

Crisis climática: modelado de políticas que favorezcan la penetración de tecnologías limpias

Climate crisis: policy modeling to assess the penetration of clean technologies

Laura M. Cárdenas A., MSc., Isaac Dyner R., PhD y Carlos J. Franco C., PhD
Universidad Nacional de Colombia- Sede Medellín, CeIBA
lmcardenasa, cjfranco, idyner@unal.edu.co

--Recibido para revisión 2012, aceptado fecha, versión final 2012--

Resumen— La problemática del aumento de Gases de Efecto Invernadero en la atmósfera y su efecto en el cambio climático ha sido preocupación de científicos, gobiernos e incluso para la industria, y debido a su magnitud y a la importancia seguirá siendo tema de investigación hasta que el mundo adopte una nueva forma de vida en todos los sectores de la sociedad. A esta nueva forma de vida se le ha asociado con el término “desarrollo bajo en carbono” y actualmente algunos gobiernos lo han acogido bajo una estrategia nacional de cambio climático.

Dichas estrategias cuentan con programas y políticas específicas para llevarlas a cabo, concentrándose en el desarrollo de tecnologías bajas en carbono. En el caso colombiano si bien se cuenta con los recursos naturales apropiados para el desarrollo de tecnologías no convencionales, las actuales políticas e instituciones colombianas aún carecen de los instrumentos adecuados que permitan combatir las barreras de mercado e institucionales que impiden que Colombia se dirija hacia una “economía baja en carbono”. En este artículo se presentan posibles políticas e instituciones para Colombia, posteriormente se realiza su modelamiento con dinámica de sistemas para su evaluación y discusión. Los resultados preliminares ilustran cómo con un elemento de política que incentive las tecnologías bajas en carbono a través de subsidios se logra desarrollar dichas tecnologías en el país y que tal vez un elemento de política donde se plantee un impuesto al carbono puede ser una medida tímida para la penetración de tecnologías bajas en carbono en el mercado eléctrico colombiano.

Palabras Clave— Dinámica de sistemas, energía, Políticas bajas en carbono, Tecnologías bajas en carbono.

Abstract—the increasing of greenhouse gases in the atmosphere and its effect on climate change has been a concern of scientists, governments and even industry, and because of its magnitude and importance is still a subject of investigation until the world adopts a new way of life in all sectors of society. This new lifestyle has been associated with the term "low-carbon development" and now some governments have embraced under a national climate change strategy.

These strategies have specific policies and programs to carry them out focusing on the development of low carbon technologies. In the Colombian case although it has the appropriate resources to develop non-conventional technologies, current policies and Colombian institutions still lack the appropriate tools to combat market and institutional barriers that prevent Colombia is bound for a "low-carbon economy." In this paper we present possible policies and institutions for Colombia, later carried his system dynamics modeling for their evaluation and discussion. Preliminary results illustrate how a policy element that encourages low-carbon technologies through subsidies are able to develop these technologies in the country and perhaps an element of policy which poses a carbon tax can be a measure shy to penetration of low carbon technologies in the electricity market in Colombia.

Keywords—Energy, Low carbon policies, Low carbon technologies, System dynamics.

1. INTRODUCCIÓN

La problemática del cambio climático ha sido un tema de interés de la comunidad científica desde hace varios lustros por no haberse logrado un acuerdo en cuanto a caminos que puedan llevar a mitigar los efectos de este fenómeno, sin afectar

las economías y a la vez conseguir un desarrollo sostenible. Es por ello que en el mundo se han venido considerando una serie de políticas y regulaciones en pro de ello y debido al papel que juega la energía como principal fuente de emisiones (IEA, 2009) muchas de ellas se enfocan en dicho sector.

Actualmente existen países con avances significativos en la reducción de emisiones de carbono, los cuales han requerido esfuerzos que implican una combinación de políticas en tres direcciones: a) eficiencia energética, b) desarrollo de tecnologías bajas en carbono y c) reducción de las emisiones por medio de incentivos económicos, tales como: precios al carbono y cuotas, entre otros. A su vez estos esfuerzos son impulsados por programas del gobierno en investigación y desarrollo, y el establecimiento de instituciones que respaldan dichos programas., incluyendo aquellos de I&D+I en tecnologías y aprendizaje para la reducción de costos, con el propósito de hacerlas más competitivas en el mercado (Morales et al., 2011).

