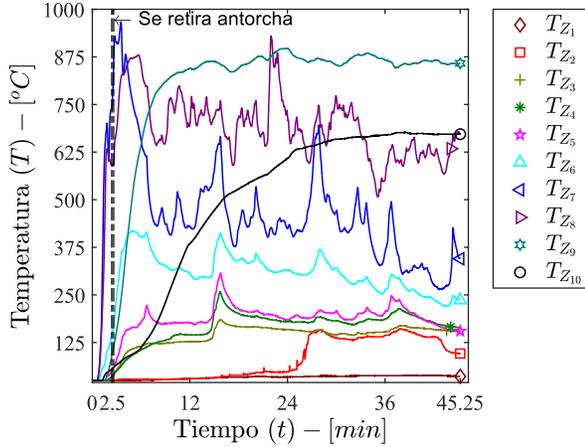


Figura 3. Evolución temporal de temperatura en termopares

En la Figura 3, se presenta la evolución temporal de las temperaturas durante el arranque. La antorcha se colocó en el puerto de ignición a los 37 segundos ( $t_{ai} = 0.61$  min) de que se comenzaron a registrar los datos; en el instante  $t_{ae} = 2.5$  min, se cumple que  $T_{Z_9} \geq 100^\circ\text{C}$  y es cuando se incrementa el flujo de aire a  $5.4 \text{ kg/h}$ . Para  $t = 45.25$  min, se redireccionó el gas de síntesis a un motor de combustión interna (MCI), sin embargo, el análisis de este trabajo se enfocará a la operación sin MCI. Durante el tiempo de operación bajo interés, es posible observar que en las ubicaciones  $Z_9$  y  $Z_{10}$  se alcanza un estado estacionario (EE), mientras que en las otras ubicaciones se presenta una tendencia decreciente sin llegar al EE, lo cual se debe a que se encuentran en una zona donde la dinámica es más lenta porque las reacciones químicas son menos intensas.

Tabla 2. Propiedades de biomasa alimentada

Propiedad	Valor
Tamaño de partícula	2cm
Porosidad del lecho	0.42
Contenido de humedad	8%
Densidad	668

Desde el punto de vista industrial, es importante entender y sistematizar el procedimiento de arranque, de tal forma que se proporcionen instrucciones precisas para conseguir perfiles de CIs que conduzcan a alcanzar exitosamente el EE de operación deseado y evitar el EE de extinción (ó de rejilla) que representa un arranque fallido (o parcialmente exitoso). Lo anterior se realizará con el apoyo de un modelo matemático que captura el comportamiento no lineal del proceso.

## 2.2 Modelo matemático

El gasificador estrangulado con precalentamiento de aire, ha sido modelado en Santamaria-Padilla et al. (2022), y de forma general se puede representar por el conjunto de ecuaciones diferenciales ordinarias-parciales

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

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

con condiciones de frontera e iniciales

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

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  $T_{amb}$  es la temperatura de los alrededores.

Aplicando un esquema de discretización por diferencias finitas sobre el dominio espacial (Hundsdoerfer and Verwer, 2003) al modelo en EDOP (1), permite obtener el sistema de ecuaciones algebraico-diferenciales (EAD) de orden  $N$

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

$$\mathbf{0} = \mathbf{f}_\zeta(\mathbf{x}, \boldsymbol{\zeta}, \mathbf{d}, \mathbf{p}, N), \quad N \in \mathbb{N} \quad (2b)$$

$$n = n_x + n_\zeta \quad (2c)$$

donde

$$n_x = \dim \mathbf{x} = (n_s + 2)N, \quad n_\zeta = \dim \boldsymbol{\zeta} = (n_g + 3)N$$

$\mathbf{x}$  (o  $\boldsymbol{\zeta}$ ) es la variable de estado dinámica (o cuasi-estática),  $n_x$  (o  $n_\zeta$ ) 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) y  $N$  es el orden del modelo.

