



**Evaluación de costos nivelados de energía eléctrica en tecnologías waste to energy aplicando incentivos tributarios de la Ley 1715 para la conversión de cáscara de cacao.**

Carlos Andrés Osuna Flórez

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:  
Ingeniero Electricista

Asesora:

Nathalia Botero Orrego, Magister en ingeniería

Universidad de Antioquia  
Facultad de ingeniería, Departamento de ingeniería eléctrica  
Ingeniería Eléctrica  
Medellín, Colombia  
2022.

**Referencia**

- [1] C.Osuna Flórez, "Evaluación de costos nivelados de energía eléctrica en tecnologías waste to energy aplicando incentivos tributarios de la Ley 1715 para la conversión de cáscara de cacao", Tesis de pregrado, Ingeniería Eléctrica, Universidad de Antioquia, Medellín, 2022.

Estilo IEEE (2020)



Biblioteca Carlos Gaviria Díaz

**Repositorio Institucional:** <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - [www.udea.edu.co](http://www.udea.edu.co)

**Rector:** John Jairo Arboleda <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - [www.udea.edu.co](http://www.udea.edu.co)

**Rector:** John Jairo Arboleda

**Decano/Director:** Jesús Francisco Vargas Bonilla

**Jefe departamento:** Noe Alejandro Mesa Quintero

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

### **Dedicatoria**

A todas las personas que tuvieron que ver con mi formación como profesional y ser humano.

### **Agradecimientos**

A todos los miembros de mi familia, amigos, compañeros y personas cuyos nombres no caben en este espacio y que de alguna u otra forma impactaron de manera positiva mi camino en esta carrera.

## TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	9
ABSTRACT.....	10
I. INTRODUCCIÓN.....	11
II. OBJETIVOS.....	13
III. MARCOTEÓRICO.....	14
IV. METODOLIGÍA.....	17
V. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	23
VI. DISCUCIÓN.....	31
VII. CONCLUSIONES.....	33
REFERENCIAS.....	34

## LISTA DE TABLAS

TABLA I CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS SISTEMAS WtE A ANALIZAR.....	18
TABLA II PRINCIPALES INGRESOS Y EGRESOS DE CADA PROYECTO.....	18
TABLA III PARÁMETROS FINANCIEROS GENERALES DE LOS PROYECTOS.....	18
TABLA IV PORCENTAJE DE DESCUENTO EN IMPUESTO DE RENTA (it) PARA EL PERIODO t.....	23
TABLA V CAMBIOS PORCENTUALES DEL LCOE DE LAS TECNOLOGÍAS WtE RESPECTO AL CASO 1.....	25
TABLA VI CAMBIOS EN LA INVERSIÓN INICIAL AL ADQUIRIR EXENCIONES.....	25
TABLA VII CAMBIOS EN EL LCOE[USD/kWh] POR VARIACIÓN EN COSTO DE INVERSIÓN.....	26
TABLA VIII CAMBIOS EN EL LCOE[USD/KWh] POR VARIACIÓN EN PERIODOS DE GRACIA.....	27
TABLA IX CAMBIOS EN EL LCOE[USD/kWh] POR VARIACIÓN EN COSTOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO.....	28
TABLA X CAMBIOS EN EL LCOE[USD/kWh] POR VARIACIÓN EN TASA DE DESCUENTO.....	29

TABLA XI CAMBIOS EN EL LCOE[USD/kWh] POR VARIACIÓN EN PERÍODOS DE DEPRECIACIÓN.....29

## LISTA DE FIGURAS

Fig.1. Algoritmo para el cálculo del LCOE.....	20
Fig.2. Convergencia del algoritmo.....	21
Fig.3. Flujograma para cálculo por fórmula.....	22
Fig.4. LCOE para la planta de gasificación.....	24
Fig.5. LCOE para la planta de pirólisis.....	24
Fig.6. LCOE[USD/kWh] para cada planta y caso.....	25

## SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

<b>FNCER</b>	Fuentes No Convencionales de Energía Renovables
<b>IRENA</b>	International Renewable Energy Agency
<b>IVA</b>	Impuesto al Valor Agregado
<b>LCOE</b>	Levelized Cost of Energy
<b>USD</b>	United States Dolar
<b>VPN</b>	Valor Presente Neto
<b>WtE</b>	Waste to Energy
<b>kW</b>	Kilovatio
<b>kWh</b>	Kilovatio hora
<b>kcal</b>	Kilocalorías
<b>m<sup>3</sup></b>	Metro cúbico

## RESUMEN

Este trabajo comprende un análisis de la prefactibilidad económica de plantas de generación de energía eléctrica a partir de tecnología waste to energy (WtE) con cáscara de cacao mediante el método de costos nivelados de energía, adicionalmente se evalúa el impacto de las exenciones tributarias de la ley 1715 de 2014 en la prefactibilidad de estos proyectos de generación. Para la evaluación fueron seleccionadas plantas de gasificación y de pirólisis de 25kW y 30kW. Cuatro casos de análisis son planteados: 1. Sin exenciones tributarias y sin financiamiento, 2. Con exenciones tributarias y sin financiamiento, 3. Sin exenciones tributarias con financiamiento 4. Con exenciones tributarias con financiamiento. Luego se determinan las variables necesarias para realizar el flujo de caja como: la tasa de descuento, el valor de la financiación, los periodos de financiación entre otros. Posteriormente se obtienen los ingresos y egresos más relevantes del proyecto como la inversión inicial y los costos de operación y mantenimiento. Mediante un algoritmo iterativo se encuentra el costo nivelado de la energía en cada uno de los casos, obteniendo valores de entre 0.0778USD/kWh y 0.1390USD/kWh. Luego se realiza un análisis de sensibilidad donde se hizo variación del costo de inversión, períodos de gracia cuando existe financiamiento, operación y mantenimiento, tasa de descuento y períodos de depreciación. Los proyectos para el aprovechamiento de la cáscara de cacao presentaron mayor sensibilidad en la tasa de descuento. Se concluye que las exenciones bajan el costo nivelado de energía volviendo esta clase de proyectos competitivos respecto al escenario mundial.

***Palabras clave*** — LCOE, waste to energy, cacao, biomasa, pirólisis, gasificación, energías renovables

## ABSTRACT

This work include an economic prefeasibility analysis of generation power plants using waste to energy (WtE) with cacao husk using the levelized cost of energy method, additionally the impact of tax credits in the Law 1715 of 2014 is evaluated in the prefeasibility of this power generation projects. For the evaluation 25kW and 30kW gasification and pyrolysis power plants were selected. Four cases of analysis were presented: 1. Without tax credits and without financing, 2. With tax credits without and financing, 3. Without tax credits with financing, 4. With tax credits with financing. Later the necessary variables for the cash flow were obtained like the discount rate, the financing value, the financing periods and others. Afterward the most relevant incomes and outcomes were obtained like the investment cost and operation and maintenance cost. By using an iterative algorithm the levelized cost of energy was found for every case obtaining values between 0.0778USD/kWh and 0.1390USD/kWh. Later a sensitivity analysis was made varing the investment cost, grace periods, when exist financing operation and maintenance cost, discount rate and depreciation periods. As conclusion, the taxes credits decrease the levelized cost of energy making this kind of projects competitive at worldwide.

**Keywords** — LCOE, waste to energy, cacao, biomass, pyrolysis, gasification, renewable energy

## I. INTRODUCCIÓN

Colombia es uno de los principales productores de cacao a nivel mundial, ubicándose en los primeros 10 países productores para los periodos del 2018 – 2019 [1]. Para el año 2020, el país contó con alrededor de 188,000 ha sembradas y cerca de 11,148 t de exportaciones de cacao, generando cerca de 16,7000 empleos directos e indirectos [2]. En el año 2021 la producción fue de 69,040 t, con 11,689 t de grano exportado y 133 t importadas [3]. Adicionalmente en [4] se menciona como la tecnificación y capacitación en el cultivo ha beneficiado a diferentes familias campesinas de Antioquia la región, haciéndolas más competitivas y fortaleciendo su economía.

Para el año 2014 los ingresos por la venta del cacao llegaron a los 600,000 millones en el departamento de Antioquia con 21,740 empleos directos [5]. En 2022 la compañía Nacional de Chocolates creó infraestructura para la plantación de 14,000 árboles en Támesis, Antioquia y mantener el abastecimiento de sus plantas [6]. Sin embargo, la forma artesanal para el beneficio del fruto del cacao y la falta de apoyo técnico puede generar un alto volumen de residuos que dificulta la gestión sostenible de los mismos, convirtiéndose en foco de contaminación y de generación de gases de efecto invernadero [7]. En [4] en la Subregión de Ariari del Departamento del Meta, Colombia se redujo la producción de cacao cerca de un 17%, debido al mal uso de agroquímicos para el control de plagas en los cultivos.

De acuerdo con [7], la cáscara de cacao es considerada el principal residuo sólido de estas plantaciones y en Colombia podría rondar los 2,100,000 t para el año 2021. Este residuo se usa convencionalmente como fertilizante introduciéndose de forma directa al suelo o mediante compostaje [7]. En [4] se menciona como está práctica se realizaba en las cosechas de Colombia tomando los residuos de cacota y de otras cosechas de las fincas para realizar un proceso de compostaje. Adicional a su uso como fertilizantes también se emplea como alimento para animales o para preparar sales de potasio [8], para eliminar el zinc(II) al usarse como un bioabsorbente [9]. De otro lado, su uso energético se limita a una combustión directa o en ocasiones se transforma en pellets con propiedades fisicoquímicas parecidos a los de otras biomásas [10].

