



Pontificia Universidad Javeriana

Facultad de Ciencias Económicas y Administrativas

Trabajo de grado para optar por el título de Magister en Economía

Título:

Relación del consumo de energía renovable y no renovable con el crecimiento económico de Colombia

Autor:

Juan David Robayo Vargas

Asesor:

Nicolas Ronderos Pulido

Bogotá D.C.

Noviembre, 2020



Relación del consumo de energía renovable y no renovable con el crecimiento económico de Colombia

Juan David Robayo Vargas

Resumen

Esta investigación busca analizar la relación entre el crecimiento económico con el consumo de energía renovable y no renovable, en donde se aclara que en el presente estudio no se pretende establecer ninguna relación de causalidad. Para lograr este objetivo se estimó un modelo de vector de corrección de error (VECM) tomando el periodo de tiempo de 1990 a 2015. Del test de Johansen se encontró una relación de cointegración entre el PIB, el consumo de energía renovable y no renovable. Por otro lado, el modelo de vector de corrección de error (VECM) muestra una relación negativa en el largo plazo entre el consumo de energía renovable y el crecimiento económico, mientras que la energía no renovable muestra una relación positiva, sin embargo esta no es estadísticamente significativa. Por otro lado, mediante las funciones de impulso respuesta se estimaron las dinámicas de corto plazo ante un choque positivo en la energía renovable y no renovable, en donde se logra inferir que ambos tipos de energía tienen una relación positiva con el crecimiento económico en el corto plazo.

Palabras clave: Cointegración, Consumo de energía renovable y no renovable, Crecimiento económico

Clasificación JEL: B22, N56, P18, Q43.

Abstract

This study aims to explore the relationship between economic growth and the consumption of renewable and non-renewable energy, where it is important to specify that in this research it is not intended to establish any causal relationship. To achieve the goal of this study a vector error correction model (VECM) was constructed taking the period 1990 – 2015 into account. From the Johansen test, a cointegration relationship was found between GDP and the consumption of renewable and non-renewable energy consumption. Where, the VECM model shows a negative relationship in the long term between the consumption of renewable energy and economic growth, while non-renewable energy shows a positive relationship, however this is not statistically significant. Finally, through the impulse response functions, it was estimated the short-term dynamics in the face of a positive shock in renewable and non-renewable energy consumption, where it is possible to infer that both types of energy have a positive impact with economic growth in the short-term.

Key words: Cointegration, Renewable and non-renewable energy consumption, Economic growth.

JEL Classifications: B22, N56, P18, Q43.



FORMATO DE RESPUESTA AL EVALUADOR DEL TRABAJO DE GRADO

Nombre del asesor: Nicolas Ronderos Pulido

Nombre del estudiante: Juan David Robayo Vargas

Título del Trabajo de Grado: Relación del consumo de energía renovable y no renovable con el crecimiento económico de Colombia

Observaciones del evaluador	Respuestas del estudiante

Relación del consumo de energía renovable y no renovable con el crecimiento económico de Colombia

En este estudio de investigación se pretende explorar la relación de corto y largo plazo entre el consumo de energías renovables y no renovables con el crecimiento económico en Colombia para el periodo de tiempo de 1990-2015.

Justificación

Varias investigaciones han buscado responder a la pregunta de qué tan importante es el consumo de energía para el crecimiento de la economía, donde los países se han enfrentado al problema de buscar diferentes fuentes de energía para lograr satisfacer el fuerte incremento de demanda de la misma a través de los años. Sin embargo, en la actualidad cada vez es más relevante el buscar fuentes de energía renovables que vayan de la mano con la sostenibilidad ambiental, por lo tanto, desagregando el consumo de energía entre renovable y no renovable, se pretende analizar esa relación que tienen las mismas con el crecimiento económico.

En Colombia, UPME (2015) realizó un reporte en donde se resalta que al año 2012 la demanda interna de energía del país estaba concentrada en su mayoría por fuentes provenientes del petróleo (43%), gas natural (25%) y de manera más reducida hidroeléctricas (13%) y carbón (5%), lo cual muestra lo dependiente que es el país de las dos primeras fuentes mencionadas. De igual forma, en el último reporte de la Agencia Nacional de Hidrocarburos, a 2019 las reservas de petróleo mostraban tener una vida útil de 6,3 años mientras que las de gas natural de 8,1 años (Hidrocarburos, 2019), por lo que aparte de los beneficios medioambientales derivados del uso de energías renovables, esta es una razón más para que el país empiece a buscar fuentes alternativas de energía que sirvan para sustituir la dependencia que existe actualmente en las fuentes fósiles, ya que de no ser así, el país va a estar sujeto a encontrar nuevas reservas para lograr cumplir con la creciente demanda de energía interna.

En Colombia se han realizado algunas investigaciones buscando analizar la relación de la energía y el PIB. Campo y Sarmiento (2011) realizaron un modelo de corrección de errores VECM, donde no se encontró evidencia de una relación del consumo de energía y el PIB en el corto plazo, sin embargo si se encontró una relación en el largo plazo.

En otro estudio, Campo y Olivares (2013) analizaron la relación del consumo de energía con las emisiones de CO_2 y el PIB en Colombia, encontrando una relación de largo plazo del consumo de energía y del PIB con las emisiones de CO_2 . Finalmente, Cortés y Arango (2017), mediante un modelo VAR, buscaron analizar la relación de la energía con el PIB en Colombia, encontrando que en momentos de mayor crecimiento de producción del PIB, se presentaron valores más altos de demanda de energía.

Por lo que el principal aporte de la investigación que se llevara a cabo estará en buscar analizar la relación de corto y largo plazo del consumo de energía con el crecimiento económico del país, en

donde el diferencial de este análisis con respecto a los estudios previos realizados para Colombia estará en tomar el consumo de energía de forma desagregada, separando entre consumo proveniente de energías renovables y no renovables, donde luego de analizar esa relación se espera poder aportar nueva información para la toma de decisiones de política pública que vayan de la mano con el crecimiento económico y la sostenibilidad ambiental del país.

Introducción

Para los investigadores, un tema de gran importancia ha sido mirar la relación que tiene el consumo de energía con el crecimiento económico. Sin embargo, actualmente se está volviendo cada vez más relevante para los países encontrar un equilibrio entre el crecimiento de la economía y la sostenibilidad ambiental, donde el incremento de las emisiones de CO_2 junto con las crisis relacionadas con los precios del petróleo, han llevado a que cada vez más se realicen estudios que buscan examinar la relación dinámica del consumo de energía renovable y el PIB.

Como resultado, se han realizado estudios en diferentes países, donde lo interesante es la diferencia en los hallazgos, atribuido especialmente al uso de distintos tipos de metodologías, periodos de tiempo de cada estudio y claramente las diferentes características de las economías de cada país. Lo más interesante, es que el indagar más a fondo la relación que manejan estas dos variables sigue siendo un tema de gran relevancia, debido a las distintas políticas ambientales que han tomado los países, donde Colombia en el año 2015, se comprometió a reducir en un 20% las emisiones de gases de efecto invernadero proyectadas para el año 2030 y en el Plan Energético Nacional: Ideario 2050 publicado por la UPME, se resalta la necesidad del país de buscar diferentes fuentes de energía, donde los puntos de mayor importancia son el garantizar el suministro para satisfacer la demanda y reducir las emisiones de CO_2 .

Por ende, la importancia de indagar más a fondo la relación que tiene el consumo de energía renovable y no renovable con el PIB en la economía colombiana. El documento se dividirá en 6 secciones, la primera será una breve revisión de literatura, en la segunda se presentara de manera resumida un modelo de crecimiento endógeno que incluye la variable de energía, en la tercera se hablara del consumo de energía en Colombia, en la cuarta sección mostrara la metodología y los datos que se usaran para el desarrollo de la investigación, en la quinta sección se darán los resultados y finalmente en la última sección se expondrán las conclusiones.

1. Revisión de literatura

La relación entre el consumo de energía y el crecimiento económico ha sido un tema de interés para muchos investigadores, en donde existen varios tipos de metodología para resolver esta pregunta de investigación. Este artículo se enfocará especialmente en dos tipos de literatura, aquella en la cual usen como modelo metodológico un VECM y aquella donde usen el modelo ARDL, en donde dependiendo del comportamiento de los datos se optara por alguna de las dos.

Magazzino (2015) es uno de los autores que realizó una investigación afín a la que se va a desarrollar en este artículo, ya que él estudia la relación entre el PIB y el consumo de energía para Italia durante 1970-2009, usando como modelo metodológico un VECM, encontrando así la existencia de una relación de cointegración entre ambas variables. De igual forma, Fernandes y Reddy (2020) investigaron la relación entre el consumo de energía y el crecimiento económico para seis países asiáticos, siendo interesante como en su investigación usaron ambos tipos de metodología (VECM y ARDL) dadas las diferentes características en los datos de cada país, encontrando así resultados mixtos, donde por ejemplo para China se encontró una relación de cointegración entre ambas variables, sin embargo para India no se encontró ningún nexo entre las mismas. Por lo que la investigación que se va a llevar a cabo, a pesar de ser similar en cuanto a la metodología usada en los artículos anteriormente mencionados, buscara dar un valor agregado al separar entre tipos de energía (renovable y no renovable) y a su vez se usaran otro tipo de variables que nos servirán como controles como lo son la fuerza laboral y la formación bruta de capital.

Por otro lado, Bartleet y Gounder (2010) indagaron acerca de la relación entre el consumo de energía y el crecimiento económico en Nueva Zelanda, un diferencial en su investigación fue el incluir los precios de la energía como variable adicional y el uso de un modelo ARDL para el desarrollo del estudio, en donde a través de la aplicación del test de Bound se encontró una relación de cointegración entre ambas variables. De igual forma, Churchill y Ivanovski (2019), estudiaron las dinámicas de corto y largo plazo entre el consumo de electricidad junto a otras variables como fuerza laboral y formación bruta de capital en el crecimiento económico de 7 estados australianos, los autores utilizaron un modelo de datos panel ARDL, diferenciándose así de otras investigaciones, ya que el usar un modelo de datos panel les permitió tener en cuenta la heterogeneidad entre los estados, encontrando así una relación de cointegración entre el consumo de energía y el crecimiento económico, a su vez usan otro tipo de variables como la formación bruta de capital y la fuerza laboral.