## 2.3 Problema y metodología

Motivados por la presencia de dispersión axial térmica en el gasificador, la cual actúa como un mecanismo suavizante del perfil de temperatura conforme pasa el tiempo (Crank, 1979), se propone elegir un perfil rectangular de temperatura como CI para simplificar la realización de las simulaciones de arranque y posteriormente comparar contra datos experimentales para verificar si la aproximación fue adecuada.

Primero, el perfil de temperatura de arranque experimental  $\Gamma_s(z)$  (— en Figura 4) se aproximará mediante uno rectangular equivalente (PTRE)

$$\gamma_s(z) = \begin{cases} 25, & 0 \leq z < Z_{si} \\ T_{eq}, & Z_{si} \leq z \leq Z_{se} \\ 25, & Z_{se} < z \leq L \end{cases} \quad (3)$$

donde  $T_{eq}$  es la temperatura equivalente en el sentido termodinámico de contenido de calor,  $Z_{si}$  (o  $Z_{se}$ ) es el inicio (o el fin) del PTRE. El perfil  $\gamma_s(z)$  (- - en Figura 4) debe igualar (con error aceptable) el calor sensible contenido en  $\Gamma_s(z)$  (área bajo la curva) y se define por el triplete inicio-fin-alto (IFA) del PTRE

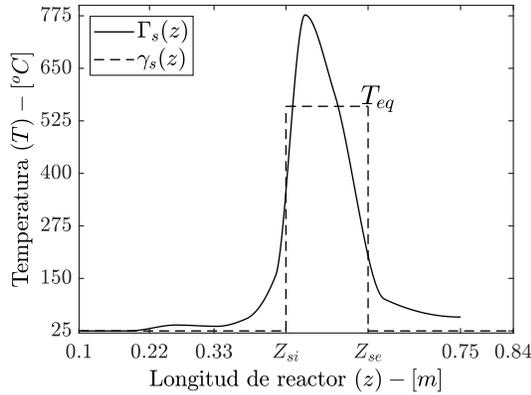


Figura 4.  $\Gamma_s(z)$  es el perfil de temperatura interpolado de arranque (—) y  $\gamma_s(z)$  es el PTRE (- -)

$$\text{IFA: } (Z_{si}, Z_{se}, T_{eq}) [m, m, ^\circ C] \quad (4)$$

Después, usando el triplete IFA (4) como CI de temperatura se simulará el arranque con el modelo (2) y se compararán los resultados contra los datos experimentales mostrados en la Figura 3. En caso de que la descripción del arranque sea razonable, el triplete IFA se aceptará, en caso contrario se ajustará el procedimiento de elección de (4).

Luego, se analizarán perfiles  $\gamma_s(z)$  con distintos valores de  $T_{eq}$ , para determinar los casos en los cuales (teóricamente) se tendrían arranques exitosos.

De nuestro estudio sobre la dinámica no lineal de gasificadores estrangulados (Santamaria-Padilla et al., 2022), un modelo de orden  $N = 70$  captura la multiplicidad de EEs y reproduce adecuadamente el comportamiento transitorio. Los parámetros cinético-químicos se toman de los trabajos de Yucel y Hastaoglu (2016) y Di Blasi y Branca (2013), con los ajustes reportados en Santamaria-Padilla et al., (2016).

### 3. DISEÑO DE CI DE TEMPERATURA

En esta sección se da un procedimiento para elegir el triplete IFA (4) del PTRE (3). Posteriormente se presenta la aplicación del procedimiento considerando el perfil de arranque de la Figura 2, con lo cual se determinan los valores del triplete IFA que se utilizarán para realizar simulaciones de arranque.

#### 3.1 Aproximación de PTRE para arranque

Se propone seguir el procedimiento de 6 pasos:

1. Elección de los datos experimentales en el instante de tiempo en el cual se alcanzaron los  $100^\circ C$  ( $t = t_{ae}$ ) en el termopar  $Z_9$  e interpolar para obtener un perfil continuo

$$\Gamma_s(z) = \mathcal{J}_z \mathbf{T}_{exp}(t_a) \quad (5)$$

donde  $\mathcal{J}_z$  es un operador de interpolación cúbico de spline.