Según [7], la generación de energía con procesos de combustión de la cáscara de cacao puede verse afectada por el efecto fouling que generarían los compuestos alcalinos resultantes de la conversión, por lo tanto, se recomienda usar gasificación como ruta termoquímica para la producción de syngas, energía eléctrica y térmica.

El gobierno colombiano implementó una serie de incentivos tributarios con el objetivo de fomentar la creación de proyectos de generación mediante fuentes de energía renovable no convencional como la biomasa y el desarrollo económico sostenible [11]. Estos incentivos posibilitan la viabilidad económica de los proyectos. Esta regulación quedó consignada en la Ley 1715 del 2014, y tiene como beneficios exención de impuesto al valor agregado (IVA) de los equipos, el no pago de aranceles de los equipos que sean importados y reducción de hasta un 50%

en el impuesto de renta durante el primer periodo [11]. Por lo tanto, en el presente trabajo se evaluó el efecto de los incentivos tributarios de la Ley 1715 sobre los costos nivelados de energía eléctrica para proyectos de generación con tecnología Waste to Energy para convertir los residuos de cáscara de cacao en el suroeste de Antioquia.

## II. OBJETIVOS

### *A. Objetivo general*

Evaluar los costos nivelados de energía eléctrica de tecnologías Waste to Energy aplicando incentivos tributarios de la Ley 1715 de 2014 para la conversión de cáscara de cacao en el Suroeste de Antioquia.

### *B. Objetivos específicos*

- Estimar costos para la implementación de sistemas de (WtE) con cáscara de cacao a pequeña escala a través del método de costos nivelados de energía eléctrica.
- Evaluar el efecto de la Ley 1715 en los componentes de costos de los sistemas (WtE) considerando medidas financieras.
- Determinar la competitividad de los sistemas (WtE) para la conversión energética de cáscara de cacao dentro del mercado eléctrico colombiano.

### III.MARCO TEÓRICO

Una de las formas en las que se obtienen beneficios adicionales de las plantaciones de cacao es usar los residuos que deja este para obtener otros subproductos o energía [12]. Para el uso energético, es posible emplear tecnologías Waste to Energy o de conversión energética de biomasa residual para generar energía eléctrica a partir de gas, es la tecnología de pirólisis, la cual consiste en la descomposición térmica de materia orgánica en ausencia de oxígeno por debajo del punto de combustión. Esta tecnología ha sido utilizada para el aprovechamiento energético de los residuos de cacao [12]. En [13] se menciona como mediante el uso de microondas se realiza un proceso de pirólisis para obtener de la cáscara de cacao y neumáticos, gas, aceite y carbón, arrojando valores caloríficos de 43kJ/g para los neumáticos y 12.2KJ/g. para la biomasa

Otro de los procesos termoquímicos por los cuales se puede obtener electricidad a partir de la cáscara de cacao, es la gasificación. Este proceso consiste en un contenedor sellado en el cual se coloca la biomasa y se somete a una menor presión a la atmosférica con mayor, temperatura y oxigenación convirtiéndola en gas de síntesis [14]. Mediante este proceso y el uso de cáscaras de cacao se ha podido obtener gas que luego es usado para la generación de electricidad [14]. En [15] se usó un gasificador de tipo downdraft para procesar residuos de fruto de cacao obteniendo poderes caloríficos del orden de los 4016,4 TJ/año concluyendo que este gas puede ser una buena fuente de energía renovable primaria para complementar la matriz energética de las zonas remotas del Perú.

Un camino para determinar la viabilidad de un proyecto de generación a partir de Fuente No Convencionales de Energía Renovables-(FNCER) como la biomasa, se calcula el costo nivelado de la energía (levelized cost of energy o LCOE), el cual representa el precio necesario al que se tiene que vender la energía en cada periodo para cubrir todos los gastos financieros y de funcionamiento del proyecto desde su construcción hasta el fin de su vida útil [16]. La **ECUACIÓN 1** muestra una forma general para calcular el LCOE.  $I_0$  [USD] representa la inversión inicial del proyecto,  $n$  [años] es el número de años de operación de la planta,  $t$  [años] es el periodo o año de análisis,  $C_t$  [USD] son todos los costos de operación fijos, variables y de mantenimiento de la planta, y por último  $E_t$  [kWh] es la energía producida en el periodo  $t$ .

$$LCOE = \frac{I_0 + \sum_{t=1}^n C_t}{\sum_{t=1}^n E_t} \quad (1)$$

Para promover la transición energética y ampliar la matriz energética del país, el Gobierno colombiano aprobó una serie de incentivos tributarios para favorecer el desarrollo de proyectos con FNCER [11]. Estos beneficios consisten en:

1. Exención del pago de impuesto al valor agregado (IVA).
2. Exención del pago de aranceles de importación.

3. Depreciación acelerada, la cual puede hacerse en un término máximo de 3 años.
4. Exención del pago de parte del impuesto de renta por 15 años. Esta exención tiene varios puntos para tener en cuenta en su aplicación:
  1. Este beneficio solo puede ser tomado durante los primeros 15 períodos del proyecto.
  2. Se puede descontar máximo un 50% del impuesto de renta distribuido entre cada uno de los periodos del proyecto. La **ECUACIÓN 2** muestra lo anterior dicho,  $i_t$  [%] representa el porcentaje del impuesto de renta que se desea descontar para el período  $t$ .

$$\sum_{t=1}^{15} i_t \leq 0.5 \quad (2)$$

3. En [16] se muestra que el porcentaje del beneficio que puede tomarse en cada período puede ser calculado con la **ECUACIÓN 3**. Donde,  $8760$  [h] representa la cantidad de horas en un año,  $CF$  es el factor de capacidad de la planta,  $p$  [USD/kWh] el precio de venta de la energía (LCOE),  $I_o$  [USD/kW] es la inversión inicial por kilovatio instalado,  $d_t$  [%] es el porcentaje que se deprecia la planta en el periodo  $t$ ,  $g_t$  [USD/kW] representa los gastos de operación y mantenimiento, por último  $r$  [USD/kW] son las utilidades adicionales que se obtengan por actividades distintas a la venta de energía.

$$i_t \leq \frac{8760 \cdot CF \cdot p - I_o \cdot d_t - g_t + r}{2 \cdot I_o} \quad (3)$$

En [16], los autores mediante un desarrollo matemático modifican la **ECUACIÓN 1**, para adaptarla a los proyectos de generación enmarcados en la legislación colombiana. En el proceso compactan los efectos de los descuentos de impuesto de renta y depreciación acelerada en un solo factor dando como resultado la **ECUACIÓN 4**. La expresión final para el LCOE para Colombia lo definen con la **ECUACIÓN 5**.

$$\Delta = \frac{-\alpha \cdot \sum_{t=1}^{T_0} d_t \cdot \gamma^t - \alpha \cdot \sum_{t=1}^{15} \gamma^t \cdot i_t + 1}{1 - \alpha} \quad (4)$$

$$LCOE = \frac{\Delta \cdot I_o + \sum_{t=1}^n \gamma^t \cdot (8760 \cdot CF \cdot v_t + f_t)}{8760 \cdot CF \cdot \sum_{t=1}^n \gamma^t \cdot x_t} \quad (5)$$

$$\gamma = \frac{1}{t_{descuento} + 1} \quad (6)$$

Los parámetros de las anteriores ecuaciones se describen a continuación:  $\Delta$  es el factor de reducción basado en incentivo contiene las variables relacionadas al pago de impuestos y deducciones,  $T_0$  [años] representa la cantidad de periodos en los que se va a depreciar la planta,  $\gamma$  [%] condensa el efecto del dinero en el tiempo con  $t_{descuento}$  [%] como la tasa de descuento de la planta,  $\alpha$  [%] es el porcentaje de impuesto de renta,  $v_t$  [USD/kWh] son los costos variables de la planta y  $f_t$  [USD/kW] los costos fijos y por último  $x_t$  [%] representa el efecto de la degradación de los equipos en el tiempo.

En [17] se calcula el LCOE de plantas de cogeneración que usan biomasa. En este trabajo se aplicaron los incentivos de la Ley 1715 obteniendo valores de LCOE de alrededor 13,2 cUSD/kWh. Adicionalmente los autores realizaron un análisis de sensibilidad respecto al costo de la biomasa, períodos de gracia, tasa interna de retorno y el costo de la tecnología usada. Se observó que la planta era más sensible a los cambios en el costo de la tecnología.  $T_0$ [años] representa la cantidad de periodos en los que se va a depreciar la planta,

En [17] se calcula el LCOE de plantas de cogeneración que usan biomasa. En este trabajo se aplicaron los incentivos de la Ley 1715 obteniendo valores de LCOE de alrededor 13,2 cUSD/kWh. Adicionalmente los autores realizaron un análisis de sensibilidad respecto al costo de la biomasa, períodos de gracia, tasa interna de retorno y el costo de la tecnología usada. Se observó que la planta era más sensible a los cambios en el costo de la tecnología.[18] se muestran los rangos de LCOE a nivel mundial respecto a otras tecnologías renovables y no renovables, los valores están entre 0.15 USD/kWh y 0.05 USD/kWh aproximadamente, para la bioenergía.