En esta misma línea, Mahadevan y Asafu-Adjaye (2007) tenían como propósito analizar la relación entre consumo de energía y PIB, en donde a diferencia de los autores anteriores ellos usaron un modelo de datos panel VECM, incluyendo en su estudio un total 20 países, siendo su principal diferencial el incluir como variable adicional los precios de la energía y el incluir tanto países desarrollados como países en desarrollo, evidenciando en sus resultados que la relación entre consumo de energía y PIB era más clara en los países de ingresos altos. De igual forma, Shahbaz et al. (2011) actualizaron un estudio previo, buscando examinar la relación del consumo de energía, crecimiento económico y empleo en Portugal, sin embargo, para llevar a cabo su investigación usaron el modelo ARDL y mediante el test de Bound encontraron la existencia de una relación de cointegración entre el consumo de electricidad, crecimiento económico y empleo durante 1971-

2009. En donde vale la pena resaltar que al igual que con los artículos anteriores, se usan otras variables aparte del PIB y el consumo de energía, sin embargo no se desagrega por tipo de energía (renovable y no renovable).

Amri (2017) es uno de los autores que más se asemeja al objetivo de esta investigación, ya que él busca explorar la relación de largo plazo entre el consumo de energía renovable y no renovable con el crecimiento económico para Argelia, en donde usando un modelo de cointegración ARDL encuentra que el consumo de energía no renovable impacta de manera positiva al crecimiento económico mientras que el consumo de energía renovable no muestra ningún nexo con el PIB. Su investigación se diferencia a las vistas anteriormente dado que primero hace una distinción entre tipo de energía y segundo incluye otras variables como la formación bruta de capital y la población. De igual forma, Ocal y Aslan (2013) estudiaron la relación entre el consumo de energía renovable con el crecimiento económico, la investigación se desarrolló bajo la metodología ARDL, donde a diferencia de los papers anteriores, se encontró que el consumo de energía renovable tenía un impacto negativo en el crecimiento económico. El autor explica que este resultado se debe a que el consumo de energía renovable implica costos elevados para los países en desarrollo, en donde al menos para el caso de Turquía, el tener limitaciones en fuentes de energía renovable parece no haber deteriorado el crecimiento económico del país.

Finalmente, como podemos observar, los resultados entre la relación del consumo de energía y el PIB no son concluyentes, en algunos países se evidencia un nexo entre estas variables, mientras que en otros esta relación no parece ser tan clara, en donde vale la pena recordar que en Colombia es muy poca la literatura que analice las dinámicas entre la energía y el PIB, y menor es aún las que incluyen el consumo de energía de manera desagregada, por lo que la presente investigación aportara como valor agregado el indagar cuáles son las dinámicas de corto y largo plazo entre la energía renovable y no renovable con el crecimiento económico del país y el uso de variables adicionales como la formación bruta de capital y la fuerza laboral.

2. Modelo de crecimiento endógeno

Algunos investigadores han desarrollado modelos de crecimiento endógeno en donde se incluye la variable de energía como uno de los inputs en la función de producción, para así ver qué relación tiene esta con el PIB. Berk y Yetkiner (2014) fueron uno de estos autores, quienes desarrollaron un modelo de crecimiento endógeno bajo los supuestos de una economía cerrada sin gobierno, en la cual se usa una función de utilidad tipo CIES (Constant intertemporal elasticity substitution function) en donde a diferencia del modelo de crecimiento tradicional, en este se asume que existen dos insumos de producción, los cuales son el capital y la energía, a su vez se asume la existencia de dos sectores económicos, los cuales son los bienes de inversión y los bienes de consumo.

Anteriormente, en la revisión de literatura se observó cómo algunos autores han buscado responder a la pregunta de cuáles son las dinámicas en la relación entre la energía y PIB, usando modelos econométricos aplicados para responder la misma, sin embargo, también es interesante ver como desde la teoría se ha querido analizar el nexo entre la energía y el crecimiento económico, siendo esta la principal motivación por la que se presentara un breve resumen del modelo de crecimiento

endógeno desarrollado por Berk y Yetkiner (2014), en el anexo 4 se encontrará el desarrollo del modelo realizado por el autor de manera más completa.

En el modelo Berk y Yetkiner (2014) plantearon las siguientes funciones de producción:

Por el lado de los bienes de inversión se seguirá la siguiente función de producción:

$$Y_I = AK_I$$

A: Productividad total de los factores

K_I : Esta variable representa una versión ampliada del capital físico empleado para la producción de los bienes de inversión.

Mientras que para la producción de los bienes de consumo se usaran como inputs el capital y la energía, asumiendo retornos constantes de la tecnología.

$$Y_c = K_c^\alpha E^{1-\alpha}$$

E: Energía empleada como input para la producción de bienes de consumo

K_c : Esta variable representa una versión ampliada del capital físico empleado para la producción de los bienes de consumo.

Berk y Yetkiner (2014) Primero desarrollaron el problema optimización de las firmas, en donde su estructura de beneficios estará dada de la siguiente forma:

Función de beneficios de los bienes de inversión

$$\pi_I = A P_I K_I - R_i K_I$$

P_i : Precio de los bienes de inversión

R_i : Costo de uso o alquiler del capital físico utilizado en la producción de bienes de inversión.

Función de beneficios de los bienes de consumo

$$\pi_c = ((P_c K_c E^{1-\alpha}) - (R_c K_c) - (R_E E))$$

P_c : Precio de los bienes de consumo

R_c : Costo de uso o alquiler del capital físico utilizado en la producción de bienes de consumo

R_E : Precio nominal de la energía

Como segundo, Berk y Yetkiner (2014) desarrollaron el problema de optimización del consumidor, el cual tendrá la siguiente función de utilidad intertemporal:

$$U_{(C_t)} = \int_0^{\infty} e^{-\rho t} \frac{C^{1-\theta} - 1}{1-\theta}$$

ρ : Tasa subjetiva de descuento

$\frac{c^{1-\theta}-1}{1-\theta}$: Función de utilidad instantánea del consumidor, la cual muestra el nivel de utilidad que tendrá el consumidor en un instante de tiempo dado su nivel de consumo.

$\frac{1}{\theta}$: Elasticidad de sustitución intertemporal

δ : Tasa de depreciación del capital

Por lo que el Hamiltoniano seguirá la siguiente forma:

$$H = e^{-\rho t} \frac{c^{1-\theta}-1}{1-\theta} + \lambda (r \text{ activos} + qE - C)$$

Activos: Representan el stock financiero del consumidor

r : Tasa de interés real

qE : En el modelo se asume que los consumidores son propietarios del total de los recursos energéticos

Finalmente, se obtiene la tasa de crecimiento de la energía, el capital y el consumo.

$$\begin{aligned}\hat{E} &= \frac{1}{\theta} (A - \delta - \rho - \frac{(1-\alpha + \alpha x \theta)}{\alpha} \hat{q}) \equiv g', \\ K_c^\alpha &= \frac{1}{\theta} (A - \delta - \rho - \frac{(1-\alpha)(1-\theta)}{\alpha} \hat{q}) \equiv g \\ \hat{C} = \hat{Y}_c &= \frac{1}{\theta} (A - \delta - \rho - \frac{(1-\alpha)}{\alpha} x \hat{q}) \equiv \alpha g + (1-\alpha) g'\end{aligned}$$

Como último, Berk y Yetkiner (2014) determinaron la trayectoria temporal del PIB real, donde se debe tener en cuenta que el PIB nominal en términos del consumo es definido como:

$$NPIB = P_I Y_I + P_C Y_C \rightarrow Y = P Y_1 + Y_c$$

Por lo tanto el PIB real será:

$$Y = \text{constante} e^{(\alpha g + (1-\alpha) g') t}$$

$\text{constante} = P(0) Y_I + (K_c(0))^\alpha (E(0))^{1-\alpha}$, será la ecuación que contendrá los valores iniciales del modelo.

Como conclusión del modelo, Berk y Yetkiner (2014) muestran como el stock total de capital, el capital de inversión y el capital de consumo crecen a una tasa g , mientras que la demanda de energía crece a una tasa g' y el PIB real y el consumo crecen a una tasa de $\alpha g + (1 - \alpha) g'$, la cual es la tasa de crecimiento ponderada de la energía y el capital físico. Finalmente, se evidencia como los precios de la energía tienen una relación negativa en todas las tasas de crecimiento.

3. Consumo de energía en Colombia

A cifras del 2015, la producción energética del país se basaba en un 93% de recursos de origen fósil, 4% de hidroenergía y el restante de biomasa y residuos. Del total de producción el país exporta un 69% y utiliza el 31% para consumo interno, del cual cerca de un 78% de ese consumo interno corresponde a fuentes fósiles y el 22% a fuentes de energía renovable (UPME,2015).

En línea con esto, usando como fuente al Banco Mundial y la Agencia Internacional de Energía (IEA) podemos ver como en Colombia la principal fuente de consumo de energía proviene del petróleo, el segundo lugar era ocupado por las fuentes de energía renovable, sin embargo a partir del año 2009 y hasta donde se tienen datos, el consumo proveniente de gas natural pasó a ocupar el segundo lugar.

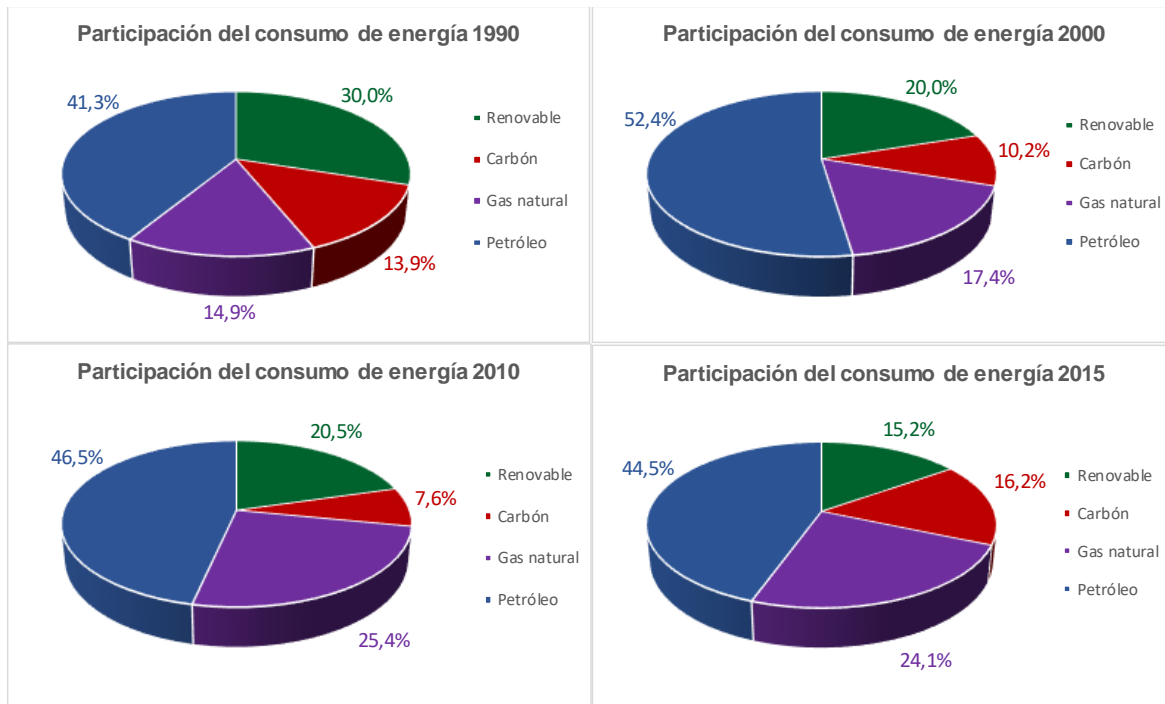


Gráfico 1: Participación del consumo de energía por tipo en Colombia

Fuente: Banco Mundo y Agencia Internacional de Energía

Algo muy interesante que se puede ver en el gráfico es como la energía renovable paso de ocupar el segundo lugar hasta el año 2009 a pasar a ocupar el cuarto lugar detrás de las fuentes provenientes de gas natural y carbón, lo que evidencia que la transición hacia el consumo de energías renovables no se está observando en el país, mientras que por el contrario se ha incrementado la dependencia sobre todo en la energía proveniente del gas natural, que como se nombró previamente a 2019 la vida útil de las reservas existentes es de 8,1 años (Hidrocarburos, 2019).