Para el caso colombiano apenas se está iniciando la construcción de una estrategia baja en carbono (Mendieta, 2011). Dentro de este proceso se han realizado talleres con representantes de los diferentes sectores económicos y académicos, y la expectativa del futuro colombiano frente a las emisiones de gases de efecto invernadero no es nada alentadora, pues se prevé un alto ingreso de tecnologías intensivas en carbono (MINAMBIENTE, 2012).

La construcción de una estrategia baja en carbono trae consigo la interacción de muchos actores en la toma de decisiones (gobierno, industria, consumidores) y la integración de dichas relaciones para su análisis hace el sistema complejo. En términos generales, no se está en procura de un óptimo sino en búsqueda de una comprensión de los efectos dinámicos de dichas políticas e instituciones, específicamente sobre el sector eléctrico, llevando a la identificación de los instrumentos y regulaciones necesarios para contrarrestar barreras de mercado e institucionales.

Este artículo hace una propuesta en este sentido, organizada de la siguiente manera: la sección 2 presenta una discusión de posibles instituciones y políticas que favorezcan la penetración de tecnologías bajas en carbono partiendo de los planteamientos existentes en la literatura. La sección 3 plantea el modelo en dinámica de sistemas que se llevó a cabo para evaluar las

políticas e instituciones en Colombia. En la sección 4 se presenta la evaluación de las políticas propuestas en la sección 2, y por último, en la sección 5 se presentan las conclusiones preliminares.

2. INSTITUCIONES Y POLÍTICAS QUE FAVORECEN LA PENETRACIÓN DE TECNOLOGÍAS BAJAS EN CARBONO

Según Stern (2007), toda respuesta global eficaz contra el cambio climático requerirá tres elementos de política: el precio del carbono, aplicado por medio de impuestos, comercio o reglamentación; una política de apoyo a la innovación y a la aplicación de tecnologías bajas en carbono; y finalmente, la adopción de medidas para eliminar cualquier barrera a la eficiencia energética e informar, educar y persuadir a los individuos sobre lo que pueden hacer, a nivel individual, para responder al cambio climático (Stern, 2007).

Así mismo, las políticas que se planteen para su evaluación deben contar con un período de aplicación de largo plazo y tener una organización responsable de su definición, monitoreo, reporte y verificación.

Es importante resaltar que la estrategia podrá contar con un elemento de política y un instrumento asociado a la misma. La tabla 1 presenta dos opciones posibles entre un gran grupo de políticas e instrumento, para mayor información revisar a (IPCC, 1996).

El primer elemento de política es la asignación de un precio al carbono. La asignación de un precio apropiado al carbono (bien explícitamente, mediante impuestos o comercio, o implícitamente mediante reglamentación) significa que los individuos tienen que asumir los costos de sus acciones contaminantes. Esto motivará a individuos y compañías a abandonar bienes y servicios altos en carbono e invertir en alternativas bajas en carbono (Stern, 2007).

El segundo elemento de política es la innovación y aplicación de nuevas tecnologías, la cual inicia desde la investigación y el desarrollo, hasta la demostración y etapas iniciales de su aplicación. El desarrollo y aplicación de una amplia gama de tecnologías bajas en carbono es un factor esencial para lograr las importantes y necesarias reducciones en las emisiones. Por dificultades predictivas, en este artículo se evalúa, con base un modelo de simulación, la política de subsidios directos a la tecnología.

Tabla 1. Elementos de política para evaluar una economía baja en carbono (elaboración propia)

	Precio al carbono	Innovación y aplicación de nuevas tecnologías
Instrumentos	Impuesto al carbono	Subsidios directo
Características	Consistiría en la inclusión de un impuesto a los combustibles fósiles o un impuesto a los generadores de electricidad que no utilicen tecnologías renovables, de manera que se generen ingresos e inversión para impulsar el desarrollo de nuevas tecnologías.	Este instrumento consistiría en el establecimiento de un sistema donde las tecnologías renovables reciben un subsidio (diferente para cada tecnología) por kWh producido por un período de tiempo determinado. Este subsidio se obtiene a través de un aumento en el precio de la electricidad.
Instituciones necesarias	Se necesitaría de una institución que controle la supervisión de los impuestos y la asignación de recursos para las nuevas tecnologías.	Institución encargada de otorgar los subsidios a las tecnologías renovables.