#### IV.METODOLOGÍA

Con base en la literatura y disponibilidad comercial, se seleccionaron plantas de 25kW y 30kW con tecnología de gasificación y pirólisis para el análisis. Los equipos de gasificación de 30kW y 25kW son de las compañías *Ankur Scientific* y *All Power Labs* de la India y EUA respectivamente [19], mientras que los equipos de pirólisis son de la compañía Qingdao Kexin New Energy Technology de China. Las pruebas de los equipos de pirólisis muestran que el syngas producido puede estar entre los 30m<sup>3</sup>/h y 100m<sup>3</sup>/h con un valor calórico de entre 1000kcal/m<sup>3</sup> y 1200kcal/m<sup>3</sup> [20]. En [7] mencionan que para la gasificación el poder calórico del syngas puede estar entre 956kcal/m<sup>3</sup> y 1434kcal/m<sup>3</sup>.

Cada planta se analiza bajo 4 casos con respecto a la aplicación de los incentivos tributarios y el financiamiento por parte de una entidad financiera. En el caso 1 no se consideran incentivos ni financiamiento, en el Caso 2 se tienen los incentivos y sin financiamiento, para el Caso 3 no se tienen incentivos, pero sí financiamiento, y por último, el Caso 4 contempla incentivos tributarios y financiamiento.

La tasa de descuento se ajusta de acuerdo con la ecuación del costo promedio ponderado del capital que está en la **ECUACIÓN 7** [21].

$$WACC = \frac{k_e * E}{E + D} + \frac{k_d * D(1 - T)}{E + D} \quad (7)$$

Se presupuestaron los sistemas de pirólisis y gasificación teniendo en cuenta el costo de cada uno de los equipos, sus impuestos asociados, obras civiles, personal requerido, obras y máquinas eléctricas, trámites legales y el personal necesario para la recolección de los residuos de cacao. Esta información fue obtenida de los proveedores de los equipos, la resolución CREG 75 del 2021, Fedecacao y expertos del sector.

Cada uno de estos gastos se agrupa en una de las siguientes categorías: Inversión inicial, costos fijos y costos variables. Otros aspectos para tener en cuenta en el flujo de caja son el pago de intereses, abonos a la deuda cuando se obtiene el dinero por medio de financiamiento de un banco, el valor de salvamento al final de la vida útil del proyecto, el cual se da como un porcentaje de la inversión inicial [19] y los ingresos adicionales que se puedan tener por externalidades.

Para obtener ingresos adicionales se plantea la venta de bonos de carbono los cuales tienen un valor de 4.0536USD/TCO<sub>2</sub> [22], y teniendo en cuenta el factor de emisiones de sistema interconectado nacional de 0.1264TCO<sub>2</sub>/MWh [23], se pueden llegar a tener ingresos adicionales de 3.8145USD/kWh. Las características generales de cada uno de los proyectos se muestran en la **TABLA I**.

TABLA I  
CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS SISTEMAS WtE A ANALIZAR.

Tasa de descuento (%)	8.1	[17]
Años de funcionamiento (Años)	20.0	[17]
Valor de salvamento (% Inversión)	10.0	[19]
Valor financiamiento Casos 3,4 (USD)	33282.68	[25]
Periodos de préstamo Casos 3,4 (Años)	10.0	[25]
Depreciación Casos 1,3 (Años)	10.0	
Depreciación Casos 2,4 (Años)	3.0	[11]

Para poder realizar una comparación entre tecnologías y plantas de distintas potencias, el LCOE se debe presentar en USD/kWh, por lo que al momento de realizar el flujo en cada periodo se debe dividir cada uno de los costos e ingresos por la energía generada en ese periodo de tiempo. En la **TABLA II** y **TABLA III** se muestran los parámetros que se tienen en cuenta al momento de hacer el flujo de caja.

TABLA II  
PRINCIPALES INGRESOS Y EGRESOS DE CADA PROYECTO.

	Gasificación		Pirólisis	
	25	30	25	30
Potencia (kW)				
Inversión (USD/kW)	2990.49	3608.11	2671.74	2572.52
Operación y mantenimiento fijo (USD/kW)	227.85	210.09	112.05	192.86
Operación y mantenimiento variable (USD/kWh)	0.0179	0.0144	0.0338	0.0281
Utilidad adicional (USD/kW)	3.81	3.81	3.81	3.81
Factor de planta (%)	85.0	85.0	75.0	75.0

TABLA III  
PARÁMETROS FINANCIEROS GENERALES DE LOS PROYECTOS.

Tasa interés (%)	15.02	[25]
DTF (%)	8.02	[24]
Años de préstamo (Años)	10.0	[25]
Impuesto de renta (%)	35.0	[19]

La **ECUACIÓN 1** puede ser usada en casos relativamente simples, sin embargo, al tener parámetros y consideraciones adicionales en el flujo de caja la ecuación debe modificarse. Para los análisis de este trabajo se tienen en cuenta elementos adicionales como adquisición de deuda y exenciones tributarias por lo que se requiere un proceso más complejo en el que se deben usar las definiciones de LCOE y valor presente neto (VPN).

Para el cálculo del LCOE se usa un algoritmo iterativo. Para encontrar la solución se parte de las siguientes consideraciones:

- 1) Los ingresos del proyecto provienen de la venta de energía, por tanto, el LCOE debe ser mayor que 0.

- 2) Según [18], el LCOE máximo presentado para la tecnología de biomasa es de 0.2 USD/kWh. Por lo que es de esperar que se obtenga un resultado menor o igual este valor para este trabajo.
- 3) Si el  $VPN > 0$  entonces se están obteniendo ganancias mayores a las requeridas para amortizar los costos de la planta, por lo que se estaría vendiendo la energía por encima del LCOE. En caso tal que  $VPN < 0$  quiere decir que el precio de la energía está por debajo del LCOE y la planta no genera suficientes ganancias para operar.

En el algoritmo se define el precio inicial (LCOE inicial) de la energía a usar, basado en las consideraciones 1 y 2 mencionadas anteriormente; para este caso se decide usar un valor de 0.2 USD/kWh. Se define una variable *Paso* que se usa para variar LCOE basado en la consideración 3, y se pone el número de iteraciones a usar. Luego se inicia el proceso iterativo colocando los ingresos y egresos que tendrá la planta a lo largo de su vida útil. Luego, si se tienen exenciones, se realiza un proceso de optimización, y el flujo de caja, luego a este se le calcula el VPN. Basado en la consideración 3, si se obtiene  $VPN > 0$ , el precio inicial está por encima del LCOE así que se le resta un *Paso*. En el caso de tener  $VPN < 0$  quiere decir que el precio inicial al que se vende la energía está por debajo del LCOE, por lo que debe usarse un *Paso* más pequeño, y que debe sumarse al precio inicial que no fue suficiente para cubrir los gastos. Este nuevo precio ajustado se usa para recalculer el flujo de caja. El proceso se repite las veces que se hayan definido.

Al momento de acceder a la exención de impuesto de renta deben tenerse en cuenta la **ECUACIÓN 2** y la **ECUACIÓN 3**. Las formas en las que se puede tomar el valor para  $i_t$  son infinitas por lo que se decide realizar un proceso de optimización que resulte en el mejor LCOE.

Inicialmente se definen las variables del problema (**ECUACIÓN 8**), como el precio de la energía fue asumido, sólo queda encontrar todos los valores de  $i_t$  que ayudan a amortizar mejor los costos de la planta.

$$i_t \forall t \in 1 \dots 15 \quad (8)$$

El siguiente paso es definir la función objetivo, para la cual se usa el concepto de dinero en el tiempo. Debido a que los ingresos futuros tendrán menor valor, debe maximizarse la cantidad de ingresos durante los primeros períodos del proyecto, por tanto, en la función objetivo (**ECUACIÓN 9**) se debe dar más peso a los  $i_t$  de los períodos iniciales.

$$\sum_{t=1}^{15} i_t \cdot (16 - t) \quad (9)$$

Por último, las restricciones del problema, las cuales ya fueron definidas en la **ECUACIÓN 2** y **ECUACIÓN 3**.

En varias pruebas se determinó que 30 iteraciones y un paso de 0.1 resultaban en valores de VPN entre 0.0855[USD/kW] y 0.1358[USD/kW]. El algoritmo anteriormente descrito se ilustra en la **Fig. 1** y la forma en la que este converge se observa en la **Fig. 2**.