2. Cálculo del área (calor sensible) bajo el perfil de temperatura

$$A_T = \int_{Z_1}^{Z_{10}} (\Gamma_s(z) - T_{amb}) dz \quad (6)$$

La temperatura ambiente se toma como referencia, por lo cual se resta a  $\Gamma_s(z)$  para que el área sea cero cuando la temperatura sea la del ambiente.

3. Normalización del perfil de temperatura como

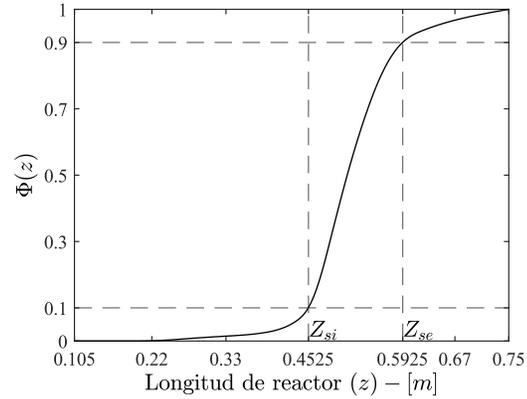


Figura 5. Curva de distribución de temperatura normalizada

$$\bar{\Gamma}_s(z) = \frac{\Gamma_s(z)}{A_T} \quad (7)$$

Lo anterior provoca que se tenga la distribución de temperatura normalizada (DTN) que cumple con

$$\Phi(z) = \int_{Z_1}^{Z_{10}} \bar{\Gamma}_s dz = 1 \quad (8)$$

4. Identificación en DTN (7) de  $Z_{si}$  y  $Z_{se}$ , las posiciones donde  $\Phi(Z_{si}) = 0.1$  y  $\Phi(Z_{se}) = 0.9$ , respectivamente. Lo anterior implica que

$$\int_{Z_{si}}^{Z_{se}} \bar{\Gamma}_s dz = 0.8 \quad (9)$$

representa el 80% del área bajo la curva.

5. Definición del calor sensible para arranque

$$Q_{0.8} = \int_{Z_{si}}^{Z_{se}} \Gamma_s(z) dz \quad (10)$$

El PTRE (3) debe poseer la misma área  $Q_{0.8}$  en el intervalo  $[Z_{si}, Z_{se}]$ , entonces

$$Q_{0.8} = T_{eq} (Z_{si} - Z_{se})$$

6. Cálculo de temperatura equivalente como

$$T_{eq} = \frac{Q_{0.8}}{Z_{si} - Z_{se}} + T_{amb} \quad (11)$$

#### 3.2 Aplicación de procedimiento en caso de estudio

Para el caso de estudio, se tiene que  $t_{ae} = 2.5 \text{ min}$ , al realizar la interpolación (5), se obtiene el perfil continuo  $\Gamma_s(z)$  mostrado en la Figura 2 (Paso 1).

Al calcular el área (6) bajo el perfil de temperatura (5) se tiene que  $A_T = 93.9542 [^\circ C \cdot m]$  (Paso 2), con este valor se calcula el perfil normalizado  $\bar{\Gamma}_s(z)$  (6) (Paso 3).

En la Figura 5 se muestra la DTN  $\Phi(z)$  (7), la intersección de las líneas horizontales discontinuas con la curva  $\Phi(z)$  determinan las ubicaciones  $Z_{si} = 0.4525$  y  $Z_{se} = 0.5925$  para las cuales  $\Phi(z)$  es 0.1 y 0.9, respectivamente (Paso 4). Estos valores definen el ancho de  $\gamma_s(z)$ .

