

GENERACIÓN A PEQUEÑA ESCALA, GASIFICADOR DE BIOMASA- SOFC: DISEÑO DE UN SISTEMA DE LIMPIEZA PARA EL GAS DE SÍNTESIS

S.Y. Giraldo*, V.R.M. Cobas, E.S. Lora

NEST- Núcleo de Excelencia en Generación Termoelectrónica y Distribuida. Instituto de Ingeniería Mecánica. Universidad Federal de Itajubá. Brasil. Av BPS, 1303-Pinheirinho CEP 37500-903.

* Tel/Fax: +55(35)3629-1493, e-mail: sayagire@yahoo.com

RESUMEN

Los sistemas compuestos por gasificadores de biomasa y células de combustible pueden ser considerados como una alternativa a la generación de electricidad en pequeña y mediana escala para el futuro. Entre las células a combustible, las de óxido sólido (SOFC) son las que presentan mejor versatilidad en el empleo de combustibles diferentes al hidrógeno puro, como el gas de gasificación de biomasa. Sin embargo, este gas contiene otros compuestos que en bajas concentraciones influyen en el desempeño de la célula y restringen su uso. Está compuesto principalmente de H_2 , CO, CO_2 , CH_4 , y compuestos adicionales como material particulado, alquitrán, compuestos de azufre y ácidos, los cuales reducen la eficiencia y el tiempo de vida útil de la célula, al ser los responsables del taponamiento, corrosión, envenenamiento y deposición de carbón en diferentes elementos del sistema.

La universidad Federal de Itajubá, dispone de un gasificador downdraft y una SOFC de 5kW diseñada para usar gas natural, que pueden ser acoplados para generar electricidad a partir de biomasa, si previamente el gas se limpia adecuadamente para atender las exigencias de calidad necesarias para su uso como combustible en la célula. Así, este trabajo presenta la propuesta de diseño de un sistema de limpieza versátil que permite la implementación de procesos a alta y/o baja temperatura acoplados a un gasificador de lecho fijo y una célula de óxido sólido. Son mostrados los resultados de diseño de los reactores de remoción de alquitrán y azufre y del filtro cerámico, equipos de mayor relevancia no disponibles comercialmente.

1. Introducción

El uso de la biomasa como gas combustible agrupa tecnologías que incluyen la combustión, la gasificación y la pirólisis. La gasificación es considerada una de las opciones más prometedoras ya que el gas producido se puede utilizar en calderas, hornos, o después de un tratamiento, en turbinas a gas y células de combustible, para la generación de potencia térmica y/o eléctrica [1]. Los sistemas de producción de electricidad que emplean células de combustible son más eficientes que aquellos basados en motores de combustión y turbinas a gas [2]. Las células de óxido sólido (SOFC) son consideradas las más promisorias para su integración con gasificadores de biomasa, debido a su alta temperatura de operación, flexibilidad en el uso de combustibles, alta eficiencia y bajas emisiones al ambiente [3].

El gas de síntesis es una mezcla gaseosa de CO, N₂, CO₂, CH₄, H₂ y H₂O principalmente, y en menor cantidad otros compuestos que son considerados contaminantes e independiente que la tolerancia de los contaminantes en los sistemas donde sea usado el gas sea diferente, es necesario efectuar un proceso de limpieza [6].

Este artículo intenta dar una visión general del estado del arte de los métodos de limpieza de gases disponibles, y propone un sistema que permita limpiar el gas de síntesis obtenido de un proceso de gasificación de biomasa en un reactor de lecho fijo con doble entrada de aire para su uso en la generación de electricidad mediante una célula de óxido sólido de 5kW. Se presentan los requerimientos del sistema y cálculos preliminares de diseño de los equipos no disponibles comercialmente, los reactores de lecho fijo para la remoción de alquitrán y compuestos de azufre y el filtro cerámico.

2. Estado del arte de los sistemas de limpieza de gases

2.1. Composición del gas de síntesis y tolerancia de los contaminantes para su uso en SOFC

El gas de síntesis contiene material particulado, alquitrán y otros componentes en menor cantidad que pueden generar problemas en los sistemas donde va a ser usado. Los contaminantes se pueden clasificar en [7]: Alquitrán, material particulado, compuestos de nitrógeno: NH₃, HCN, compuestos de azufre: H₂S, COS, compuestos alcalinos: KOH, NaCl, NaOH y compuestos halogenuros: HCl, HBr, HF, HI. Existen datos experimentales limitados disponibles en la literatura sobre el impacto de estos contaminantes en el desempeño de las SOFC, sin embargo el material particulado,

alquitrán, HCl y derivados de azufre (H_2S y COS) [8,9] son los que más efectos adversos generan, siendo responsables de taponamiento, corrosión, envenenamiento y deposición de carbón en electrodos, catalizadores de reforma, tuberías, etc.

