

**DISEÑO CONCEPTUAL Y EVALUACIÓN ENERGÉTICA PARA LA
PRODUCCIÓN DE GAS DE SÍNTESIS A PARTIR DE MICROALGAS**

EDUAR FERNANDO FORERO ALARCÓN

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2015

**DISEÑO CONCEPTUAL Y EVALUACIÓN ENERGÉTICA PARA LA
PRODUCCIÓN DE GAS DE SÍNTESIS A PARTIR DE MICROALGAS**

EDUAR FERNANDO FORERO ALARCÓN

**Trabajo de grado presentado para optar al título de
Ingeniero Químico**

Director:

Dr. Sc. Viatcheslav Kafarov

Profesor Titular Universidad Industrial de Santander

Codirectora

MSc. Viviana Quintero Dallos

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2015

Este trabajo está dedicado a DIOS quien siempre guió mis pasos y fue mi más grande compañía en los momentos difíciles.

A mi abuela y mi madre quienes han luchado ferozmente para traerme a este momento de mi vida.

A mis tíos y hermano quienes hicieron el trabajo de padres, dándome siempre su apoyo incondicional y todo su cariño.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero agradecer a DIOS por permitirme cumplir con esta etapa tan importante en mi vida, siempre cuidándome y guiando mis pasos. En segundo lugar a mi Familia quienes son ese motor que me impulsa para lograr las cosas más difíciles y son el lugar donde siempre encontré paz, apoyo y amor. En tercer lugar a mis profesores quienes me formaron e hicieron de mí no solo un gran profesional sino una gran persona.

Por último quiero agradecer a mis compañeros y amigos que hicieron de esta etapa, la mejor experiencia de mi vida, quienes siempre estuvieron para sacar una sonrisa en momentos difíciles y me motivaron a continuar. Aquí quiero agradecer a una mujer que no solo fue mi amiga sino mi compañera de vida, quien con su cariño y sonrisas ha hecho más felices mis días.

TABLA DE CONTENIDO

| | Pág. |
|--|-------------|
| INTRODUCCIÓN | 14 |
| | |
| 1. MARCO TEÓRICO | 16 |
| 1.1. MICROALGAS | 16 |
| 1.2. SÍNTESIS DE BIOCOMBUSTIBLES A PARTIR DE MICROALGAS | 17 |
| 1.3. GASIFICACIÓN | 18 |
| 1.3.1. Gasificación con agua súper crítica o SCWG (siglas en inglés). | 20 |
| 1.4. PRODUCTOS DE LA GASIFICACIÓN CON AGUA SÚPER CRÍTICA | 22 |
| 1.5. INDICADORES DE SOSTENIBILIDAD PARA BIOCOMBUSTIBLES DE MICROALGAS | 23 |
| | |
| 2. METODOLOGÍA | 25 |
| 2.1 SELECCIÓN DEL ESQUEMA DE PROCESAMIENTO PARA LA SCWG | 25 |
| 2.1.1 Diseño conceptual del proceso | 25 |
| 2.1.2 Cultivo | 26 |
| 2.1.3 Centrifugación..... | 27 |
| 2.1.4 Gasificación con agua súper crítica. | 27 |
| 2.2 SIMULACIÓN DEL PROCESO..... | 28 |
| 2.3 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD | 30 |
| 2.4 EVALUACIÓN DEL PROCESO A TRAVÉS DE ÍNDICES ENERGÉTICOS Y AMBIENTALES..... | 30 |
| 2.5 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS CON LA LITERATURA | 30 |
| | |
| 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS | 31 |
| 3.1 ESQUEMA CONCEPTUAL DEL PROCESO..... | 31 |
| 3.2 EVALUACIÓN DEL PROCESO MEDIANTE ÍNDICES MÉTRICOS..... | 34 |

| | |
|-----------------------|----|
| 4. CONCLUSIONES | 39 |
| BIBLIOGRAFIA..... | 40 |
| ANEXOS | 48 |

LISTA DE FIGURAS

| | Pág. |
|---|-------------|
| Figura 1 Diagrama de flujo para la conversión de las microalgas en biocombustibles. | 18 |
| Figura 2 Diagrama del proceso de SCWG. | 31 |
| Figura 3. Flujo másico del Syngas producido contra la temperatura. | 32 |
| Figura 4. Flujo másico del Syngas producido contra presión. | 33 |
| Figura 5. Gráfica de los rendimientos reportados por varios autores en el proceso SCWG usando microalgas y los resultados obtenidos de la simulación. | 34 |
| Figura 6. Consumo energético presentado en el proceso de SCWG. | 36 |
| Figura 7. Comparación de los NER obtenidos en la literatura y el presentado en este trabajo. | 37 |

LISTA DE TABLAS

| | Pág. |
|--|-------------|
| Tabla 1. Compuestos de la biomasa introducidos en el simulador. | 26 |
| Tabla 2. Diseño del conceptual de la etapa de cultivo. | 26 |
| Tabla 3. Análisis elemental de la <i>Chlorella Vulgaris</i> | 29 |
| Tabla 4. Análisis energético del proceso de SCWG simulado. | 35 |
| Tabla 5. Análisis del consumo de combustibles fósiles en el proceso SCWG. | 37 |

LISTA DE ANEXOS

| | Pág. |
|--|-------------|
| Anexo A. Condiciones para etapas de cultivo y cosecha..... | 48 |
| Anexo B. Simulación realizada de SCWG. | 51 |
| Anexo C. Análisis de sensibilidad | 52 |
| Anexo D. Valores de LHV y HHV obtenidos mediante el análisis de sensibilidad . | 55 |
| Anexo E. Resultados de la bomba (PUMP) | 58 |
| Anexo F. Resultados de rehervidor (HEATER)..... | 59 |

RESUMEN

TÍTULO: DISEÑO CONCEPTUAL Y EVALUACIÓN ENERGÉTICA PARA LA PRODUCCIÓN DE GAS DE SÍNTESIS A PARTIR DE MICROALGAS*

AUTOR: EDUAR FERNANDO FORERO ALARCÓN**

Palabras Clave: Microalgas, Gasificación, Biomasa, Aspen Plus®, Procesos Termoquímicos, indicadores energéticos.

La implementación de nuevas técnicas para la obtención de fuentes renovables de energía, como la gasificación de biomasa para obtención de gas de síntesis (Syngas), ha permitido el aprovechamiento de materias primas novedosas, como las microalgas, con resultados que se acercan a procesos auto-sostenibles energéticamente y bajos impactos ambientales. Las microalgas se han catalogado como una materia prima con un alto potencial para la obtención de biocombustibles. Como todas las biomásas, éstas presentan un alto nivel de humedad en su composición, lo que afecta los procesos termoquímicos como la gasificación involucra grandes consumos de energía para su tratamiento. En este trabajo se plantea la simulación en Aspen Plus® V8.4., del proceso de gasificación con agua súper crítica (SCWG, siglas en inglés) para microalgas (*Chlorella Vulgaris*) y un análisis de sensibilidad mediante la variación de la T y P. Luego de obtenerse el diseño conceptual de la simulación, se construye el modelo en el simulador. A partir de los resultados obtenidos se estimaron los rendimientos de los componentes presentes en el gas de síntesis, los cuales fueron comparados con otras simulaciones de SCWG reportadas en la literatura. Además de los rendimientos, se calculó la relación de energía neta (NER, siglas en inglés) y la relación de energía fósil (FER, siglas en inglés), los cuáles son indicadores energéticos y ambientales que permiten evaluar la sostenibilidad del proceso, Estos indicadores fueron comparados con algunos reportados en la literatura para el proceso de SCWG.

* Trabajo de Grado

** Facultad De Ingenierías Físicoquímicas, Escuela De Ingeniería Química. Director: Viatcheslav Kafarov. Codirectora Viviana Quintero Dallos

ABSTRACT

TITLE: CONCEPTUAL DESIGN AND ENERGY EVALUATION FOR SYNTHESIS GAS PRODUCTION FROM MICROALGAE^{*}

AUTHOR: EDUAR FERNANDO FORERO ALARCÓN^{}**

Keywords: Microalgae, Gasification, Biomass, Simulation, Thermoquimics processes, Energy and environmental indicators.

The implementation of new techniques for obtaining renewable energy such as biomass gasification for production of synthesis gas (Syngas) has allowed the use of innovative materials such as microalgae, with results that are close to self processes-sustainable energy and low environmental impact. Microalgae have been listed as a raw material with a high potential for producing biofuels. Like all biomasses, they have a high level of humidity in composition, affecting thermochemical processes such as gasification involves large energy consumption for processing. In this paper, the simulation in Aspen Plus® V8.4 arises. The gasification process with super critical water (SCWG, acronym in English) for microalgae (*Chlorella Vulgaris*) and a sensitivity analysis by varying T and P. After obtained the conceptual design of the simulation, the model has been built in the simulator. From the results the yields of the components present in the Syngas, which were compared with other SCWG simulations reported in the literature is estimated. Besides yields, net energy ratio (NER acronym) and the ratio of fossil energy sources (RES, acronym) was calculated, which are the energy and environmental indicators to assess the sustainability of the process, these indicators were compared with some reported in the literature for SCWG process.

^{*} Work Degree

^{**} Faculty of Engineering Physicochemical, School Of Chemical Engineering. Director: Viatcheslav Kafarov. Co-director Viviana Quintero Dallos

INTRODUCCIÓN

Los combustibles fósiles son actualmente la mayor fuente de energía en el mundo, para el año 2013 el petróleo cubría el 33,1% de la demanda de energía mundial ¹. Se proyecta que para el 2035 el consumo mundial de energía aumentará a 779.7 cuatrillones de kJ, valor que equivaldría a más del doble de la energía consumida para el año 1990 ². Incluso con algunas desviaciones de estas proyecciones muestran un consumo energético masivo para el futuro. Para suplir esa demanda energética es necesaria la utilización de todas y cada una de las fuentes de energía posibles³.

En la búsqueda de nuevas energías que sustituyan los combustibles convencionales, las cuales deben ser: renovables, rentables, sostenibles y amigables con el medio ambiente, los recursos biológicos han recibido gran atención⁴. Siendo las microalgas, materia prima considerada promisoría para la producción de los biocombustibles denominados de tercera generación, esta afirmación ésta soportada en la investigación de 9 empresas a nivel mundial, las cuales enfocan su transformación por medios termoquímicos o bioquímicos para obtener productos tales como hidrógeno, Biodiesel, Bioetanol, etc^{5 6 7}.

¹ BP (BRITISH PETROLEUM). The BP statistical review of world energy june 2013. London, U.K.; 2013.[En Línea] citado 18 de enero de 2015 disponible en: <www.bp.com/statisticalreview.com>.

² EIA (U.S. Energy Information Administration). International Energy Outlook 2010. Washington, DC 20585, U.S.; 2010.[en línea] enero 18 de 2015 disponible en: <www.eia.gov/oiaf/ieo/index.html>.

³ ONCEL Suphi, S. Meicroalgae for a macroenergy world. Faculty of engineering. Departament of bioengineering., Ege University. Turkey : ELSEVIER, 2013

⁴ Oncel Suphi, S. op cit

⁵ PTASINSKI KJ. Efficiency analysis of hydrogen production methods from biomass. International Journal of Alternative Propulsion 2008;2(1):39-49.

⁶ WEBER G, FU Q, WU H. Energy efficiency of an integrated process based on gasification for hydrogen production from biomass. Developments in Chemical Engineering and Mineral Processing 2006;14:39e49.

⁷ MAHISHI MR, GOSWAMI DY. Thermodynamic optimization of biomass gasifier for hydrogen production. International Journal of Hydrogen Energy 2007;32:3831e40.

La gasificación es un proceso termoquímico, el cual utiliza un medio gasificante (aire, vapor de agua o agua en estado súper crítico) para convertir materiales carbonosos en Syngas (H_2 , CH_4 , CO_2 y CO), que puede ser utilizado como combustible⁸

El hidrógeno se ha considerado como un combustible limpio, ya que su combustión genera H_2O como desecho⁹. Una gran parte del hidrógeno producido en la actualidad es a partir del reformado del gas natural o de carbón¹⁰¹¹. Una tecnología más sostenible para la producción de hidrógeno puede ser la gasificación de biomasa que tiene significativamente menos emisiones de gases de efecto invernadero¹².

El objetivo de este trabajo es evaluar el rendimiento de Syngas (hidrógeno, dióxido de carbono, monóxido de carbono y metano), como función de la temperatura y la presión en la gasificación con agua súper crítica de la microalga (*Chlorella Vulgaris*), utilizando el simulador Aspen PLUS®, y realizar un análisis energético y ambiental mediante la utilización de indicadores.

⁸ PANDA, Chittaranjan. Aspen plus simulation and experimental studies on biomass gasification. National institute of technology. Rourkela : s.n., 2012. Thesis.

⁹ Weber G, Fu Q, Wu H. Energy efficiency of an integrated process based on gasification for hydrogen production from biomass. Developments in Chemical Engineering and Mineral Processing 2006;14:39-

¹⁰ MAHISHI MR, GOSWAMI DY. Thermodynamic optimization of biomass gasifier for hydrogen production. International Journal of Hydrogen Energy 2007;32:3831e40. Renewable Energy Laboratory; 2002. Report No: IEA/H2/TR-02/001. Golden, CO, USA.

¹¹ MILNE TA, ELAM CC, EVANS RJ. Hydrogen from biomass: state of the art and research challenges. National Renewable Energy Laboratory; 2002. Report No: IEA/H2/TR-02/001. Golden, CO, USA.

¹² COHCE, M, ROSEN, M Y DINCER, I. Efficiency evaluation of a biomass gasification-based hydrogen production. Faculty of engineering and applied science, University of Ontario institute of technology. Ontario : ELSEVIER, 2011.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. MICROALGAS

Las microalgas han sido propuestas como un recurso importante para diversos productos como suplementos alimenticios tanto para humanos como animales, ingredientes activos para cosméticos, vitaminas, fertilizantes etc.¹³ adicionalmente, se han considerado una materia prima potencial en la producción de biocombustibles debido a su gran capacidad de almacenar metabolitos primarios, como: carbohidratos, lípidos y proteínas, los cuales son sintetizados en hidrocarburos, aceites y gas combustible por reacciones biológicas y termoquímicas¹⁴. Sus requerimientos de tierra para cultivo son menores en comparación con otras materias primas comerciales tales como el aceite de palma, jatrofa o caña de azúcar^{15,16}.

De hecho, el incremento de las investigaciones y cultivos de microalgas se debe principalmente a su utilización para la producción de biocombustibles, siendo la obtención de biodiesel quien concentra los mayores esfuerzos¹⁷. En la actualidad la tecnología para la producción de biocombustibles a nivel industrial no se encuentra disponible¹⁸. Para lograr su uso industrial con fines energéticos, se deberán lograr balances de energía y carbono positivos y la disminución de costes

¹³ SANTOS, A., GONZÁLEZ, Y., MARTIN, C., Uso y aplicaciones potenciales de las microalgas. Universidad Pontificia Comillas de Madrid. 2014. P. 1-9.

¹⁴ AMARO, H.M., GUEDES, A.C., MALCATA, F.X., Advances and perspectives in using microalgae to produce biodiesel. *Applied Energy* 2011;88:3402–3410.

¹⁵ SCHENK P, THOMAS-HALL S, STEPHENS E, MARX U, Mussgnug J, Posten C, et al. Second generation biofuels: high-efficiency microalgae for biodiesel production. *Bioenerg Res* 2008;1:20–43.

¹⁶ CLARENS A, RESURRECCION E, WHITE M, COLOSI L. Environmental life cycle comparison of algae to other bioenergy feedstocks. *Environ Sci Technol* 2010;44:1813–1809.

¹⁷ SAULI, E., SARBATLY, R., Conversion of microalgae to biofuel. *Universiti Malaysia Sabah. Sabah*. 2012. 16, 4316-4342.

¹⁸ AMARO, H.M., GUEDES, A.C., MALCATA, F.X., Op cit

de producción e impactos ambientales. La literatura reporta que la biomasa de microalgas puede ser transformada de forma directa en calor o electricidad mediante su combustión, pero también en combustibles líquidos, sólidos y gaseosos mediante procesos termoquímicos o bioquímicos¹⁹.

1.2. SÍNTESIS DE BIOCOMBUSTIBLES A PARTIR DE MICROALGAS

Para lograr la conversión de las microalgas en biocombustibles, es necesario llevar a cabo, tres etapas básicas: i) El cultivo de las microalgas, el cual puede realizarse tanto en fotobiorreactor o estanques abiertos²⁰. ii) La cosecha, donde se separan las microalgas del medio de cultivo por diferentes métodos, siendo la centrifugación y/o filtración los más usados en la industria²¹. iii) La conversión. En esta etapa la biomasa cosechada puede ser tratada mediante dos rutas: termoquímica o bioquímica; teniendo como productos principales: Biodiesel, Bioetanol, Syngas (gas de síntesis), Bio-aceite e Hidrógeno²², tal como se observa en la figura 1. Khoo et al.²³ reporto que el tratamiento termoquímico presenta ventajas frente al bioquímico, tales como mayor velocidad de conversión y formación de diversos productos energéticos.

Las vías termoquímicas presentan dos rutas para la conversión de la biomasa debido a la diferencia que presentan sus constituyentes en estructura y composición química: i) Centrarse en la conversión de uno de los componentes con igual número de carbonos y estructura química similar a la del producto

¹⁹ SANTOS, A., GONZÁLEZ, Y., MARTIN, C., Uso y aplicaciones potenciales de las microalgas. Universidad Pontificia Comillas de Madrid. 2014. P. 1-9.

²⁰ SAULI, E., SARBATLY, R., Conversion of microalgae to biofuel. Universiti Malaysia Sabah. Sabah. 2012. 16, 4316-4342.

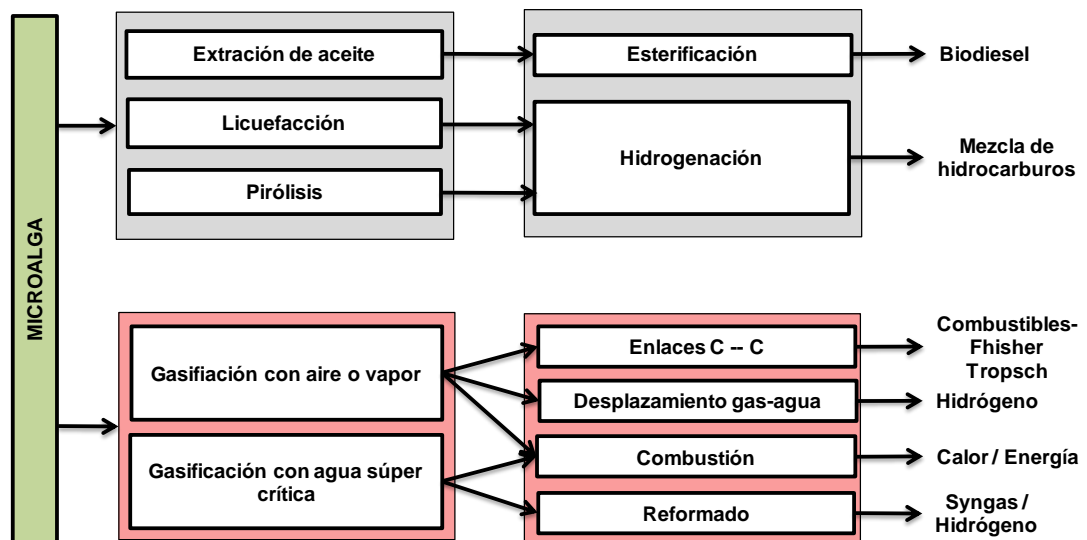
²¹ ONCEL SUPHI, S. Meicroalgae for a macroenergy world. Faculty of engineering. Departament of bioengineering., Ege University. Turkey : ELSEVIER, 2013

²² NATH K. & DAS D., Hydrogen from biomass, Current Science, vol. 85, No. 3, 2003;265-327.

²³ KHOO, H., SHAIK, K., SHARRATT, P., Bioenergy co-products derived from microalgae biomass via thermochemical conversion – Life cycle energy balances and CO2 emissions. Institute of Chemical and engineering Sciences. Bioresource Technology 2013; 143; 298-307.

deseado como combustibles líquidos. ii) La descomposición de todos los componentes presentes en la biomasa para formar productos gaseosos²⁴.

Figura 1 Diagrama de flujo para la conversión de las microalgas en biocombustibles.



Fuente: Azadi, P., Brownbridge, G., Mosbach, S., Inderwildi, O., Kraft, M., Simulation and life cycle assessment of algae gasification process in dual fluidized bed gasifier. University of Cambridge. Department of chemical engineering. Cambridge. 2014.

1.3. GASIFICACIÓN

La gasificación de microalgas es un proceso termoquímico en donde la biomasa reacciona con aire, vapor de agua u oxígeno a alta temperatura, que oscila desde 200 hasta 700 °C²⁵. Sus principales productos son: Hidrógeno con rendimientos entre 5-56% v/v²⁶ y Dióxido de carbono con rendimientos entre 9-52% v/v^{2728 2930}.

²⁴ NATH K. & DAS D., Hydrogen from biomass, Current Science, vol. 85, No. 3, 2003;265-327.

²⁵ SAULI, E., SARBATLY, R., Conversion of microalgae to biofuel. Universiti Malaysia Sabah. Sabah. 2012. 16, 4316-4342.

²⁶ Nath, K & Das D. Hydrogen from biomass. Curr Sci 2003;85:265–271.

El metano es producido en pequeñas cantidades, aproximadamente 2-25% v/v, por esto es considerado como un co-producto³¹³²³³. Sin embargo, la producción de gas enriquecido en metano se puede lograr utilizando agua supercrítica como medio de gasificación donde aproximadamente el 60-70% de la energía empleada, se recupera con la combustión del metano producido³⁴.

A partir de la gasificación se puede obtener metanol. Esto se consigue cuando los productos de la gasificación son llevados a 1000 °C logrando producir el 64% p/p de metanol, con respecto a la cantidad de microalga alimentada, tal como reporta Suali et al.³⁵. Un análisis energético muestra que la relación entre la energía producida y la energía requerida para producir el metanol, partiendo de la gasificación es de 1,1³⁶, lo que permite ver este método muy prometedor para la producción de metanol limpio.

²⁷ GIL J, CORELLA J, AZNAR MP, CABALLERO MA. Biomass gasification in atmospheric and bubbling fluidizing bed: effect of the type of gasifying agent on the product distribution. *Biomass Bioenergy* 1999;17:389–403.

²⁸ ABUADALA A, DINCER I, NATERER GF. Exergy analysis of hydrogen production from biomass gasification. *Int J Hydrogen Energy* 2010;35: 4981–4990.

²⁹ CHAKINALA AG, BRILMAN DWF, van Swaij WPM, Kersten SRA. Catalytic and non-catalytic supercritical water gasification of microalgae and glycerol. *Ind Eng Chem Res* 2010;49:1113–1122.

³⁰ RAMZAN N, ASHRAF A, NAVEED S, MALIK A. Simulation of hybrid biomass gasification using Aspen plus: a comparative performance analysis for food, municipal solid and poultry waste. *Biomass Bioenergy* 2011;35:3962–3949.

³¹ GIL J, CORELLA J, AZNAR MP, Caballero MA. Biomass gasification in atmospheric and bubbling fluidizing bed: effect of the type of gasifying agent on the product distribution. *Biomass Bioenergy* 1999;17:389–403.

³² BUADALA A, DINCER I, NATERER GF. Exergy analysis of hydrogen production from biomass gasification. *Int J Hydrogen Energy* 2010;35: 4981–4990.

³³ CHAKINALA AG, BRILMAN DWF, VAN SWAAIJ WPM, KERSTEN SRA. Catalytic and non-catalytic supercritical water gasification of microalgae and glycerol. *Ind Eng Chem Res* 2010;49:1113–1122.

³⁴ STUCKI S, VOGEL F, LUDWIG C, HAIDUC AG, BRANDENBERGER M. Catalytic gasification of algae in supercritical water for biofuel production and carbon capture. *Energy Environ Sci* 2009;2:535–41.

³⁵ SAULI, E., SARBATLY, R., Conversion of microalgae to biofuel. *Universiti Malaysia Sabah. Sabah*. 2012. 16, 4316-4342.

³⁶ HIRANO A, HON-NAMI K, KUNITO S, HADA M, OGUSHI Y. Temperature effect on continuous gasification of microalgal biomass: theoretical yield of methanol production and its energy balance. *Catal Today* 1998;45:399–404.

La gasificación de la biomasa también origina algunos subproductos tales como agua, ceniza y TAR (alquitranes y vapores condensables), que causan una disminución en el rendimiento del producto principal³⁷. Sin embargo, se ha encontrado que al utilizar la gasificación con agua súper crítica como medio se previene la formación de estos productos³⁸.

1.3.1. Gasificación con agua súper crítica o SCWG (siglas en inglés). En un proceso tradicional de gasificación se requiere que la biomasa presente un contenido de humedad menor del 40% en peso³⁹. Un mayor nivel de humedad implica la disminución en el rendimiento del proceso y poder calorífico del Syngas producido⁴⁰. Teniendo en cuenta los altos contenidos de humedad para la biomasa de microalgas, la cual es mayor al 70% en microalgas de acuerdo a Aziz M.⁴¹, en el esquema de procesamiento se incluye una etapa de secado o deshidratación la cual representa un gasto del 84,9% de la energía total consumida⁴². En la gasificación convencional, Coche et al.⁴³ reporta un valor de NER (la relación neta de energía) de 3,03, ésto refleja un consumo energético mayor a la energía generada por el proceso, lo que deriva en balances energéticos negativos del proceso. Recientemente se ha reportado en la literatura que la estrategia de gasificación con agua súper crítica (SCWG) permite la utilización de biomasa

³⁷ DEMIRBAS A. Potential applications of renewable energy sources, biomass combustion problems in boiler power systems and combustion related environmental issues. *Prog Energy Combust Sci* 2005;31:171–92.

³⁸ AZIZ, MUHAMMAD. Integrated supercritical water gasification and a combined cycle for microalgal utilization. Tokyo institute of technology. *Energy conversion and management* 2015;91: 140-148.

³⁹ HIRANO A, HON-NAMI K, KUNITO S, HADA M, OGUSHI Y. Temperature effect on continuous gasification of microalgal biomass: theoretical yield of methanol production and its energy balance. *Catal Today* 1998;45:399–404.

⁴⁰ SAULI, E., SARBATLY, R., Conversion of microalgae to biofuel. *Universiti Malaysia Sabah. Sabah*. 2012. 16, 4316-4342.

⁴¹ AZIZ, MUHAMMAD. Integrated supercritical water gasification and a combined cycle for microalgal utilization. Tokyo institute of technology. *Energy conversion and management* 2015;91: 140-148.

⁴² XU, L., BRILMAN, D., WITHAG, J., BREM, G., KERSTEN, S., Assessment of a dry and wet route for the production of from microalgae: energy balance analysis. University of Twente. Enschede. *Bioresource Technology* 2011;102: 5113-5122.

⁴³ COHCE, M., ROSEN, M., DINCER, I., Efficiency evaluation of a biomass gasification based hydrogen production. *Int J Hydrogen Energy* 2011;36:11388–98.

hasta con un 80% de humedad (contenido de humedad de la mayoría de biomasa)
44 .

El método de gasificación con agua súper crítica convierte los materiales orgánicos en H₂, CH₄, CO₂ y CO, esto ocurre en presencia de agua en condiciones por arriba de su punto crítico (T> 374 °C y P> 22,1 MPa)⁴⁵, aprovechando las propiedades únicas que presenta el agua en este estado⁴⁶ tales como:

- Densidad mucho menor (166,54 kg/m³ a 400 °C y 25 MPa vs 997 kg/m³ a 25 °C y 0,1 MPa,⁴⁷) en comparación a condiciones estándar.
- Constante dieléctrica mucho menor (78,03 a 25 °C y 0,1 MPa vs 2,52 a 400 °C y 25 MPa,⁴⁸) en comparación a condiciones estándar.

Confiriéndole al agua súper crítica una disminución en sus propiedades como líquido debido al debilitamiento en la fuerza de sus puentes de hidrógeno. Esto le permite disolver moléculas no polares tales como los compuestos orgánicos. Además el agua supercrítica presenta una alta miscibilidad con gases, lo que ayuda a la velocidad de reacción⁴⁹. Otras de las ventajas de la SCWG es que muestra un mayor rendimiento en la producción de hidrógeno 8,56 kg/kg_{biomasa,seca},

⁴⁴ FIORI, L., VALBUSA, M., CASTELO, D., Supercritical water gasification of biomass for H₂ production: Process design. *Bioresource Technology* 2012;121;139-147.

⁴⁵] Nath K. & Das D., Hydrogen from biomass, *Current Science*, vol. 85, No. 3, 2003;265-327.

⁴⁶ Louw, J., Schwarz, E., Knoetze, J., Burger, E., Thermodynamic modelling of supercritical water gasification: Investigating the effect of biomass composition to aid in the selection of appropriate feedstock material. Stellenbosch University. Department of process engineering. *Matieland*. 2014;174; 11–23.

⁴⁷ Lemmon, E.W., McLinden, M.O., Friend, D. Thermophysical Properties of Fluid Systems, NIST chemistry WebBook, NIST standard reference database number 69. In: Linstrom, P.J., Mallard, W.G. (Eds.), National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD 20899. 2011.

⁴⁸ Fernandez, D.P., Goodwin, A.R.H., Lemmon, E.W., Levelt Sengers, J.M., Williams, R.C. A formulation for the static permittivity of water and steam at temperatures from 238 K to 873 K at pressures up to 1200 MPa, including derivatives and Debye–Hückel coefficients. *J. Phys. B At. Mol. Opt. Phys.* 1997;26; 1125–1165.

⁴⁹ Ibid

aproximadamente⁵⁰, frente a un rendimiento del 0,123 kg/kg_{biomasa,seca} en la gasificación tradicional⁵¹.

Una de las ventajas más importantes de usar SCWG para la producción de hidrógeno, es la fácil obtención de hidrógeno enriquecido, debido a que el hidrógeno y dióxido de carbono presentan grandes diferencias de solubilidades en agua a altas presiones⁵².

1.4. PRODUCTOS DE LA GASIFICACIÓN CON AGUA SÚPER CRÍTICA

Los principales productos de la SCWG son H₂, CH₄, CO₂ y CO⁵³, de estos el H₂ y el CH₄ son usados como combustibles y constituyen productos deseados en la gasificación.

El hidrógeno, es considerado como una fuente de energía limpia, debido a que su combustión genera H₂O como desecho⁵⁴, esto ha atraído una gran atención para su uso como combustible alternativo en el futuro mediante, pilas de combustible de hidrógeno y en motores de combustión⁵⁵. Además de sus usos en procesos

⁵⁰ ZHANG, L., XU, C., Champagne, P. Overview of recent advances in thermochemical conversion of biomass. *Energy Convers. Manage.* 2010;51:969–982.

⁵¹ ABUADALA A, DINCER I, NATERER GF. Exergy analysis of hydrogen production from biomass gasification. *Int J Hydrogen Energy* 2010;35: 4981–4990.

⁵² ZHANG, L., XU, C., Champagne, P. Overview of recent advances in thermochemical conversion of biomass. *Energy Convers. Manage.* 2010;51:969–982.

⁵³ FERNANDEZ, D.P., Goodwin, A.R.H., Lemmon, E.W., Levelt Sengers, J.M., Williams, R.C. A formulation for the static permittivity of water and steam at temperatures from 238 K to 873 K at pressures up to 1200 MPa, including derivatives and Debye–Huckel coefficients. *J. Phys. B At. Mol. Opt. Phys.* 1997;26; 1125–1165.

⁵⁴ ABUADALA A, DINCER I, NATERER GF. Exergy analysis of hydrogen production from biomass gasification. *Int J Hydrogen Energy* 2010;35: 4981–4990.

⁵⁵ LOUW, J., SCHWARZ, E., KNOETZE, J., BURGER, E., Thermodynamic modelling of supercritical water gasification: Investigating the effect of biomass composition to aid in the selection of appropriate feedstock material. Stellenbosch University. Department of process engineering. *Matieland.* 2014;174; 11–23.

industriales tales como; hidrogenación, saturación de compuestos y crack de hidrocarburos⁵⁶.

El metano, por su parte tiene su mayor uso como gas natural, aunque también es considerado como un gas de efecto invernadero. Varias naciones se encuentran muy interesadas en constituir al metano como una fuente de energía, impulsada por el descubrimiento de grandes yacimiento de hidratos de metano en el fondo marino que rodean los continentes⁵⁷. El metano es utilizado también en muchos procesos químicos industriales como materia prima para la producción de hidrógeno y metanol⁵⁸.

1.5. INDICADORES DE SOSTENIBILIDAD PARA BIOCMBUSTIBLES DE MICROALGAS

Debido a la gran importancia que están recibiendo las microalgas para la producción de biocombustibles, resulta imperante evaluar la viabilidad y sostenibilidad de estos procesos a escala industrial. Los indicadores permiten determinar la sostenibilidad basados en variables energéticas, sociales y ambientales⁵⁹, tales como la relación de energía fósil, relación neta de energía, uso de tierra y localización, eutrofización, etc. Estos indicadores relacionan las cantidades de energía o recursos que se consumen frente a los que se generan o la cantidad de CO₂ emitida al ambiente⁶⁰.

⁵⁶ Panda, Chittaranjan. Aspen plus simulation and experimental studies on biomass gasification. National institute of technology. Rourkela : s.n., 2012. Thesis.

⁵⁷ Bylin C. U.S. Environmental protection agency. Perspectiva general de la asociación metano al mercado- Sector de petróleo y gas natural. 2008.

⁵⁸ Uso Industrial Metano. BuenasTareas.com. [en línea] citado 11 de enero de 2015 disponible en: <http://www.buenastareas.com/ensayos/Uso-Industrial-Metano/4184718.html>, Recuperado: 10 de enero de 2012.

⁵⁹ Efromson, R. & Dale, V.,. Environmental indicators for sustainable production of algal biofuels. Oak ridge national laboratory. Ecological indicators 2014;49;1-13.

⁶⁰ Slade, R. & Bauen, A.,. Micro-algae cultivation for biofuels: Cost, energy balance, environmental impacts and future prospects. Imperial college London. Biomass and bioenergy 2013;53;29-38.

En este trabajo se plantea la determinación y el análisis ambiental y energético del proceso SCWG, mediante dos indicadores; la relación neta de energía (NER, siglas en inglés) y la relación de energía fósil (FER, siglas en inglés). El NER es un indicador energético que relaciona la cantidad de energía introducida al proceso con la energía obtenida del producto final y se describe con la siguiente ecuación⁶¹

$$NER_{Syngas} = \frac{\sum \text{Energía primaria requerida (cultivo, cosecha, gasificación)}}{\text{Energía contenida en el syngas}} \quad (3.1)$$

Si al determinar el NER da mayor que 1, el proceso presenta un mayor consumo de energía que la obtenida.

La relación de energía fósil es un indicador ambiental que relaciona la energía consumida a partir de combustibles fósiles en el proceso con el poder calorífico mayor del Syngas obtenido en el proceso⁶².

$$FER = \frac{HHV_{Syngas}}{\sum \text{Energía de combustibles fósiles consumida en el proceso}} \quad (3.2)$$

Si al determinar el FER da mayor que 1, el proceso genera más energía que la consumida en combustibles fósiles.

⁶¹ Ibid

⁶² Ibid

2. METODOLOGÍA

2.1 SELECCIÓN DEL ESQUEMA DE PROCESAMIENTO PARA LA SCWG

2.1.1 Diseño conceptual del proceso

- **Cepa:** En este trabajo se planteó la gasificación de la microalga *Chlorella Vulgaris* con agua súper crítica. De acuerdo a Spoehr y Milner⁶³, la *Chlorella Vulgaris* está constituida principalmente por lípidos, proteínas y carbohidratos con composiciones máxicas tomadas en base seca de 45,5%, 26,2% y 28,3%, respectivamente. Para la simulación se tomaron los compuestos más representativos de cada metabolito disponibles en la base de datos de Aspen Plus®, los cuales se muestran en la tabla 1.
- **Base de cálculo:** La base de cálculo para la biomasa utilizada en la simulación se realizó de acuerdo a la disponibilidad de CO₂ proveniente de la etapa de fermentación en una planta de etanol de primera generación con una producción de 511,59 kg/h de etanol y 519,54 kg/h de CO₂ teniendo en cuenta la solubilidad en agua (75,7L CO₂/100L agua a 25 °C⁶⁴), se disponen de 72,73 kg/h de CO₂.