3. MODELO

En esta sección se presenta la formulación de la hipótesis dinámica que argumenta la estructura del modelo construido para la evaluación de políticas e instituciones en el sector eléctrico colombiano. Para ello se describe brevemente la hipótesis dinámica y luego se presenta la formulación formal de los principales supuestos del modelo.

3.1. HIPÓTESIS DINÁMICA

La hipótesis parte de la formulación básica de la estructura del sector eléctrico, representado por los ciclos B1 y B3 de la figura 1.

El ciclo de balance B1 indica que a medida que aumenta la demanda de electricidad, el margen del sistema disminuye, éste a su vez genera una disminución en el precio de la electricidad, el cual ejerce una influencia negativamente la demanda.

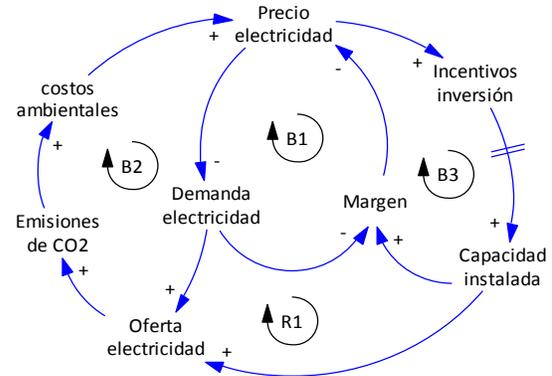


Figura 1. Hipótesis dinámica de la internalización de costos ambientales en el sector eléctrico

El ciclo de balance B2 indica que a medida que la demanda incrementa, mayor capacidad instalada, haciendo que aumente la oferta de electricidad, la cual producirá mayor número de emisiones (debido a la presencia de tecnologías basadas en combustibles fósiles), las cuales llevan a que se aumente el costo de emisión incrementando los costos de generación y éstos a su vez elevan el precio de la electricidad, el cual tiene un efecto opuesto en la demanda.

El ciclo de balance B3 establece como la capacidad instalada es influenciada por las inversiones en nueva capacidad obtenidas gracias a mayores ingresos como consecuencia del aumento del precio de electricidad. Esta capacidad adicional incrementará el margen del sistema con un efecto negativo en el precio de la electricidad. Finalmente, el aumento en capacidad y demanda, aumentará la generación de electricidad produciendo mayores emisiones en el sector.

El ciclo R1 presenta cómo la inversión en capacidad aumenta la oferta de electricidad, quien a su vez representa mayor número de emisiones. Estas emisiones implican mayores costos ambientales para los generadores, los cuales a su vez tienden a aumentar el precio de electricidad. Este aumento en el precio representa una entrada de incentivos para la inversión en nueva capacidad.

El marco institucional (North, 1990) se refleja en el modelo a través de su influencia en los costos y la expansión de capacidad (ver figura 2). Los dos elementos de política planteados en la sección anterior de este artículo están representados así: a) los costos ambientales, los cuales establecen un costo adicional para las tecnologías de combustibles fósiles, y b) la promoción de tecnologías bajas en carbono a través de subsidios.

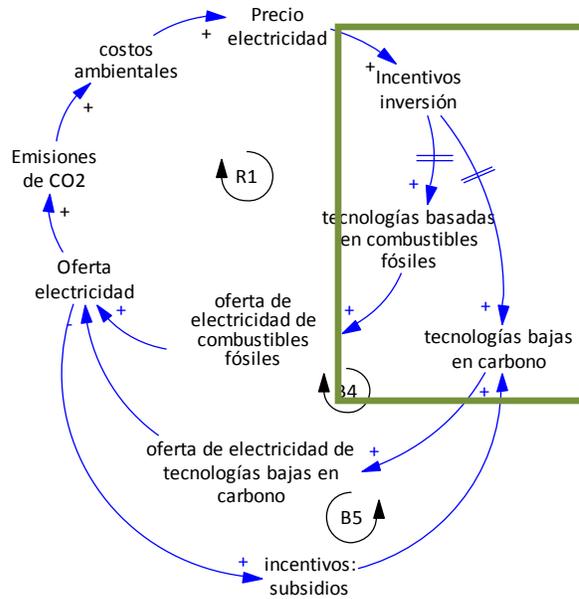


Figura 2. Hipótesis dinámica con políticas bajas en carbono.