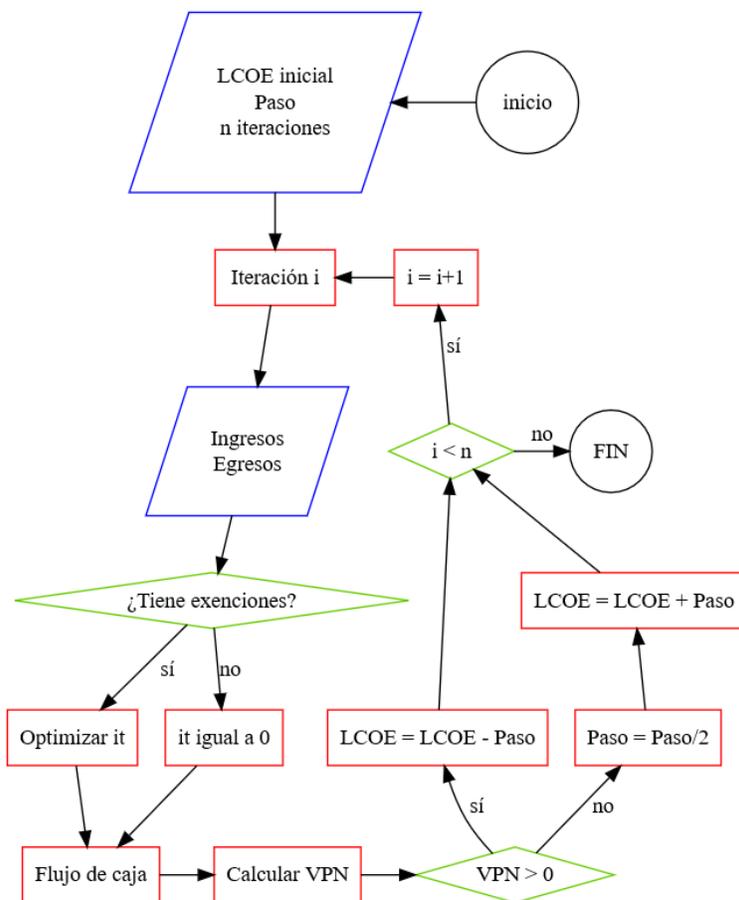


Fig. 1. Algoritmo para el cálculo del LCOE.

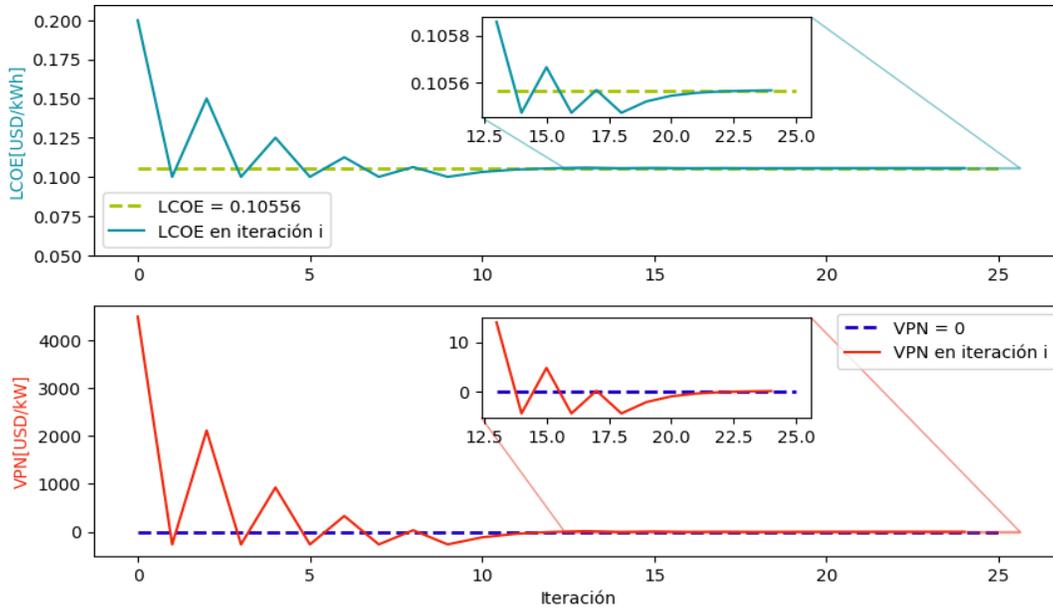


Fig. 2. Convergencia del algoritmo.

Debido a las consideraciones del flujo de caja como el valor de salvamento y el préstamo a entidades financieras, la **ECUACIÓN 5** no puede ser usada directamente sin ninguna modificación, para obtener el mismo resultado que en el procedimiento mostrado en la **Fig. 1**, es necesario realizar unas modificaciones, estas dan como resultado la **ECUACIÓN 10**. Para llegar a esta expresión se debe considerar:

- 1) El abono a la deuda por fuera del pago de impuesto de renta.
- 2) Los intereses afectan el pago final en el impuesto de renta.
- 3) El salvamento se da en el último periodo.
- 4) El desgaste de los equipos es despreciable debido al mantenimiento,  $x_t$  es 1 para todos los períodos.

$$\Delta = \frac{1 - \alpha \sum_{t=1}^{T_0} d_t \gamma^t - \alpha \sum_{t=1}^{15} i_t \gamma^t + \sum_{t=1}^{T_2} \frac{A_t}{I_0} \gamma^t}{1 - \alpha} \quad (10)$$

$$LCOE = \frac{(\Delta + Salv\gamma^n) * I_0 + \sum_{t=1}^n (g_t - r_t) \gamma^t + \sum_{t=1}^{T_2} In_t \gamma^t}{8760Cf \sum_{t=1}^n \gamma^t} \quad (11)$$

$T_2$ [años] es el número de periodos de préstamo de la entidad financiera,  $A_t$ [USD/kW] representa el abono a la deuda en el periodo  $t$ ,  $In_t$ [USD/kW] son los intereses por pagar en el período  $t$  y, por último,  $Salv$ [%] es el valor de salvamento. Si se tienen exenciones se debe realizar un procedimiento similar al mostrado en la **Fig. 1**, asumiendo un valor inicial de LCOE y optimizando el valor de  $i_t$  en varias iteraciones, de lo contrario el cálculo es directo. En la **Fig. 3**

se muestra el proceso a realizar para el cálculo del LCOE por fórmula. Todos los resultados entregados por el algoritmo de la **Fig. 1** fueron posteriormente corroborados con la **ECUACIÓN 11**, dando el mismo resultado en todos los casos. Si se llegan a presentar cambios en la legislación o en las consideraciones la **ECUACIÓN 11** ya no sería válida.

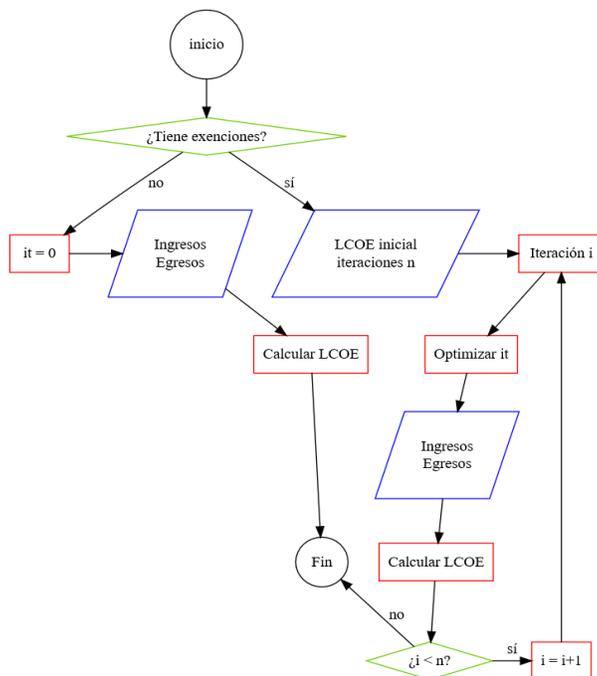


Fig. 3. Flujograma para cálculo por fórmula.

Debido a las variaciones que pueden existir en los precios debido a las particularidades de los mismos, se plantea realizar un análisis de sensibilidad. Tomando como base los valores de las tablas **TABLA I**, **TABLA III** se varían los valores de la inversión inicial, periodos de gracia, operación y mantenimiento, tasa de descuento y depreciación.

## V.RESULTADOS Y ANÁLISIS

*Exenciones de impuesto de renta por período*

Los resultados del proceso de optimización se muestran en la **TABLA IV**.

TABLA IV  
PORCENTAJE DE DESCUENTO EN IMPUESTO DE RENTA (it) PARA EL PERIODO t.