Una de las razones del porqué desde los años 90 el gas natural ha venido ganando protagonismo en Colombia es explicada en Reyes et al. (2005), quienes realizaron una investigación del desempeño que tuvo el Plan de masificación del consumo de gas planteado por el gobierno en el

CONPES 2571 de 1991, el cual tenía como objetivo redistribuir de manera más eficiente la matriz de consumo de energía del país que en aquella época se basaba principalmente de fuentes provenientes del petróleo, carbón y leña, y a la vez buscar fuentes energéticas que implicaran menores afectaciones al medio ambiente. En el CONPES 2933 de 1997, se describe como con el Plan de masificación de consumo de gas se consiguieron grandes avances, entre los que se destacan el incremento en la capacidad de producción de gas, construcción de gasoductos troncales y sobre todo un incremento de la cobertura de gas natural a los hogares colombianos, que previamente basaban su consumo de energía de fuentes como la energía eléctrica y la leña, en donde para finales de 2004 el gas natural logro ganar terreno en los mercados vehicular y residencial, pasando de 647.000 usuarios en 1993 a 3.575.000 en el 2004 (Reyes et al., 2005), siendo esto finalmente una de las principales razones del porqué el gas natural ha venido tomando este protagonismo desde los años 90s.

4. Datos y metodología

Para estimar el modelo se utilizarán datos en una periodicidad anual entre 1990-2015. Las variables que serán incluidas en este modelo son el producto interno bruto real a precios constantes del año 2010, fuerza laboral la cual comprende a todas aquellas personas mayores de 15 años que ofrecen mano de obra para la producción de bienes y servicios durante un cierto periodo en específico, la formación bruta de capital a precios constantes año 2010, el consumo de energía renovable y no renovable, donde la medida usada será en kw/h. Como fuentes de los datos se usaron los Indicadores de desarrollo del Banco Mundial y la Agencia Internacional de Energía (iea). En el anexo 1 se podrán encontrar las tablas de las estadísticas descriptivas de cada una de las variables usadas en el modelo.

La variable de consumo de energía renovable incluye la energía proveniente de hidroeléctricas, biocombustibles sólidos, energía eólica, energía solar, biocombustibles líquidos, biogás, energía geotérmica, marina y de residuos, mientras que la variable de energía no renovable incluye la energía proveniente del petróleo, carbón y gas natural. Finalmente, cada una de las variables se transformó en logaritmo natural. Dentro de las metodologías de cointegración utilizadas para hallar relaciones de largo plazo existe la metodología desarrollada por Engle y Granger (1987), el test de Johansen desarrollado por Johansen (1991) y el modelo ADRL desarrollado por Pesaran (1997). En donde, para el desarrollo de la investigación, se tendrán en cuenta el modelo de vector de corrección de errores VECM, por lo que será necesario hacer test de cointegración antes de desarrollar el modelo, para la realización del ejercicio se utilizara el paquete estadístico Eviews 10.

Nuestro modelo de crecimiento económico es una extensión de la clásica función de producción de Cobb Douglas, donde la energía renovable y no renovable son variables adicionales al capital y trabajo (Bhattacharya et al., 2016), (Shahbaz et al., 2011), (Amri, 2017), (Rafindadi y Ozturk, 2017), (Ocal y Aslan, 2013)), finalmente esta será denotado de la siguiente manera:

$$PIB_{it} = FBC_T^{\beta_{oi}} FL_T^{\beta_{1i}} ER_T^{\beta_{2i}} ENR_T^{\beta_{3i}} e_T^{\varepsilon_{it}}$$

Haciendo la transformación logarítmica de la ecuación, obtenemos el siguiente modelo:

$$\ln PIB_{it} = \beta_{0i} + \beta_{1i} \ln FBC_{it} + \beta_{2i} \ln FL_{it} + \beta_{3i} \ln ER_{it} + \beta_{4i} \ln ENR_{it} + \varepsilon_{it}$$

Donde $\ln PIB$ es el logaritmo del producto interno bruto en millones de USD en año base 2010, $\ln FBC$ es el logaritmo de la formación bruta de capital, $\ln FL$ es el logaritmo de la fuerza laboral medido en millones, ER es el logaritmo del consumo de energía renovable medido en kw/h, ENR representa el logaritmo del consumo de energía no renovable medido en kw/h y finalmente ε_{it} es el término de error. Por otro lado, $\beta_{1i} \dots \beta_{4i}$ son los coeficientes para cada una de las variables.

Ahora bien, a la hora de como incluir los datos, en la literatura se puede observar como algunos autores tomaron los datos en niveles y otros en per cápita. En este caso, se incorporará la función de producción en niveles, sin embargo vale la pena resaltar que igual se está controlando por L al incluir la fuerza laboral en la función de producción, entre los autores que utilizaron datos en niveles en la función de producción están Ocal y Aslan (2013), Al-mulali et al. (2012), Bartleet y Gounder (2010). El principal objetivo de este modelo será encontrar la relación de corto y largo plazo del consumo de energía renovable y no renovable con el PIB en Colombia, en donde, se estimaran dos tipos de modelos, uno en el cual se incluirán variables control, las cuales serían la formación bruta de capital y la fuerza laboral y un modelo benchmark en donde solo se tendrán en cuenta el PIB y el consumo de energía renovable y no renovable.

4.1 Cointegración

Los primeros autores en hablar de cointegración fueron Granger (1981) y Engle & Granger (1987), donde el principal objetivo detrás de este nuevo concepto es el de encontrar una combinación lineal entre variables que tengan un orden de integración $I(d)$ que resulte en una nueva variable con un orden de integración menor. El desarrollo de esta metodología tomó gran relevancia, sobre todo cuando se usan variables económicas, ya que cuando se diferencia una serie se pierde información de gran relevancia sobre el comportamiento de la misma, sin embargo con esta metodología se puede trabajar sobre series que sean no estacionarias, siendo uno de los ejemplos más conocidos de variables que no son estacionarias en niveles, sin embargo existe una combinación lineal de las mismas que si es estacionaria son el ingreso de los hogares y el consumo, es decir existe una relación de cointegración entre las mismas.

Una definición más formal de cointegración la podemos encontrar en el libro de Pfaff (2011) y Lütkepohl (1991), en el cual se define la cointegración como: Los componentes de un vector X_t se dice esta cointegrado de orden d, b , denotado como $X_t \sim I(d, b)$ si primero todos los componentes de X_t son $I(d)$ y un vector $\alpha \neq 0$ existe, por lo que $Z_t = \alpha' X_t \sim I(d-b)$, $b > 0$. El vector α será llamado como el vector de cointegración, concluye el autor (p.75).

4.2 Modelo de vector de corrección de error (VECM)

Una de las diferencias del modelo VEC con los modelos VAR es que el primero emplea variables no estacionarias y por ende cuando existe cointegración, este modelo es capaz de captar componentes de gran importancia para el análisis de las series de tiempo (Enders, 2005).

Por lo que la principal motivación de usar un modelo VECM, es buscar una relación de equilibrio de largo plazo entre las diferentes variables del modelo.

$$\Delta Y_t = \pi Y_{t-1} + \Gamma_1 \Delta Y_{t-1} + \dots + \Gamma_{p-1} \Delta Y_{t-p} + \mu_t$$

$$\Delta Y_t = \alpha \beta' Y_{t-1} + \Gamma_1 \Delta Y_{t-1} + \dots + \Gamma_{p-1} \Delta Y_{t-p} + \mu_t$$

Para evitar cualquier tipo de relación espuria, el primer paso es verificar el grado de integración de las series, con el fin de verificar si las series son estacionarias (media y varianza constante a través del tiempo) o no lo son. Para ello se realizarán distintas pruebas de raíz unitaria, donde entre las más conocidas están el test de Dickey Fuller aumentado (ADF) desarrollado por Dickey y Fuller (1979) y la prueba de Phillips Perron desarrollada por Phillips y Perron (1988). En dado caso de que las series no sean estacionarias se procederá a probar el grado de cointegración de las series. En donde, si todas las series tienen el mismo grado de integración usaremos el test de Engle y Granger o el test de Johansen, mientras que si el grado de integración de las series es mixto podremos utilizar el Test de Bound.

4.3 Test de Johansen

$$x_t = (y_t, z_t, \dots, w_t)'$$

$$\Delta x_t = A_0 + \pi X_{t-1} + \pi_1 \Delta x_{t-1} + \varepsilon_t$$

Al igual que en caso anterior, el primer paso será mirar el orden de integración de las series, luego se procederá a estimar del modelo VAR, donde el número de rezagos se seleccionará mediante los criterios de información BIC y AIC. Finalmente, se procederá a realizar el test de Johansen para mirar el rango de cointegración de las series (Enders, 2005).

5. Resultados

En esta investigación primero se analizó el nivel de integración de las variables usando la prueba ADF y el test de Phillips Perron. Segundo, se realizó el análisis de los criterios de información para seleccionar el orden de rezagos del modelo, seguido por el test de cointegración de Johansen, con el cual podremos saber si existe o no alguna relación de cointegración y en caso de existir, saber cuál es el rango o número de relaciones existentes. Finalmente, se realiza el modelo VECM (Vector error correction term model) junto con las estimaciones de las funciones de impulso respuesta, para así mirar las relaciones de corto y largo plazo entre las variables.