3.2 PRINCIPALES SUPUESTOS DEL MODELO: CASO DE APLICACIÓN COLOMBIA

Las principales variables del modelo son: capacidad instalada, demanda de electricidad, costos de generación, oferta de electricidad y precio de electricidad, las cuales se describen a continuación. El modelo es desarrollado en PowerSim Studio 7, su horizonte de simulación está dado desde el año 2012 al año 2035 y el paso de simulación es mensual. El modelo es vectorial dependiendo de las tecnologías de generación del sistema eléctrico colombiano. El enfoque del modelo es la generación de electricidad y por tanto no está dentro de su alcance el modelo de transmisión y distribución de electricidad.

3.2.1 Capacidad instalada y demanda de electricidad.

Para finales del 2011 el sistema cuenta con una capacidad instalada de 14420 MW con la distribución que presenta la tabla 1. Así mismo la demanda de electricidad durante el 2011 fue de 57150,3 GW y se espera que ésta tenga un crecimiento entre 3 y 4,5 % en los próximos años (UPME, 2009).

Adicionalmente el modelo da señales de expansión en capacidad de acuerdo a las rentabilidades de cada una de las tecnologías de generación.

Tabla 2. Capacidad instalada sistema eléctrico colombiano 2011 (XM, 2012)

	Recurso	MW	%
	Hidráulicos	9185	63,7
	Térmica	4545	31,5
	Gas	3053	
	Carbón	991	
	Fuel oil	314	
	Combustóleo	187	
	Menores	635	4,4
	Hidráulicos	533	
	Térmica	83	
	Eólica	18	
	Cogeneración	55	0,4
	Total SIN	14420	100

3.2.2 Costos de electricidad

En cuanto a los costos de cada tecnología para realizar el despacho en el modelo se tiene en cuenta la siguiente ecuación:

$$\text{costos de oferta} = \text{costos de generación} + \text{costos fijos}$$

Donde los costos de generación incluyen el costo de emisión correspondiente al impuesto al carbono que deben pagar las tecnologías que utilicen combustibles fósiles. El costo de emisión de cada tecnología se obtiene a través del valor del impuesto por el factor de emisión de cada tecnología.

3.2.3 Oferta de electricidad y precio de electricidad

La oferta de electricidad en el modelo está determinada por la capacidad instalada de cada una de las tecnologías. La oferta constituida por la potencia y los costos de cada una de las tecnologías, junto con la demanda de electricidad nos determina el precio de la electricidad en el mercado (ver figura 3).

Con base en el modelo descrito en esta sección se obtuvieron los resultados que se presentan a continuación.

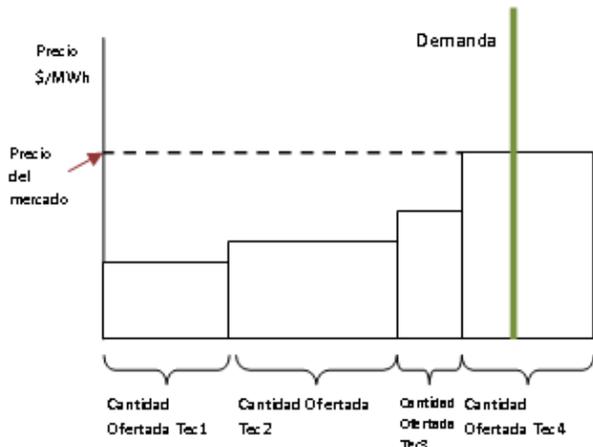


Figura 3. Obtención del precio del mercado a través del cruce entre demanda y oferta

4. EVALUACIÓN DE POLÍTICAS

Para Colombia se plantean los siguientes elementos de política: primero la asignación de un precio al carbono a través del impuesto del carbono y el segundo elemento de política es la innovación y aplicación de nuevas tecnologías a través de los incentivos a las tecnologías bajas en carbono por medio de los subsidios directos. Para evaluar estos elementos de política se presentan a continuación los resultados en tres escenarios: un escenario base, es decir un escenario sin políticas; un segundo escenario donde se evalúa el impuesto al carbono y, un tercer escenario, donde se analizan los incentivos a las tecnologías bajas en carbono.

4.1. CASO BASE

En la figura 4 se presenta los resultados obtenidos en la capacidad instalada de cada una de las tecnologías en ausencia de políticas y en la figura 5 la generación de electricidad.

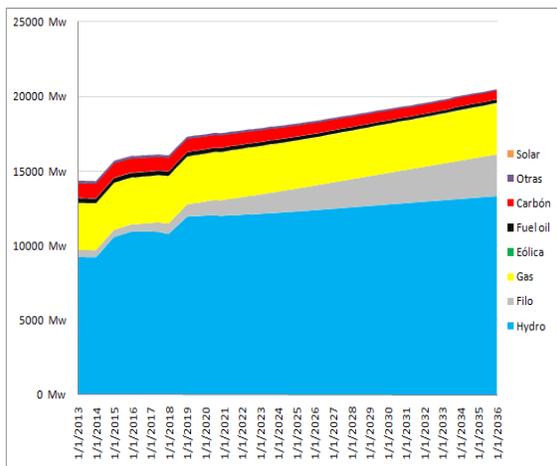


Figura 4. Capacidad instalada caso base

En un escenario de ausencia de políticas, el panorama del sector eléctrico colombiano no muestra grandes diferencias a las tendencias actuales en cuanto a capacidad y generación eléctrica. Los resultados del modelo presentan una tendencia de aumento en las tecnologías hidrotérmica y filo de agua y la térmica a gas tiende a mantener su capacidad instalada con el paso del tiempo, el resto de tecnologías tienden a disminuir muy poco su participación en el mercado. En cuanto a las tecnologías renovables solar y eólica siguen tener una presencia importante en el sector eléctrico colombiano.

Las señales económicas del modelo no son lo suficientemente fuertes para que las tecnologías limpias (solar y eólica) se desarrollen en el país debido principalmente a sus altos costos de instalación, el poco desarrollo tecnológico de dichas tecnologías y la fuerte presencia de tecnologías como la hidrotérmica en el mercado.

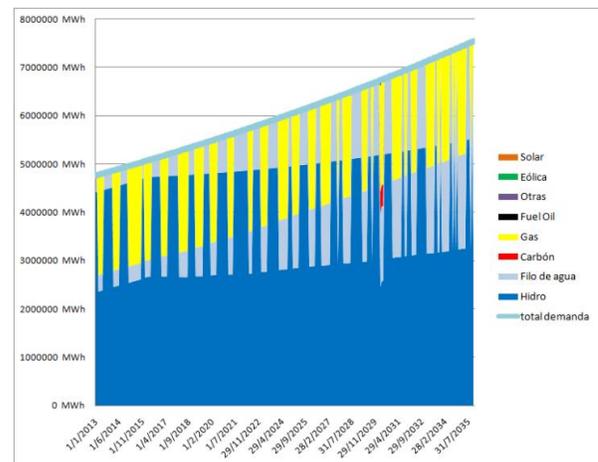


Figura 5. Generación de electricidad caso base

Los picos de la figura 5 se deben a la variabilidad del recurso hídrico el cual depende del agua disponible en los embalses. La generación de electricidad tiene una presencia importante con base al agua, sin embargo cuando los niveles del embalse tienden a disminuir entonces la térmica a gas (quien logra mantener unos costos considerablemente bajos con respecto a las demás tecnologías basadas en combustibles fósiles) logra entrar en el mérito por debajo de la hidrotérmica y éstas terminan complementándose en el resto de la simulación.

4.2. CASO PRECIO AL CARBONO

En este caso se asume las tecnologías basadas en combustibles fósiles deberán pagar un costo de emisión por la generación realizada. La figura 6 presenta los cambios en capacidad instalada de las

diferentes tecnologías en presencia del impuesto al carbono.

Los resultados con el escenario son casi nulos, debido a que el sistema eléctrico colombiano tiene una generación predominantemente de hidroeléctricas, por tal motivo la participación de tecnologías basadas en combustibles fósiles, quienes serían las principalmente afectadas por un impuesto del carbono, sigue manteniéndose casi nula y pues los efectos que puedan tener el impuesto no son posibles apreciarse con la poca participación de estas tecnologías en el sistema.