Descuento en periodo t	Gasificación				Pirólisis			
	25kW		30kW		25kW		30kW	
	Caso 2	Caso 4	Caso 2	Caso 4	Caso 2	Caso 4	Caso 2	Caso 4
<b>i<sub>1</sub></b>	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
<b>i<sub>2</sub></b>	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
<b>i<sub>3</sub></b>	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
<b>i<sub>4</sub></b>	4.95%	7.09%	4.95%	6.39%	4.95%	7.46%	4.95%	7.46%
<b>i<sub>5</sub></b>	4.95%	7.49%	4.95%	6.66%	4.95%	7.92%	4.95%	7.92%
<b>i<sub>6</sub></b>	4.95%	7.89%	4.95%	6.93%	4.95%	8.38%	4.95%	8.38%
<b>i<sub>7</sub></b>	4.95%	8.29%	4.95%	7.21%	4.95%	8.84%	4.95%	8.84%
<b>i<sub>8</sub></b>	4.95%	8.69%	4.95%	7.48%	4.95%	9.3%	4.95%	9.3%
<b>i<sub>9</sub></b>	4.95%	9.09%	4.95%	7.76%	4.95%	8.11%	4.95%	8.11%
<b>i<sub>10</sub></b>	4.95%	1.45%	4.95%	7.57%	4.95%	0.0%	4.95%	0.0%
<b>i<sub>11</sub></b>	4.95%	0.0%	4.95%	0.0%	4.95%	0.0%	4.95%	0.0%
<b>i<sub>12</sub></b>	4.95%	0.0%	4.95%	0.0%	4.95%	0.0%	4.95%	0.0%
<b>i<sub>13</sub></b>	4.95%	0.0%	4.95%	0.0%	4.95%	0.0%	4.95%	0.0%
<b>i<sub>14</sub></b>	0.5%	0.0%	0.5%	0.0%	0.45%	0.0%	0.45%	0.0%
<b>i<sub>15</sub></b>	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
<b>Total</b>	50.00%	49.99%	50.00%	50.00%	49.95%	50.01%	49.95%	50.01%

*LCOE*

El LCOE para las plantas de gasificación en cada uno de los casos se observa en la **Fig. 4**, y para la planta de pirólisis en la **Fig. 5**. En la **Fig. 6**. se tienen consolidado los valores de LCOE por tecnología (columnas) y por potencia (filas). La **TABLA V** muestra cómo cambia el LCOE de los casos evaluados considerando cómo caso base, el Caso 1 (sin exenciones ni financiamiento).

En la **Fig. 4**, muestra poca diferencia en el LCOE de las plantas de gasificación de 25kW y 30kW (particularmente para los casos 1 y 2). La planta de 30kW tiene menores costos de operación y mantenimiento, sin embargo, la planta de 25kW tiene menor costo de inversión inicial por lo que para una familia productora de cacao en la región Suroeste, será más conveniente reducir la inversión inicial, ya que representa un monto de dinero más mayor, y cuyo desembolso está en un periodo en el que no hay venta de energía. Se aprecia además que las exenciones tributarias redujeron el LCOE entre un -18.92% y -24.42% respecto a los casos sin exenciones.

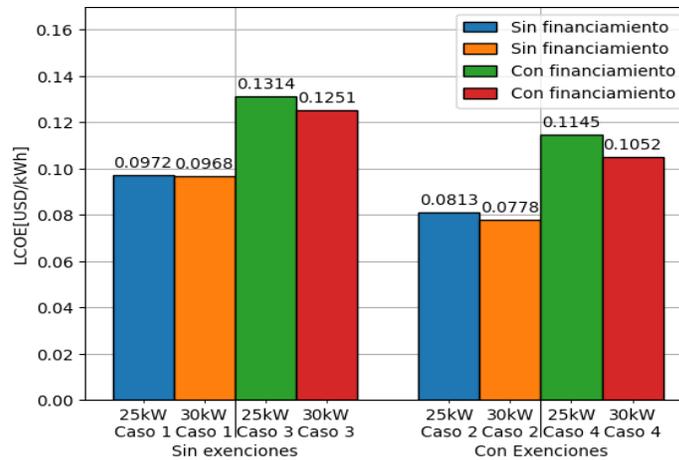


Fig. 4. LCOE para la planta de gasificación.

La Fig. 5 muestra que para el caso 2, la diferencia entre el LCOE de las plantas de pirólisis de 25kW y 30kW no es considerable (en particular casos 1 y 2), de forma similar al proyecto con la tecnología de gasificación, debido al menor costo de inversión inicial y operación y mantenimiento variable, es más conveniente selección de la planta de 30kW. Las exenciones tributarias redujeron el LCOE entre un -15.14% y -20.58% respecto a los casos sin exenciones.

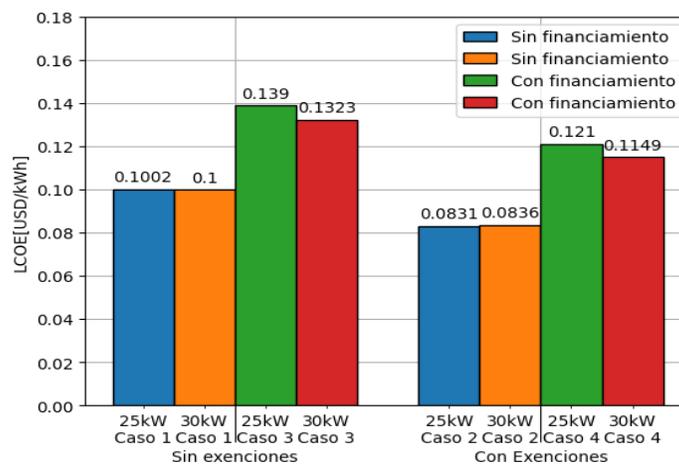


Fig. 5. LCOE para la planta de pirólisis.

En la figura Fig. 6 se contrasta por tecnología y potencia. Se observa que la tecnología de gasificación tiene el menor LCOE y el valor mas bajo se da para la planta de 30kW. Esto es debido a que tiene mayor factor de planta que la tecnología de pirólisis y menores costos de operación y mantenimiento que la planta de 25kW de gasificación. En general genera más energía a menores costos.

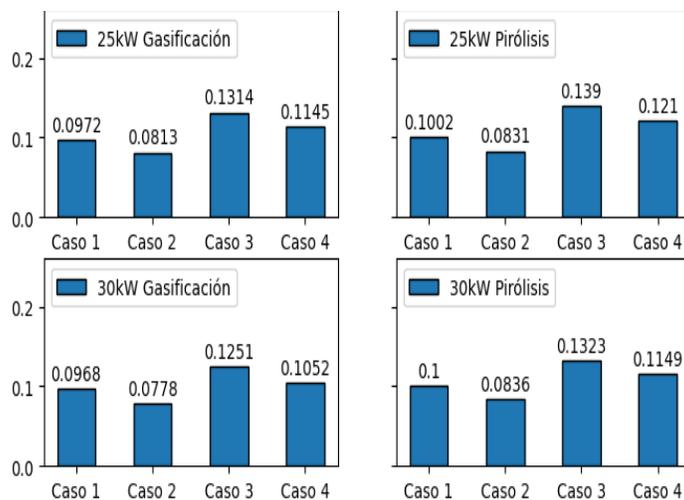


Fig. 6. LCOE [USD/kWh] para cada planta y caso.

Los cambios porcentuales en la **TABLA V** muestran que al adquirir financiamiento (Casos 3,4), el LCOE puede llegar a subir considerablemente (Caso 3), sin embargo, al aplicar la ley 1715 es posible bajar a menos de la mitad el incremento (Caso 4).

TABLA V  
CAMBIOS PORCENTUALES DEL LCOE DE LAS TECNOLOGÍAS WtE RESPECTO AL CASO 1.

	Caso 2	Caso 3	Caso 4
<b>25kW</b>			
<b>Gasificación</b>	-16.36%	35.19%	17.80%
<b>Pirólisis</b>	-17.07%	38.72%	20.76%
<b>30kW</b>			
<b>Gasificación</b>	-19.63%	29.24%	8.68%
<b>Pirólisis</b>	-16.40%	32.30%	14.90%

### Costos de inversión

Los resultados de la **TABLA VI** muestran el efecto de las deducciones en IVA y aranceles propuesto en la Ley 1715 de 2014. Para la tecnología de gasificación, la reducción en el costo de inversión fue del -16.24% y del -15.79% en las plantas de 25kW y 30kW respectivamente cuando se aplicaron las exenciones tributarias. Las plantas de pirólisis tuvieron una reducción de -18.74% y -18.88% para las potencias de 25kW y 30kW respectivamente. La mayor disminución en los equipos de pirólisis se debe a que los equipos que fueron importados tienen un mayor peso en el costo de inversión por lo que el descuento por aranceles se hace más significativo respecto a la tecnología de gasificación.

TABLA VI  
CAMBIOS EN LA INVERSIÓN INICIAL AL ADQUIRIR EXENCIONES.

Gasificación				Pirólisis			
25kW		30kW		25kW		30kW	
Sin Exenciones	Con Exenciones						
2990.49	2504.84	3608.11	3038.27	2671.74	2171.1	2572.52	2086.94

### *Análisis de sensibilidad*

Debido a las particularidades de cada proyecto de generación de energía, se pueden tener variaciones en algunas de las variables del flujo de caja. Para observar entre qué rangos puede estar el LCOE por estas variaciones y cuáles de ellas afectan más el LCOE, se realiza un análisis de sensibilidad cambiando el costo de inversión (**TABLA VII**), periodos de gracia en el préstamo, (**TABLA VIII**), costo por operación y mantenimiento (**TABLA IX**), tasa de descuento (**TABLA X**), y porcentaje de depreciación (**TABLA XI**). Las variables que tienen la palabra *base* hacen referencia a los valores de LCOE obtenidos en la **Fig. 6** y la **TABLA VI**.