5.1 Gráficos Series de tiempo en niveles (Periodo 1990-2015)

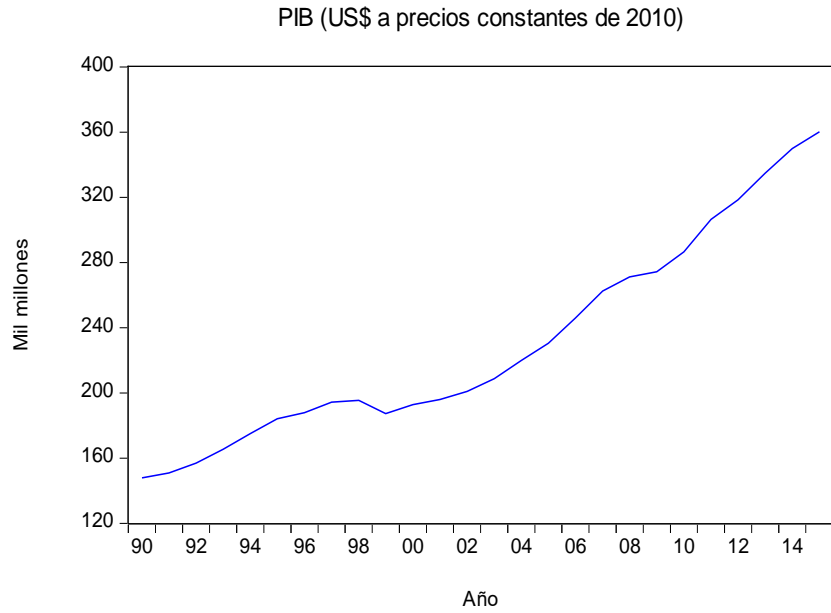


Gráfico 2 Evolución del Producto Interno Bruto

Fuente: Banco Mundial

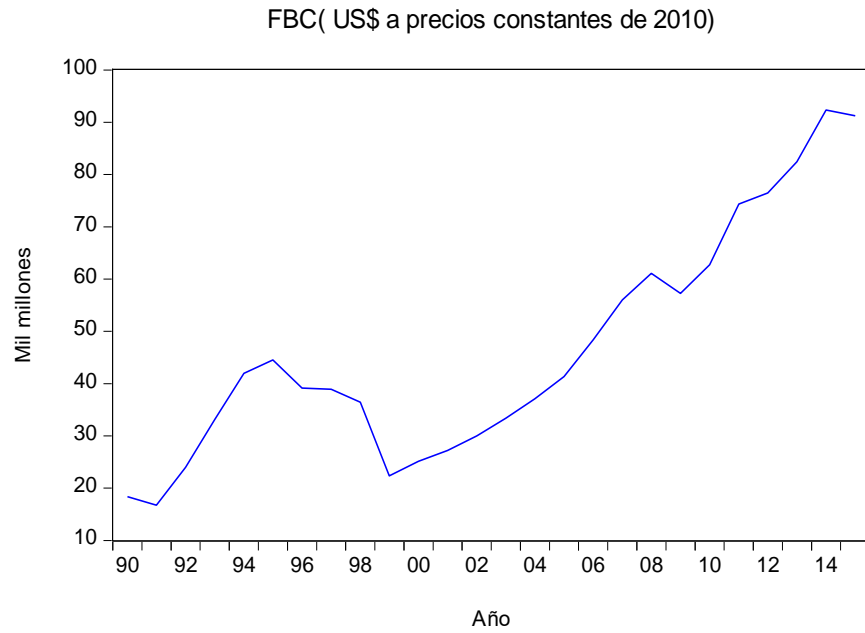


Gráfico 3 Evolución de la Formación bruta de capital

Fuente: Banco Mundial

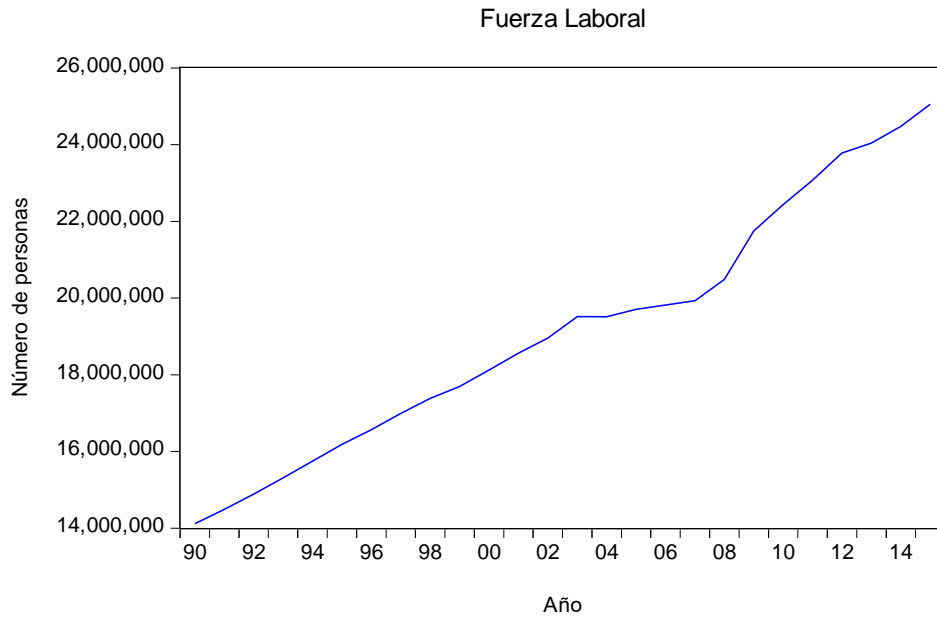


Gráfico 4 Evolución de la Fuerza Laboral

Fuente: Banco Mundial

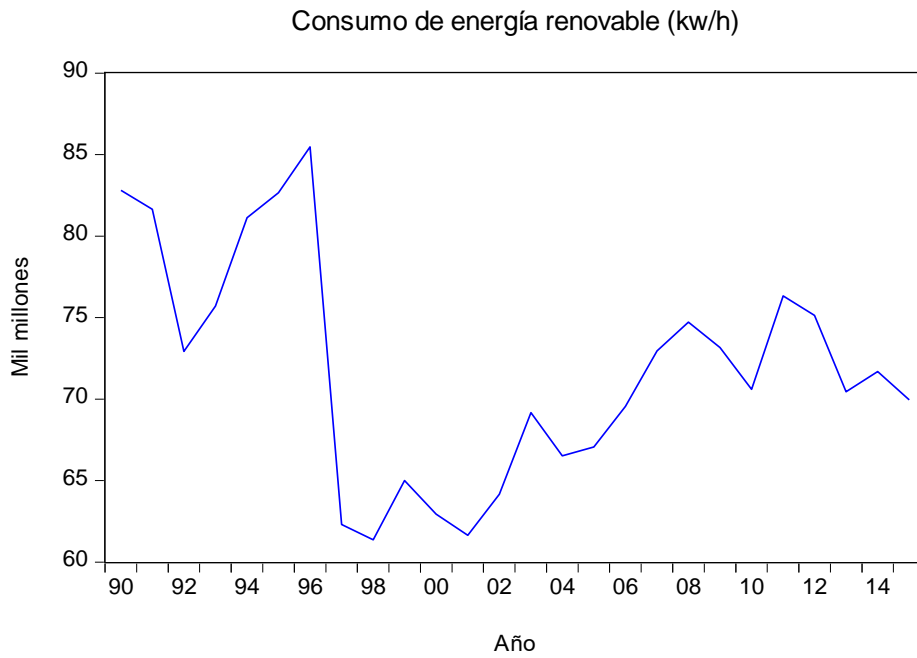


Gráfico 5 Evolución del consumo de energía renovable

Fuente: Banco Mundial

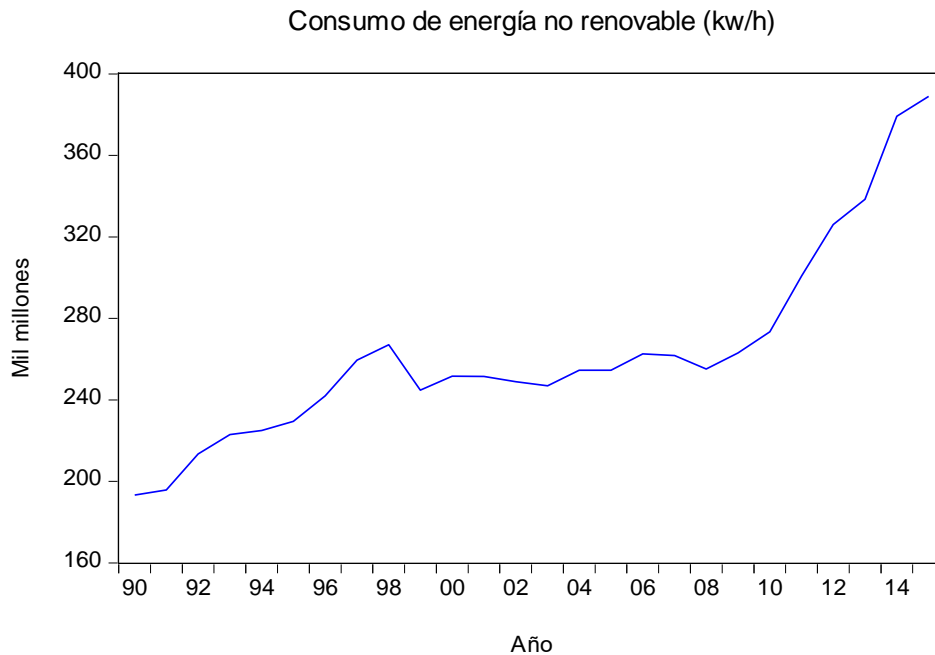


Gráfico 6 Evolución del consumo de energía no renovable

Fuente: Agencia Internacional de Energía

5.2 Test de raíz unitaria

El primero paso corresponde a mirar el orden de integración de cada una de las variables, en donde se utilizaron dos diferentes tipos de test de raíz unitaria, los cuales son: La prueba de Dickey Fuller aumentado y el test de Phillips-Perron. Los test de raíz unitaria son desarrollados con modelos con intercepto e intercepto y tendencia. Los resultados de la tabla 1 evidencian como las variables muestran no ser estacionarias en niveles, sin embargo una vez son transformadas en primeras diferencias muestran cumplir con la propiedad de estacionariedad débil, es decir tener una media y varianza constante a través del tiempo.