Se define el calor sensible para el arranque (10) (Paso 5) como

$$Q_{0.8} = \int_{0.4525}^{0.5925} \Gamma_s(z) dz = 78.34 [^\circ C \cdot m]$$

Entonces la temperatura equivalente (altura de  $\gamma_s(z)$ ) (11) es

$$T_{eq} \approx 559.6 \text{ } ^\circ C$$

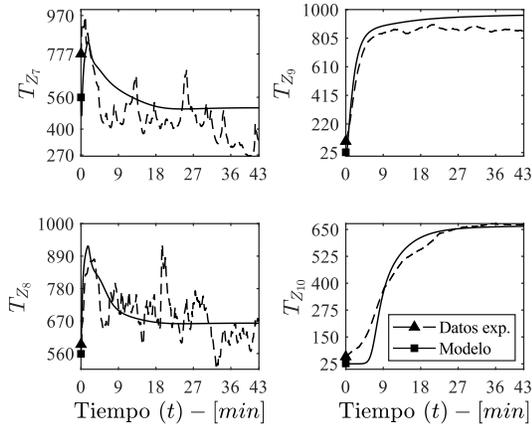


Figura 6. Comparación arranque modelo contra datos

Con lo anterior el triplete IFA (que define al perfil  $\gamma_s(z)$  de la Figura 3.5) es

$$(Z_{si}, Z_{se}, T_{eq}) = (0.4525, 0.5925, 559.6) \quad (12)$$

Las ubicaciones  $Z_{si}, Z_{se}$ , muestran que el PTRE  $\gamma_s(z)$  inicia 0.01m antes del fin del puerto de ignición ( $Z_{pif}$ ) y termina a 0.04 m después de la zona de entrada de aire ( $Z_a$ ).

#### 4. RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados de simulación obtenidos usando el modelo (2) considerando el PTRE  $\gamma_s(z)$  definido por el triplete IFA (12) como CI de temperatura. Los perfiles de CIs de los estados dinámicos restantes (1c) se determinan a partir de la descripción del procedimiento de arranque, mientras que las CIs de los estados cuasi-estacionarios se calculan a partir de las CIs de los dinámicos.

##### 4.1 Simulaciones con PTRE $\gamma_s(z)$

Al comparar el transitorio de arranque del modelo contra los datos experimentales (ver Figura 6), se observa que los transitorios experimentales en  $T_{Z_9}$  y  $T_{Z_{10}}$  tienen una muy buena aproximación, en particular para  $T_{Z_{10}}$  a partir de los 9 min. En ambos casos, la temperatura inicial del modelo (■) se encontraba por debajo del valor experimental (▲).

Para  $T_{Z_7}$  se observa que la temperatura inicial del modelo está unos 218°C por debajo del valor experimental, sin embargo, se incrementa rápidamente para después comenzar a disminuir siguiendo la tendencia del valor experimental, teniendo un buen seguimiento después de unos 7 min. Para  $T_{Z_8}$ , se aprecia que la diferencia entre las temperaturas iniciales es mínima (de unos 32°C), de igual forma la descripción realizada por el modelo es buena ya que se encuentra dentro de las fluctuaciones que el registro experimental exhibe.

Con lo anterior, se valida que la aproximación de la CI de temperatura mediante el PTRE  $\gamma_s(z)$  (3) y los valores del triplete IFA (12) fueron adecuados, ya que se describieron los datos experimentales de arranque y además no se presentaron problemas de condicionamiento ni de convergencia del resolutor de EDOs, por lo anterior, no fue necesario realizar algún ajuste al procedimiento propuesto.

##### 4.2 Relación entre el tiempo de antorcha y arranque exitoso

Para apreciar la relación que existe entre el PTRE con la rutina de arranque (RA) del fabricante, se analizará la

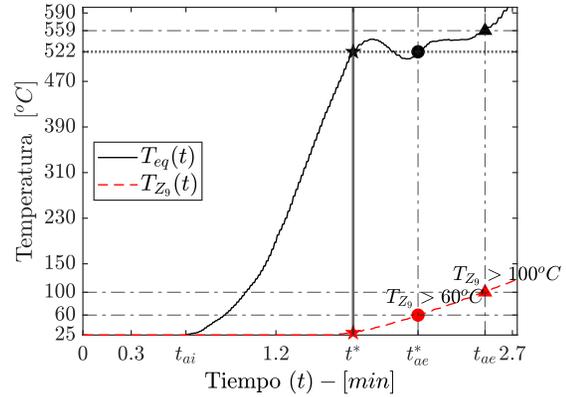


Figura 7. Evolución de temperatura  $T_{Z_9}$  y de  $T_{eq}$  en perfil  $\gamma_s(z)$  asociado

temperatura equivalente de los perfiles  $\gamma_s(z)$  (manteniendo al ancho  $[Z_{si}, Z_{se}]$ ) en tiempos  $t \leq t_{ae} = 2.5$  min y su capacidad de producir simulaciones con arranques exitosos.

En la Figura 7, se dibujan la temperatura en el termopar  $Z_9$  (---) y la  $T_{eq}^*(t)$  (—) del PTRE  $\gamma_s(z)$  asociadas al tiempo correspondiente. En el tiempo  $t_{ai} = 0.61$  min es cuando se acerca la antorcha al puerto de ignición y es a partir de dicho instante en que es posible tener perfiles  $\gamma_s(z)$  equivalentes. Es importante recalcar que hasta el tiempo 1.58 min se comienza a visualizar un incremento en  $T_{Z_9}$ , mientras que en los termopares más cercanos al puerto de ignición el incremento en temperatura se visualiza antes (ver Figura 3).

De acuerdo con RA2,  $T_{Z_9} \approx 100^\circ\text{C}$  ocurre en  $t_{ae} = 2.5$  min y está asociado al perfil  $\gamma_s(z)$  con  $T_{eq} = 559^\circ\text{C}$  (▲ en Figura 7). En una versión anterior del manual del fabricante, la RA2 recomendaba verificar que  $T_{Z_9} \approx 60^\circ\text{C}$ , esto ocurre en  $t_{ae}^* = 2$  min, lo cual corresponde a un perfil  $\gamma_s(z)$  con  $T_{eq} = 522^\circ\text{C}$  (● en Figura 7).

La recta horizontal (⋯) muestra 3 intersecciones con la curva  $T_{eq}^*(t)$ , lo cual implica que para tiempos menores a  $t_{ae}^*$  existen casos en los cuales los PTRE  $\gamma_s(z)$  asociados poseerán el mismo calor sensible. Se realizó una simulación considerando el PTRE  $\gamma_s(z)$  con el triplete IFA  $(Z_{si}, Z_{se}, T_{eq}) = (0.4525, 0.5925, 522)$  y se encontró que la aproximación a los datos experimentales de arranque es equivalente a la mostrada en Figura 6 (no se incluye por economía de espacio).

En  $t^* = 1.67$  min, es la primera vez que  $T_{eq} \approx 522^\circ\text{C}$  ocurre, mientras que en dicho tiempo  $T_{Z_9} \approx 29^\circ\text{C}$  (★ en Figura 7). Si se retirara la antorcha en  $t^* = 1.67$  min y se procediera a RA3, de acuerdo con el análisis realizado con modelo, se tendría un arranque exitoso y se alcanzaría el EE nominal. Puede ser que el fabricante no recomiende el tiempo  $t^*$  debido a que la temperatura registrada  $T_{Z_9}$  aun puede experimentar cambios considerables (ver Figura 7).

Por lo anterior, la decisión del fabricante de mantener la antorcha hasta el tiempo  $t_{ae}$  en que  $T_{Z_9} \geq 100^\circ\text{C}$ , es para robustificar la operación de arranque, ya que se garantiza que se tendrá una mayor cantidad de calor sensible disponible y

con ello (al operar en lazo abierto) es posible llevar las trayectorias del sistema lo suficientemente cerca de la cuenca de atracción del EE nominal.