Como el combustible se oxida en el ánodo de la SOFC, los ánodos dependiendo del material, pueden presentar diferente interacción con los contaminantes, y por lo tanto el nivel de tolerancia puede variar [10]. Los ánodos están compuestos principalmente por níquel y son mezclados (dopados) con otros materiales como Itria estabilizada con zirconia (YSZ) o gadolinio dopado con cerio (GDC). Se encuentran trabajos evaluando la influencia de algunos contaminantes, en especial azufre, en diferentes ánodos. La presencia de H_2S envenena el ánodo de la célula reduciendo su efecto catalítico, básicamente debido a quimisorción [11] sin embargo el efecto de envenenamiento depende principalmente de la temperatura de operación de la SOFC, de la concentración de H_2S , del voltaje, de la densidad de corriente de la célula [12] y también del material, así en el caso de ánodos de Ni-YSZ, estos se ven afectados con concentraciones superiores a 1 ppm [11,13], mientras que en ánodos de Ni-GDC las concentraciones están arriba de 9 ppm [14].

Compuestos como el HCl afecta la actividad catalítica del ánodo de la célula en concentraciones por encima de 1 ppm [15,16], sin embargo, existen algunos trabajos en donde concentraciones de hasta 100 ppm de HCL no muestran influencia significativa en corto tiempo de operación de SOFC [17]. Aravind et al, encontró que concentraciones de 9 ppm no muestra interacción del HCl con ánodos de Ni-GDC [10]. Otros estudios muestran que el electrolito tiene menor tolerancia al HCl, y concentraciones de 100 ppm tiene alta influencia en el deterioro por corrosión de otras partes de la célula cuyo material sea acero inoxidable [18]. Las pérdidas de corriente en la SOFC aumentan cuando aumenta la concentración de HCl y aumenta la temperatura de operación de la célula, presentándose perdidas de corriente superiores al 13% en concentraciones arriba de 20 ppm [19].

El principal problema del alquitrán y particulado en el gas se debe a la deposición de carbono, que provoca taponamiento de los poros y/o encapsulamiento de los sitios activos de los electrodos, disminuyendo la eficiencia de generación de potencia de la SOFC [20]. El material particulado también puede generar incrustación y corrosión [21]. Estudios realizados para evaluar la influencia del alquitrán, mostraron que SOFC con electrodos de Ni-GDC toleran mayor concentración de estos contaminantes [22]. Los

rangos de concentración del gas de síntesis y los límites de contaminantes para una SOFC se encuentran en las referencias [6,13,15].

2.2. Tecnologías disponibles de acuerdo con el contaminante y las condiciones de operación

Actualmente las investigaciones en el tema de limpieza de gases proveniente de la gasificación de biomasa, están enfocadas en el tratamiento del material particulado y alquitrán y para aplicaciones específicas como las SOFC, la remoción de H_2S cobra una mayor importancia [10]. En general se puede hablar de dos tipos de sistemas: a alta y baja temperatura [23]. La figura 1 muestra opciones de limpieza teniendo en cuenta la temperatura [24] y los contaminantes presentes en él [6].