Tabla 1

Linear unit root test

Variables	Augmented Dickey- Fuller test statistic		Phillips-Perron test statistic	
	Intercept	Intercept & trend	Intercept	Intercept & trend
Ln PIB	0.865646	-0.911001	0.593495	-1.291475
Ln ER	-2.480174	-2.346744	-2.464499	-2.325373
Ln ENR	0.562056	-0.531905	0.397671	-0.923113
Ln FBC	-0.946223	-1.641983	-1.036297	-1.928424
Ln FL	-0.544653	-2.673284	-0.516148	-2.079662
Δ Ln PIB	-3.063327**	-3.009588	-3.092380**	-3.045515
Δ Ln ER	-4.976639***	-4.935381***	-5.232998***	-5.507681***
Δ Ln ENR	-3.744899***	-3.741616**	-3.744899***	-3.741616**
Δ Ln FBC	-3.740821***	-3.665745**	-3.790381***	-3.722402**
Δ Ln FL	-3.175148**	-3.104157	-3.203194**	-3.134746

*** Simboliza la significancia al nivel del 1%.

**Simboliza la significancia al nivel del 5%

5.3 Criterios de información y test de cointegración

En el anexo 2 se pueden observar los criterios de información tanto para el modelo que incluye variables exógenas (formación bruta de capital y la fuerza laboral), como para el modelo sin ninguna variable exógena. En ambos modelos se obtiene el mismo resultado, donde tanto el criterio de información Akaike (AIC) como el de Hannan-Quinn (HQ) escogen como mejor modelo el de 4 rezagos mientras que el criterio Schwarz selecciona un modelo con dos rezagos. En este caso escogeremos el modelo AIC, ya que aunque el criterio de información BIC tiende a escoger modelos más parsimoniosos, este suele no desempeñarse bien en muestras pequeñas (Hurvich y Tsai, 1990).

Una vez sabemos cuál será el orden de nuestro modelo se procede a examinar la posible existencia de relaciones de cointegración entre las variables, donde para ello se desarrollara el test de Johansen. Una de las principales ventajas de emplear este test es que sabremos el número de relaciones de cointegración entre las variables, como se puede observar en el anexo 2, mirando tanto con el estadístico traza (Trace statistic) como con el máximo valor propio (Max Eigen-value) se puede concluir la existencia de al menos una relación de cointegración entre las variables de PIB, consumo de energía renovable y no renovable en ambos tipos de modelos.

5.4 Estimaciones de los parámetros de largo plazo

Una vez sabemos la existencia de una relación de cointegración entre las variables, se procede a realizar el modelo VECM para ambos tipos de modelos, donde el primer paso será realizar pruebas de diagnóstico sobre los residuales y cómo se puede ver en las tablas 2 y 3, ambos modelos muestran tener residuales que siguen una distribución normal dado que no se rechaza hipótesis nula. Por lo tanto la estimación para ambos modelos es:

Modelo A: Modelo que incluye como variables endógenas el PIB, el consumo de energía renovable y el consumo de energía no renovable, como exógenas se incluye un rezago de las variables de formación bruta de capital y fuerza laboral transformadas en sus primeras diferencias.

Modelo B: Este será un modelo benchmark, en el cual solo se tendrán en cuenta las variables endógenas (PIB, ER, ENR).

Se decide incluir las variables de FBC y FL como exógenas dado que al tener una serie de tiempo pequeña, estamos limitados por los grados de libertad del modelo.

Tabla 2

Vector Error Correction Terms

Cointegrating equation t-statistics in []				
Modelo A	PIB(-1)	ER(-1)	ENR(-1)	C
	1.00000	3.247939 [3.18302]	-0.647639 [-1.34516]	-90.26220
ECT	D(PIB)	D(ER)	D(ENR)	
	-0.026620 [-0.64924]	-0.038459 [-0.23034]	0.132240 [1.93767]	

Tabla 3

Vector Error Correction Terms

Cointegrating equation t-statistics in []				
Modelo B	PIB(-1)	ER(-1)	ENR(-1)	C
	1.00000	3.080810 [3.54860]	-0.444223 [0.43336]	-91.43701
ECT	D(PIB)	D(ER)	D(ENR)	
	-0.029995 [-0.97369]	0.068972 [0.53633]	0.139568 [2.66981]	

Como se puede ver en ambos modelos, el coeficiente estimado para la energía renovable muestra ser estadísticamente significativo y muestra una relación negativa con el PIB tanto en el modelo A como en el modelo B, evidenciando así como históricamente Colombia, en las tendencias, no sustituye energía no renovable por renovable, en donde si interpretamos el coeficiente de ER en el

modelo A, ante un incremento de un 1% en la ER el PIB caería en 3.2%. Por otro lado, la energía no renovable muestra una relación positiva con el PIB, sin embargo su coeficiente no es estadísticamente significativo.

Finalmente, el término de corrección de error nos dará la velocidad de ajuste con la que nuestro modelo retornara al equilibrio en el periodo actual ante desviaciones en el largo plazo del periodo anterior. El término de corrección de error para la ecuación en donde la energía no renovable es la variable dependiente es positivo y estadísticamente significativo(a un nivel del 10% en el modelo A y 5% en el modelo B) indicando que hay una convergencia hacia un equilibrio de largo plazo, en donde ante una desviación en el largo plazo en el periodo anterior, este será corregido en un 13,3% en el siguiente periodo.

5.5 Estimación de la matriz de correlación de los residuales

Tabla 4
Matriz de Correlación de los Residuales del modelo A

	PIB	ER	ENR
PIB	1.000000	0.272769	0.750805
ER	0.272769	1.000000	0.084853
ENR	0.750805	0.084853	1.000000

Matriz de Correlación de los Residuales del modelo B

	PIB	ER	ENR
PIB	1.000000	0.295604	0.595267
ER	0.295604	1.000000	-0.115118
ENR	0.595267	-0.115118	1.000000

Como podemos observar en la tabla 4, se evidencia una clara correlación de los residuales del modelo, es decir no se obtiene una matriz diagonal de los residuales tanta para el modelo A como para el modelo B. Por lo que antes de mirar las funciones de impulso respuesta, será necesario aplicar la metodología de la descomposición de Cholesky, donde estimando una matriz triangular inferior podemos corregir este problema (Lütkepohl, 1991). Sin embargo, cuando se usa esta metodología se debe prestar especial atención al orden que usaremos en las variables, donde se debe escoger de la variable más exógena a la más endógena en el ordenamiento.

En este caso vamos a asumir que las variables van a estar ordenadas de la siguiente manera: ER ENR PIB, basándonos en el supuesto de que el PIB no afectara la energía renovable en el corto plazo, ya que crecimientos del PIB no afectarían la oferta de energía renovable al menos en el corto plazo. Como lo explica Amundsen y Bergman (2002) toma más de un año construir una planta de energía, por lo que en el corto plazo es difícil aumentar la máxima capacidad que las plantas ya instaladas proveen. Adicionalmente, Amundsen y Bergman (2002) encuentran que en países como Noruega y Suecia donde las Hidroeléctricas tienen un peso importante, la capacidad de producción de energía proveniente de esta fuente estará restringida más por su capacidad instalada que por los reservorios de agua que tengan estos países. Por lo que como vemos, al menos en el corto plazo es difícil que incrementos en el PIB afecten a la energía renovable y no renovable.

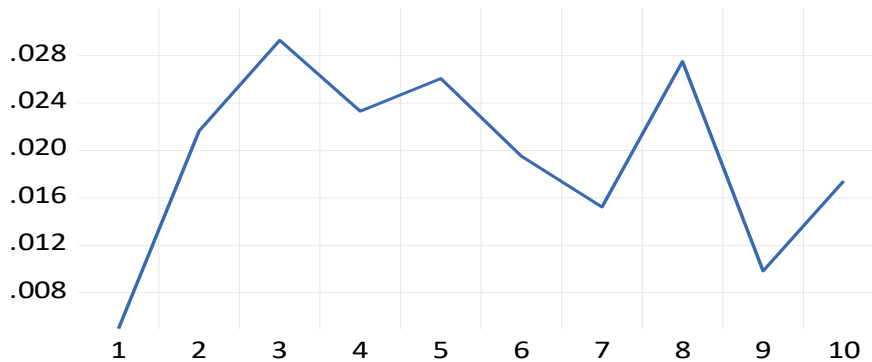
5.6 Función de impulso respuesta

La función de impulso respuesta nos muestra que un choque positivo de una desviación estándar en la energía renovable lleva a un incremento del PIB en los tres primeros años, luego ya se empiezan a percibir fluctuaciones. Más específicamente, un incremento de 1% en la energía renovable va a significar un incremento de 0,03% en el PIB en los tres primeros años, por lo tanto podemos inferir que hay una relación positiva en el corto plazo entre ambas variables.

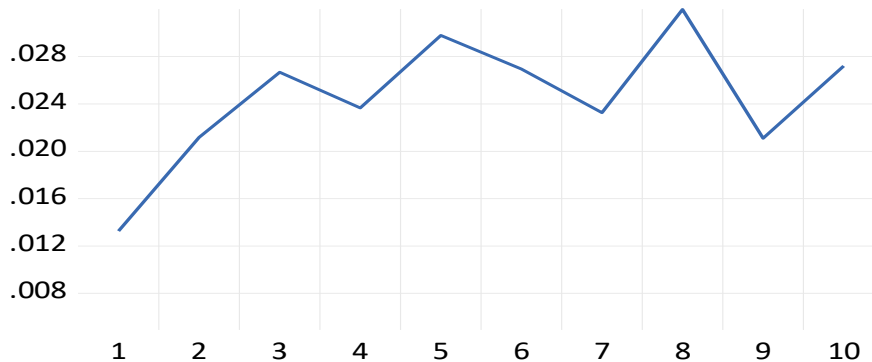
Por otro lado, ante un choque positivo de una desviación estándar en la energía no renovable lleva a un incremento del PIB en los tres primeros años, luego ya se empiezan a percibir fluctuaciones al igual que el caso anterior, sin embargo, estas fluctuaciones no son tan fuertes. Más específicamente, un incremento de 1% en la energía no renovable va a significar un incremento de 0,025% en el PIB en los tres primeros años, por lo tanto podemos inferir que tanto la energía renovable como la no renovable tienen una relación positiva con el PIB en el corto plazo.