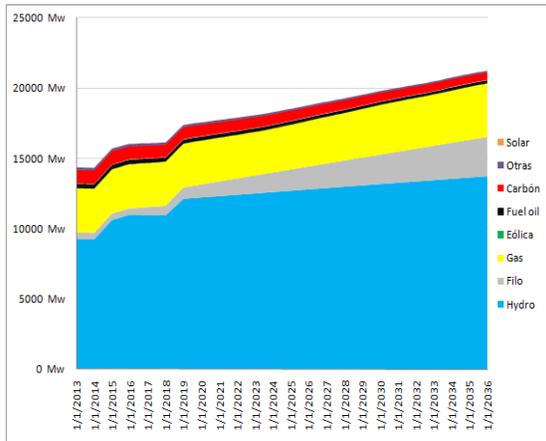


Figura 6. Capacidad instalada con presencia del impuesto del carbono

La figura 7 presenta los resultados del modelo de generación eléctrica en presencia del impuesto al carbono. A diferencia del escenario base, la hidrotérmica tiende a mantener su posición en el mérito por debajo de todas las tecnologías, inclusive cuando los niveles del embalse no están tan altos, esto se debe a que los costos de la térmica a gas aumentan con la presencia del impuesto al carbono y no son competitivos con los costos de la hidrotérmica. Sin embargo la térmica sigue siendo la opción predominante entre las tecnologías basadas en combustibles fósiles.

Nuevamente, la presencia de tecnologías renovables (eólica y solar) sigue siendo nula, debido a sus altos costos que no permite su participación a precios competitivos en el mercado.

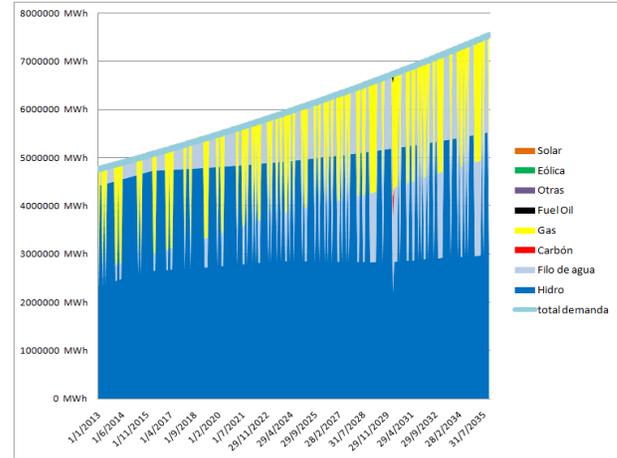


Figura 7. Generación de electricidad con presencia del impuesto del carbono

4.3. CASO INCENTIVOS A LAS TECNOLOGÍAS BAJAS EN CARBONO.

Las figura 8 y 9 muestran los resultados en términos de capacidad y generación de electricidad en el escenario de incentivos para las tecnologías bajas en carbono (solar y eólica).

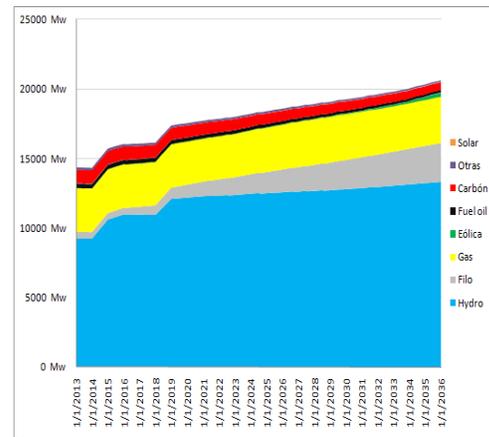


Figura 8. Capacidad instalada con presencia de incentivos.

Este escenario se caracteriza porque presenta un mayor crecimiento en las tecnologías bajas en carbono (eólica) debido a la presencia clara de un enfoque de incentivos. Este es el resultado de la rentabilidad positiva de la inversión para estas tecnologías que viene dado por los precios de la electricidad. Es importante destacar la disminución de las tecnologías de combustibles fósiles, donde no solo se ve reflejado en el efecto de las térmicas a carbón sino de todas las tecnologías basadas en combustibles fósiles, en comparación con el escenario anterior (ver figura 6 y 7).

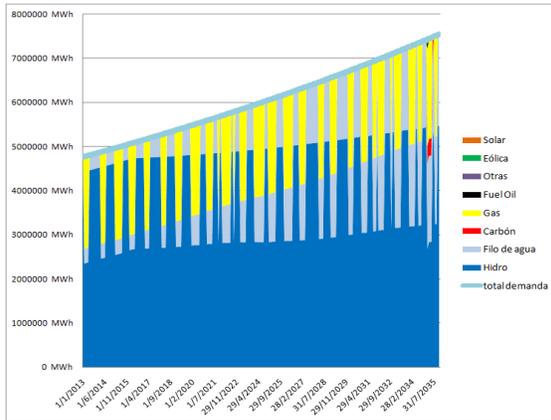


Figura 9. Generación de electricidad con presencia de incentivos

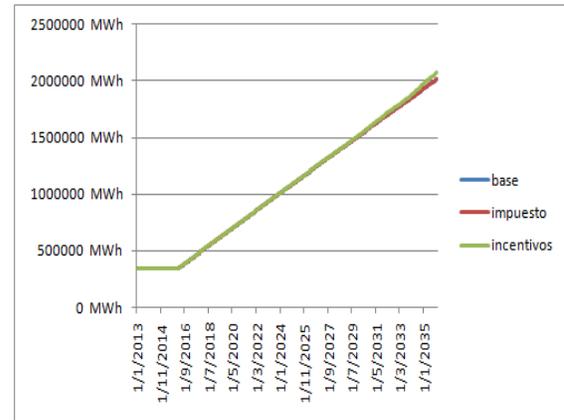


Figura 11. Comparativo de la generación de electricidad renovable en los tres casos

Los incentivos presentados en este escenario de todas maneras siguen siendo muy bajos para que la tecnología solar se desarrolle en el país. La figura 10 presenta cómo la capacidad instalada del sistema tiene un pequeño crecimiento en este escenario comparado con los dos escenarios anteriores.

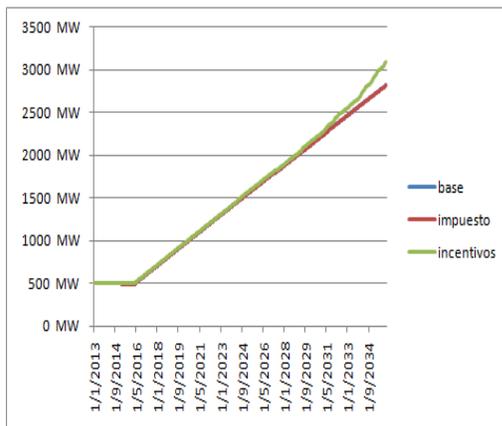


Figura 10. Comparativo de la capacidad instalada renovable en los tres casos

A pesar de que la capacidad instalada en este escenario tiende a aumentar para las tecnologías renovables, su participación en el mercado a través de la generación de electricidad sigue manteniéndose muy parecida a la producida en los escenarios anteriores. Esto se debe principalmente a que si bien se logra un aumento en la capacidad instalada, éstas tecnologías tienen altos índices de intermitencia que hacen que se limite la generación de electricidad de estas tecnologías (ver figura 11).

En cuanto al número de emisiones el panorama es bastante diferente cuando se comparan los tres escenarios. La figura 12 presenta una comparación de las emisiones del sistema en cada uno de los escenarios analizados en este trabajo. Las emisiones más altas se obtienen en el escenario base, seguido por las emisiones en el escenario de incentivos y el escenario con las emisiones más bajas es el escenario con la presencia del impuesto al carbono. La razón de este comportamiento está dada en que la tecnologías que producen son las basadas en combustibles fósiles, y en presencia del impuesto del carbono, son estas tecnologías que disminuyen su participación en el mercado.

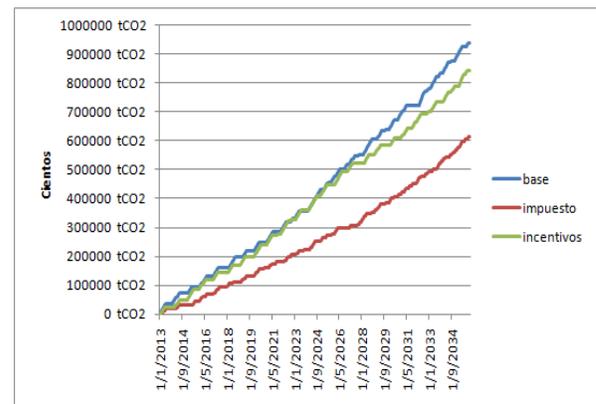


Figura 12. Comparativo del número de emisiones de los tres casos.

