

## Análise Exergoeconômica da Gasificação de Sabugo de Milho Integrado em um Sistema de Geração de Energia: Estudo de Caso na Colômbia

### *Exergoeconomic Analysis of Corn Cob Gasification Integrated to a Power Generation System: Case Study in Colombia*

Jorge Mario Mendoza Fandiño,<sup>a,\*</sup> Jesús David Rhenals Julio,<sup>a</sup> Adrián Enrique Ávila Gomez,<sup>a</sup> Elías Ricardo Durango Padilla<sup>b</sup> 

<sup>a</sup>Universidade de Córdoba, Departamento de Engenharia Mecânica, Campus Montería, Carrera 6 No. 76-103, CP 230002, Montería, Córdoba, Colômbia.

<sup>b</sup>Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita, Departamento de Engenharia Mecânica, Filho, Av. Ariberto Pereira da Cunha 333, CEP 12516-410, Guaratinguetá-SP, Brasil

\*E-mail: [jorge.mendoza@correo.unicordoba.edu.co](mailto:jorge.mendoza@correo.unicordoba.edu.co)

Recebido: 16 de Agosto de 2020

Aceito: 13 de Fevereiro 2021

Publicado online: 14 de Abril de 2021

The aim of this work was to carry out an exergoeconomic model of corn cob gasification using water vapor as a gasifying agent coupled to an internal combustion engine to generate electricity. Initially, the physicochemical characterization of the samples was performed by immediate analysis, elemental analysis and higher heating value (HHV). The characterization output was 65.23% for volatile material, 16.54% for fixed carbon and 13.53 MJ/kg of HHV. A simulation was made using Aspen HYSYS software, obtaining a gas with a heating value of 12.41 MJ/kg. Then, an exergoeconomic generation cost of 0.040 USD/kWh was calculated for a 10.1 MW system, with an internal rate of return (IRR) of 65.75% for a period of 20 years. Finally, an energetic optimization of the system integration was performed using the response surface methodology (RSM) in the Statgraphics software, obtaining a generation potential of 10.55 MW, a generation cost of 0.037 USD/kWh and an exergetic efficiency 45.8% with which an IRR of 68.71%. Additionally, the plant size impact on the generation cost and the IRR was calculated, finding that the balance size was 770 kW for an incoming mass flow of 360 kg/h. The assessed costs are type 3 and therefore have an uncertainty of 15%.

**Keywords:** Biomass; exergy; simulation; optimization.

### 1. Introdução

A utilização de combustíveis fósseis envolve a emissão de grandes quantidades de CO<sub>2</sub> que contribuem para o efeito estufa. O impacto ambiental causado durante décadas pelos combustíveis fósseis é um dos fatores que incentivaram a procura de novos combustíveis. Os substitutos para esses combustíveis, além de reduzir o problema ambiental devem competir economicamente com as fontes de energia convencionais. Entre os candidatos está a biomassa residual, uma fonte de energia renovável que pode solucionar as necessidades atuais e futuras de energia. De acordo com a unidade de planejamento mineiro-energética (UPME), o potencial energético da biomassa residual da Colômbia é 2 229,13 TJ/ano.<sup>1</sup>

No departamento de Córdoba, Colômbia, a economia é baseada principalmente na agricultura, que produz uma grande quantidade de resíduos agroindustriais, destacando os gerados pelas lavouras de milho, arroz, coco e banana. No caso específico do milho, em 2017, havia 122 mil hectares cultivados.<sup>2</sup> No processamento dessa cultura, o principal resíduo é o sabugo de milho, que atualmente é descartado, e grandes quantidades são incineradas no campo, trazendo consigo geração de gases de efeito estufa e deterioração do solo sem nenhum benefício energético.

O sabugo de milho é uma biomassa de grande abundância no departamento de Córdoba; estimou-se que até 2013, eram produzidas anualmente cerca de 44 mil toneladas, o equivalente a 4.867 kg/h de biomassa de sabugo de milho, com uma produção média cidade de 1.900 toneladas.<sup>3</sup> Considerando as propriedades energéticas da biomassa, estima-se que o potencial anual de geração de energia do departamento utilizando biomassa de milho é de aproximadamente 169 GWh, equivalente a 123 mil barris de petróleo, e de 6,4% do potencial de geração de carvão mineral no departamento, de acordo com dados da Agência Nacional de Mineração da Colômbia.<sup>4</sup>

A mudança na política ambiental regional proibiu a queima dos resíduos com o objetivo de incentivar a implementação de processos de conversão de energia onde seja possível aproveitar os resíduos.<sup>5</sup> Entre as tecnologias de conversão térmica de biomassa, a mais atraente é a gaseificação,

que permite aproveitar os resíduos agroindustriais e produzir um combustível que pode ser integrado às atuais instalações de geração de eletricidade regional, tornando essencial o estudo da operação da gaseificação.

A construção de uma planta piloto para geração de energia de gaseificação requer um grande investimento inicial, neste estudo foi considerada uma análise teórica deste tipo de plantas utilizando ferramentas computacionais que fornecem dados confiáveis. Os dados podem ser utilizados para verificar a viabilidade da implementação da planta piloto. A análise computacional permite apreciar o panorama do investimento necessário, dando uma estimativa dos custos de geração, as condições ideais de operação e a capacidade da planta.<sup>6,7,8</sup>

A teoria exergoeconômica foi formulada em 1962 por Tribus e Evans, em estudos realizados sobre otimização energética de processos.<sup>9</sup> A teoria vem avançando desde então, tornando-se cada vez mais robusta e suas aplicações foram estendidas. A otimização exergoeconômica representa uma das aplicações mais estudadas atualmente, devido a que combina eficiência energética, otimização econômica e redução do impacto ambiental.<sup>10</sup>

Para realizar uma análise exergoeconômica, deve ser realizada uma modelagem do sistema avaliado, o que permite o cálculo das exergias do sistema. Atualmente, esses modelos são construídos por meio de simulação computacional. Shokati *et al.*<sup>11</sup> realizaram a análise exergoeconômica do ciclo de Kalina usando um modelo de simulação realizado no software EES, existem vários estudos sobre gaseificação de biomassa, onde o problema é abordado a partir da simulação computacional da Aspen Hysys.<sup>12, 13</sup>

O objetivo deste trabalho foi realizar uma análise exergoeconômica da gaseificação do sabugo de milho com vapor de água como agente gaseificante, integrado ao motor de combustão interna (MCI), mediante uma simulação computacional usando o software Aspen Hysys para estabelecer o custo ótimo de geração de energia; Os custos estimados neste trabalho são do tipo 3, pois são calculados a partir do projeto básico de engenharia da planta, ou seja, são considerados somente os equipamentos principais, descartando elementos menores, condições especiais de montagem, entre outros.

## 2. Materiais e Métodos

### 2.1. Preparação e caracterização dos materiais

O sabugo de milho utilizado foi coletado na cidade de Montería, **Córdoba**, Colômbia. Inicialmente, foi realizada uma caracterização do material mediante análise elementar que consistiu em determinar o teor de Carbono (C), Hidrogênio (H), Nitrogênio (N) e Enxofre (S). O valor do teor de Oxigênio (O) foi determinado pela diferença, conforme a norma ASTM D3176.<sup>14</sup>

Na análise imediata foi determinado o teor de umidade, voláteis e cinzas conforme a norma ASTM D7582,<sup>15</sup> com

três repetições para cada teste. O valor de carbono fixo foi calculado pela diferença.

O poder calorífico superior (PCS) foi determinado de acordo com a norma ASTM D2015<sup>16</sup>, utilizando-se uma bomba calorimétrica marca IKA modelo C200, com três repetições para cada tratamento.

### 2.2. Simulação do sistema de integração energética

Posteriormente, utilizando os dados experimentais da caracterização da biomassa, a planta de geração foi modelada no software Aspen HYSYS® usando o pacote termodinâmico Peng-Robinson. O processo de gaseificação foi modelado com um arranjo de reatores químicos cinéticos, nos quais foi produzido o gás que alimentou o motor de combustão interna para geração de energia. O gerador foi simulado por meio do ciclo termodinâmico de um motor diesel a gás. Assim, utilizando a modelagem computacional do conjunto gaseificador-gerador foi determinado o potencial energético do sabugo de milho. Usando os conceitos da segunda lei da termodinâmica, foi determinada a exergia de cada linha de fluxo.

### 2.3. Avaliação exergoeconômica do sistema

Os custos na geração de energia foram determinados mediante a teoria de custo exergoeconômico.<sup>17</sup> O custo do investimento nos equipamentos que compõe a planta foi estimado para uma planta piloto. Com base na produção de biomassa nos principais municípios produtores do departamento de Córdoba foi proposto o local estratégico para a planta de geração até a qual a biomassa deve ser transportada. Assim, com os custos de investimento em equipamentos, transporte e geração de energia, se determinou a perspectiva econômica do investimento, mediante uma taxa interna de retorno (TIR). Os resultados foram comparados com o índice de depreciação da Lei colombiana nº 1715 que regulamenta o uso de energia renovável.<sup>18</sup>

### 2.4. Otimização do sistema de geração de energia

Finalmente, mediante a metodologia da superfície de resposta foi realizada a otimização da planta de geração, minimizando o custo exergoeconômico de geração e maximizado a eficiência da planta. No software Statgraphics®, foi desenvolvido um modelo determinístico-matemático encontrando os valores operacionais ideais propostos para a planta, com base na análise da superfície de resposta da função desejável para custo e eficiência de geração.

### 2.5. Análise estatística

Foi realizada uma análise estatística para validar o modelo de simulação. Para isso, a composição elementar de diferentes biomassas foi inserida no simulador e o valor calorífico do gás obtido a partir da simulação foi comparado

ao registrado em estudos de referência.<sup>19-22</sup> A análise consistiu na construção de um modelo de calibração linear para relacionar os dados de potência calórica do gás obtido a partir da simulação com os registrados nos estudos de referência e, finalmente, testar as hipóteses de inclinação da linha igual a um e a interceptação igual a zero. Para todas as análises foram considerados o nível de confiança de 95%.

### 3. Resultados e Discussão

#### 3.1. Caracterização dos materiais

A Tabela 1, apresenta os resultados da análise imediata e poder calorífico superior do sabugo de milho.

Os resultados da Tabela 1 indicam as propriedades energéticas do material. Observou-se que a maior fração da composição foi representada pelo teor de voláteis de 65,23%, seguido pelo teor de carbono fixo de 16,4%, indicando que aproximadamente 81% da biomassa pode ser aproveitada no processo de gaseificação, pois as cinzas e a umidade não contribuem com energia no processo.<sup>23</sup> O sabugo de milho se encontrava estocado ao ar livre, isto explica a baixa umidade (10,52%) da biomassa. A exposição ao sol em espaços abertos também justifica o teor de cinzas do material de 7,71%, sua presença pode ser devido à poeira depositada durante o processo de secagem natural, sendo prejudicial por permitir a formação de óxidos corrosivos no equipamento durante a gaseificação.<sup>24</sup> O poder calorífico superior foi de 14,3 MJ/kg, equivalente a aproximadamente 53,2% do poder calorífico do carvão betuminoso utilizado na Colômbia como fonte de energia, assim a biomassa apresentou potencial energético.<sup>25</sup> Os valores são semelhantes aos encontrados na literatura (65,1%, 8,5%, 21,3% e 18,02 MJ/kg) para os teores de voláteis, cinzas e carbono fixo e PCS, respectivamente.<sup>26</sup>

A Tabela 2 apresenta os resultados da análise elementar.

Na análise elementar se destaca que o sabugo de milho é composto por 39,3% de carbono. Comparando o resultado com o teor de carbono da turfa (45,5%), verificou-se que o teor de carbono encontrado, representa 86,5% do teor da turfa. O carbono favorece a formação de metano, hidrogênio e monóxido de carbono.<sup>21</sup> Dessa forma, o sabugo de milho apresenta potencial para o uso no processo de gaseificação. Com os dados da composição elementar, foi determinada a fórmula química aproximada do sabugo de milho  $C_{0,924}H_{1,402}O_{0,836}N_{0,012}$ . Os valores são semelhantes aos encontrados na literatura (43,81%; 6,54%; 0,77%; 48,19%) para os teores de C, H, N e O, respectivamente.<sup>27</sup>

#### 3.2. Simulação do sistema de integração energética

O modelo do sistema energético desenvolvido no Aspen HYSYS é mostrado na Figura 1. Pode ser observado a divisão do sistema em 5 subsistemas, destacando-se: 1- Unidade de geração de vapor, 2- Sistema de gaseificação, 3 e 4- Unidade de condicionamento e 5- Unidade de geração de energia (MCI). Da unidade de gaseificação foi liberado o gás com poder calorífico de 12,41 MJ/kg, que depois circula pela unidade de condicionamento e entra no MCI para produzir 10,1 MW de potência com uma eficiência do processo de 44,2%, em condições operacionais iniciais.

#### 3.3. Validação do modelo computacional

A validação do modelo de gaseificação foi realizada simulando as condições experimentais de alguns estudos de referência indicados na tabela 3, foram consideradas 10 biomassas diferentes.

O modelo de calibração mostrou que, com 95% de confiança, o modelo de simulação ajusta adequadamente os valores obtidos experimentalmente nos estudos de referência, obtendo um grau de ajuste de 91%. A figura 2 mostra a curva de calibração obtida.

**Tabela 1.** Análises imediata e poder calorífico superior do sabugo de milho

Composição	Resultado
Umidade	10,52 %
Carbono fixo	16,54 %
Voláteis	65,23 %
Cinzas	7,71 %
PCS	14,3 MJ/kg

**Tabela 2.** Composição elementar

Composição	%P/P
C	39,3
H	4,97
N	0,6
O	47,42
Cinzas	7,71

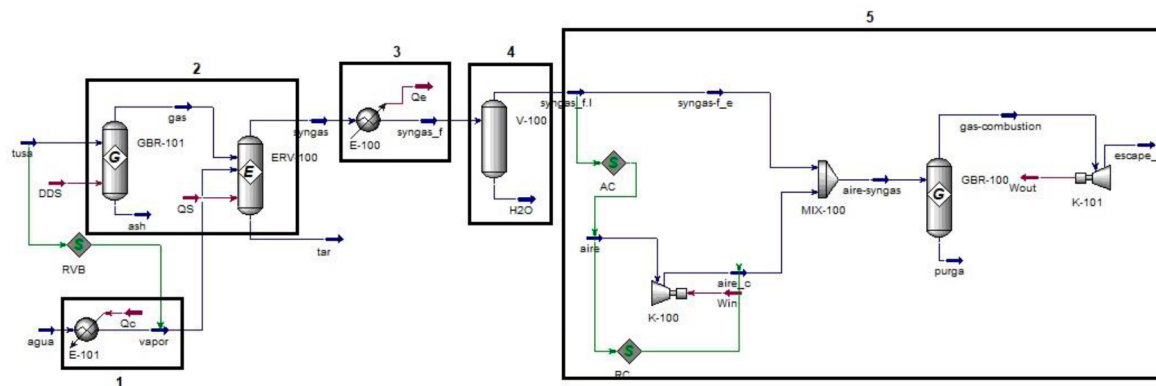


Figura 1. Sistema modelado em Aspen HYSYS

Tabela 3. Comparação entre os resultados da simulação e da literatura

Biomassa	PCS gás Simulado (MJ/kg)	PCS gás Experimental (MJ/kg)	Erro	Referência
Madeira	18,45	18,3	0,82 %	Sattara, <i>et al.</i> , 2014 <sup>19</sup>
Lodo de esgoto	8,3	9,1	8,79 %	Sattara, <i>et al.</i> , 2014 <sup>19</sup>
Miscanthus sp.	21,67	24,024	9,80 %	Sattara, <i>et al.</i> , 2014 <sup>19</sup>
Canola	16,2	18,81	13,88 %	Sattara, <i>et al.</i> , 2014 <sup>19</sup>
Cardo	17,5	16,5	6,06 %	Encinar, <i>et al.</i> , 2001 <sup>20</sup>
Legumes	17,98	16,82	6,90 %	Muñoz, <i>et al.</i> , 2011 <sup>21</sup>
Pinus sp.	17,43	16,13	8,06 %	Muñoz, <i>et al.</i> , 2011 <sup>21</sup>
Casca de Arroz	15,26	17,27	11,64 %	Muñoz, <i>et al.</i> , 2011 <sup>21</sup>
Casca de amêndoa	16,61	18,86	11,93 %	Muñoz, <i>et al.</i> , 2011 <sup>21</sup>
Casca de café	13,14	12,11	8,51 %	Klose, <i>et al.</i> , 2011 <sup>22</sup>

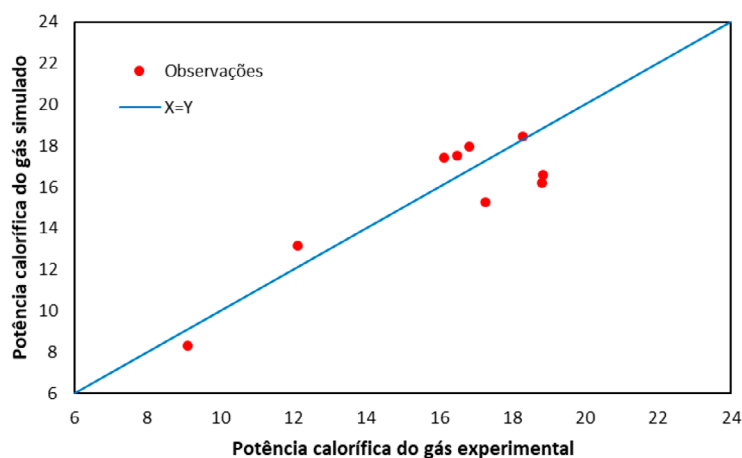


Figura 2. Curva de calibração do modelo de simulação

### 3.4. Avaliação exergoeconômica do sistema

Definida a capacidade do sistema, foi determinado que o custo inicial do investimento seria de aproximadamente 8,66 milhões de dólares com custos anuais para operação e manutenção de 346,4 mil dólares. Com a planta localizada no município de San Carlos, Córdoba, Colômbia, os custos de transporte anuais da biomassa seriam aproximadamente de 458,7 mil dólares. Nesse cenário econômico, estimou-se que o custo de geração de energia seria de 0,040 USD/kWh.

Considerando o preço de comercialização da energia na Colômbia (0,13 USD/kWh), o custo de geração na planta de gasificação e os custos anuais de funcionamento, estimou-se que o lucro anual de uma usina desse tipo seria 5.732 milhões de dólares. Assim, ao comparar os fluxos de caixa durante uma vida útil estimada da planta de 20 anos, seria gerada uma taxa interna de retorno (TIR) de 65,75%, que quando comparada a uma taxa de depreciação máxima de 20% estabelecida pela lei colombiana nº 1715 de 2014, indica que a planta pode ser viável.



Figura 3. Localização da usina e municípios produtores

### 3.5. Otimização do sistema de geração de energia

Mediante uma otimização do sistema aplicando a metodologia da superfície de resposta RSM, determinou-se que o sistema ideal possui uma capacidade de 10,55 MW, operando com uma eficiência de 45,8% e um custo de geração de 0,040 USD/kWh. A Figura 4 mostra a superfície de resposta da função desejável da otimização. Com os valores ótimos, determinou-se que a nova taxa interna de retorno foi de 68,71%, a qual foi 48,71% superior à taxa de depreciação estabelecida pela Lei colombiana nº 1715 de 2014.

A Figura 5 apresenta a taxa interna de retorno comparada com a capacidade da planta em MW, ao analisar o gráfico foi possível deduzir que a planta possivelmente é lucrativa operando a uma capacidade mínima de 770 kW, onde a TIR e o índice de depreciação de 20% são iguais, o que foi alcançado com 7,4% da biomassa gerada anualmente.

### 4. Conclusões

As propriedades termoquímicas do sabugo de milho indicam que o departamento de Córdoba, Colômbia, possui grande potencial energético utilizável nos resíduos das atividades agrícolas. O modelo de gaseificação simulado forneceu boas previsões com um grau de ajuste de 91%. De acordo com a validação realizada através do modelo de calibração, pode-se concluir que com nível de confiança de 95% não há diferença estatística entre os dados experimentais e os obtidos na simulação. A metodologia RSM permitiu minimizar o custo de geração até 0,037 USD/kWh. Com base no valor máximo de depreciação estabelecido pela lei colombiana, de 20%, estabeleceu-se que o ponto de equilíbrio econômico tem uma potência gerada de 770 kW, para a qual foi necessária 7,4% da biomassa total produzida no departamento. Observou-se

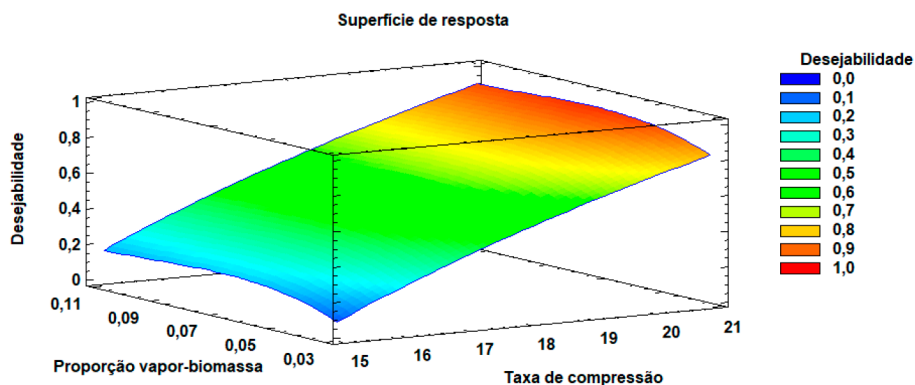


Figura 4. Superfície de resposta de função objetivo



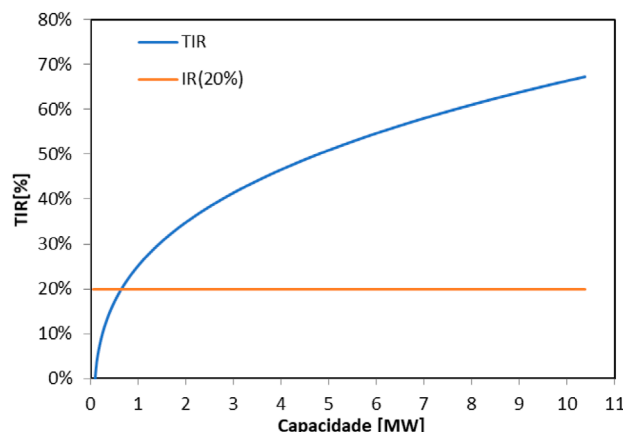


Figura 5. Taxa interna de retorno (TIR) e referência de interesse (IR) vs. capacidade de geração da planta.

também que o investimento é recuperado antes do tempo esperado. No entanto, é importante esclarecer que a implementação de uma planta comercialmente competitiva na região que utilize a tecnologia de gaseificação deve ser apoiada por estudos que considerem outros aspectos envolvidos desde o ponto de vista econômico, uma vez que este estudo foi realizado a partir de um modelo básico de engenharia (custos do tipo 3), cuja incerteza é de cerca de 15%.

## Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Pontificia Bolivariana campus Montería pelo software Aspen HYSYS v.8.0, acessível sob o acordo 753 de 2013 “Desarrollo de integración tecnológica de recursos energéticos renovables en sistemas productivos agrícolas y agroindustriales Montería, Córdoba, Caribe” BPIN N° 2012000100026 (Gobernación de Córdoba-UPB Montería). À Universidade de Córdoba pelo financiamento no âmbito da chamada interna para projetos de pesquisa, ano 2017 “Acta No. FI-05-17 de 2019”.

## Referências Bibliográficas

1. Valoración energética de residuos, Proyecto WTE Colombia, 2018. [Link]
2. Estadísticas agropecuarias 2019. Disponível em: <http://www.agronet.gov.co/>. Acesso em: 12 março 2020.
3. Secretaría de desarrollo economico de Córdoba, Evaluaciones agropecuarias municipales, Montería-Colombia, 2017. [Link]
4. Agencia Nacional de Minería. Disponível em: <https://www.anm.gov.co>. Acesso em: 22 março 2020.
5. Congreso de colombia, Ley No 1259, Bogotá DC, República de Colombia, 2008. [Link]
6. Lazzaroni, E.; Elsholkami, M.; Martelli, E.; Elkamel, A.; Design and simulation of a petcoke gasification polygeneration plant integrated with a bitumen extraction and upgrading facility and net energy analysis. *Energy* **2017**, 141, 880. [CrossRef]
7. Formica, M.; Frigo, S.; Gabbrielli, R.; Development of a new steady state zero-dimensional simulation model for woody biomass gasification in a full scale plant. *Energy Conversion and Management* **2016**, 120, 358. [CrossRef]
8. Hosseinpour, J.; Chitsaz, A.; Liu, L.; Gao, Y.; Simulation of eco-friendly and affordable energy production via solid oxide fuel cell integrated with biomass gasification plant using various gasification agents. *Renewable Energy* **2020**, 145, 757. [CrossRef]
9. Dincer, I.; Rosen, M. A.; *Exergy: Energy, Environment and Sustainable Development*, Elsevier: Amsterdam, 2013. [CrossRef]
10. de Oliveira, S.; *Exergy: Production, Cost and Renewability*, Springer: London, 2012. [CrossRef]
11. Shokati, N.; Ranjbar, F.; Yari, M.; A comprehensive exergoeconomic analysis of absorption power and cooling cogeneration cycles based on Kalina, part 1: Simulation. *Energy Conversion and Management* **2018**, 158, 437. [CrossRef]
12. Bassyouni, M.; Hasan, S. W.; Abdel-Aziz, M. H.; Abdel-hamid, S. M.-S.; Naveed, S.; A. Hussain, S.; Ani, F. N.; Date palm waste gasification in downdraft gasifier and simulation using ASPEN HYSYS. *Energy Conversion and Management* **2014**, 88, 693. [CrossRef]
13. Alshammari, Y. M.; Hellgardt, K.; A new HYSYS model for underground gasification of hydrocarbons under hydrothermal conditions. *International Journal of Hydrogen Energy* **2014**, 39, 12648. [CrossRef]
14. ASTM D3176-15, ASTM D3176-15, Standard Practice for Ultimate Analysis of Coal and Coke, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015. [Link]
15. ASTM D7582-15, Standard Test Methods for Proximate Analysis of Coal and Coke by Macro Thermogravimetric Analysis, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015. [Link]
16. ASTM D2015-00, Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke by the Adiabatic Bomb Calorimeter (Withdrawn 2000), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2000. [Link]
17. Tsatsaronis, G.; Thermo-economic analysis and optimization of energy systems. *Progress in Energy and Combustion Science* **1993**, 19, 227. [CrossRef]
18. Congreso de colombia, Ley No 1715, Bogotá DC, República de Colombia, 2014. [Link]

19. Sattar, A.; Leeke, G. A.; Hornung, A.; Wood, J.; Steam gasification of rapeseed, wood, sewage sludge and miscanthus biochars for the production of a hydrogen-rich syngas. *Biomass and Bioenergy* **2014**, *69*, 276. [[CrossRef](#)]
20. Encinar, J. M.; González, J. F.; González, J.; Steam gasification of *Cynara cardunculus* L.: Influence of variables. *Fuel Processing Technology* **2002**, *75*, 27. [[CrossRef](#)]
21. Muñoz, J.; Posada, A.; Simulación de la producción de hidrógeno y metanol a partir de la gasificación de cascarilla de arroz con vapor. *Dyna* **2011**, *78*, 122. [[Link](#)]
22. Rincón, S.; Rincón, A. G. W. K. S.; Gómez, A.; Klose, W.; *Gasificación de biomasa residual de procesamiento agroindustrial*, Kassel University Press: Kassel, 2011.
23. Liao, C.; Wu, C.; Yan, Y.; The characteristics of inorganic elements in ashes from a 1 MW CFB biomass gasification power generation plant. *Fuel Processing Technology* **2007**, *88*, 149. [[CrossRef](#)]
24. Yao, X.; Zhao, Z.; Li, J.; Zhang, B.; Zhou, H.; Xu, K.; Experimental investigation of physicochemical and slagging characteristics of inorganic constituents in ash residues from gasification of different herbaceous biomasses. *Energy* **2020**, *198*, 117367. [[CrossRef](#)]
25. Beamish, B. B.; Theiler, J.; Coal spontaneous combustion: Examples of the self-heating incubation process. *International Journal of Coal Geology* **2019**, *215*, 103297. [[CrossRef](#)]
26. Anukam, A. I.; Goso, B. P.; Okoh, O. O.; Mamphweli, S. N.; Studies on Characterization of Corn Cob for Application in a Gasification Process for Energy Production. *Journal of Chemistry* **2017**, *2017*, ID 6478389. [[CrossRef](#)]
27. Shariff, A.; Aziz, N. S. M.; Ismail, N. I.; Abdullah, N.; Corn cob as a potential feedstock for slow pyrolysis of biomass. *Journal of Physical Science* **2016**, *27*, 123. [[CrossRef](#)]