En la **TABLA VII** Se observan los cambios en el LCOE al variar el costo de inversión descrito en la **TABLA II**. El valor base hace referencia a los resultados sin variación (**Fig. 6**). Los resultados muestran que el Caso 1, es el más sensible a cambios en el costo de inversión, esto es porque para el Caso 2 las exenciones reducen el peso de la inversión en el LCOE, por lo que, al hacer variaciones, estas tienen una afectación menor. En los Casos 3 y 4 (con financiamiento) se tiene un egreso adicional que es el pago de la deuda, esto reduce el peso de la inversión en el LCOE haciendo que las variaciones tengan un menor impacto. Para la tecnología de gasificación la planta de 25kW presenta menor sensibilidad debido a que tiene mayores costos de operación y mantenimiento, así que, por esta razón, el costo de inversión tiene menor peso en el LCOE. Para la tecnología de pirólisis se tienen un mayor costo de inversión y menores costos de operación y mantenimiento fijos en la planta de 25kW, por lo que es más sensible a la variación que la planta de 30kW.

TABLA VII  
CAMBIOS EN EL LCOE[USD/kWh] POR VARIACIÓN EN COSTO DE INVERSIÓN.

		Gasificación		Pirólisis	
		25kW	30kW	25kW	30kW
-20% en costo de inversión	Caso 1	0.0874 (-10.08%)	0.0849 (-12.29%)	0.0902 (-9.98%)	0.0904 (-9.60%)
	Caso 2	0.0747 (-8.23%)	0.0698 (-10.40%)	0.0766 (-7.82%)	0.0773 (-7.43%)
	Caso 3	0.1256 (-4.41%)	0.1165 (-6.87%)	0.1337 (-3.81%)	0.1265 (-4.38%)
	Caso 4	0.1112 (-2.97%)	0.0999 (-5.13%)	0.1182 (-2.31%)	0.1118 (-2.70%)
-10% en costo de inversión	Caso 1	0.0923 (-5.04%)	0.0908 (-6.20%)	0.0952 (-4.99%)	0.0952 (-4.80%)
	Caso 2	0.0780 (-4.18%)	0.0739 (-5.13%)	0.0798 (-3.97%)	0.0804 (-3.71%)
	Caso 3	0.1285 (-2.21%)	0.1208 (-3.44%)	0.1363 (-1.94%)	0.1294 (-2.19%)
	Caso 4	0.1129 (-1.48%)	0.1026 (-2.56%)	0.1196 (-1.16%)	0.1133 (-1.39%)
(base) en costo de inversión	Caso 1	0.0972 (0.00%)	0.0968 (0.00%)	0.1002 (0.00%)	0.1000 (0.00%)
	Caso 2	0.0814 (0.00%)	0.0779 (0.00%)	0.0831 (0.00%)	0.0835 (0.00%)
	Caso 3	0.1314 (0.00%)	0.1251 (0.00%)	0.1390 (0.00%)	0.1323 (0.00%)
	Caso 4	0.1146 (0.00%)	0.1053 (0.00%)	0.1210 (0.00%)	0.1149 (0.00%)
+10% en costo de inversión	Caso 1	0.1021 (5.04%)	0.1027 (6.10%)	0.1052 (4.99%)	0.1048 (4.80%)
	Caso 2	0.0847 (4.05%)	0.0820 (5.26%)	0.0864 (3.97%)	0.0867 (3.83%)
	Caso 3	0.1343 (2.21%)	0.1294 (3.44%)	0.1417 (1.94%)	0.1352 (2.19%)
	Caso 4	0.1163 (1.48%)	0.1080 (2.56%)	0.1223 (1.07%)	0.1165 (1.39%)
+20% en costo de inversión	Caso 1	0.1070 (10.08%)	0.1087 (12.29%)	0.1101 (9.88%)	0.1096 (9.60%)
	Caso 2	0.0880 (8.11%)	0.0860 (10.40%)	0.0897 (7.94%)	0.0898 (7.54%)
	Caso 3	0.1372 (4.41%)	0.1337 (6.87%)	0.1444 (3.88%)	0.1381 (4.38%)
	Caso 4	0.1180 (2.97%)	0.1107 (5.13%)	0.1237 (2.23%)	0.1181 (2.79%)

Dentro de la **TABLA VIII** se muestran los cambios en el LCOE al variar los períodos de gracia en los casos 3 y 4 (con financiamiento), como valor base se toma sin períodos de gracia lo cual da los resultados presentados en la **Fig. 6**. Para todas las condiciones evaluadas el Caso 4 fue el más sensible a la variación en los periodos de gracia. La cantidad de financiamiento recibido en los casos 3 y 4 es el mismo, sin embargo, debido a las exenciones el costo de inversión es menor en el caso 4, por lo que la relación entre capital externo y el costo de inversión es mayor (la deuda tiene mayor peso que en el caso 3) por lo que tener un alivio en el pago de esta deuda tendrá un mayor impacto en el LCOE. De forma análoga, las plantas de 25kW tienen un menor costo de inversión respecto a las de 30kW, entonces se puede deducir que las plantas de 25kW son las más sensibles a los periodos de gracia que las plantas de 30kW.

TABLA VIII  
CAMBIOS EN EL LCOE[USD/KWh] POR VARIACIÓN EN PERIODOS DE GRACIA.

		Gasificación		Pirólisis	
		25kW	30kW	25kW	30kW
Años de gracia 0 (base)	Caso 3	0.1314 (0.00%)	0.1251 (0.00%)	0.1390 (0.00%)	0.1323 (0.00%)
	Caso 4	0.1146 (0.00%)	0.1053 (0.00%)	0.1210 (0.00%)	0.1149 (0.00%)
Años de gracia 2	Caso 3	0.1266 (-3.65%)	0.1212 (-3.12%)	0.1335 (-3.96%)	0.1278 (-3.40%)
	Caso 4	0.1100 (-4.01%)	0.1016 (-3.51%)	0.1156 (-4.46%)	0.1106 (-3.74%)
Años de gracia 3	Caso 3	0.1245 (-5.25%)	0.1195 (-4.48%)	0.1311 (-5.68%)	0.1258 (-4.91%)
	Caso 4	0.1080 (-5.76%)	0.1000 (-5.03%)	0.1133 (-6.36%)	0.1087 (-5.40%)
Años de gracia 4	Caso 3	0.1225 (-6.77%)	0.1179 (-5.76%)	0.1289 (-7.27%)	0.1239 (-6.35%)
	Caso 4	0.1059 (-7.59%)	0.0984 (-6.55%)	0.1109 (-8.35%)	0.1067 (-7.14%)
Años de gracia 5	Caso 3	0.1207 (-8.14%)	0.1164 (-6.95%)	0.1268 (-8.78%)	0.1223 (-7.56%)
	Caso 4	0.1040 (-9.25%)	0.0968 (-8.07%)	0.1087 (-10.17%)	0.1049 (-8.70%)

Los resultados mostrados en la **TABLA IX** corresponden a los cambios en el LCOE al variar los costos de operación y mantenimiento fijos y variables. El valor base representa los valores mostrados en **Fig. 6**. Si se observa el costo de inversión en los casos con exenciones y sin exenciones (**TABLA VI**) y se hace la relación respecto a los costos de operación y mantenimiento (los cuales permanecen constantes con o sin exenciones). Se obtiene que el peso de los costos de operación y mantenimiento es mayor respecto a la inversión inicial en los casos con exenciones, por esta razón los resultados muestran una mayor sensibilidad en los casos en los que hay exenciones respecto a los que no las tienen (para ambas tecnologías). De forma análoga se puede explicar la mayor sensibilidad de las plantas de 25kW respecto a las plantas de 30kW de la misma tecnología. En los casos en los que se tiene financiamiento (Caso 3 y 4) la variación se amortigua un poco debido a que se tienen elementos adicionales (pago de intereses y abono a la deuda) que afectan el LCOE y lo hacen menos sensible a las variaciones de operación y mantenimiento.

TABLA IX  
CAMBIOS EN EL LCOE[USD/kWh] POR VARIACIÓN EN COSTOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO.