## 5. CONCLUSIONES

Se ha propuesto una metodología para determinar las condiciones iniciales (CI) del modelo matemático, en particular la CI del perfil de temperatura, que fue probada exitosamente para reproducir la rutina de arranque (RA) experimental de un gasificador estrangulado mediante simulación utilizando un modelo de orden eficiente. El perfil de temperatura de arranque experimental fue aproximando con un perfil de temperatura rectangular equivalente (PTRE) el cual posee el mismo calor sensible presente al retirar la antorcha del puerto de ignición. El PTRE permitió realizar las simulaciones sin malcondicionar numéricamente el problema. La experiencia ganada en este trabajo puede ser aprovechada para encontrar el PTRE óptimo de arranque, ya que se han identificado características bajo las cuales la solución numérica converge.

Se verificó que la RA recomendada por el fabricante está relacionada con el calor sensible disponible y se observó que, para los datos utilizados, era posible retirar la antorcha en el instante  $t^* = 1.67$  min, ya que el calor sensible del PTRE es, en teoría, el mismo que cuando la antorcha se mantiene por  $t_{ae} = 2$  min (asociado a un criterio del fabricante). Se concluye que mantener la antorcha por más tiempo ( $t_{ae} = 2.5$  min) robustece la RA al operar en lazo abierto.

La simplificación de la elección de CI del perfil de temperatura para simular el arranque induce un error de descripción que se desvanece en los primeros 9 minutos (1/5 del tiempo de arranque) y es aceptable dentro del rango de incertidumbre o variabilidad de las mediciones. Esto permite: (i) para un reactor en particular, analizar escenarios distintos al recomendado por el fabricante, estableciendo una zona específica donde se puede cambiar la temperatura equivalente relacionada con el calor sensible disponible para el arranque y (ii) aplicar la metodología a otras configuraciones y escalas de reactor. Dado los hallazgos recientes sobre multiplicidad en este tipo de reactores, es de esperar que existan CIs para las cuales las trayectorias de arranque terminen en el estado estacionario nominal, de rejilla y de extinción. Conocer estos escenarios es crucial para sistematizar el diseño del arranque en lazo abierto y para el caso de contar con un sistema de control y monitoreo.

AGRADECIMIENTOS: Al proyecto PAPIIT IT100623.

## REFERENCIAS

All Power Labs. (2024). All power labs. Retrieved June 5, 2024, from <http://www.allpowerlabs.com/>

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>

Boor, C. de. (2001). A Practical Guide to Splines - Revised Edition. In Springer-Verlag, New York (Vol. 115). Springer.

Crank, J. (1979). The mathematics of diffusion. Oxford university press.

Di Blasi, C., & Branca, C. (2013). Modeling a stratified downdraft wood gasifier with primary and secondary air entry. *Fuel*, 104, 847–860. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.10.014>

Huchon, V., Pinta, F., Commandré, J. M., & van de Steene, L. (2020). How electrical engine power load and feedstock moisture content affect the performance of a fixed bed gasification genset. *Energy*, 197, 2–11. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117144>

Hundsdoerfer, W., & Verwer, J. G. (2003). Numerical Solution of Time-Dependent Advection-Diffusion-Reaction Equations. In *SIAM Review* (Vol. 33).

Janajreh, I., & al Shrah, M. (2013). Numerical and experimental investigation of downdraft gasification of wood chips. *Energy Conversion and Management*, 65, 783–792. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.03.009>

Pérez, J. F., Melgar, A., & Benjumea, P. N. (2012). Effect of operating and design parameters on the gasification/combustion process of waste biomass in fixed bed downdraft reactors: An experimental study. *Fuel*, 96, 487–496. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.01.064>

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>

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>

Yan, W. C., Shen, Y., You, S., Sim, S. H., Luo, Z. H., Tong, Y. W., & Wang, C. H. (2018). Model-based downdraft biomass gasifier operation and design for synthetic gas production. *Journal of Cleaner Production*, 178, 476–493. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.009>

You, S., Sik Ok, Y., Chen, S. S., Tsang, D. C. W., Kwon, E. E., Lee, J., & Wang, C.-H. (2017). A critical review on sustainable biochar system through gasification: Energy and environmental applications. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.177>

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>