Response to Cholesky One S.D. (d.f. adjusted) Innovations

Response of PIB to ER



Response of PIB to ENRKH



Finalmente, en el anexo 3 podemos ver como los resultados son robustos al ordenamiento, dado que cuando cambia el ordenamiento de las variables no se perciben cambios significativos en las salidas de impulso respuesta.

6. Conclusiones

El fomentar la producción y consumo de energías renovables es un tema que ha tomado gran relevancia en el mundo, dado que como sabemos las energías no renovables implican grandes externalidades negativas sobre todo ambientales. Adicionalmente, Colombia es un país donde el consumo de energía proviene principalmente fuentes como el petróleo y el gas natural, por lo que primero, estas son tipos de energía no renovable que traen grandes afectaciones al medio ambiente y segundo, sobre todo el petróleo es un commodity que ha mostrado a través de la historia una alta volatilidad en sus precios, por lo que el incentivar una transición hacia el consumo de energías renovables haría que dejáramos de ser susceptibles ante la volatilidad de precios de este commodity. Finalmente, se debe tener en cuenta que la vida útil de las reservas existentes a 2019 del país son de 6 años para el petróleo y 8 años para las reservas de gas natural (Hidrocarburos, 2019), siendo estas las principales fuentes usadas para satisfacer la demanda interna de energía, por lo que es importante que el país busque fuentes alternativas, permitiendo así dejar de ser tan dependientes de las fuentes fósiles y por ende poder satisfacer la demanda de energía en el futuro de manera óptima sin estar sujetos a encontrar nuevas reservas tanto de petróleo como de gas natural.

En esta investigación se buscó explorar la relación de corto y largo plazo del consumo de energía renovable y no renovable con el crecimiento económico de Colombia durante el periodo de 1990-2015. Primero se realizó el test de Johansen para verificar la existencia de relaciones de cointegración entre las variables, luego se realizó el modelo VECM junto con las estimaciones de las funciones de impulso respuesta para mirar la dinámica de la relación de corto y largo plazo entre las variables.

Los resultados sugieren que la energía renovable tiene una relación negativa con el crecimiento económico en el largo plazo, mientras que la energía no renovable parece tener un impacto positivo en el crecimiento económico, sin embargo su coeficiente no es estadísticamente significativo. Los resultados son similares con la investigación realizada por Ocal y Aslan (2013) para el caso de Turquía, donde como lo explica el autor la energía renovable tiene costos altos en comparación a las energías no renovables lo que dificulta su producción y consumo en países en desarrollo, mientras que varios estudios han demostrado como los países de altos ingresos muestran niveles más altos de producción y consumo de energías renovables.

Adicionalmente, previamente se observó como para Colombia el consumo de energía renovable ha ido cayendo en el tiempo, mientras que el consumo de fuentes como petróleo y el gas natural han ido tomando relevancia en el país. En donde según los resultados, en cuanto a recomendaciones de política pública, pareciera ser que el tener limitaciones en fuentes de energía renovables parece no afectar el crecimiento económico en Colombia, sin embargo, es importante

resaltar que para una extensión futura de esta investigación valdría la pena mirar qué relación tienen estas dos fuentes de energías con las emisiones de CO_2 .

Finalmente, a través de las funciones de impulso respuesta se puede observar la relación de corto plazo entre las variables, en donde ante un impulso en la energía renovable y no renovable el PIB muestra un incremento sobre todo en los tres primeros años, por lo que se evidencia una dinámica de corto plazo positiva entre el PIB y ambos tipos de energías.

Anexo 1

Estadísticas descriptivas del PIB por periodo de tiempo
(US\$ Mil de millones)

Año	Media	Desviación Estándar
1990-1994	159,2	11,1
1995-1999	189,8	4,9
2000-2004	203,6	10,9
2005-2009	256,9	18,4
2010-2015	326,1	27,6

Fuente: Banco Mundial

Estadísticas descriptivas del FBC por periodo de tiempo
(US\$ Mil de millones)

Año	Media	Desviación Estándar
1990-1994	26,8	10,6
1995-1999	36,3	8,3
2000-2004	30,6	4,8
2005-2009	52,8	7,9
2010-2015	79,9	11,2

Fuente: Banco Mundial

Estadísticas descriptivas de la fuerza laboral por periodo de tiempo
(Número de personas)

Año	Media	Desviación Estándar
1990-1994	14.907.849	646.142
1995-1999	16.963.659	607.941
2000-2004	18.934.616	607.367
2005-2009	20.337.180	845.028
2010-2015	23.811.748	945.352

Fuente: Banco Mundial

Estadísticas descriptivas del consumo de energía renovable
por periodo de tiempo (Mil de millones de kw/h)

Año	Media	Desviación Estándar
1990-1994	78,8	4,3
1995-1999	71,4	11,7
2000-2004	64,9	3,0
2005-2009	71,5	3,1
2010-2015	72,4	2,7

Fuente: Banco Mundial

Estadísticas descriptivas del consumo de energía no renovable
por periodo de tiempo (Mil de millones de kw/h)

Año	Media	Desviación Estándar
1990-1994	210,1	14,9
1995-1999	248,6	14,9
2000-2004	250,7	2,9
2005-2009	259,4	4,2
2010-2015	334,5	44,5

Fuente: Agencia Internacional de Energía

Anexo 2

Criterios de Información, Test de Cointegración(Test de Johansen) y test de Normalidad sobre residuales del modelo

Modelo A

VAR lag Order Selection Criteria & Johansen- Juselius cointegration test

Lag lenght selection						
Endogenous variables: PIB ER ENR						
Exogenous variables: C D(FBC(-1)) D(FL(-1))						
Lag	LogL	LR	FPE	AIC	SC	HQ
0	56.40584	NA	2.71e-06	-4.309622	-3.863286	-4.204479
1	134.8099	114.0423*	5.12e-09	-10.61909	-9.72641*	-10.40880
2	141.2585	7.620958	7.21e-09	-10.38713	-9.048125	-10.07170
3	157.3229	14.60401	4.85e-09	-11.02935	-9.244009	-10.60878
4	173.8812	10.53714	4.04e-09*	-11.7164*	-9.484797	-11.1907*
Johansen-Juselius cointegration test						
Trace						
Maximum rank	Eigen value	Trace statistic	Critical Value level	5%	Prob**	
None*	0.759634	46.38622	35.19275		0.021	
At most 1	0.403632	15.02319	20.26184		0.2250	
At most 2	0.152932	3.651438	9.164546		0.4665	
Max-eigen value						
Maximum rank	Eigen value	Max-eigen statistic	Critical Value level	5%	Prob**	
None*	0.759634	31.36303	22.29962		0.0021	
At most 1	0.403632	11.37176	15.89210		0.2255	
At most 2	0.152932	3.651438	9.164546		0.4665	

*Indica el número de rezagos seleccionado. Log L: Log Likelihood, LR:Log likelihood ratio, AIC:Akaike Information Criteria, SIC:Schwarz information criterion, y HQ: Hannan-Quinn information criterion.

VAR Residual Normality test

Orthogonalization: Cholesky (Lutkepohl)				
Null Hypothesis: Residuals are multivariate normal				
Component	Skewness	Chi-sq	df	Prob*
1	-0.482402	0.853276	1	0.3556
2	0.697381	1.783246	1	0.1818
3	0.083195	0.025378	1	0.8734
Joint		2.661901	3	0.4467
Component	Kurtosis	Chi-sq	df	Prob.
1	3.786254	0.566679	1	0.4516
2	4.517654	2.111333	1	0.1462
3	2.181266	0.629567	1	0.4275
Joint		3.307580	3	0.3466
Component	Jarque-Bera	df	Prob	
1	1.419956	2	0.4917	
2	3.894579	2	0.1427	
3	0.654946	2	0.7207	
Joint	5.969480	6	0.4266	

Modelo B

VAR lag Order Selection Criteria & Johansen- Juselius cointegration test

Lag length selection						
Endogenous variables: PIB ER ENR						
Lag	LogL	LR	FPE	AIC	SC	HQ
0	51.72341	NA	2.39e-06	-4.429400	-4.280622	-4.394353
1	128.4604	125.5697	5.13e-09	-10.58731	-9.992198*	-10.44712
2	137.9277	12.90994	5.20e-09	-10.62979	-9.588343	-10.38446
3	153.6698	17.17313*	3.26e-09	-11.24270	-9.754920	-10.89223
4	166.6540	10.62345	3.11e-09*	-11.60491*	-9.670786	-11.14929*
Johansen-Juselius cointegration test						
Trace statistic						
Maximum rank	Eigen value	Trace statistic	Critical Value	5%	Prob**	
None*	0.685781	33.68054	29.79707	level	0.0170	
At most 1	0.283342	8.211935	15.49471		0.4430	
At most 2	0.039320	0.882500	3.841465		0.3475	

Max-eigen value				
Maximum rank	Eigen value	Max-eigen statistic	Critical Value 5% level	Prob**
None*	0.685781	25.46860	21.13162	0.0115
At most 1	0.283342	7.329435	14.26460	0.4509
At most 2	0.039320	0.882500	3.841465	0.3475

*Indica el número de rezagos seleccionado. Log L: Log Likelihood, LR:Log likelihood ratio, AIC:Akaike Information Criteria, SIC:Schwarz information criterion, y HQ: Hannan-Quinn information criterion.