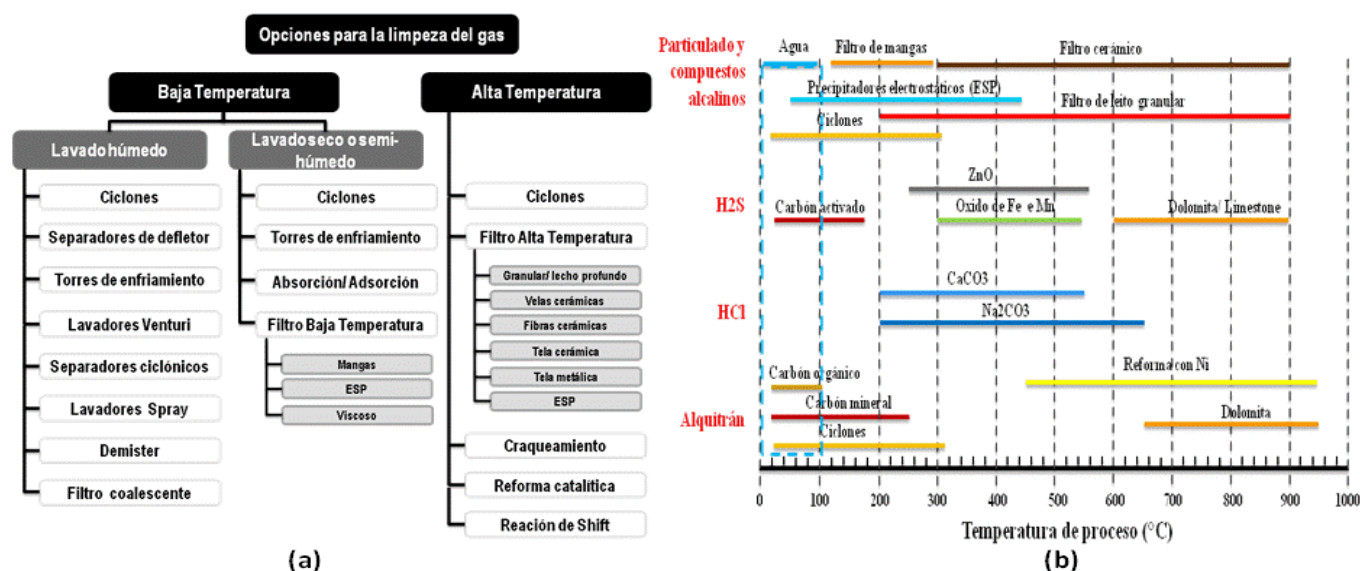


Figura 1.- Limpieza del gas de síntesis según (a) la temperatura, (b) el contaminante

En este trabajo se propone un sistema de baja temperatura ($<400\text{ }^{\circ}\text{C}$), con excepción del reactor de lecho fijo para alquitrán que se diseñó con el fin de comparar el desempeño del sistema operando a baja temperatura con uno combinado con remoción de alquitrán a alta temperatura.

2.2.1. Material particulado

Está formado principalmente por carbono y cenizas que puede contener compuestos como metales alcalinos [25], que son removidos usando los mismos métodos para particulado (figura 1b). Los sistemas a baja temperatura incluyen ciclones, lavadores, precipitadores electrostáticos (ESP) y filtros. Los ciclones son los sistemas más

económicos y antiguos y son considerados sistemas de pre-separación [26-28]. Su eficiencia de separación está alrededor de 90% para partículas $>5\ \mu\text{m}$ [28]. Los lavadores presentan mejor eficiencia de remoción que los ciclones y remueven partículas $>0.5\ \mu\text{m}$. También son usados para remover ácidos y otros contaminantes como el SO_2 [30,31]. Existen varios tipos de lavadores, siendo el venturi y las torres empacadas los más usados para remover partículas con eficiencias $>98\%$ [30,32,33]. Los lavadores spray son más usados para remover ácidos, sin embargo existen estudios de uso para remover partículas [34]. Los sistemas de filtración son los filtros de talega (textiles), filtros de barrera rígida (cerámicos y metálicos) y filtros de lecho granular (por ejemplo arena) [35,36]. Los filtros granulares ofrecen altas eficiencia para partículas y alquitrán pesado ($>90\%$) [29, 37,38]. Los filtros de talega y de barrera rígida presentan eficiencias cercanas al 100%, en la remoción de partículas $<1\ \mu\text{m}$, pueden operar a baja y alta temperatura [35,39,40] y usualmente son usados en combinación con lavadores [41,42]. Los precipitadores electrostáticos (ESP) presentan eficiencias muy altas en la remoción de particulado (98%), sin embargo su uso a nivel industrial es limitado debido a costos [43,44]

2.2.2. *Alquitrán*

Definido como aquellos hidrocarburos condensables de masa molecular mayor que el benceno. Su remoción incluye procesos químicos (craqueo térmico o catalítico) y procesos físicos. Los lavadores son los equipos de remoción física más usados [26,33,45], con eficiencias $>95\%$. Otros equipos que también han sido usados son los EPS y ciclones [46]. Los métodos de craqueo son usados para destruir el alquitrán, a altas temperaturas ($>750\ ^\circ\text{C}$), siendo muy común el uso de catalizadores como dolomita, zeolita y Ni en el caso de craqueo catalítico con eficiencias $>98\%$ [47-50] o superior a $900\ ^\circ\text{C}$ para craqueo térmico [51].

2.2.3. *Compuestos de azufre.*

El azufre contenido en la biomasa es transformado en H_2S y en menor medida en COS durante la gasificación. Los procesos de remoción a baja temperatura incluyen adsorción, absorción, métodos biológicos [52] y oxidación selectiva. La absorción mediante el uso de lavadores [53,54], la adsorción y oxidación con el uso de sorbentes como carbón activado, carbonato de potasio, ZnO , Fe_2O_3 hidratada en reactores de lecho fijo o lecho fluidizado [55-57]. El carbón activado es uno de los sorbentes más estudiados por su eficiencia en la remoción a baja temperatura ($25\text{-}150\ ^\circ\text{C}$) [58-60].

Estudios incluyen el uso del carbón en forma simple o modificado con compuestos básicos y ácidos para mejorar su capacidad [61,62], influencia del tamaño del poro [63], concentración del contaminante [57], humedad [64,65], etc. A alta temperatura incluyen el uso de óxidos de Zn, Fe, Mn, La y Cu, en reactores de lecho fijo [66-68].

2.2.4. *Compuestos alcalinos y ácidos*

Incluyen sales de sodio y potasio (KCl, NaCl) y HCl. Los primeros pueden ser removidos a baja temperatura, usando los mismos procesos para material particulado mencionados previamente [41] y a alta temperatura (600-1000°C) usando sistemas de lecho fijo con sorbentes como la bauxita, caolina y SiO₂ [69,70] cuyas eficiencias son >98% y combinados con filtros cerámicos [71]. La remoción de HCl incluye procesos a baja temperatura usando ciclones [72] y lavadores, especialmente del tipo spray [31,41] y a alta temperatura (>400 °C) con sorbentes alcalinos como hidróxidos y sales de Ca, K, y Na o sus óxidos [73,74].

3. Configuración del sistema de limpieza

La limpieza del gas a niveles deseados requiere diferentes procesos y determinar cuál es el mejor para un conjunto de condiciones exige análisis técnicos y económicos, sin embargo, en este trabajo, fueron tenidas en cuenta únicamente las de tipo técnico, y que predominara la operación a baja temperatura. El sistema seleccionado está formado por un filtro de arena, dos lavadores (spray y venturi), dos reactores de lecho fijo (carbón activado y dolomita) y un filtro cerámico, como se puede ver en la figura 3.

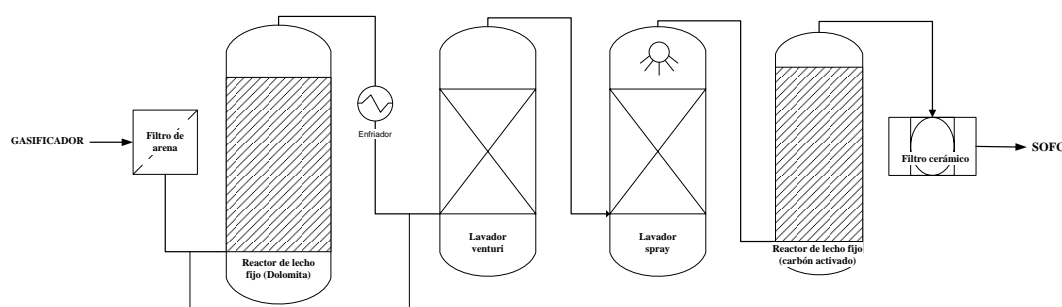


Figura 2.- Diagrama sistema de limpieza propuesto

Este sistema permitirá limpiar el gas, en condiciones de baja temperatura, complementando la remoción de alquitrán a alta temperatura como punto de comparación, permitiendo su operación a diferentes temperaturas para seleccionar la configuración que garantice los requisitos de concentración de la SOFC. En la Tabla 2 se muestra la descripción de cada equipo.

Tabla 1. Descripción del sistema de limpieza y requerimientos de diseño

Equipo	Función	Temperatura (°C)
Filtro de arena	Remover particulado	150
Reactor de lecho fijo con dolomita/ Ni	Craqueo de alquitrán	850
Lavador venturi	Remover alquitrán, particulado	150
Lavador spray	Remover HCl, SO ₂	150
Reactor de lecho fijo con carbón activado	Remover H ₂ S, COS	150
Filtro cerámico/talega	Remover particulado	350

Se selecciono como material de construcción y de aislamiento acero inoxidable 310 y vermiculita para el reactor de alquitrán e inoxidable 304 y lana de roca para los demás equipos. El dimensionamiento se hizo siguiendo la metodología mostrada en [75], bibliografía de diseño de reactores y transferencia de calor [76-78]. El flujo de diseño fue de 140 NL/min de gas de síntesis [79]. En la tabla 3 se muestra la concentración promedio del gas de síntesis [80] usado y las propiedades, calculadas asumiendo gas ideal [81]

Tabla 2- Composición y propiedades del gas a la temperatura de diseño de los equipos

Compuesto	% vol	150 °C	350 °C	850 °C
H ₂	17			
N ₂	37			
CO	20			
CO ₂	13			
CH ₄	1.5			
H ₂ O	11.5			
Alquitrán (mg/Nm ³)	2000			
Particulado (mg/Nm ³)	300			
ρ_{gas} , (kg/m ³)		0.7036	0.4778	0.2651
$C_{p_{\text{gas}}}$ (kJ/kg.K)		3.4534	3.5327	3.7896
μ_{gas} , (N.s/m ²)		1.913E-05	2.600E-05	4.011E-05
k_{gas} , (W/m.K)		0.0645	0.0901	0.1488

3.1. Diseño del reactor

Los reactores fueron diseñados de forma idéntica para simplificar el proceso de concepción y fabricación. El volumen del reactor fue calculado teniendo en cuenta el concepto de velocidad espacial, de acuerdo a la ecuación 1 [78], debido a la ausencia de datos cinéticos [k, E_a].

$$V_{adsorbente} = \frac{\text{Flujo de gas}}{\text{velocidade espacial}} \quad (1)$$

La velocidad espacial para la remoción de H₂S y alquitrán se encuentra entre 1000 y 36000 h⁻¹ [82,83], se toma la mínima velocidad para encontrar el máximo volumen. Se selecciona un reactor de lecho fijo adiabático cilíndrico por presentar presiones internas estables y porque este permite regular la temperatura de entrada en procesos con bajo calor de reacción [84]. El gas entra al reactor a través del “downcomer” donde se precalienta el gas para garantizar la temperatura de operación del reactor. El calentamiento se hará mediante resistencia eléctrica cuya potencia fue determinada por cálculos de transferencia de calor, usados también para encontrar la longitud del “downcomer”. La caída de presión fue determinada para seleccionar el tamaño de partícula más adecuado del lecho, usando las relaciones semi-empíricas de Ergun en combinación con las de Forchheimer [78]. La figura 4 muestra la caída de presión para cada reactor, y un esquema en 3D del equipo

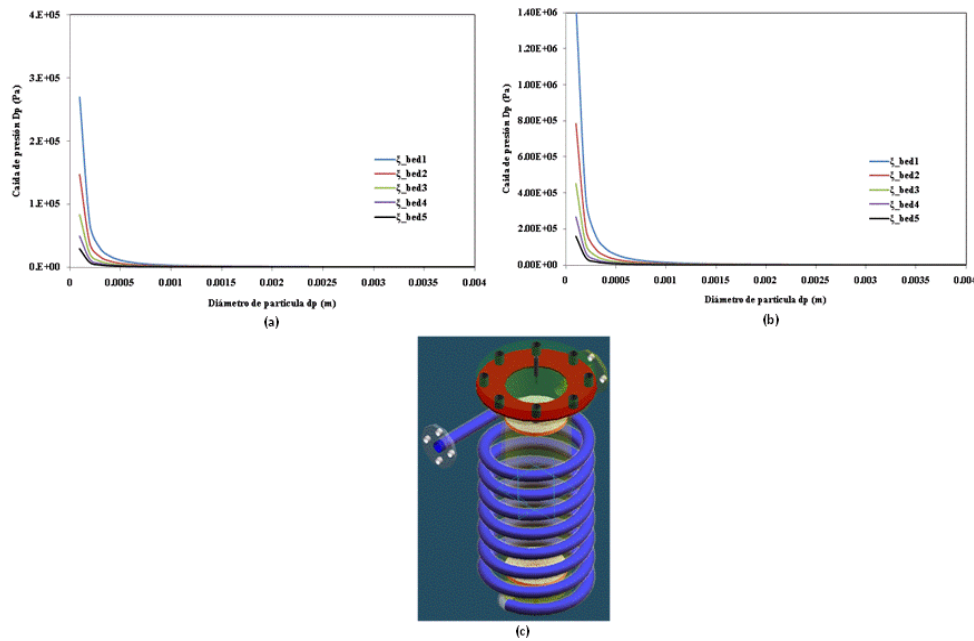


Figura 4. Caída de presión (a) reactor de azufre, (b) reactor de alquitrán, para fracciones de vacío ε de 0.3-0.5. (c) Diagrama 3D del reactor

Teniendo en cuenta esta grafica (a) y (b), el tamaño de partícula debe ser > 0.0005 m para garantizar que la caída de presión sea despreciable. La tabla 4 muestra los resultados de cálculo de los reactores.

Tabla 3. Resultados de dimensionamiento de los reactores

Descripción	Unidades	Reactor azufre	Reactor alquitrán
Flujo real	L/min	216.88	575.66
Velocidad espacial mínima	h^{-1}	1000	1000
Tiempo de residencia máximo	S	3.6	3.6
Tipo de adsorbente	-	Carbón	Dolomita
Volumen adsorbente	L	13.01	34.54
Diámetro del reactor	mm	202.72	254.51
Longitud del reactor	mm	550	840
Longitud del lecho	mm	440	700
Volumen del reactor	L	17.75	41.45
Diámetro del downcomer	m	0.027	0.027
Longitud del downcomer	m	4.37	6.80
Caída de presión del reactor	mbar	200	200
Material aislante	-	Lana de roca	Vermiculita
Espesor de aislamiento	m	0.05	0.05
Número de Reynold	-	6343.95	3029.87
Calor gas síntesis	W	427.51	5557.58
Perdida de calor totales	W	225.99	4832.30
Potencia mín de la resistencia	W	653.50	10389.89

3.2. Diseño del filtro

Para garantizar la remoción de partículas $<0.5\mu\text{m}$ se usará un filtro cerámico vertical tipo vela cuyas características se listan en la tabla 5 y con flujo ascendente de gas. El calentamiento del filtro se hará con resistencias eléctricas cuya potencia se determino mediante cálculos de transferencia de calor, asumiendo todo el filtro como un recipiente cilíndrico, usando los datos de la tabla 3.

Tabla 4- Vela cerámica (Ref. Pyrotex KE85, BWF Alemania)

Diámetro externo, m	0.06
Diámetro interno, m	0.042
Longitud, m	0.95
Permeabilidad @ 200 Pa ($\text{L}/\text{dm}^2 \cdot \text{Min}$)	120
Área elemento filtrante, m^2	0,18

Como no existe un método estándar de diseño de filtros, pueden usarse algunas guías encontradas en la literatura, sin embargo, el concepto de velocidad “can” (v_c) es usado en la mayoría de los diseños para determinar el área transversal de la carcasa libre de elemento filtrante [75], de acuerdo con la ecuación 2.

$$A = \frac{\text{Flujo de gas}}{v_v} \quad (2)$$

Los fabricantes de filtros recomiendan v_c en un rango de 0.2-0.5 m/s y para el presente trabajo se tomo 0.25 m/s y se calculo el área y finalmente, el diámetro de la carcasa suficiente para acomodar el elemento filtrante y los elementos auxiliares de apoyo.

También se calculo la caída de presión del filtro usando la ecuación de Ergun modificada por Innocentini [75]. Los cálculos se hicieron teniendo en cuenta el diámetro de poro $<1\mu\text{m}$, para cubrir el caso extremo de material filtrante totalmente obstruido. La figura 5 muestra los resultados de caída de presión y una figura en 3D del filtro y la tabla 6 los resultados de cálculo de diseño.

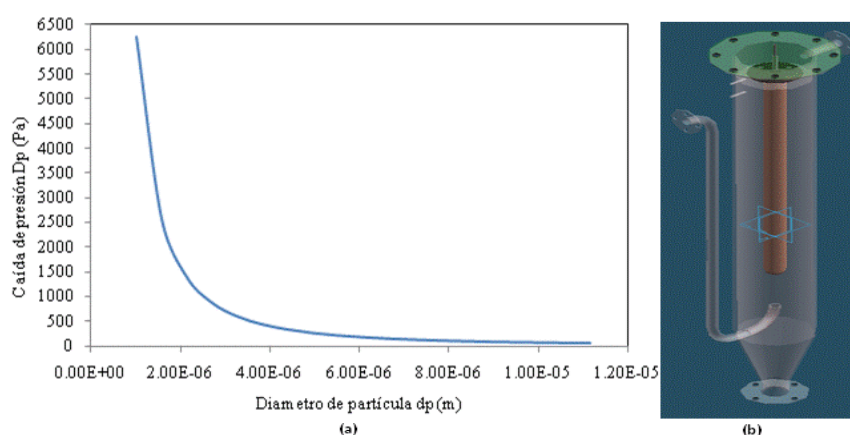


Figura 5. (a) Caída de presión del filtro y (b) Diagrama 3D

Tabla 6. Resultados de dimensionamiento del filtro

Descripción	Unidades	Valor
Flujo real	L/min	319.39
v_c	m/s	0.25
Diámetro filtro	m	0.203
Longitud del filtro	mm	1.60
Diámetro tubo entrada	m	0.027
Longitud del tubo	m	1.30
Caída de presión del tubo	mbar	300.00
Material aislante	-	Lana de roca
Espesor de aislamiento	m	0.05
Diámetro boquilla aire	m	0.0128
Número de Reynold	-	614.30
Calor gas síntesis	W	1710.03
Perdida de calor totales	W	329.01
Potencia min de la resistencia	W	2039.03

4. Conclusiones

En este trabajo se ha presentado una revisión acerca de los métodos de limpieza usados para remover los contaminantes que más afectan el desempeño de las SOFC, haciendo énfasis en aquellos que operan a baja temperatura. También se presentó una propuesta de un sistema de limpieza a baja temperatura para acondicionar el gas de síntesis de un proceso de gasificación de biomasa para su uso como combustible en una SOFC y se mostraron los resultados finales de diseño de dos reactores de lecho fijo para la remoción de compuestos de azufre y alquitrán y de un filtro cerámico para remover particulado. Los cálculos incluyeron caída de presión para determinar el tamaño mínimo de partícula del adsorbente para los reactores y la frecuencia de limpieza del filtro y transferencia de calor para determinar la potencia del sistema de calentamiento de los equipos.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen a la CEMIG, a la CNPQ y a la CAPES por el apoyo financiero para el desarrollo del presente trabajo mediante el proyecto 237 - Validación teórico-experimental de la gasificación de biomasa para la operación de células de combustible de óxido sólido (SOFC) y la beca doctoral y de investigación.

6. Referencias

- [1] Athanasiou, C, et al., *International Journal of Hydrogen Energy*, 32, 337, (2007)
- [2] Nagel, F.P, Schildhauer, T.J and Biollaz, S.M.A., *Int J Hydrogen Energy*, 34, 6809, (2009)
- [3] Hofmann, P, et al., *Int J Hydrogen Energy*, 33, 2834, (2008)
- [4] Rapagnà, S, et al., *Biomass & Bioenergy*, 19, 187, (2000)
- [5] de Jong, W, Andries, J e Hein, K.R.G., *Renewable Energy*, 16, 1110, (1999)
- [6] Skoblia, S., et al., *International Freiberg Conference on IGCC & XtL Technologies*. (2005)
- [7] Bridgwater, A.V. *Fuel*, 74, 631 (1999)
- [8] Aravind, P, et al. *6th European SOFC Forum Proceedings*, 1514. 2004
- [9] Aravind, P.V, et al., *Electrochemical Society Proceedings*, . 7, . 1459-1467. 2005
- [10] Aravind, P.V., et al., *Electrochemical and Solid-State Letters*, . 11, . B24-B28. 2008
- [11] Rasmussen, Jens F.B. and Hagen, Anke., *Journal of Power Sources*, . 191, . 534-541. 2009
- [12] Cheng, Zhe and Liu, Meilin., *Solid State Ionics*, . 178, . 925-935. 2007
- [13] Aravind, P.V., et al., *Electrochemical Society Proceedings*, . 7, . 1459-1467. (2005)
- [14] Heer, Eric De. *MSc Thesis*. Faculty of Mechanical Engineering, TU Delft. (2005)
- [15] Dayton, D.C. *National Renewable, NRL*. Report NREL/MP-510-30298, (2001)
- [16] Marina, O.A, et al., *Journal of Power Sources*, 195, 7033, (2010)
- [17] Bao, JianEr, et al., *Journal of Power Sources*, 193, 607, (2009)
- [18] Xu, Chunchuan, et al., *Journal of Power Sources*, . 195, . 2149-2158.(2010)
- [19] Tremblay, J.P., Gemmen, R.S. and Bayless, D.J., *Journal of Power Sources*, . 169, . 347, (2007)
- [20] Eguchi, K, et al., *Solid State Ionics*, s. 152-153, . 411-416. 2002
- [21] Pettersson, A. e et al., *Fuel*, . 87, . 3183-3193. (2008)
- [22] Yildiz, I. *MSc Thesis*. Faculty of Mechanical Engineering, TU Delft. (2007)
- [23] Hamelinck, C. N. Faaij, P.C., *Journal of Power Sources*, . 111, . 1-22. (2002)
- [24] Milne, T.A., Abatzoglou, N., Evans R.J. NREL. Golden, Colorado. Report NREL. (1998)
- [25] Leiva, C. e et al., *Energy & Fuels*, . 21, . 361-367. . 2007
- [26] Zwart, R.W.R., et al. 3, , *Environmental Progress & Sustainable Energy*, . 28, . 324-335. 2009

- [27] Salcedo, R.L.R, et al., *Powder Technology*, 172, . 89. (2007)
- [28] Sasatsu, H, et al., *Powder Technology* , . 118, . 58, (2001)
- [29] Hasler, P and Nussbaumer, Th., *Biomass and Bioenergy*, . 16, 385, (1999)
- [30] Joseph, G.T. and Beachler, D. S. North Carolina State University.. APTI Course SI:412C. (1998)
- [31] Lehner, M, Mayinger, F and Geipel, W., *Trans IChemE*, . 79, 109, (2001)
- [32] Yang, Linjun, et al. *Chemical engineering journal*., 156, 25, (2010)
- [33] Bhawe, A.G., Vyas, D.K. and Patel, J.B., *Renewable Energy*, 33, 1716, (2008)
- [34] Mohan, B.R, Biswas, S and Meikap, B.C., *Separation and Purification Technology*, 61, 96, (2008)
- [35] Golesworthy, T., *Filtration and Separation*, 36, 24, (1999)
- [36] Reijnen, K and Brakel, J. Van., *Powder Technology*, . 40, 81, (1984)
- [37] Pathak, B. S., et al., *International energy journal*., 8, 15, (2007)
- [38] Zevenhoven, C.A.P, Scarlett, B and Andries, J., *Filtration & separation*, 29, 239, (1992)
- [39] Clayton, E., Clayton, M. and Helmbach., T.J., *Filtration & Separation*, 32, 27, (1995)
- [40] Sharma, S.D., et al., *Powder Technology*, 180, 115, (2008)
- [41] Spooren, Tom, et al., *Environmental Progress*, .25, 2, (2006)
- [42] Farber, Paul s., *Energy*, 11, 1347, (1986)
- [43] Kautz, M and Hansen, U., *Applied Energy*, 84, 795, (2007)
- [44] Pettersson, Magnus, et al, *J. Proc. Cont.*, 8, 69, (1997)
- [45] Boerrigter, H., et al. ECN, *Report ECN-C -05-009*. (2005)
- [46] Iaquaniello, G and Mangiapane, A. *International J Hydrogen Energy*, 31, 399, (2006)
- [47] Dou, Binlin, et al, *Applied Thermal Engineering*, 23, 2229, (2003)
- [48] Yu, Q.-Z., et al., *Fuel*, 88, 1922, (2009)
- [49] Binlin Dou, Weiguo Pan, et al., *Energy Conversion and Management*, 49, 2247, (2008)
- [50] Haibo, Liu, et al., *Chinese Journal of Catalysis*, 31, 409, (2010)
- [51] Brandt, P, Henriksen, U. *Proceedings of the first world conference on biomass for energy and industry*. (2000)
- [52] Duan, H., et al., *Chemosphere*, 66, 1684, (2007)
- [53] Aniskin, S.V., Protod'yakonova, O.I. and Marasev, S.V., *Russian J Applied Chem*, 74, 748, (2001)
- [54] Wang, Rui., *Separation and Purification Technology*, 31, 111, (2003)
- [55] Wang, Xiaohui, et al. *Chemical Engineering Journal*, 142, 48, (2008)
- [56] Xiao, Yonghou, et al. *Separation and Purification Technology*, 59, 326, (2008)
- [57] Elsayed, Yehya, et al, *Chemical Engineering Journal*, 155, 594, (2009)
- [58] Zhou, Li, et al, *Adsorption Science & Technology*, 20, 969, (2002)
- [59] Lee, Seung Jong, et al., *Korean J. Chem. Eng*, 24, 1128, (2007)
- [60] Bagreev, A, Rahman, Hand Badosz, T. J., *Carbon*, 39, 1319, (2001)
- [61] Tsai, Jiun-Hong, et al., *J Chin Institute of Environ Eng.*, 9, 145, (1999)
- [62] Cui, S. Q., Turn, M. and Reese, A., *Catalysis Today*, 139, 274, (2009)
- [63] Bashkova, Svetlana, et al., *Carbon*, 45, 1354, (2007)
- [64] Primavera, A., et al. 1998, *Applied Catalysis A: General*, . 173, . 185-192.
- [65] Bouzaza, A., Laplanche, A. and Marsteau, S., *Chemosphere*, 54, 481, (2004)
- [66] Elseviers, W. F. e Verelst, H. 1999, *Fuel*, . 78, . 601-612.
- [67] Zhang, Jinchang, et al., *Energy Conversion and Management*, 44, 357, (2003)
- [68] Atakül, Hüsnü, et al. 1995, *Fuel*, . 74, . 187-191. 2.
- [69] Sharma, Sunil D., et al. 2010, *Fuel*, . 89, . 817-826.
- [70] Dou, B., et al. 2003, *Fuel Processing Technology*, . 82, . 51-60.
- [71] Turn, Scott Q., et al., *Ind. Eng. Chem. Res*, 40, 1960, (2001)
- [72] Chibanta, V, Fonseca, A. and Salcedo, R., *Journal of Hazardous Materials*, 178, 1, (2010)
- [73] Duo, W., et al. *Chemical Engineering Science*, 51, 2541, (1996)
- [74] Ohtsuka, Yasuo, et al., *Powder Technology*, 190, 340, (2009)
- [75] Protopapas, G. *MSc Thesis*. Delft University of Technology. (2006)
- [76] Couper, James R., et al. *Chemical Process Equipment. Selection and Design*. Elsevier, (2010).
- [77] Rase, H. F. *Fixed Bed Reactor Design and Diagnostics: Gas Phase Reactions*. Butterworths, (1990).
- [78] Green, Don W. *Perry's chemical engineers' handbook*. : McGraw-Hill, (2008).
- [79] Fuel cell technology LTD. *5 kW SOFC Alpha unit operations manual*. (2005).
- [80] Martinez, Juan Daniel. *Disertación de Maestria*, Universidad Federal de Itajubá. (2009).
- [81] Yaws, Carl. *Chemical Properties Handbook*, McGraw-Hill, 1998.
- [82] Devi, Lopamudra, et al., *Renewable Energy*, 30, 565, (2005)
- [83] Chen, Qingjun, et al, *Ind. Eng. Chem. Res*, 49, 3152, (2010)
- [84] Andriago, P., Bagatin, R. e Pagani, G. *Catalysis Today*, 52, 197, (1999)