La diferencia en el escenario base y el de incentivos, se debe principalmente a que en el escenario de incentivos logra entrar la tecnología eólica, quien hace disminuir las emisiones que en el escenario base estarían representadas por la generación de la térmica a gas.

5. CONCLUSIONES

Este trabajo señala las ventajas del enfoque de modelado para evaluar políticas que favorecen la penetración de tecnologías bajas en carbono. Se hace evidente que la penetración de la tecnología eólica casi no iba a prosperar en ausencia de políticas, sin embargo, cuando una política de incentivos está presente, la difusión de tecnologías bajas en carbono prospera.

También es claro que la tecnología solar requiere mayor apoyo y orientación de la política para alcanzar cualquier participación significativa en el mercado, debido a sus altos costos actuales, en comparación con la energía eólica o las tecnologías tradicionales.

A pesar de que un escenario de impuesto al carbono reduce el aumento de tecnologías contaminantes con respecto al caso base, esto no es suficiente para promover las tecnologías bajas en carbono, como sí se da bajo un mecanismo de incentivos. Esto se ha demostrado en la práctica en Europa y en algunos países de América Latina.

Si el enfoque de la política implementada es lograr reducir las emisiones, el modelo presenta que una política de impuesto al carbono puede obtener mejores resultados frente a una política de incentivos o ausencia de los mismos.

El modelo mostrado en este trabajo es el resultado de las primeras etapas de la investigación ("versión 2"). Aún se requiere futuros trabajos dirigidos a un modelado más detallado de la tecnología y la demanda del sector, así como las instituciones del mercado. Además, se debe señalar que este artículo sugiere sólo dos políticas de una variedad más amplia que examinar cuidadosamente a fin de establecer planes de trabajo adecuados a una economía baja en carbono. Por otra parte, las versiones más avanzadas deben incorporar un análisis de validación a fondo.

6. REFERENCIAS

- IEA. (2009). *CO2 emissions from fuel combustion. Highlights* (p. 124).
- IPCC. (1996). *Climate Change 1995: Economic and social dimensions of climate change*. (J. P. Bruce, H. Lee, & E. F. Haites, Eds.) (UNEP, WMO., pp. 1–438). United States of America: Cambridge University Press.
- MINAMBIENTE. (2012). Subportal Gestión ambiental, Crecimiento verde y Cambio Climático. *Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible - Colombia*. Retrieved February 6, 2012, from <http://www.minambiente.gov.co/portal/default.aspx>
- Mendieta, M. P. (2011). *Estrategia Colombiana de Desarrollo Bajo en Carbono ECDBC*. Bogotá.
- Morales, Y. O., Cárdenas, L., Cadavid, L., Castañeda, M., Dyner, I., & Zuluaga, W. (2011). *Metas y avances de las políticas de mitigación y adaptación al cambio climático en el mundo* (pp. 1–61).
- North, D. (1990). *Institutions, institutional change, and economic performance*. Cambridge University Press. Retrieved from http://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=oFnWbTqgNPYC&oi=fnd&pg=PR5&dq=Institutions,+Institutional+Change,+and+Economic+Performance&ots=sXluLeHkP6&sig=Xq40MkIAePB3PQG_FT6Dna-TA0o
- Stern, N. (2007). *The Economics of Climate Change: The Stern Review*. (Cabinet Office - HM Treasury, Ed.) (p. 712). Cambridge, UK: Cambridge University Press.



www.dinamica-de-sistemas.com

Libros

Cursos Online



[Ejercicios](#)



[Curso Básico Intensivo en Dinámica de Sistemas](#)



[Avanzado](#)



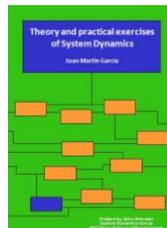
[Curso Superior en creación de modelos de simulación](#)



[Conceptos](#)



[Modelos de simulación en ecología y medioambiente](#)



[English](#)



[Planificación de empresas con modelos de simulación](#)



[Português](#)



[System Thinking aplicado al Project Management](#)