		Gasificación		Pirólisis	
		25kW	30kW	25kW	30kW
-20% en Operación y mantenimiento	Caso 1	0.0875 (-9.98%)	0.0892 (-7.85%)	0.0900 (-10.18%)	0.0895 (-10.50%)
	Caso 2	0.0717 (-11.92%)	0.0703 (-9.76%)	0.0729 (-12.27%)	0.0730 (-12.57%)
	Caso 3	0.1217 (-7.38%)	0.1175 (-6.08%)	0.1289 (-7.27%)	0.1218 (-7.94%)
	Caso 4	0.1049 (-8.46%)	0.0977 (-7.22%)	0.1108 (-8.43%)	0.1044 (-9.14%)
-10% en Operación y mantenimiento	Caso 1	0.0923 (-5.04%)	0.0930 (-3.93%)	0.0951 (-5.09%)	0.0948 (-5.20%)
	Caso 2	0.0765 (-6.02%)	0.0741 (-4.88%)	0.0780 (-6.14%)	0.0783 (-6.23%)
	Caso 3	0.1265 (-3.73%)	0.1213 (-3.04%)	0.1339 (-3.67%)	0.1270 (-4.01%)
	Caso 4	0.1097 (-4.28%)	0.1015 (-3.61%)	0.1159 (-4.21%)	0.1097 (-4.53%)
Valor base en Operación y mantenimiento	Caso 1	0.0972 (0.00%)	0.0968 (0.00%)	0.1002 (0.00%)	0.1000 (0.00%)
	Caso 2	0.0814 (0.00%)	0.0779 (0.00%)	0.0831 (0.00%)	0.0835 (0.00%)
	Caso 3	0.1314 (0.00%)	0.1251 (0.00%)	0.1390 (0.00%)	0.1323 (0.00%)
	Caso 4	0.1146 (0.00%)	0.1053 (0.00%)	0.1210 (0.00%)	0.1149 (0.00%)
+10% en Operación y mantenimiento	Caso 1	0.1021 (5.04%)	0.1006 (3.93%)	0.1053 (5.09%)	0.1053 (5.30%)
	Caso 2	0.0862 (5.90%)	0.0817 (4.88%)	0.0882 (6.14%)	0.0888 (6.35%)
	Caso 3	0.1363 (3.73%)	0.1289 (3.04%)	0.1441 (3.67%)	0.1376 (4.01%)
	Caso 4	0.1194 (4.19%)	0.1091 (3.61%)	0.1260 (4.13%)	0.1202 (4.61%)
+20% en Operación y mantenimiento	Caso 1	0.1069 (9.98%)	0.1044 (7.85%)	0.1104 (10.18%)	0.1105 (10.50%)
	Caso 2	0.0911 (11.92%)	0.0855 (9.76%)	0.0933 (12.27%)	0.0941 (12.69%)
	Caso 3	0.1411 (7.38%)	0.1327 (6.08%)	0.1492 (7.34%)	0.1428 (7.94%)
	Caso 4	0.1243 (8.46%)	0.1129 (7.22%)	0.1311 (8.35%)	0.1255 (9.23%)

Los resultados mostrados en la **TABLA X** corresponden a los cambios en el LCOE al variar la tasa de descuento. El valor base representa los valores mostrados en **Fig. 6**. Al aumentar la tasa se le está pidiendo un mayor rendimiento económico al proyecto, por lo que es necesario aumentar el precio de la energía para obtener las ganancias deseadas. Un aumento de 2% en la tasa de descuento puede llevar a aumentos del LCOE de entre un 3% y 24% aproximadamente. La forma en la que se distribuyen los aumentos entre los casos para cada variación en la tasa es similar al de la **Fig. 6**.

TABLA X  
CAMBIOS EN EL LCOE[USD/kWh] POR VARIACIÓN EN TASA DE DESCUENTO.

		Gasificación		Pirólisis	
		25kW	30kW	25kW	30kW
Tasa de descuento 4.1%	Caso 1	0.0809 (-16.77%)	0.0771 (-20.35%)	0.0836 (-16.57%)	0.0841 (-15.90%)
	Caso 2	0.0705 (-13.39%)	0.0647 (-16.94%)	0.0724 (-12.88%)	0.0733 (-12.22%)
	Caso 3	0.1067 (-18.80%)	0.0986 (-21.18%)	0.1130 (-18.71%)	0.1085 (-17.99%)
	Caso 4	0.0952 (-16.93%)	0.0850 (-19.28%)	0.1006 (-16.86%)	0.0966 (-15.93%)
Tasa de descuento 6.1%	Caso 1	0.0887 (-8.74%)	0.0865 (-10.64%)	0.0916 (-8.58%)	0.0917 (-8.30%)
	Caso 2	0.0755 (-7.25%)	0.0707 (-9.24%)	0.0773 (-6.98%)	0.0780 (-6.59%)
	Caso 3	0.1168 (-11.11%)	0.1099 (-12.15%)	0.1234 (-11.22%)	0.1182 (-10.66%)
	Caso 4	0.1029 (-10.21%)	0.0935 (-11.21%)	0.1085 (-10.33%)	0.1039 (-9.57%)
Tasa de descuento (base)	Caso 1	0.0972 (0.00%)	0.0968 (0.00%)	0.1002 (0.00%)	0.1000 (0.00%)
	Caso 2	0.0814 (0.00%)	0.0779 (0.00%)	0.0831 (0.00%)	0.0835 (0.00%)
	Caso 3	0.1314 (0.00%)	0.1251 (0.00%)	0.1390 (0.00%)	0.1323 (0.00%)
	Caso 4	0.1146 (0.00%)	0.1053 (0.00%)	0.1210 (0.00%)	0.1149 (0.00%)
Tasa de descuento 10.1%	Caso 1	0.1063 (9.36%)	0.1078 (11.36%)	0.1094 (9.18%)	0.1089 (8.90%)
	Caso 2	0.0877 (7.74%)	0.0856 (9.88%)	0.0894 (7.58%)	0.0896 (7.31%)
	Caso 3	0.1384 (5.33%)	0.1345 (7.51%)	0.1458 (4.89%)	0.1392 (5.22%)
	Caso 4	0.1193 (4.10%)	0.1119 (6.27%)	0.1252 (3.47%)	0.1194 (3.92%)
Tasa de descuento 12.1%	Caso 1	0.1159 (19.24%)	0.1194 (23.35%)	0.1192 (18.96%)	0.1183 (18.30%)
	Caso 2	0.0945 (16.09%)	0.0938 (20.41%)	0.0960 (15.52%)	0.0960 (14.97%)
	Caso 3	0.1499 (14.08%)	0.1477 (18.07%)	0.1576 (13.38%)	0.1503 (13.61%)
	Caso 4	0.1279 (11.61%)	0.1216 (15.48%)	0.1338 (10.58%)	0.1275 (10.97%)

Los resultados mostrados en la **TABLA XI** corresponden a los cambios en el LCOE al variar los períodos de depreciación en los casos 2 y 4 (con exenciones). El valor base representa los valores mostrados en **Fig. 6**. El caso 4 es el menos sensible debido a que se debe pagar el abono a la deuda y los intereses esto hace que la depreciación tenga menos peso en el valor del LCOE. la variación de estos períodos no afecta considerablemente el valor del LCOE.

TABLA XI  
CAMBIOS EN EL LCOE[USD/kWh] POR VARIACIÓN EN PERÍODOS DE DEPRECIACIÓN.

		Gasificación		Pirólisis	
		25kW	30kW	25kW	30kW
Períodos de depreciación 3 (base)	Caso 2	0.0814 (0.00%)	0.0779 (0.00%)	0.0831 (0.00%)	0.0835 (0.00%)
	Caso 4	0.1146 (0.00%)	0.1053 (0.00%)	0.1210 (0.00%)	0.1149 (0.00%)
Períodos de depreciación 4	Caso 2	0.0819 (0.61%)	0.0785 (0.77%)	0.0836 (0.60%)	0.0840 (0.60%)
	Caso 4	0.1152 (0.52%)	0.1060 (0.66%)	0.1216 (0.50%)	0.1155 (0.52%)
Períodos de depreciación 5	Caso 2	0.0827 (1.60%)	0.0795 (2.05%)	0.0844 (1.56%)	0.0848 (1.56%)
	Caso 4	0.1161 (1.31%)	0.1071 (1.71%)	0.1225 (1.24%)	0.1164 (1.31%)
Períodos de depreciación 6	Caso 2	0.0836 (2.70%)	0.0806 (3.47%)	0.0853 (2.65%)	0.0856 (2.51%)
	Caso 4	0.1170 (2.09%)	0.1081 (2.66%)	0.1233 (1.90%)	0.1172 (2.00%)
Períodos de depreciación 7	Caso 2	0.0845 (3.81%)	0.0817 (4.88%)	0.0862 (3.73%)	0.0865 (3.59%)
	Caso 4	0.1174 (2.44%)	0.1089 (3.42%)	0.1237 (2.23%)	0.1176 (2.35%)

De mayor a menor, los proyectos con tecnologías WtE para aprovechamiento de la cáscara de cacao en la región del Suroeste, fueron más sensibles a las variaciones en la tasa de interés, operación y mantenimiento, inversión inicial, periodos de gracia y depreciación.

## VI.DISCUSIÓN

En el reporte de [26] se tiene que el valor promedio de LCOE para la bioenergía, es de 0.067 USD/kWh a nivel mundial, con valores máximos y mínimos aproximados de 0.14 USD/kWh y 0.06 USD/kWh respectivamente. Al comparar estos valores con los resultados anteriores se tiene que en el peor de los casos (Caso 3) se está por debajo del valor máximo anteriormente descrito. Comparando el mejor de los casos (Caso 2) los resultados están por encima del valor promedio a nivel mundial.

Al comparar con el análisis en [27] se tiene que para Estados Unidos la generación por biomasa tiene un LCOE de 0.0901 USD/kWh, comparado con los resultados obtenidos se tiene que solo para el caso 2 se está por debajo del promedio de Estados Unidos.

También en [26] se menciona el gran aumento en los precios de los combustibles fósiles. Los valores promedio para el gas natural en Europa fueron de entre 0.134 USD/kWh y 0.09 USD/kWh. El carbón térmico en Alemania se encuentra en el orden de 0.04 USD/kWh. Estos valores (que solo representan el combustible) están muy por encima de los costos de operación y mantenimiento variable de las plantas analizadas en este trabajo. Particularmente para el caso del gas natural su precio está rondando valores similares a los del LCOE mostrados en la **Fig. 6**.

[27] también se presentan LCOEs para tecnologías que usan combustibles fósiles como: carbón con 0.8261 USD/kWh y gas con ciclo combinado con 0.3994 USD/kWh. Estos valores están por encima de todos los casos presentados en este trabajo.

Los valores de costo de inversión promedios ponderados para el año 2021 reportados por [26], para la bioenergía, están en 2353 USD/kW con máximos y mínimos aproximados de 10,000 USD/kW y 1,600 USD/kW respectivamente. Comparando los datos de este reporte con los resultados anteriormente obtenidos en el presente trabajo, se observa que los costos de inversión están dentro de este rango de máximo y mínimo. Para el caso de tecnología de pirólisis antes de aplicar las exenciones, los costos de inversión estaban por encima del promedio mundial, luego con exenciones el costo de inversión llegó a niveles por debajo de dicho promedio. La tecnología de gasificación en todos los casos se situó por encima de este promedio.

En el trabajo de [17], Realizan un análisis de sensibilidad de varios tipos de plantas entre las que está una con tecnología de gasificación. Esta planta se compara con los resultados de este trabajo a continuación:

Al realizar el análisis de sensibilidad sobre el costo de inversión encuentran que las plantas con mayores costos de inversión son más sensibles a estos cambios. El mismo resultado fue obtenido en este trabajo, esto es debido a que entre mayor peso tenga el costo de inversión en el LCOE mayor será su sensibilidad a los cambios de inversión inicial.

También se obtuvo que al aumentar la tasa de descuento se aumenta el LCOE, para una tasa de descuento del 14% presentó un aumento del 5.4% en el LCOE respecto al caso base. Las variaciones presentadas en este trabajo para las plantas de gasificación están entre un 5.33% y 21.18%. Las diferencias se deben a todas las condiciones particulares que tiene cada flujo de caja por lo que se debe prestar más atención a las tendencias generales de las variaciones.

Por último, al variar los períodos de gracia obtuvieron que el LCOE se redujo en un 5.2%. También se observó que los proyectos fueron menos sensibles a las variaciones en los períodos de gracia.

Los resultados encontrados en la sección de análisis de sensibilidad pueden dar información a otros inversores que quieran realizar proyectos con distintas condiciones en las variables del proyecto.

Debido al alto costo de estos sistemas se puede dificultar mucho para los campesinos adquirir esta clase de tecnologías por lo que los escenarios más probables a tener sean los casos 3 y 4. Estos Casos tienen los mayores valores de LCOE por lo que para mejorar asequibilidad es necesario bajar los costos por transporte e importación fabricando en la medida de lo posible la tecnología en Colombia. Al comparar el LCOE con el precio de la energía en Támesis para el mes de septiembre pueden ser de 0.0650 USD/kWh, 0.0812 USD/kWh, 0.1375 USD/kWh y 0.1618 USD/kWh dependiendo del tipo de usuario [28] (4356.62 USD/COP, 6/7/22). En la mayoría de los casos se tiene que estos sistemas son viables para cubrir las necesidades energéticas de sus habitantes.

## VII.CONCLUSIONES

- De acuerdo con la evaluación económica realizada, los proyectos con tecnologías WtE para la conversión energética de cáscara de cacao en la subregión del Suroeste de Antioquia, pueden ser viabilizados si se aplican los incentivos de la Ley 1715 de 2014.
- Los costos de inversión de las tecnologías y el LCOE antes de aplicar las exenciones están por encima de los valores reportados a nivel mundial. Al aplicar las exenciones de la Ley 1715 de 2014 fue posible reducir los costos de inversión y el LCOE a niveles más cercanos o por debajo de los reportados a nivel mundial en cuanto a proyectos de bioenergía. Adicionalmente se mostró que las variaciones en la tasa de descuento son las que tienen mayor impacto en el LCOE.
- Los sistemas de gasificación y pirólisis para conversión energética de la cáscara de cacao en la región del Suroeste de Antioquia mostraron estar muy por debajo de los costos de las tecnologías de combustibles fósiles. Debido a los altos costos del gas natural y el carbón las tecnologías WtE son una opción más asequible para la generación de electricidad.
- En caso de fabricar los equipos en Colombia se podría reducir aún más los costos de funcionamiento de las plantas y volver esta clase de proyectos más viables económicamente.

## REFERENCIAS

- [1] F. N. de Cacaoterros, “Informe de gestión,” pp. 329–345, 2020.
- [2] M. de Agricultura, “Cadena de cacao: Dirección de cadenas agrícolas y forestales,” 2021.
- [3] “Fedecacao,” <https://www.fedecacao.com.co/>, accessed: 2022-09-20.
- [4] F. N. de Cacaoterros, “Proyecto productivo de inversión y acompañamiento para el establecimiento de 336 hectáreas de cacao clonado para la región de ariari,” pp. 11–23, 2006.
- [5] “El cacao en antioquia: Una apuesta en desarrollo,” *Revista Antioqueña de Economía y Desarrollo*, pp. 84–85.
- [6] “Compañía nacional de chocolates,” <https://chocolates.com.co/actualidad/nuestras-granjas-experimentales-de-cacao-un-aporte-al-desarrollo-sostenible-del-sector-rural-colombiano/>, accessed: 2022-06-4.
- [7] J. S. Bonvehi and F. V. Coll, “Protein quality assessment in cocoa husk,” *Food research international*, vol. 32, no. 3, pp. 201–208, 1999. 1
- [8] J. D. Martínez-Ángel, R. A. Villamizar-Gallardo, and O. ORTÍZ-RODRÍGUEZ, “Characterization and evaluation of cocoa (theobromacacao l.) pod husk as a renewable energy source,” *Agrociencia*, vol. 49, no. 3, pp. 329–345, 2015.
- [9] V. Njoku, “Biosorption potential of cocoa pod husk for the removal of zn (ii) from aqueous phase,” *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 2, no. 2, pp. 8–9, 2014.
- [10] M. Syamsiro, H. Saptoadi, B. Tambunan, and N. Pambudi, “A preliminary study on use of cocoa pod husk as a renewable source of energy in indonesia,” *Energy for Sustainable development*, vol. 16, no. 1, pp. 74–77, 2012.
- [11] C. D. L. REPÚBLICA, “Ley 1715: Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional,” 2014.
- [12] D. Mansur, T. Tago, T. Masuda, and H. Abimanyu, “Conversion of cacao pod husks by pyrolysis and catalytic reaction to produce useful chemicals,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 66, pp. 275–285, 2014.
- [13] M. Vavstyl, Z. Jankovska, G. J. F. Cruz, and L. Matějová, “A case study on microwave pyrolysis of waste tyres and cocoa pod husk; effect on quantity and quality of utilizable products,” *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 10, no. 1, p. 106917, 2022.

- [14] Á. H. V. Poveda, E. R. G. Gualotuña, C. A. C. Jara, and P. M. T. Escanta, “Caracterización de la biomasa residual de cacao ccn51 para obtención del poder calorífico mediante procesos de gasificación anaeróbico y termoquímico,” 2017.
- [15] C. H. Zavala, V. Pretell, J. Verastegui, and A. Ramirez, “Estimación del potencial energético del gas pobre a partir de la gasificación de cáscara de cacao y racimos de frutos vacíos de palma aceitera,” *Información tecnológica*, vol. 32, no. 2, pp. 143–150, 2021.
- [16] A. Castillo-Ramírez, D. Mejía-Giraldo, and J. Molina-Castro, “Fiscal incentives impact for rets investments in colombia,” *Energy Sources, PartB: Economics, Planning, and Policy*, vol. 12, no. 9, pp. 759–764, 2017.
- [17] J. D. Saldarriaga-Loaiza, F. Villada, and J. F. Pérez, “Análisis de costos nivelados de electricidad de plantas de cogeneración usando biomasa forestal en el departamento de antioquia, colombia,” *Información tecnológica*, vol. 30, no. 1, pp. 63–74, 2019.
- [18] I. R. E. Agency, “Renewable power generation costs in 2020,” 2020.
- [19] N. Botero, “Evaluación de la prefactibilidad técnico - económica de una planta de valorización energética de biomasa residual del cultivo de café en el suroeste de antioquia,” <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>, 2022.
- [20] “Kx-300sa biomass gasification power generation equipment,” <https://en.kexinqd.com/product/61.html>, accessed: 2022-06-4.
- [21] A. Farber, R. L. Gillet, and A. Szafarz, “A general formula for the wacc,” *International Journal of Business*, vol. 11, no. 2, 2006.
- [22] “Enel,” <https://www.enel.com.co/es/empresas/enel-generacion/bonos-de-carbono.html>, accessed: 2022-06-4.
- [23] “Expertos en mercados,” <https://www.xm.com.co/noticias/4591-factor-emision-matriz-energetica-2021>, accessed: 2022-06-4.2
- [24] “Banco de la república de colombia,” <https://www.banrep.gov.co/es/estadisticas/tasas-captacion-semanales-y-mensuales>, accessed: 2022-06-4.
- [25] “Credito finagro,” <https://www.grupobancolombia.com/personas/creditos/negocios/finagro>, accessed: 2022-06-4.
- [26] I. R. E. Agency, “Renewable power generation costs 2021,” 2022.
- [27] U. E. I. Association et al., “Levelized costs of new generation resources in the annual energy outlook 2022,” US Department of Energy, March, 2022.