⁶³ Spoehr, H., & Milner, H., The chemical composition of *Chlorella* effect of environmental conditions. 1948

⁶⁴ Abbasi, E., Hassanzadeh, A., Zarghami, S., Aratooopour, H., Abbasian, J., Regenerable MgO-based sorbent for high temperatura CO₂ removal from Syngas: 3. CO₂ capture and sorbent enhanced wáter gas shift reaction. Illinois institute of Technology, Chicago. Fuel 2014:137;260-268.

Tabla 1. Compuestos de la biomasa introducidos en el simulador.

| Metabolitos primarios | |
|------------------------------|--------------------|
| Lípidos | Ácido Mirístico |
| | Ácido Palmítico |
| | Ácido Palmitoleico |
| | Ácido Esteárico |
| | Ácido Oleico |
| | Ácido Linoleico |
| Proteínas | Ácido aspártico |
| | Ácido glutámico |
| | Glicina |
| | Alanina |
| | Valina |
| | Leucina |
| | Prolina |
| | Lisina |
| Carbohidratos | Celulosa |
| | Hemicelulosa |

Fuente: Fowden, L. , Ververis et al..

2.1.2 Cultivo. Se seleccionó un Raceway pond (RWP), para llevar a cabo el cultivo de las microalgas. De acuerdo a la base de cálculo y a la información obtenida en la literatura para este cultivo, se diseñó un diagrama de Gantt (ver *Anexo A*), el cual permite un proceso en continuo, debido a la operación en batch del cultivo. En la tabla 2 se muestra la información utilizada para el diseño y los resultados del cultivo.

Tabla 2. Diseño del conceptual de la etapa de cultivo.

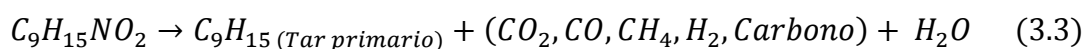
| RACEWAY POND | | REFERENCIA |
|-----------------------------|--|------------------------------|
| Productividad biomasa seca | 11 g/m ² *d | Ozkan et al. [45] |
| Área ocupada | 1.000 m ² | Wan et al. [46] |
| Tiempo por lote | 9 d | Chiamonti et al. [47] |
| Rendimiento CO ₂ | 0,55 kg biomasa seca/kg CO ₂ | Chisti Y. [48] |
| Diseño | | |

| RACEWAY POND | REFERENCIA |
|-------------------------------------|------------|
| Productividad biomasa/lote | 99 kg |
| CO ₂ Disponible por lote | 14.402 kg |
| Biomasa obtenida por lote | 8.001 kg |
| Número de RWP por Tren | 81 |
| Número de Trenes | 9 |

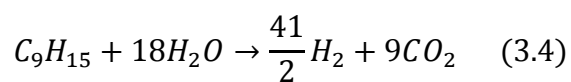
2.1.3 Centrifugación. Para el proceso se establece un rendimiento del 90% para la centrifuga y a condiciones de operación ambiente (25 °C y 1 bar). En esta etapa se ingresaron 40,41 kg/h de biomasa de microalgas (*Chlorella Vulgaris*) en suspensión con una concentración de 5% de biomasa seca.

2.1.4 Gasificación con agua súper crítica. Para la gasificación se tomó el diagrama que se muestra en la figura 2, y se realizó un análisis de sensibilidad variando la temperatura de 400 a 800 °C y la presión de 250 a 350 Bar. En el gasificador se dan lugar las siguientes reacciones⁶⁵:

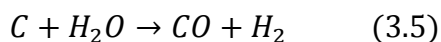
Pirólisis



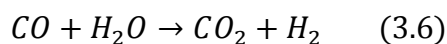
Reformado Tar-Vapor



Gasificación Char



Desplazamiento agua-gas (WGS)

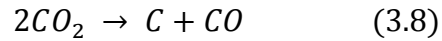


⁶⁵ PANDA, CHITTARANJAN. Aspen plus simulation and experimental studies on biomass gasification. National institute of technology. Rourkela : s.n., 2012. Thesis.

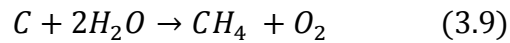
Reformado metano-vapor



Reacción de Boudouard



Metanización



Del proceso de gasificación se obtuvo una corriente gaseosa “Syngas” rica en H₂, CO, CO₂ y CH₄, y una corriente líquida “Liquid”, que contiene principalmente agua con trazas de gases.

2.2 SIMULACIÓN DEL PROCESO.

La SCWG fue simulada en el programa Aspen Plus® V8.4, el cual ha sido empleado en varias simulaciones de SCWG, utilizando glicerol, cascara de uva, microalgas, cascarilla de arroz, entre otros [32]. Los resultados alcanzados se acercan a los obtenidos en plantas pilotos, según reportó Panda Chittaranjan⁶⁶.

Consideraciones de Simulación:

- Modelamiento mediante la ecuación de estado de Redlich-Kwong con modificación de Boston-mathias.
- Las partículas de la biomasa son esféricas y no afectan el desarrollo de las reacciones.
- Reactores de conversión
- Distribución uniforme de los gases en la emulsión.

⁶⁶ ibid

- Gasificación completa de la biomasa (no formación de TAR ni Char).
- No se incluyó la ceniza en la composición de la biomasa.

La simulación se modela mediante la ecuación de estado de Peng-Robinson con modificación Boston-Mathias, debido a su precisión para modelar fluidos en el estado crítico⁶⁷. Para simular la reacción de gasificación se tiene en cuenta dos reactores; un reactor tipo Yield y Gibbs.

El reactor RYIELD se utilizó para simular la descomposición de la biomasa en sus componentes elementales; carbono, oxígeno, hidrógeno, nitrógeno y azufre, mediante la especificación de la composición de acuerdo al análisis elemental de la microalga que se muestra en la Tabla 3⁶⁸. Al salir del RYIELD, el producto es enviado al reactor RGIBBS donde se realizaron las reacciones de gasificación volátiles⁶⁹.

Tabla 3. Análisis elemental de la *Chlorella Vulgaris*.

| Componente | Composición p/p en base seca |
|-------------------|---|
| C | 47.84 |
| H | 6,41 |
| O | 25 |
| N | 9,01 |
| S | 1,46 |
| Ceniza | 10,28 |

Fuente: Chen et al. [41].

⁶⁷ LEMMON, E.W., MCLINDEN, M.O., FRIEND, D. Thermophysical Properties of Fluid Systems, NIST chemistry WebBook, NIST standard reference database number 69. In: Linstrom, P.J., Mallard, W.G. (Eds.), National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD 20899. 2011.

⁶⁸ PANDA, CHITTARANJAN. Aspen plus simulation and experimental studies on biomass gasification. National institute of technology. Rourkela : s.n., 2012. Thesis.

⁶⁹ Ibid

2.3 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Se realizó un análisis de sensibilidad en función de la temperatura y la presión con un rango de análisis de 400 a 900 °C y 200 a 350 bar respectivamente.

2.4 EVALUACIÓN DEL PROCESO A TRAVÉS DE ÍNDICES ENERGÉTICOS Y AMBIENTALES

Para la etapa de cultivo se tomó el consumo energético reportado por Khoo et al.⁷⁰, el cual tiene en cuenta: La inyección de CO₂, el suministro de agua, suministro de nutrientes y la agitación mecánica. En la centrifugación se tomó el consumo energético reportado por Suali et al.⁷¹, el cual es un consumo eléctrico. Los consumos energéticos de la gasificación fueron tomados de los resultados obtenidos en la simulación.

Para la etapa de cultivo y cosecha, la energía consumida de combustibles fósiles fue tomada de Lardon et al.⁷². Para la gasificación se tomó el consumo de energía fósil de la simulación.

2.5 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS CON LA LITERATURA

Los resultados obtenidos de los indicadores energético y ambiental se compararon con los datos reportados en la literatura, con el fin de confrontar la eficiencia y la sostenibilidad que presenta la simulación frente a otros trabajos reportados.

⁷⁰ KHOO, H., SHAIK, K., SHARRATT, P., Bioenergy co-products derived from microalgae biomass via thermochemical conversion – Life cycle energy balances and CO₂ emissions. Institute of Chemical and engineering Sciences. Bioresource Technology 2013; 143; 298-307.

⁷¹ SAULI, E., SARBATLY, R., Conversion of microalgae to biofuel. Universiti Malaysia Sabah. Sabah. 2012. 16, 4316-4342.

⁷² LARDON, L., HÉLIAS, A., SIALVE, B., STEYER, J., BERNARD, O., Life-cycle assessment of biodiesel production from microalgae. Laboratoire de Biotechnologie de l'Environnement, Environ. Sci. Technol 2009;43;6475-6481.

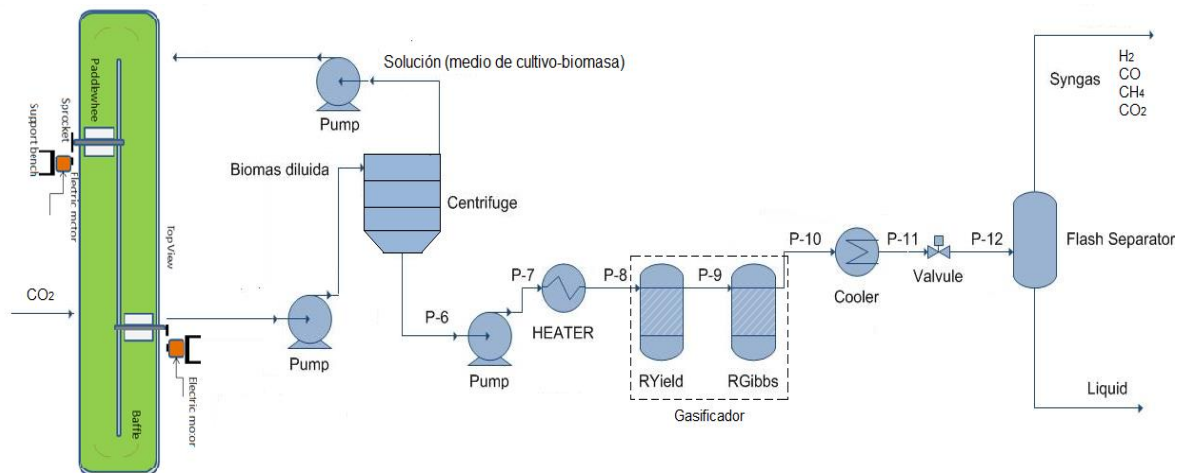
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 ESQUEMA CONCEPTUAL DEL PROCESO

El esquema conceptual desarrollado se muestra en la figura 2, el cual consta de 3 tres etapas: cultivo, cosecha y gasificación con agua súper crítica. El esquema fue simulado tal como se muestra en el anexo B.

Con el simulador se realizó un análisis de sensibilidad en función de la temperatura y presión con los datos obtenidos se construyeron las figuras 3 y 4. Al observar la figura 3 se pudo establecer que el rendimiento de H₂ y CO, es directamente proporcional a la temperatura de operación.

Figura 2 Diagrama del proceso de SCWG.



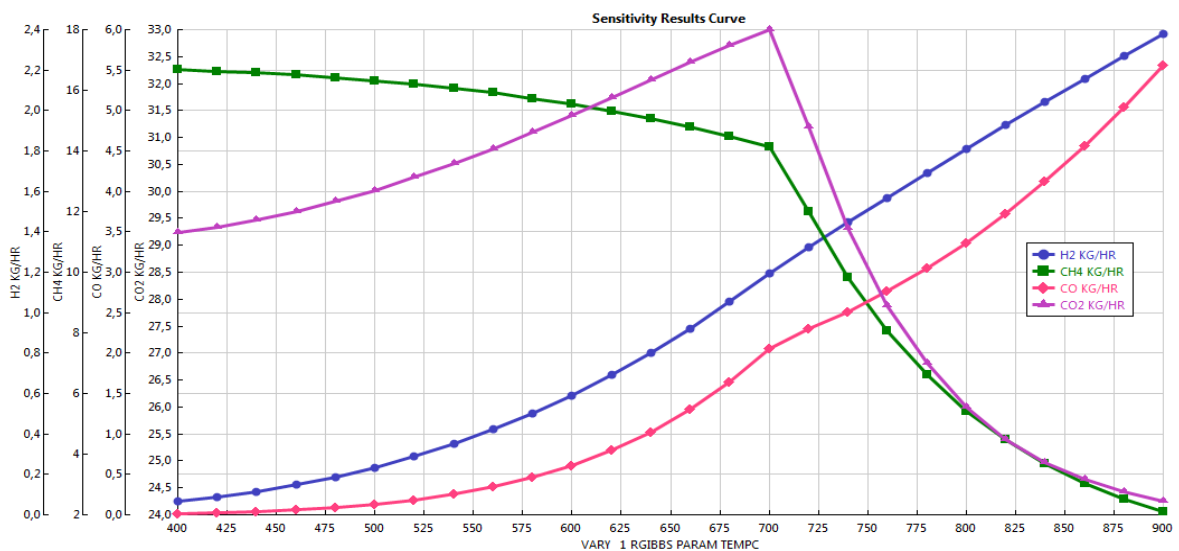
Para el CH₄ se determinó que los aumentos de temperatura dentro del gasificador desfavorecen la producción de este compuesto y que después de los 700 °C se da una caída brusca en su rendimiento.

En el caso del CO₂ presenta un crecimiento en el rendimiento hasta los 700 °C, después de esta temperatura, cayó con la misma tendencia que la del CH₄. Los valores obtenidos del análisis de sensibilidad se muestran en el Anexo C. En la simulación no se produjeron NO_x, ni SO_x.

Como se observa en la figura 4, los componentes H₂, CO y CO₂ presentan una producción inversamente proporcional a la presión. El CH₄ presenta un comportamiento proporcional a la presión hasta los 310 Bar, luego de esta presión se presenta una caída del rendimiento drástica.

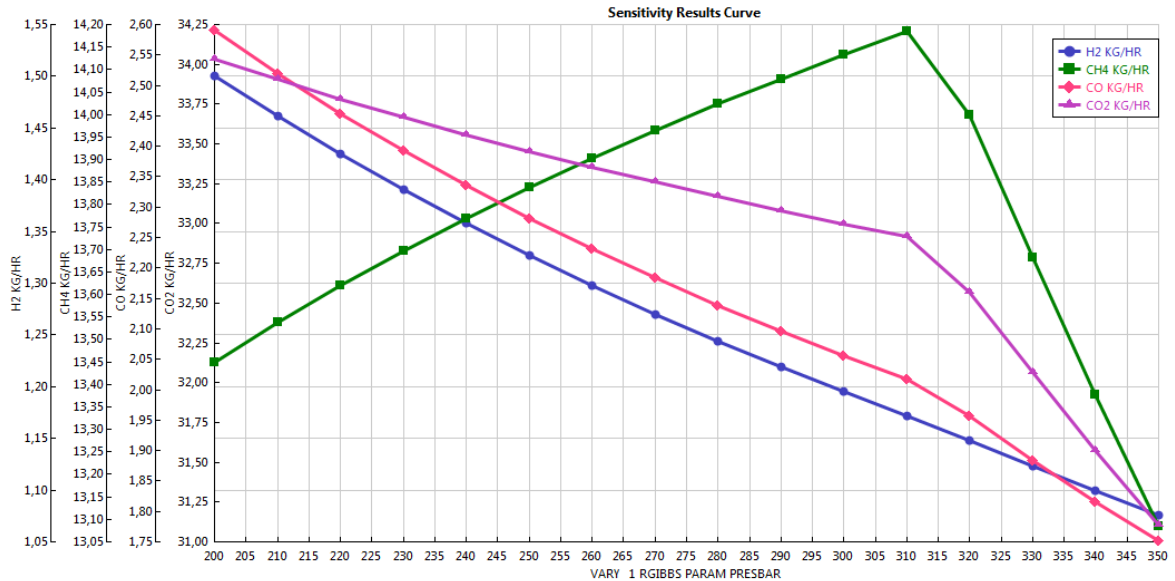
De acuerdo con los resultados obtenidos, se determinó que 700 °C y 310 Bar, son las condiciones que registran los mejores rendimientos de H₂ (31,13 g/kg_{biomasa seca}), CH₄ (368,16 g/kg_{biomasa seca}) y CO (53,56 g/kg_{biomasa seca}) con un LHV de 15,652 MJ/kg_{Syngas}. En la literatura algunos autores como Panda, Chittaranjan⁷³, han reportado condiciones similares de operación para rendimientos óptimos del Syngas.

Figura 3. Flujo másico del Syngas producido contra la temperatura.



⁷³ PANDA, CHITTARANJAN. Aspen plus simulation and experimental studies on biomass gasification. National institute of technology. Rourkela : s.n., 2012. Thesis.

Figura 4. Flujo másico del Syngas producido contra presión.



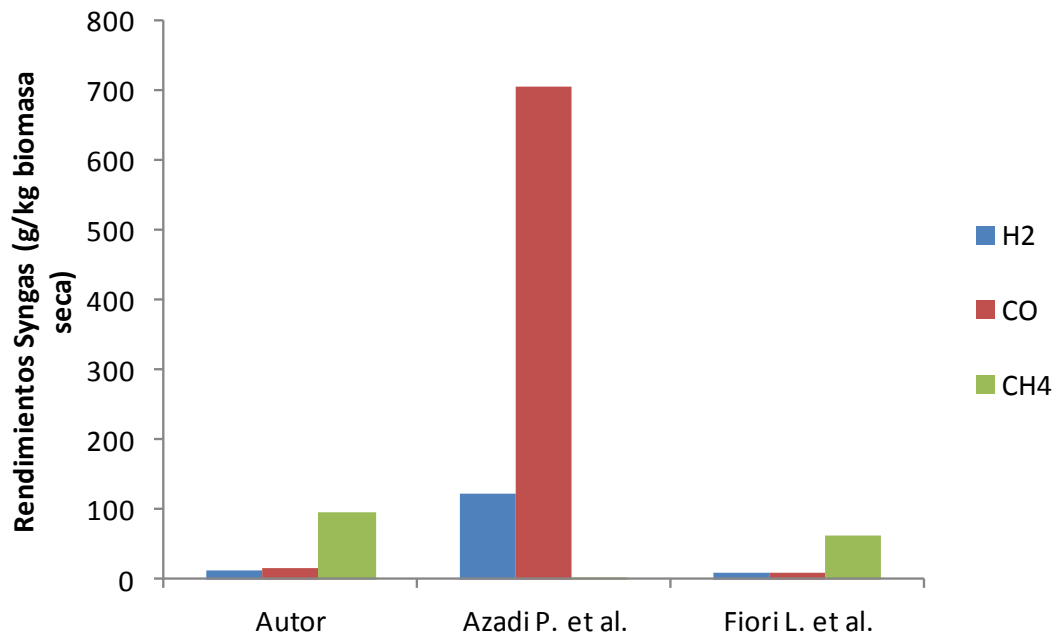
Debido al interés de usar el Syngas como combustible y realizar una evaluación energética del proceso, se utilizó el análisis de sensibilidad para determinar las condiciones de operación donde se registra el valor de LHV más alto. Los valores obtenidos para el LHV se muestran en el *Anexo D*. El LHV más alto 15,65 MJ/kg_{Syngas} se obtuvo a 310 Bar y 700 °C. Estas mismas condiciones fueron en las que se obtuvieron los mayores de rendimiento del Syngas.

Teniendo en cuenta las condiciones óptimas para el proceso, se realizó una comparación con los resultados reportados en la literatura. De acuerdo con la figura 5, se observa la similitud de la tendencia en los rendimientos obtenidos por Azadi P. et al.⁷⁴ y los obtenidos en este trabajo.

⁷⁴ FIORI, L., VALBUSA, M., CASTELO, D., Supercritical water gasification of biomass for H2 production: Process design. *Bioresource Technology* 2012;121;139-147.

Dentro de los resultados obtenidos en este trabajo se puede observar un mayor rendimiento de metano en comparación con Hidrogeno. Según Stucki et al.⁷⁵ [25], cuando se lleva a cabo una gasificación en presencia de agua súper crítica, el Syngas obtenido puede estar enriquecido en metano.

Figura 5. Gráfica de los rendimientos reportados por varios autores en el proceso SCWG usando microalgas y los resultados obtenidos de la simulación.



Fuente: Azadi et al. [19], Fiori et al. [31],

3.2 EVALUACIÓN DEL PROCESO MEDIANTE ÍNDICES MÉTRICOS

El valor calculado para el NER fue de 0,95 tal como se observa en la tabla 4. Dado que el valor obtenido del NER es menor a la unidad, el proceso está consumiendo menos energía de la que genera, lo que indica que el proceso es autosuficiente energéticamente. El mayor consumo energético que se presenta en el proceso se da en la etapa de SCWG, el cual representa el 84% del total de la energía

⁷⁵ STUCKI S, VOGEL F, LUDWIG C, HAIUDUC AG, BRANDENBERGER M. Catalytic gasification of algae in supercritical water for biofuel production and carbon capture. Energy Environ Sci 2009;2:535–41.

consumida en el proceso; como se observa en la figura 6. Por tanto, para lograr que el proceso de SCWG sea viable energéticamente y a su vez económicamente rentable, se debe aumentar el rendimiento del Syngas, lo que aumentará el LHV y a su vez la energía generada.

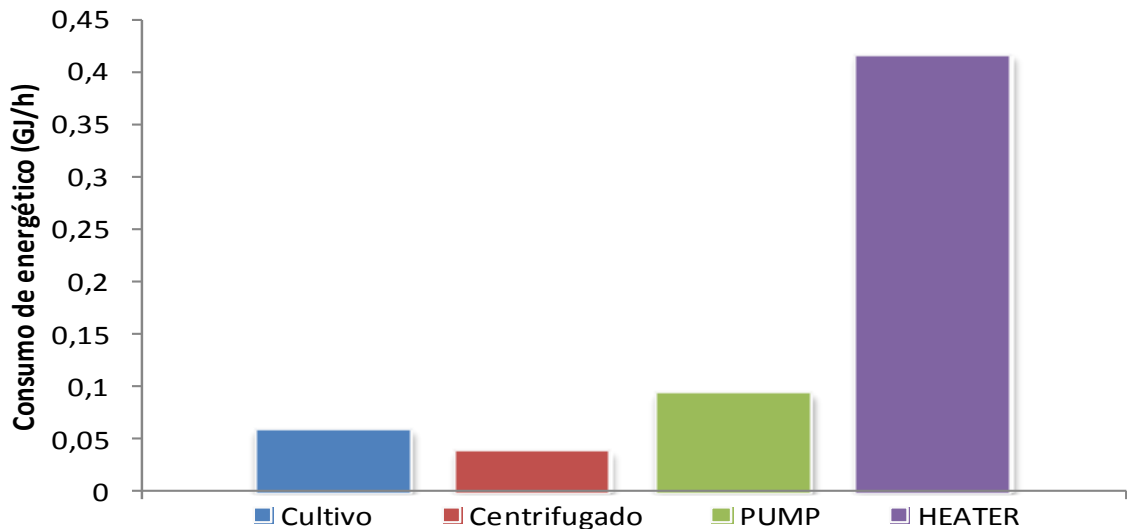
Tabla 4. Análisis energético del proceso de SCWG simulado.

| CONSUMO ENERGÉTICO | REFERENCIA | |
|---------------------------------------|-------------------|--------------------|
| Cultivo (kJ/h) | 58.686 | Lardon et al. [49] |
| Centrifugado o cosecha (kJ/h) | 38.389 | Suali et al. [16] |
| Gasificación | | |
| PUMP (kJ/h) | 93.441 | Ver Anexo E |
| HEATER (kJ/h) | 415.499 | Ver Anexo F |
| Energía liberada | | |
| Total E. Syngas (kJ/h) | 600.872 | |
| HHV Syngas (kJ/Kg _{Syngas}) | 17.552 | Ver Anexo D |
| LHV Syngas (kJ/Kg _{Syngas}) | 15.652 | |
| NER (kJ/kJ) | 0,95 | |

Fuente: Lardon et al. , Suali et al.

Energéticamente, el proceso de SCWG aún no es viable, como revelan los indicadores NER de varios autores para este proceso, tal como se observa en la figura 7. Estos valores de NER rondan cerca del 1, lo que muestra un gran potencial para el uso de este proceso termoquímico. El NER 0,95 obtenido en este trabajo muestra que el proceso SCWG se encuentra en un equilibrio entre la energía consumida y la generada, lo que permite al proceso ser auto-sostenible energéticamente.

Figura 6. Consumo energético presentado en el proceso de SCWG.

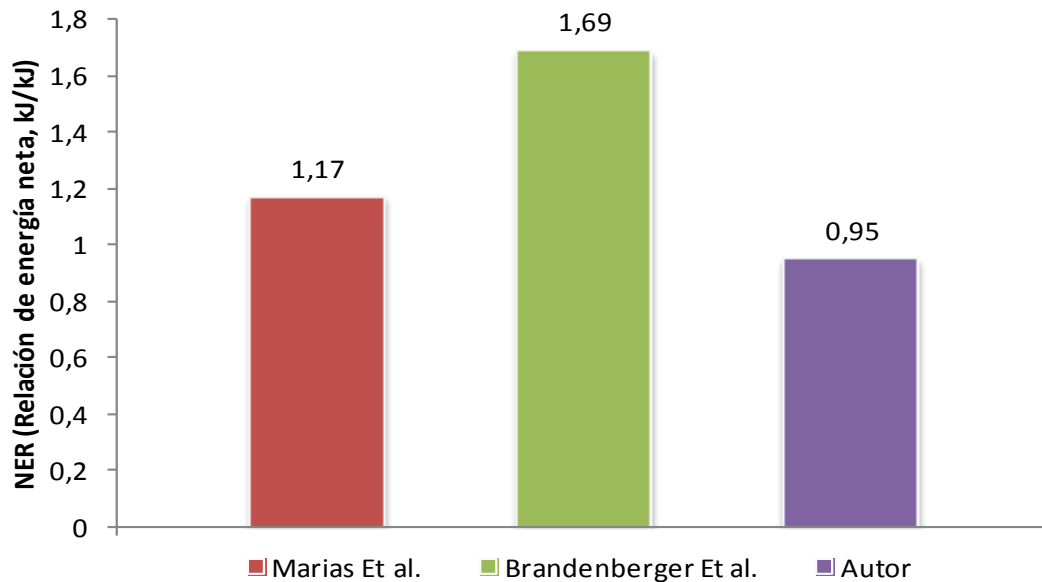


Para calcular el valor de FER en el presente trabajo se realizó la búsqueda del consumo de combustibles fósiles para las etapas de cultivo en la literatura. En la etapa de gasificación se tuvo en cuenta la energía fósil consumida en el (HEATER), y se omitió la energía consumida por la bomba y la centrífuga ya que éstas utilizan energía eléctrica.

Se tomó el HHV con las condiciones de operación más favorables del análisis de sensibilidad y se multiplicó por la cantidad de Syngas producido. Estos datos se muestran en la tabla 5, donde también se reporta el FER calculado.

Ya que el FER obtenido en el proceso es de mayor a la unidad, el consumo de energía a partir de combustibles fósiles es menor a la energía producida por el Syngas para este proceso. Esto refleja un balance ambiental positivo para el proceso, disminuyendo la dependencia de combustibles fósiles, los cuales afectan negativamente el medio ambiente, tanto en su extracción, como en su utilización. La etapa SCWG representa el 68% del consumo de combustibles fósiles. Este consumo se puede evitar ahora que el proceso es auto-sostenible energéticamente.

Figura 7. Comparación de los NER obtenidos en la literatura y el presentado en este trabajo.



Fuente: Marias et al, Brandenberger et al.

En la literatura se encontraron pocos análisis enfocados al consumo de combustibles fósiles para la SCWG, por esto solo se realiza la comparación con el reportado por Xu et al.⁷⁶, el cual reporta un FER de 1,16, este valor muestra que el proceso genera un 14% más de energía en la combustión del gas de síntesis obtenido, que la energía consumida de los combustibles fósiles, lo cual reduce el impacto ambiental. El valor del FER calculado para este trabajo, el cual es menor que el reportado por Xu et al⁷⁷.

Tabla 5. Análisis del consumo de combustibles fósiles en el proceso SCWG.

⁷⁶ XU, L., BRILMAN, D., WITHAG, J., BREM, G., KERSTEN, S., Assessment of a dry and wet route for the production of hydrogen from microalgae: energy balance analysis. University of Twente. Enschede. Bioresource Technology 2011;102; 5113-5122.

⁷⁷ Ibid

| CONSUMO ENERGÉTICO | REFERENCIA | |
|--|-------------------|---------------------------|
| Cultivo | 191.948 | Lardon et al. [49] |
| Gasificación | | |
| HEATER (kJ) | 415.499 | Ver Anexo F |
| Combustible generado | | |
| Syngas | | |
| HHV Syngas (kJ/Kg_{Syngas}) | 17.552 | Ver Anexo D |
| Syngas producido (kg) | 38.395 | |
| Energia liberada | 673.812 | |
| FER | 1,11 | |

Fuente: Lardon et al.

4. CONCLUSIONES

- Se estableció que 700 °C y 310 bar son las mejores condiciones de operación donde se establecen los máximos rendimientos del Syngas para el proceso de SCWG.
- Se determinó que el proceso se encuentra en un equilibrio energético, con un NER de 0,95
- El LHV y HHV máximos que se pueden obtener en el Syngas son 15.652 17.552 kJ/kg_{Syngas} respectivamente.
- Se logró disminuir en un 65% las emisiones de CO₂, con respecto al alimentado en el proceso.

BIBLIOGRAFIA

ABBASI, E., HASSANZADEH, A., ZARGHAMI, S., ARATOOPOUR, H., ABBASIAN, J., Regenerable MgO-based sorbent for high temperatura CO₂ removal from Syngas: 3. CO₂ capture and sorbent enhanced wáter gas shift reaction. Illinois institute of Technology, Chicago. Fuel 2014;137;260-268.

ABUADALA A, DINCER I, NATERER GF. Exergy analysis of hydrogen production from biomass gasification. Int J Hydrogen Energy 2010;35: 4981–4990.

AMARO, H.M., GUEDES, A.C., MALCATA, F.X., Advances and perspectives in using microalgae to produce biodiesel. Applied Energy 2011;88;3402–3410.

AZADI, P., BROWNBRIDGE, G., MOSBACH, S., INDERWILDI, O., KRAFT, M., Simulation and life cycle assessment of algae gasification process in dual fluidized bed gasifier. University of Cambridge. Departament of chemical engineering. Cambridge. 2014.

AZIZ, Muhammad. Integrated supercritical water gasification and a combined cycle for microalgal utilization. Tokyo institute of technology. Energy conversion and management 2015;91; 140-148.

BAUTISTA, J., & SIERRA, A., Evaluación energética del proceso de producción de bioetanol a partir de biomasa residual de la microalga *Chlorella Vulgaris*. Universidad Industrial de Santander. Tesis de grado. Bucaramanga. 2012.

BP (BRITISH PETROLEUM). The BP statistical review of world energy june 2013. London, U.K.; 2013. (<www.bp.com/statisticalreview.com>).

BRANDENBERGER, M., MATZENBERGER, J., VOGEL, F., LUDWING, CH., Production synthetic natural gas from microalgae via supercritical water gasification: A techno-economic sensitivity analysis. General energy research Department, Biomass and bioenergy 2013;51; 26-34.

BYLIN C. U.S. Environmental protection agency. Perspectiva general de la asociación metano al mercado- Sector de petróleo y gas natural. 2008.

CHAKINALA AG, BRILMAN DWF, VAN SWAAIJ WPM, KERSTEN SRA. Catalytic and non-catalytic supercritical water gasification of microalgae and glycerol. Ind Eng Chem Res 2010;49:1113–1122.

CHIARAMONTI, D., PRUSSI, M., CASINI, D., TREDICI, M., RODOLFI, L., BASSI, N., ZITTELLI, CHINI, BONDIOLI, P., Reviw of energy balance in raceway ponds for microalgae cultivation: Re-thinking a traditional system is possible. University of Florence. Applied Energy 2103;128;101-111.

CLARENS A, RESURRECCION E, WHITE M, COLOSI L. Environmental life cycle comparison of algae to other bioenergy feedstocks. Environ Sci Technol 2010;44:1813–1809.

COHCE, M, ROSEN, M Y DINCER, I. Efficiency evaluation of a biomass gasification-based hydrogen production. Faculty of engineering and applied science, University of Ontario institute of technology. Ontario : ELSEVIER, 2011.

COHCE, M., ROSEN, M., DINCER, I., Efficiency evaluation of a biomass gasification based hydrogen production. Int J Hydrogen Energy 2011;36:11388–98.

DEMIRBAS A. Potential applications of renewable energy sources, biomass combustion problems in boiler power systems and combustion related environmental issues. Prog Energy Combust Sci 2005;31:171–92.

EFROYMSON, R. & DALE, V,. Environmental indicators for sustainable production of algal biofuels. Oak ridge national laboratory. Ecological indicators 2014;49;1-13.

EIA (U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION). International Energy Outlook 2010. Washington, DC 20585, U.S.; 2010. (www.eia.gov/oiaf/ieo/index.html).

FERNANDEZ, D.P., GOODWIN, A.R.H., LEMMON, E.W., LEVELT SENGERS, J.M., WILLIAMS, R.C. A formulation for the static permittivity of water and steam at temperatures from 238 K to 873 K at pressures up to 1200 MPa, including derivatives and Debye–Huckel coefficients. J. Phys. B At. Mol. Opt. Phys. 1997;26; 1125–1165.

FIORI, L,. VALBUSA, M,. CASTELO, D,. Supercritical water gasification of biomass for H₂ production: Process design. Bioresource Technology 2012;121;139-147.

FOWDEN, L. The quantitative recovery and calorimetric estimation of amino-acids separated by paper chromatography. Medical Research Council Laboratories. London. 1950; 327-333.

GIL J, CORELLA J, AZNAR MP, CABALLERO MA. Biomass gasification in atmospheric and bubbling fluidizing bed: effect of the type of gasifying agent on the product distribution. Biomass Bioenergy 1999;17:389–403.

HIRANO A, HON-NAMI K, KUNITO S, HADA M, OGUSHI Y. Temperature effect on continuous gasification of microalgal biomass: theoretical yield of methanol production and its energy balance. *Catal Today* 1998;45:399–404.

KHOO, H., SHAIK, K., SHARRATT, P., Bioenergy co-products derived from microalgae biomass via thermochemical conversion – Life cycle energy balances and CO₂ emissions. Institute of Chemical and engineering Sciences. *Bioresource Technology* 2013; 143; 298-307.

LAAMANEN, C., SHANG, H., ROSS, G., SCOTT, J., A model for utilizing industrial off-gas to support microalgae cultivation for biodiesel in cold climates. Laurentian University. *Energy conversion and management* 2014:88;476-483.

LARDON, L., HÉLIAS, A., SIALVE, B., STEYER, J., BERNARD, O., Life-cycle assessment of biodiesel production from microalgae. *Laboratoire de Biotechnologie de l'Environnement, Environ. Sci. Technol* 2009:43;6475-6481.

LEMMON, E.W., MCLINDEN, M.O., FRIEND, D. Thermophysical Properties of Fluid Systems, NIST chemistry WebBook, NIST standard reference database number 69. In: Linstrom, P.J., Mallard, W.G. (Eds.), National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD 20899. 2011.

LOUW, J., SCHWARZ, E., KNOETZE, J., BURGER, E., Thermodynamic modelling of supercritical water gasification: Investigating the effect of biomass composition to aid in the selection of appropriate feedstock material. Stellenbosch University. Department of process engineering. *Matieland*. 2014;174; 11–23.

MAHISHI MR, GOSWAMI DY. Thermodynamic optimization of biomass gasifier for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy* 2007;32:3831e40.

MAHISHI MR, GOSWAMI DY. Thermodynamic optimization of biomass gasifier for hydrogen production. International Journal of Hydrogen Energy 2007;32:3831-40.

MARIAS, F., LETELLIER, S., CEZAC, P., SERIN, J., Energetic analysis of gasification of aqueous biomass supercritical water. Université de Pau et des Pays de l'Adour, rue Jules Ferry, Biomass and bioenergy 2011;35; 50-73.

MILNE TA, ELAM CC, EVANS RJ. Hydrogen from biomass: state of the art and research challenges. National Renewable Energy Laboratory; 2002. Report No: IEA/H2/TR-02/001. Golden, CO, USA.

NATH K. & DAS D., Hydrogen from biomass, Current Science, vol. 85, No. 3, 2003;265-327.

Nath, K & Das D. Hydrogen from biomass. Curr Sci 2003;85:265–271.

ONCEL SUPHI, S. Microalgae for a macroenergy world. Faculty of engineering. Department of bioengineering., Ege University. Turkey : ELSEVIER, 2013

OZKAN, A., KINNEY, K., KATZ, L., BERBEROGLU, H., Reduction of water and energy requirement of alga cultivation using an algae biofilm photobioreactor. The university of Texas at Austin. Austin. 2012. P. 1-7

PANDA, CHITTARANJAN. Aspen plus simulation and experimental studies on biomass gasification. National institute of technology. Rourkela : s.n., 2012. Thesis.

PTASINSKI KJ. Efficiency analysis of hydrogen production methods from biomass. International Journal of Alternative Propulsion 2008;2(1):39-49.

RAMZAN N, ASHRAF A, NAVEED S, MALIK A. Simulation of hybrid biomass gasification using Aspen plus: a comparative performance analysis for food, municipal solid and poultry waste. *Biomass Bioenergy* 2011;35:3962–3949.

SANTOS, A., GONZÁLEZ, Y., MARTIN, C., Uso y aplicaciones potenciales de las microalgas. Universidad Pontificia Comillas de Madrid. 2014. P. 1-9.

SAULI, E., SARBATLY, R., Conversion of microalgae to biofuel. Universiti Malaysia Sabah. Sabah. 2012. 16, 4316-4342.

SAVAGE, P.E, Organic chemical reactions in supercritical water. *Chem. Rev.* 1999;99; 603–622.

SCHENK P, THOMAS-HALL S, STEPHENS E, MARX U, MUSSGNUG J, POSTEN C, et al. Second generation biofuels: high-efficiency microalgae for biodiesel production. *Bioenerg Res* 2008;1:20–43.

SLADE, R. & BAUEN, A., Micro-algae cultivation for biofuels: Cost, energy balance, environmental impacts and future prospects. Imperial college London. *Biomass and bioenergy* 2013;53;29-38.

SPOEHR, H., & MILNER, H., The chemical composition of *Chlorella* effect of environmental conditions. 1948

STUCKI S, VOGEL F, LUDWIG C, HAIDUC AG, BRANDENBERGER M. Catalytic gasification of algae in supercritical water for biofuel production and carbon capture. *Energy Environ Sci* 2009;2:535–41.

UDOM, I., ZARIBAF, B., HALFHIDE, T., GILLIE, B., DALRYMPLE, O., ZHANG, Q., ERGAS, S., Harvesting microalgae grown on wastewater. University of south Florida. Energy policy 2013;139;101-106.

USO INDUSTRIAL METANO. BuenasTareas.com. Disponible online: <http://www.buenastareas.com/ensayos/Uso-Industrial-Metano/4184718.html>, Recuperado: 10 de enero de 2012.

VERVERIS, C., GEORGHIOU, K., DANIELIDIS, D., HATZINIKOLAOU, D., SANTAS, P., SANTAS, R., CORLETI, V., Cellulose, hemicelluloses, lignin and ash content of some organic materials and their suitability for use as paper pulp supplements. University of Athenas. Bioresource Technology 2007;98:296-301.

WANG, T., YABAR, H., HIGANO, Y., Perspective assessment of algae-based biofuel production using recycled nutrient source: The case of japan. University of Tsukuba. Bioresource technology 2013;128;688-696.

WEBER G, FU Q, WU H. Energy efficiency of an integrated process based on gasification for hydrogen production from biomass. Developments in Chemical Engineering and Mineral Processing 2006;14:39e49.

WEBER G, FU Q, WU H. Energy efficiency of an integrated process based on gasification for hydrogen production from biomass. Developments in Chemical Engineering and Mineral Processing 2006;14:39-49.

XU, L., BRILMAN, D., WITHAG, J., BREM, G., KERSTEN, S., Assessmen of a dry and wet route for the production of from microalgae: energy balance analysis. University of Twente. Enschede. Bioresource Technology 2011;102; 5113-5122.

ZHANG, L., XU, C., CHAMPAGNE, P. Overview of recent advances in thermochemical conversion of biomass. *Energy Convers. Manage.*2010;51;969–982.

ANEXOS

Anexo A. Condiciones para etapas de cultivo y cosecha

Etapa de cultivo

Condiciones del cultivo en un Raceway pond

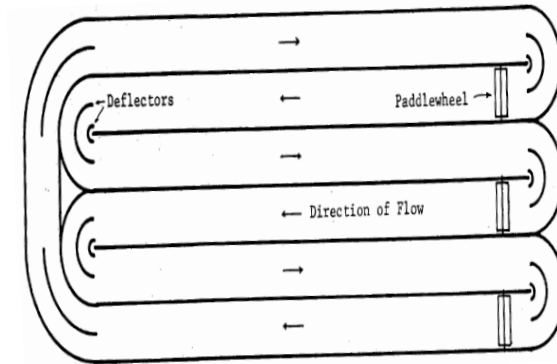
| Condiciones | | Referencias |
|---------------------------------|---|-------------------------|
| Productividad biomasa seca | 11 g/m ² *d | Ozkan et al. [45] |
| Área ocupada | 10.000 m ² | Wan et al. [46] |
| Tiempo por lote | 9 d | Chiaramonti et al. [47] |
| Rendimiento CO ₂ | 0,55 kg biomasa seca/kg CO ₂ | Chisti Y. [48] |
| Agitación (agitador de paletas) | 25 cm/s | |
| Consumo de agua | 4 L/kg de biomasa seca | Lardon et al. [49] |
| Inyección de CO ₂ | 0,1425 MJ/kg de biomasa seca | |
| Consumo energético total* | 1,2634 MJ/kg de biomasa seca | |
| Consumo energía fósil | 5 MJ/kg de biomasa seca | |

* Tiene en cuenta los consumos energéticos de: inyección de CO₂, Suministro de agua, inyección de nutrientes, agitación mecánica.

Diseño conceptual de la etapa de cultivo

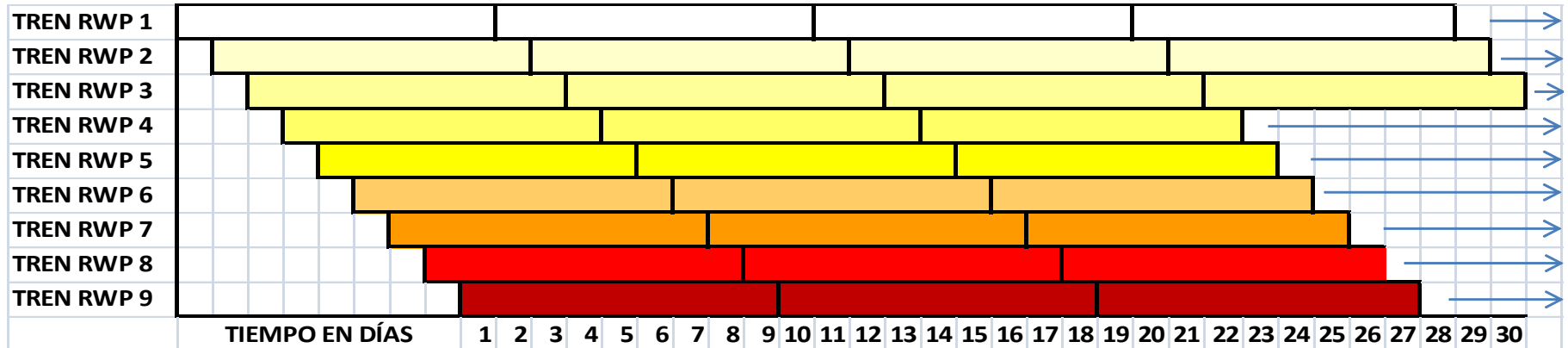
| | |
|-------------------------------------|-----------|
| Productividad biomasa/lote | 990 kg |
| CO ₂ Disponible por lote | 14.402 kg |
| Biomasa producida por lote | 8.001 kg |
| Número de RWP por Tren | 8 |
| Número de Trenes | 9 |

Esquema de un Raceway pond comercial



Fuente: Bautista, J., & Sierra, A., [53].

Diagrama de Gantt para la etapa de cultivo y cosecha.

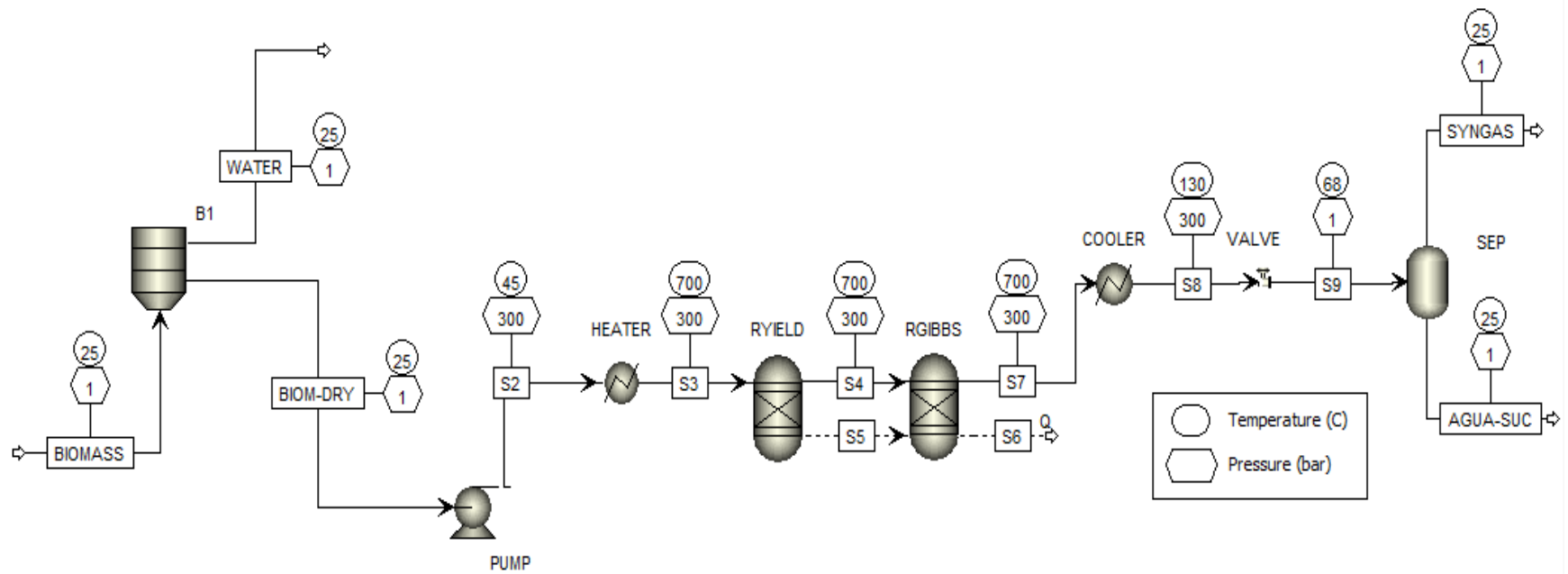


Etapa de cosecha

Condiciones de centrifugado

| Condiciones | Referencias | |
|------------------------------------|----------------------|-------------------|
| Equipo | Evodos | |
| Capacidad | 900 kg/h | |
| Velocidad de centrifugado | 2000 rpm | Udom et al. [52] |
| Eficiencia de la etapa | 95% | Suali et al. [16] |
| Concentración de sólidos (entrada) | 1-6% | Udom et al. [52] |
| Concentración de sólidos (salida) | 5-30% | |
| Consumo energético | 1 MJ/kg biomasa seca | Suali et al. [16] |

Anexo B. Simulación realizada de SCWG.



Anexo C. Análisis de sensibilidad

Valores de rendimiento obtenidos del Syngas en función de la temperatura

| TEMPERATURA | Rend. H₂ (g/kg biomasa) | Rend. CH₄ (g/kg biomasa) | Rend. CO (g/kg biomasa) | Rend. CO₂ (g/kg biomasa) |
|--------------------|---|--|--|--|
| 700 | 31,13 | 368,15 | 53,56 | 859,60 |
| 690 | 29,25 | 372,69 | 48,01 | 855,86 |
| 680 | 27,43 | 377,03 | 42,93 | 851,95 |
| 670 | 25,69 | 381,16 | 38,28 | 847,91 |
| 660 | 24,02 | 385,09 | 34,05 | 843,77 |
| 650 | 22,41 | 388,83 | 30,21 | 839,54 |
| 640 | 20,88 | 392,38 | 26,73 | 835,27 |
| 630 | 19,41 | 395,75 | 23,59 | 830,97 |
| 620 | 18,02 | 398,94 | 20,75 | 826,68 |
| 610 | 16,68 | 401,95 | 18,21 | 822,41 |
| 600 | 15,42 | 404,80 | 15,93 | 818,19 |
| 590 | 14,22 | 407,48 | 13,89 | 814,04 |
| 580 | 13,08 | 410,00 | 12,08 | 809,97 |
| 570 | 12,01 | 412,37 | 10,47 | 806,00 |
| 560 | 10,99 | 414,59 | 9,04 | 802,15 |
| 550 | 10,04 | 416,67 | 7,78 | 798,43 |
| 540 | 9,14 | 418,61 | 6,67 | 794,84 |
| 530 | 8,30 | 420,42 | 5,70 | 791,40 |
| 520 | 7,52 | 422,10 | 4,86 | 788,12 |
| 510 | 6,79 | 423,66 | 4,12 | 785,00 |
| 500 | 6,11 | 425,11 | 3,48 | 782,04 |
| 490 | 5,48 | 426,44 | 2,92 | 779,25 |
| 480 | 4,89 | 427,67 | 2,45 | 776,63 |
| 470 | 4,36 | 428,79 | 2,04 | 774,18 |
| 460 | 3,86 | 429,83 | 1,69 | 771,89 |
| 450 | 3,41 | 430,77 | 1,40 | 769,77 |
| 440 | 3,00 | 431,63 | 1,14 | 767,81 |

| | | | | |
|------------|-------|--------|--------|--------|
| 430 | 2,62 | 432,40 | 0,93 | 766,01 |
| 420 | 2,28 | 433,11 | 0,76 | 764,36 |
| 410 | 1,97 | 433,74 | 0,61 | 762,85 |
| 400 | 1,70 | 434,31 | 0,49 | 761,49 |
| 710 | 32,87 | 345,75 | 57,42 | 842,34 |
| 720 | 34,46 | 312,79 | 59,90 | 812,60 |
| 730 | 36,06 | 283,00 | 62,59 | 786,51 |
| 740 | 37,66 | 256,09 | 65,50 | 763,68 |
| 750 | 39,26 | 231,79 | 68,62 | 743,76 |
| 760 | 40,85 | 209,84 | 71,97 | 726,41 |
| 770 | 42,44 | 190,02 | 75,55 | 711,34 |
| 780 | 44,01 | 172,13 | 79,36 | 698,29 |
| 790 | 45,57 | 155,99 | 83,42 | 687,01 |
| 800 | 47,13 | 141,42 | 87,73 | 677,29 |
| 810 | 48,67 | 128,27 | 92,28 | 668,94 |
| 820 | 50,19 | 116,40 | 97,09 | 661,79 |
| 830 | 51,71 | 105,69 | 102,15 | 655,67 |
| 840 | 53,21 | 96,02 | 107,47 | 650,45 |
| 850 | 54,70 | 87,30 | 113,04 | 646,00 |
| 860 | 56,17 | 79,42 | 118,86 | 642,23 |
| 870 | 57,63 | 72,30 | 124,94 | 639,02 |
| 880 | 59,08 | 65,87 | 131,28 | 636,29 |
| 890 | 60,52 | 60,05 | 137,87 | 633,96 |
| 900 | 61,95 | 54,79 | 144,70 | 631,98 |

Valores de rendimiento obtenidos del Syngas en función de la presión

| PRESIÓN (Bar) | Rend. H₂ (g/kg biomasa) | Rend. CH₄ (g/kg biomasa) | Rend. CO (g/kg biomasa) | Rend. CO₂ (g/kg biomasa) |
|--------------------------|---|--|------------------------------------|--|
| 350 | 28,04 | 340,86 | 45,65 | 810,30 |
| 340 | 28,63 | 348,47 | 47,31 | 822,50 |
| 330 | 29,25 | 356,39 | 49,08 | 835,16 |
| 320 | 29,90 | 364,64 | 50,97 | 848,31 |
| 310 | 30,53 | 369,48 | 52,57 | 857,52 |
| 300 | 31,13 | 368,15 | 53,56 | 859,60 |
| 290 | 31,75 | 366,76 | 54,61 | 861,76 |
| 280 | 32,40 | 365,30 | 55,71 | 864,02 |
| 270 | 33,09 | 363,77 | 56,88 | 866,38 |
| 260 | 33,81 | 362,17 | 58,12 | 868,85 |
| 250 | 34,57 | 360,47 | 59,43 | 871,44 |
| 240 | 35,37 | 358,68 | 60,83 | 874,16 |
| 230 | 36,21 | 356,78 | 62,32 | 877,01 |
| 220 | 37,11 | 354,77 | 63,92 | 880,02 |
| 210 | 38,06 | 352,63 | 65,64 | 883,20 |
| 200 | 39,08 | 350,35 | 67,49 | 886,56 |

Anexo D. Valores de LHV y HHV obtenidos mediante el análisis de sensibilidad

Valores de LHV y HHV del Syngas en función de la temperatura

| TEMPERATURA | LHV Syngas (kJ/kg) | HHV Syngas (kJ/kg) |
|--------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 400 | 16516,81 | 18339,60 |
| 410 | 16505,63 | 18328,88 |
| 420 | 16493,28 | 18317,06 |
| 430 | 16479,73 | 18304,07 |
| 440 | 16464,90 | 18289,87 |
| 450 | 16448,76 | 18274,42 |
| 460 | 16431,27 | 18257,67 |
| 470 | 16412,39 | 18239,59 |
| 480 | 16392,09 | 18220,17 |
| 490 | 16370,36 | 18199,37 |
| 500 | 16347,19 | 18177,20 |
| 510 | 16322,57 | 18153,65 |
| 520 | 16296,52 | 18128,73 |
| 530 | 16269,04 | 18102,46 |
| 540 | 16240,18 | 18074,87 |
| 550 | 16209,97 | 18046,00 |
| 560 | 16178,45 | 18015,89 |
| 570 | 16145,70 | 17984,61 |
| 580 | 16111,78 | 17952,23 |
| 590 | 16076,77 | 17918,83 |
| 600 | 16040,77 | 17884,50 |
| 610 | 16003,89 | 17849,33 |
| 620 | 15966,23 | 17813,45 |
| 630 | 15927,91 | 17776,96 |
| 640 | 15889,07 | 17740,00 |

| | | |
|------------|----------|----------|
| 650 | 15849,83 | 17702,69 |
| 660 | 15810,35 | 17665,17 |
| 670 | 15770,76 | 17627,59 |
| 680 | 15731,22 | 17590,09 |
| 690 | 15691,87 | 17552,81 |
| 700 | 15652,88 | 17515,91 |
| 710 | 15417,02 | 17265,37 |
| 720 | 15037,42 | 16859,22 |
| 730 | 14666,22 | 16462,58 |
| 740 | 14306,65 | 16078,90 |
| 750 | 13961,67 | 15711,29 |
| 760 | 13633,88 | 15362,51 |
| 770 | 13325,48 | 15034,84 |
| 780 | 13038,20 | 14730,11 |
| 790 | 12773,32 | 14449,60 |
| 800 | 12531,65 | 14194,13 |
| 810 | 12313,56 | 13964,05 |
| 820 | 12119,04 | 13759,29 |
| 830 | 11947,72 | 13579,40 |
| 840 | 11798,95 | 13423,64 |
| 850 | 11671,85 | 13291,04 |
| 860 | 11565,36 | 13180,42 |
| 870 | 11478,31 | 13090,50 |
| 880 | 11409,44 | 13019,91 |
| 890 | 11357,44 | 12967,25 |
| 900 | 11321,02 | 12931,09 |

Valores de LHV y HHV del Syngas en función de la presión

| PRESIÓN (Bar) | LHV Syngas (kJ/kg) | HHV Syngas (kJ/kg) |
|--------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 310 | 15669,36 | 17531,63 |
| 300 | 15652,88 | 17515,91 |
| 290 | 15635,74 | 17499,56 |
| 320 | 15618,93 | 17474,72 |
| 280 | 15617,90 | 17482,54 |
| 270 | 15599,29 | 17464,79 |
| 260 | 15579,87 | 17446,26 |
| 250 | 15559,57 | 17426,90 |
| 240 | 15538,30 | 17406,62 |
| 330 | 15529,06 | 17374,96 |
| 230 | 15515,99 | 17385,35 |
| 220 | 15492,55 | 17362,99 |
| 210 | 15467,86 | 17339,45 |
| 200 | 15441,80 | 17314,61 |
| 340 | 15440,09 | 17276,16 |
| 350 | 15351,94 | 17178,25 |

Anexo E. Resultados de la bomba (PUMP)

| | |
|---|-------------|
| Name | PUMP |
| Property method | PR-BM |
| Henry's component list ID | |
| Electrolyte chemistry ID | |
| Use true species approach for electrolytes | YES |
| Free-water phase properties method | STEAM-TA |
| Water solubility method | 3 |
| Model Type | |
| Specified discharge pressure [bar] | 300 |
| Fluid power [kW] | 1,92 |
| Calculated brake power [kW] | 6,49 |
| Electricity [kW] | 6,49 |
| Volumetric flow rate [l/min] | 3,85 |
| Calculated discharge pressure [bar] | 300 |
| Calculated pressure change [bar] | 299 |
| NPSH available [m-kgf/kg] | 11,64 |
| Head developed [m-kgf/kg] | 3057,61 |
| Pump efficiency used | 0,29 |
| Net work required [kW] | 6,49 |
| Total feed stream CO2e flow [kg/hr] | 0 |
| Total product stream CO2e flow [kg/hr] | 0 |
| Net stream CO2e production [kg/hr] | 0 |
| Utility CO2e production [kg/hr] | 0 |
| Total CO2e production [kg/hr] | 0 |

Fuente: Aspen Plus® V8.4.

Anexo F. Resultados de rehervidor (HEATER)

| | |
|---|---------------|
| Name | HEATER |
| Property method | PR-BM |
| Use true species approach for electrolytes | YES |
| Free-water phase properties method | STEAM-TA |
| Water solubility method | 3 |
| Specified pressure [bar] | 300 |
| Specified temperature [C] | 700 |
| Calculated pressure [bar] | 300 |
| Calculated temperature [C] | 700 |
| Calculated vapor fraction | 1 |
| Calculated heat duty [cal/sec] | 59576,86 |
| Net duty [cal/sec] | 59576,86 |
| First liquid / total liquid | |
| Total feed stream CO2e flow [kg/hr] | 0 |
| Total product stream CO2e flow [kg/hr] | 0 |
| Net stream CO2e production [kg/hr] | 0 |
| Utility CO2e production [kg/hr] | 0 |
| Total CO2e production [kg/hr] | 0 |

Fuente: Aspen Plus® V8.4.