VAR Residual Normality test

Orthogonalization: Cholesky (Lutkepohl)

Null Hypothesis: Residuals are multivariate normal

Component	Skewness	Chi-sq	df	Prob*
1	-0.506439	0.940430	1	0.3322
2	0.549495	1.107129	1	0.2927
3	0.278299	0.283985	1	0.5941
Joint		2.331544	3	0.5065

Component	Kurtosis	Chi-sq	df	Prob.
1	3.607746	0.338576	1	0.5607
2	3.951173	0.829336	1	0.3625
3	2.698131	0.083531	1	0.7726
Joint		1.251443	3	0.7407

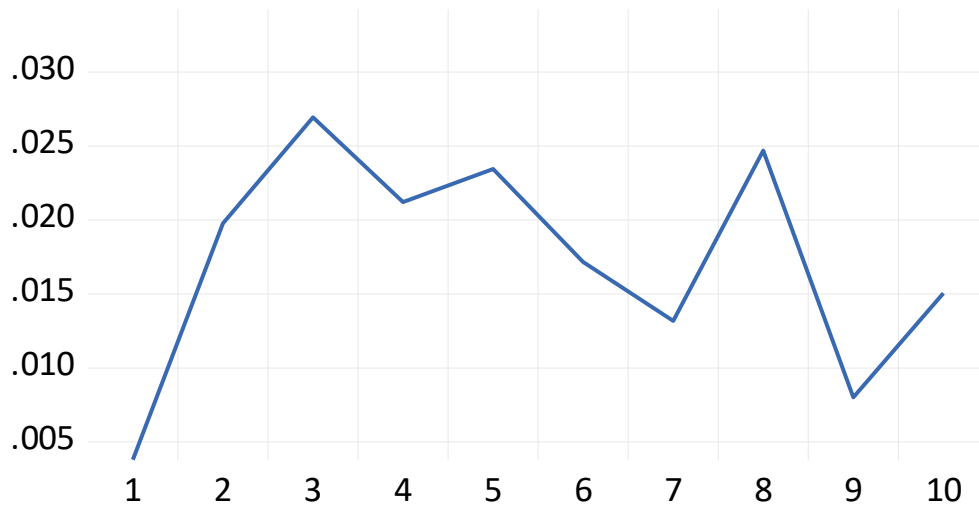
Component	Jarque-Bera	df	Prob
1	1.279006	2	0.5276
2	1.936465	2	0.3798
3	0.367516	2	0.8321
Joint	3.582988	6	0.7329

Anexo 3

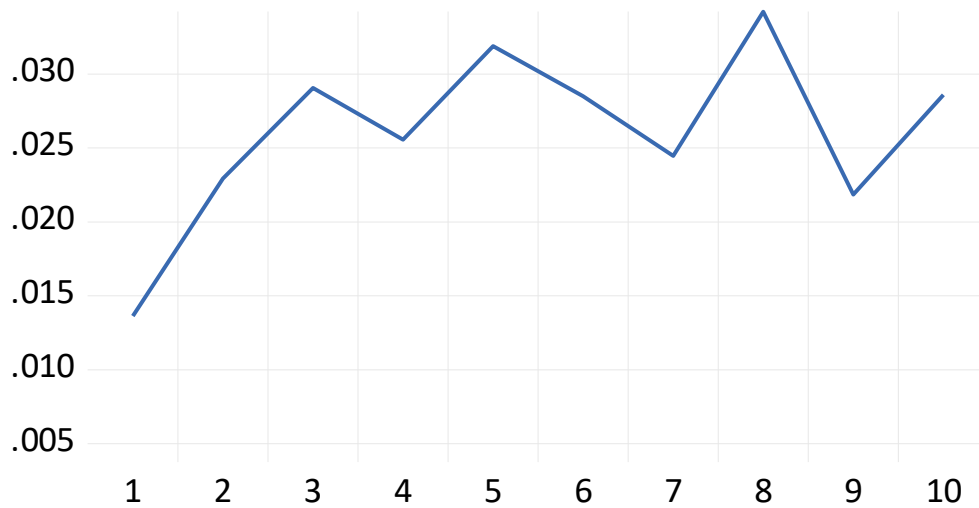
Ordenamiento: ENR ER PIB

Response to Cholesky One S.D. (d.f. adjusted) Innovations

Response of PIB to ER



Response of PIB to ENRKH



Anexo 4

Modelo de crecimiento endógeno

Algunos investigadores han desarrollado modelos de crecimiento económico en donde se incluye la variable de energía, para así ver qué relación tiene esta con el PIB. Berk y Yetkiner (2014) fueron uno de estos autores, quienes desarrollaron un modelo de crecimiento endógeno bajo los supuestos de una economía cerrada sin gobierno, en la cual se usa una función de utilidad tipo CIES (Constant intertemporal elasticity substitution function) en donde a diferencia del modelo de crecimiento tradicional, en este se asume que existen dos insumos de producción, los cuales son el capital y la energía, a su vez se asume la existencia de dos sectores económicos, los cuales son los bienes de inversión y los bienes de consumo.

En el modelo el autor plantea las siguientes funciones de producción:

Por el lado de los bienes de inversión se seguirá la siguiente función de producción:

$$1. Y_I = A K_I$$

A: Productividad total de los factores

K_I : Esta variable representa una versión ampliada del capital físico empleado para la producción de los bienes de inversión.

Mientras que para la producción de los bienes de consumo se usaran como inputs el capital y la energía, asumiendo retornos constantes de la tecnología.

$$2. Y_c = K_c^\alpha E^{1-\alpha}$$

E: Energía empleada como input para la producción de bienes de consumo

K_c : Esta variable representa una versión ampliada del capital físico empleado para la producción de los bienes de consumo.

Primero el autor desarrolla el problema optimización de las firmas, en donde su estructura de beneficios estará dada de la siguiente forma:

Función de beneficios de los bienes de inversión

$$\pi_I = A P_I K_I - R_i K_I$$

P_i : Precio de los bienes de inversión

R_i : Costo de uso o alquiler del capital físico utilizado en la producción de bienes de inversión.

Función de beneficios de los bienes de consumo

$$\pi_c = ((P_c K_c E^{1-\alpha}) - (R_c K_c) - (R_E E))$$

P_c : Precio de los bienes de consumo

R_c : Costo de uso o alquiler del capital físico utilizado en la producción de bienes de consumo

R_E : Precio nominal de la energía

A través de las condiciones de primer orden desarrollamos el problema de optimización de las firmas.

$$3. a \frac{d\pi_I}{dk} = AP_k - R_I = 0$$

$$3. b \frac{d\pi_c}{dk} = P_c \alpha K_c^{\alpha-1} E^{1-\alpha} - R_c = 0$$

Por la condición de arbitrariedad se tiene $R_I = R_c$

$$AP_k - R_I = P_c \alpha K_c^{\alpha-1} E^{1-\alpha} - R_c$$

$$AP_I = \alpha P_c K_c^{\alpha-1} E^{1-\alpha}$$

$P = \frac{P_I}{P_c}$: Esto nos muestra el precio relativo de los bienes de inversión en términos de bienes de consumo

Ahora bien, el costo real del capital será:

$$4. RR \rightarrow AP = \alpha K^{\alpha-1} E^{1-\alpha}$$

Si dinamizamos esta ecuación aplicando logaritmos obtenemos;

$$5. \hat{P} = (\alpha - 1)\hat{K}_c + (1-\alpha)\hat{E}$$

\hat{P} : Representa la tasa de crecimiento del precio relativo de los bienes de inversión usados por el sector de bienes de consumo.

\hat{K}_c : Representa la tasa de crecimiento del precio relativo de los bienes de capital usados por el sector de bienes de consumo.

\hat{E} : Representa la tasa de crecimiento del precio relativo de los bienes de energía usados por el sector de bienes de consumo.

En donde, la definición estándar del costo de uso del capital sigue la siguiente forma:

$$6. RR \equiv (r + \delta - \hat{P}) P$$

r : Tasa de interés real en términos del precio de los bienes del consumo

δ : Tasa de depreciación del capital

\hat{P} : Perdida de capital dados cambios en el precio.

Como segundo Berk y Yetkiner (2014) desarrolla el problema de optimización del consumidor, el cual tendrá la siguiente función de utilidad intertemporal:

$$U_{(C_t)} = \int_0^{\infty} e^{-\rho t} \frac{C^{1-\theta} - 1}{1-\theta}$$

ρ : Tasa subjetiva de descuento

$\frac{C^{1-\theta}-1}{1-\theta}$: Función de utilidad instantánea del consumidor, la cual muestra el nivel de utilidad que tendrá el consumidor en un instante de tiempo dado su nivel de consumo.

$\frac{1}{\theta}$: Elasticidad de sustitución intertemporal

Por lo que el Hamiltoniano seguirá la siguiente forma:

$$H = e^{-\rho t} \frac{C^{1-\theta}-1}{1-\theta} + \lambda(r \text{ activos} + qE - C)$$

Activos: Representan el stock financiero del consumidor

r: Tasa de interés real

qE: En el modelo se asume que los consumidores son propietarios del total de los recursos energéticos.

Las CPO resultantes del modelo son:

$$\frac{dH}{dC} = e^{-\rho t} C^{-\theta} - \lambda = 0 \quad *$$

Por lo tanto, despejando λ

$$\mathbf{7.a} \quad \lambda = e^{-\rho t} C^{-\theta}$$

$$\mathbf{7.b} \quad - \frac{dH}{d \text{activos}} = \dot{\lambda} = \lambda r \quad *$$

$$\mathbf{7.c} \quad \frac{dH}{d\lambda} = r \text{ activos} + qE - C \quad *$$

Adicionalmente, otra condición que debe cumplirse en el modelo es la de transversalidad que garantiza que cuando t tienda a infinito el valor de los activos va a tender a cero o este no va a valer nada para este momento.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \lambda_t \text{ activos} = 0$$

En este punto, se dinamizará el modelo, es decir se aplicará logaritmo y derivará con respecto al tiempo, dinamizando la ecuación 7.a tenemos:

$$\lambda = e^{-\rho t} C^{-\theta}$$

$$\log \lambda = \rho t - \theta \log C$$

$$\mathbf{8.} \quad \frac{\dot{\lambda}}{\lambda} = \rho_t + \theta \frac{\dot{C}}{C}$$

Ahora reemplazando ecuación 7.b en ecuación 8 tenemos:

$$\frac{\lambda}{\lambda} r = \rho_t + \theta \frac{\dot{C}}{C}$$

Despejando $\frac{\dot{C}}{C}$ llegamos a:

$$\mathbf{9.} \frac{\dot{C}}{C} = \frac{1}{\theta} (r - \rho)$$

Donde en el equilibrio los activos financieros deben ser iguales al capital físico si se asume una economía cerrada sin gobierno.

$$\text{Activos} = \dot{P} K + P \dot{K}$$

De las CPO de la optimización de las firmas se obtiene:

$$q = (1 - \alpha) K_c^\alpha E^{-\alpha}$$

q: Precio real de la energía

Como ya vimos anteriormente, la ecuación del costo real del capital es:

$$RR \rightarrow AP = \alpha K^{\alpha-1} E^{1-\alpha}$$

Dinamizando esta ecuación se obtiene:

$$\text{Log A} + \text{Log P} = \text{Log } \alpha + (\alpha - 1) \text{Log } K_c + (1 - \alpha) \text{Log E}$$

$$\hat{P} = (\alpha - 1) \hat{K}_c + (1 - \alpha) \hat{E}: \text{Tasa de crecimiento del precio relativo.}$$

Trayendo de nuevo la definición estándar del costo de uso del capital e igualando las ecuaciones 4 y 6 se obtiene:

$$AP = (r + \delta - \hat{P}) P$$

$$A = r + \delta - \hat{P}$$

$$r = A - \delta + \hat{P}$$

Usando esa información, se puede transformar la restricción presupuestaria del consumidor.

$$K_t = r \text{ activos} + q E - C$$

$$\dot{P} K + P \dot{K} = P K (A - \delta + \hat{P}) + (1 - \alpha) K_c^\alpha E^{-\alpha} E - K_c^\alpha E^{1-\alpha}$$

$$\dot{P} K + P \dot{K} = P K (A - \delta + \hat{P}) - (1 - \alpha) K_c^\alpha E^{1-\alpha} - K_c^\alpha E^{1-\alpha}$$

$$P \dot{K} = P K (A - \delta) - \alpha K_c^\alpha E^{1-\alpha}$$

Ahora si se sustituye AP por $\alpha K^{\alpha-1} E^{1-\alpha}$ (ver ecuación 4) y al dividir ambas partes por P, obtendremos:

$$P \dot{K} = P K (A - \delta) - AP$$

$$10. \dot{K} = K(A - \delta) - A K_c$$

Por lo tanto, el problema de optimización del consumidor se obtiene las ecuaciones 9 y 10. Donde finalmente, como se evidencia en (Berk y Yetkiner, 2014) el modelo se resolverá a través de las condiciones de primer orden derivadas de los problemas de optimización de las firmas y del consumidor.

Recordemos que $r = A - \delta + \hat{P}$

Reemplazando r en 9

$$\frac{\dot{c}_t}{c_t} = \frac{1}{\theta} (A - \delta + \hat{P} - \rho)$$

Y sustituyendo \hat{P} (Ver ecuación 5) obtenemos:

$$\frac{\dot{c}}{c} = \frac{1}{\theta} (A - \delta + (\alpha - 1) \hat{K}_c + (1 - \alpha) \hat{E} - \rho)$$

Por la ecuación 2 sabemos que $Y_c \equiv C = K^\alpha E^{1-\alpha}$, dinamizando la ecuación obtenemos:

$$11. \hat{Y} = \hat{C} = \alpha \hat{K}_c + (1 - \alpha) \hat{E}$$

Reemplazo ecuación 11 en $\frac{\dot{c}_t}{c_t}$

$$\alpha \hat{K}_c + (1 - \alpha) \hat{E} = \frac{1}{\theta} (A - \delta + (\alpha - 1) \hat{K}_c + (1 - \alpha) \hat{E} - \rho)$$

$$\hat{K}_c (1 - \alpha + \Theta \alpha) + \hat{E} (1 - \alpha)(\Theta - 1) = A - \delta - \rho$$

Por otro lado, de la ecuación 3b sabemos que $R_E = P_c (1 - \alpha) K_c^\alpha E^{-\alpha}$, ahora bien, dividiendo por el nivel de precios obtenemos

$q = (1 - \alpha) K_c^\alpha E^{1-\alpha}$, Ahora dinamizando la ecuación obtenemos:

$\hat{q} = \alpha \hat{K}_c - \alpha \hat{E}$: Tasa de crecimiento del Precio Real de la Energía

Finalmente, se obtiene la tasa de crecimiento de la energía, el capital y el consumo (Berk y Yetkiner, 2014).

$$12.a \hat{E} = \frac{1}{\theta} (A - \delta - \rho - \frac{(1 - \alpha + \alpha x \theta)}{\alpha} \hat{q}) \equiv g'$$

$$12.b K_c^\alpha = \frac{1}{\theta} (A - \delta - \rho - \frac{(1 - \alpha)(1 - \theta)}{\alpha} \hat{q}) \equiv g$$

$$12.c \hat{C} = \hat{Y}_c = \frac{1}{\theta} (A - \delta - \rho - \frac{(1 - \alpha)}{\alpha} \hat{q}) \equiv \alpha g + (1 - \alpha) g'$$

En donde la ecuación 12.a y 12.c muestran como los precios de la energía afectan negativamente en el crecimiento del uso de la energía. De acá en adelante estará el supuesto de que:

$A - \delta - \rho > \frac{(1 - \alpha + \alpha x \theta)}{\alpha} > \frac{(1 - \alpha)(1 - \theta)}{\alpha} > \frac{(1 - \alpha)}{\alpha}$ ya que bajo este supuesto se garantizara que todas las tasas de crecimiento sean positivas. Y bajo este supuesto se seguirá desarrollando lo que queda del modelo.

Ahora bien usando la igualdad:

$$\hat{P} = (\alpha - 1) \hat{K}_c + (1 - \alpha) \hat{E} \text{ Se puede mostrar que:}$$

$\hat{P} = \left(\frac{1-\alpha}{\alpha}\right) \hat{q}$: Si la tasa de crecimiento del precio de la energía es positiva, el precio relativo de los bienes de inversión en términos de los bienes de consumo se va a aproximar a cero

Por otro lado, de la igualdad de $r = A - \delta + \hat{P}$ y al reemplazar \hat{P} se obtiene lo siguiente:

$$r = A - \delta - \left(\frac{1-\alpha}{\alpha}\right) \hat{q}$$

Finalmente, de la ecuación obtenida de las condiciones de primer orden del problema de optimización del consumidor tenemos:

$$\dot{\lambda} = -\lambda + r$$

$$\dot{\lambda} = -\left(A - \delta - \left(\frac{1-\alpha}{\alpha}\right) \hat{q}\right) \lambda$$

En este punto (Berk y Yetkiner, 2014) a través del método del factor integrante resuelve la ecuación 10:

$$\dot{K} = K(A - \delta) - A K_c$$

$$K_t = \frac{A K_c(0)}{A - \delta - g} e^{gt} + \text{constante} e^{(A - \delta)t}$$

Donde como lo explica Berk y Yetkiner (2014) a través condición de transversalidad se puede determinar el valor de la constante y si se sustituyen los valores de λ y Activos = PK en la condición de transversalidad $\lim_{t \rightarrow \infty} (\lambda_t \text{ activos}) = 0$ nos daría un valor para la constante de cero. Finalmente, el stock total de capital está dado por:

$$K_t = \frac{A K_c(0)}{A - \delta - g} e^{gt}$$

Como último, se determina la trayectoria temporal del PIB real, donde se debe tener en cuenta que el PIB nominal en términos del consumo es definido como:

$$NPIB = P_I Y_I + P_C Y_C \rightarrow Y = P Y_1 + Y_C$$

Por lo tanto el PIB real será:

$$Y = \text{constante} e^{(\alpha g + (1-\alpha)Gg')t}$$

constante = $P(0) Y_I + (K_c(0))^\alpha E(0)^{1-\alpha}$, será la ecuación que contendrá los valores iniciales del modelo.

Como conclusión del modelo, (Berk y Yetkiner (2014)) muestran como el stock total de capital, capital de inversión y capital de consumo todos crecen a una tasa g , mientras que la demanda de energía crece a una tasa g' y el PIB real y el consumo crecen a una tasa de $\alpha g + (1 - \alpha) g'$, la cual

es la tasa de crecimiento ponderada de la energía y el capital físico. Finalmente, se evidencia como los precios de la energía tienen una relación negativa en todas las tasas de crecimiento.

Bibliografía

- Al-mulali, U., Fereidouni, H., Lee, J., y Che Sab, C. (2012). Examining the bi-directional long run relationship between renewable energy consumption and GDP growth. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Amri, F. (2017). The relationship amongst energy consumption (renewable and nonrenewable), and GDP in Algeria. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Amundsen, E., y Bergman, L. (2002). Will Cross-Ownership Re-Establish Market Power in the Nordic Power Market. *The Energy Journal*, 23.
- Bartleet, M., y Gounder, R. (2010). Energy consumption and economic growth in New Zealand: Results of trivariate and multivariate models. *Energy Policy*.
- Berk, I., y Yetkiner, H. (2014). Energy Prices and economic growth in the long run: Theory and evidence. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Bhattacharya, M., Paramati, S., Ozturk, I., y Bhattacharya, S. (2016). The effect of renewable energy consumption on economic growth : evidence from top 38 countries. *Applied Energy*.
- Campo, J., y Olivares, W. (2013). RELACIÓN ENTRE LAS EMISIONES DE CO₂, EL CONSUMO DE ENERGÍA Y EL PIB: EL CASO DE LOS CIVETS.
- Campo, J., y Sarmiento, V. (2011). Un modelo de corrección de errores para la relación entre el consumo de energía y el PIB en Colombia (1970-2009).
- Cortés, S., y Arango, A. (2017). Energías renovables en Colombia: una aproximación desde la economía. *Revista Ciencias Estratégicas*.
- Churchill, S., y Ivanovski, K. (2019). Electricity consumption and economic growth across Australian states and territories. *Applied Economics*.
- Dickey, D., y Fuller, W. (1979). Distribution of the estimators for autoregressive time series with a unit root. *J Am Stat Assoc*.
- Enders, W. (2005). *Applied Econometrics Time Series*.
- Engle, R., y Granger, J. (1987). Co-Integration and Error Correction: Representation, Estimation, and Testing. *Econometrica*.
- Fernandes, K., y Reddy, Y. (2020). Energy Consumption and Economic Growth in Newly Industrialised Countries of Asia. *International Journal of Energy Economics and Policy*.
- Hidrocarburos, A. N. d. (2019). Sector Hidrocarburos. <https://www.minenergia.gov.co/>.
- Hurvich, C., y Tsai, C. (1990). The impact of model selection on inference in linear regression. *The American Statistician*.
- Johansen, S. (1991). Estimation and Hypothesis Testing of Cointegration Vectors in Gaussian Vector Autoregressive Models. *Econometrica*.
- Lütkepohl, H. (1991). *Introduction to multiple time series analysis*.
- Magazzino, C. (2015). Energy consumption and GDP in Italy: cointegration and causality analysis. *Environment, Development and Sustainability*.
- Mahadevan, R., y Asafu-Adjaye, J. (2007). Energy consumption, economic growth and prices: A reassessment using panel VECM for developed and developing countries. *Energy Policy*.
- Ocal, O., y Aslan, A. (2013). Renewable energy consumption- economic growth nexus in Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Pesaran, H. (1997). The Role of Economic Theory in Modelling the Long Run. *The Economic Journal*.
- Pfaff, B. (2011). *Analysis of Integrated and Cointegrated Time Series with R*.
- Phillips, P., y Perron, P. (1988). Testing for a unit root in time series regression. *Biometrika*.
- Rafindadi, A., y Ozturk, I. (2017). Impacts of renewable energy consumption on the German economic growth: Evidence from combined cointegration test. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.

- Reyes, M., Garcés, E., y Belage, S. (2005). El plan de masificación de gas natural en Colombia: Una década de aciertos y errores.
- Shahbaz, M., Tang, C., y Shabbir, M. (2011). Electricity consumption and economic growth nexus in Portugal using cointegration and causality approaches. *Energy Policy*.
- UPME. (2015). Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia.