



CÁLCULOS DE CARBONO

Para lograr reducciones sustanciales de las emisiones de gases de efecto invernadero es esencial tener una perspectiva a largo plazo sobre los costos

Kenneth Gillingham

El consenso científico es claro: el cambio climático está asociado a la frecuencia e intensidad cada vez mayores de los desastres naturales, que van desde sequías e incendios forestales hasta huracanes e inundaciones en zonas costeras. No es posible determinar con certeza el alcance del daño económico, pero hay datos contundentes que apuntan a que podría ser muy extenso. Para las autoridades, el desafío consistirá en decidir cuánto gasto destinar a medidas para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. En tal sentido, deben poder comparar los costos de varias opciones, como las fuentes de energía renovable y los vehículos eléctricos.

Ese desafío es cada vez más urgente en el ámbito de las políticas porque, según los científicos del clima, las reducciones de emisiones tienen que ser rápidas y sustanciales, a fin de que para 2050, o antes, alcancen un nivel neto de cero (Millar *et al.*, 2017). Esa meta, que ya

la han asumido muchos países, requerirá una enorme transformación de las fuentes de energía que impulsan la economía mundial, y supondrá avances tecnológicos muchos más portentosos de lo normal. De hecho, en su informe de 2019 sobre las perspectivas internacionales de la energía, la Administración de Información Energética de Estados Unidos proyecta que en 2050 los combustibles fósiles aún generarán un 57% de la electricidad.

¿Cuánto costará romper el paradigma actual y acercarse lo suficiente a la meta de emisiones netas iguales a cero en 2050? Para responder a esta pregunta es importante distinguir entre los costos a corto y a largo plazo. En el corto plazo, hay formas económicas de reducir las emisiones, pero si se busca lograr reducciones más contundentes los costos aumentan rápidamente. Sin embargo, ciertas actividades —especialmente las que usan nuevas tecnologías de bajo uso de carbón— que parecerían ser costosas en el corto plazo en realidad pueden dar lugar a modelos de bajo

Algunas actividades que parecerían ser costosas en el corto plazo en realidad pueden dar lugar a modelos de bajo costo a largo plazo, gracias a la innovación inducida.

costo a largo plazo, gracias a la innovación inducida. Esto apunta a que el costo a más largo plazo de las medidas de mitigación quizá sea más bajo de lo que se suele suponer.

Los costos a corto plazo de las tecnologías

Para calcular los costos a corto plazo de la mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero, los economistas estiman los costos iniciales y los dividen por el número de toneladas de emisiones de dióxido de carbono (o equivalente) que se logra reducir. Por ejemplo, supongamos que un gobierno gasta USD 20 millones en el desarrollo de parques eólicos para generar electricidad, logrando una reducción de emisiones de dióxido de carbono de 1 millón de toneladas. El costo a corto plazo de la mitigación sería de USD 20 por tonelada. Este método ofrece un modo útil de comparar los costos de las diferentes formas de reducir las emisiones.

Desde luego, hay que tomar precauciones si los resultados se interpretan considerando una sola tecnología

o política de forma aislada. Por ejemplo, podría haber interacciones entre las políticas, y los costos relacionados con las tecnologías pueden variar según el lugar o la forma exacta en que se implemente la tecnología. Y las estimaciones de esos costos varían de un año al otro. De hecho, el costo de generación de energía solar o eólica ha disminuido rápidamente en la última década, y parece que esa tendencia continuará.

Con mi colega James Stock estimamos los costos no subsidiados de varias tecnologías para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero a partir de un examen de estudios económicos recientes y del informe anual de 2018 sobre perspectivas de la energía de la Administración de Información Energética (gráfico 1). Los costos se expresan en relación a la actual generación de energía basada en el carbón, un parámetro de referencia útil porque dicho material es el combustible de uso más intensivo de carbono. En muchos países, las autoridades tendrán que decidir si la ruta hacia la descarbonización incluye el cierre de las actuales plantas de carbón. Estas estimaciones son promedios de Estados Unidos, y si se las aplica a otros lugares habría que hacerlo con cierta precaución.

La conclusión más interesante es que las tecnologías de energía renovable están entre las menos costosas. (Este resultado *sí puede* aplicarse fuera de Estados Unidos, ya que los mercados para la mayoría de las tecnologías renovables son mundiales). De hecho, el costo de la energía eólica y solar puede ser aún más bajo si se incluyen los subsidios implícitos o explícitos. No obstante, estas estimaciones no tienen en cuenta la intermitencia de la generación de energía renovable; después de todo, el sol no brilla todo el tiempo ni el viento sopla constantemente (Joskow, 2019). Cuando los niveles de uso son elevados, las energías renovables deben complementarse con tecnologías de almacenamiento, como depósitos de bombeo hidroeléctrico o baterías, o con algún tipo de generación que pueda suplir rápidamente el abastecimiento eólico o solar cuando este se interrumpa.

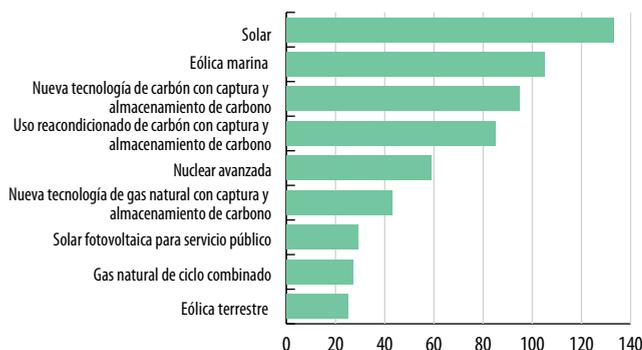
En Estados Unidos, una alternativa de bajo costo y bajo uso de carbono frente al carbón es una planta generadora que incorpore turbinas de gas y vapor para incrementar la eficiencia. Esta solución, conocida como generación de gas natural de ciclo combinado,

Gráfico 1

Comparación de costos

Las tecnologías de energía renovable están entre las menos costosas en comparación con las actuales tecnologías basadas en carbón.

(Dólares por tonelada de dióxido de carbono, en dólares de 2017)



Fuente: Kenneth Gillingham y James H. Stock, "The Cost of Reducing Greenhouse Gas Emissions", *Journal of Economic Perspectives* 32, No. 4 (cuarto trimestre de 2018): 53–72.

Nota: Las estimaciones se derivan del informe anual de 2018 sobre perspectivas de la energía de la Administración de Información Energética de Estados Unidos. Los costos se proyectan para las instalaciones que entren en servicio en 2022. Los costos no incluyen créditos tributarios federales para energía renovable u otros subsidios.

aprovecha la abundante oferta barata de gas de esquisto extraído por fracturación, o *fracking*. Una advertencia: el costo estimado de USD 27 por tonelada supone que no hay fugas de metano de los pozos, las tuberías y los depósitos de almacenamiento. El metano es un potente gas de efecto invernadero, y la gigantesca fuga en Aliso Canyon, California, en 2015, demuestra que la generación a partir de gas natural puede producir mayores emisiones de efecto invernadero, y por lo tanto elevar los costos por tonelada de la reducción total de gases de efecto invernadero que se logre.

Costo social

Para comprender lo sensato que resulta gastar dinero en la reducción de estas emisiones, podemos compararlas con estimaciones del costo social del carbono, que es una variable que cuantifica el incremento del daño infligido al liberar en la atmósfera una tonelada de dióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero. Este incremento del daño incluye factores como pérdidas agrícolas (o mejoras en las latitudes norte) provocadas por el calentamiento global, inundaciones por la subida del nivel de los océanos y la destrucción causada por ciclones tropicales más violentos y un mayor número de incendios forestales. El gobierno del presidente estadounidense Barack Obama elaboró una estimación central de USD 50 por tonelada de dióxido de carbono en 2019.

Varias tecnologías de mitigación resultan ser menos costosas cuando se usa esta estimación del costo social del carbono (lo que significa que, desde el punto de vista económico, no hay vueltas que dar), en tanto que otras tecnologías resultan más caras, como la energía solar térmica y la eólica marina. Los parámetros de referencia distintos de la estimación de USD 50 por tonelada también pueden ser útiles. Por ejemplo, un informe reciente del FMI estima que un impuesto de USD 75 por tonelada de dióxido de carbono aplicado a escala mundial permitiría alcanzar la meta del Acuerdo de París de limitar el calentamiento global a 2°C sobre los niveles preindustriales. Si se usa esta estimación de USD 75 en lugar de la de USD 50, la energía nuclear avanzada surge como otra opción menos cara que el costo social del carbono.

Costos a corto plazo de las políticas

Hasta ahora hemos analizado los costos actuales de tecnologías no subsidiadas, lo cual es útil para comprender la orientación que tendrán los mercados en el futuro próximo. Está claro que conforme las viejas plantas de generación vayan desapareciendo y se construyan nuevas, se producirá una transición hacia tecnologías de energía renovable, independientemente de las políticas. Pero esta transición puede demorar

Cuadro 1

Amplio rango

Los estudios económicos muestran que los costos de las medidas a corto plazo para reducir las emisiones de dióxido de carbono varían ampliamente.

MEDIDA DE POLÍTICA	COSTO ESTIMADO DE REDUCIR LAS EMISIONES DE DIÓXIDO DE CARBONO (DÓLARES DE 2017 POR TONELADA)
Comportamiento de eficiencia energética	-190
Etanol basado en almidón de maíz	-18—+310
Reforestación	1—10
Normas de oferta de energías renovables	0—190
Normas de consumo medio de combustible para empresas (CAFE)	-110—+310
Subsidios a la energía eólica	2—260
Plantas de energía limpia	11
Impuestos a la gasolina	18—47
Regulaciones de quema de metano	20
Reducción de arrendamientos federales de carbón	33—68
Políticas sobre emisiones agrícolas	50—65
Normas nacionales de energía limpia	51—110
Manejo de suelos	57
Políticas de manejo de ganado	71
Concentración en expansión de energía solar	100
Subsidios para combustibles renovables	100
Normas para combustibles de bajo uso de carbono	100—2.900
Subsidios para sistemas fotovoltaicos solares	140—2.100
Biodiésel	150—420
Programas de eficiencia energética	250—300
Planes de modernización del parque automotor	270—420
Programas de asistencia para aclimatación de viviendas	350
Subsidios para vehículos de batería eléctrica exclusiva	350—640

Fuente: Kenneth Gillingham y James H. Stock, "The Cost of Reducing Greenhouse Gas Emissions", *Journal of Economic Perspectives* 32, No. 4 (cuarto trimestre de 2018): 53-72.

Nota: Las políticas que figuran en este cuadro se usan en todo el mundo, pero la mayoría provienen de Estados Unidos. Los costos de los gases de efecto invernadero distintos del dióxido de carbono se convierten a equivalentes de dióxido de carbono en función del potencial de los gases para contribuir al calentamiento global. Las estimaciones se basan en estudios individuales o en una gama de estimaciones de diferentes estudios.

mucho más de lo que demoraría si estuviera dictada por las metas de gran alcance que se han fijado muchos gobiernos. Así que es importante comprender los costos de reducciones de emisiones derivados de las diferentes medidas de *política* que los gobiernos pueden adoptar.

Un repaso de estudios económicos revela una gama muy amplia de los costos de las políticas que se han implementado y evaluado (cuadro 1). En el extremo inferior están las intervenciones de eficiencia energética, que en la realidad ahorran dinero. En la economía conductual, estas intervenciones suelen llamarse “empujoncitos” (*nudges*, en inglés), porque consisten sencillamente en presentar o replantear información para influir en las decisiones relativas al consumo de energía, o darles un empujoncito, hacia un enfoque que tenga más en cuenta el medio ambiente. Un ejemplo conocido es el de los informes que se incluyen en las facturas de electricidad que permiten comparar el uso de energía eléctrica de un hogar con el de los vecinos. Estas intervenciones no son costosas y pueden reducir el uso de electricidad aproximadamente un 2%, produciendo ahorros netos. El costo de estas medidas pueden amortizarse por sí solas, pero las resultantes reducciones de las emisiones tienden a ser modestas y contribuyen relativamente poco a los esfuerzos de descarbonización más sustanciales.

En el extremo superior en cuanto a costos están muchas políticas que dan la impresión de ser muy costosas si se consideran sus costos estáticos y a corto plazo. Las más destacables son las políticas para inducir la generación adicional de energía renovable y ayudar a descarbonizar el transporte. De hecho, las más costosas son los subsidios para los vehículos eléctricos. Esto se debe a que en muchos lugares, dichos vehículos se cargan usando electricidad proveniente de fuentes de combustibles fósiles, lo cual reduce el ahorro potencial de emisiones.

Sin embargo, estas tecnologías a la larga quizá resulten más baratas de lo que hacen pensar las estimaciones a corto plazo que figuran en el cuadro. La razón es que muchas de ellas pueden aportar ventajas secundarias, como menos contaminación atmosférica, lo cual puede hacerlas atractivas incluso si sus costos son altos en lo que se refiere a la reducción de emisiones de carbono. Además, a más largo plazo, las reducciones de emisiones que se logren y el costo por tonelada reducida podrían ser muy diferentes, gracias a los efectos secundarios del cambio tecnológico inducido.

Costos dinámicos y a largo plazo

¿Por qué la propagación de la innovación marca una diferencia? El cambio climático es un problema a largo plazo e intergeneracional, y el dióxido de carbono perdurará en la atmósfera por cientos o miles de años. Por eso, el cambio tecnológico y la innovación son

elementos centrales de los esfuerzos a más largo plazo para mitigar el cambio climático mediante el desarrollo de alternativas para los combustibles fósiles. Hoy en día ya existen tecnologías para reducir drásticamente las emisiones, pero el sistema energético no solo adolece de una tremenda inercia, sino que también aún hay mucho margen para que los costos de la tecnología continúen disminuyendo. Estos factores propician la adopción de una perspectiva dinámica y a largo plazo que considere cómo el gasto en nuevas tecnologías hoy en día puede rebajar el costo de la reducción de emisiones en el futuro.

Adoptar una perspectiva dinámica y a largo plazo es recomendable por varias razones. Los economistas saben que la investigación y el desarrollo generan efectos de propagación porque las empresas por lo general solo pueden patentar una parte de las ventajas generadas. Por ejemplo, una vez que una patente caduca, cualquier empresa puede aprovechar la innovación en cuestión. También puede haber casos en que las mejoras de ingeniería y gestión derivadas de la producción de una nueva tecnología reducen sus costos (lo que suele llamarse “aprender con la práctica”), y algunas de las reducciones de costos pueden propagarse a otras empresas. Por ejemplo, hay evidencias de que las empresas en el sector de semiconductores redujeron sus costos de producción a medida que incrementaban la producción de cada generación de semiconductores, y que estos menores costos beneficiaron, o se propagaron, a otras empresas (Irwin y Klenow, 1994). También puede haber efectos de red positivos, en los que la sociedad se beneficia de la adopción de una norma única, como un enchufe que sirve para cargar todos los vehículos eléctricos. Estos tres tipos de efectos de propagación permiten a otras empresas reducir los costos, mejorar el bienestar social y ofrecer una motivación económica para el diseño adecuado de políticas que fomenten esta propagación.

Aparte de estos efectos, investigaciones recientes sobre la economía de las innovaciones de energía limpia han demostrado que la política óptima puede ser muy diferente a largo plazo sencillamente porque los gastos efectuados hoy pueden tener efectos a largo plazo. Algunas de las estrategias de reducción de emisiones que son muy costosas a corto plazo pueden dar lugar a innovaciones que podrían producir costos a largo plazo más bajos que los de las estrategias existentes. Pensemos por ejemplo en los subsidios para vehículos eléctricos, que incluyen tecnologías que están mejorando rápidamente, como las baterías. Si la política actual para tecnología limpia puede generar reducciones considerables de los costos en el futuro, entonces quizá sea lógico dedicarse a opciones más costosas hoy en día (Acemoglu *et al.*, 2016; Vogt-Schilb *et al.*, 2018). En principio, esta conclusión es válida incluso

El cambio tecnológico y la innovación son elementos centrales de los esfuerzos a más largo plazo para mitigar el cambio climático mediante el desarrollo de alternativas que reemplacen a los combustibles fósiles.

si una sola empresa adopta una innovación de bajo uso de carbono (es decir, sin una propagación de la innovación), aunque en la práctica es casi seguro que habrá efectos de propagación que reducirán los costos a largo plazo. La idea central es que cuando la sociedad esté sopesando cuál es la mejor manera de abordar el cambio climático, la decisión óptima a largo plazo quizá difiera de la decisión miope a corto plazo. Desde luego, no es fácil prever cómo evolucionará la tecnología, y por lo tanto toda decisión implica un grado de incertidumbre. Pero sabemos que los avances de las tecnologías maduras tienden a ser menos espectaculares que los de las tecnologías nacientes. Por lo tanto, la visión a largo plazo es aplicable solo a las tecnologías de bajo uso de carbono más nuevas, que tienen un potencial real para reducir los costos en el futuro.

Innovaciones decisivas

Retornemos a la pregunta original. ¿Es posible lograr un grado de descarbonización suficiente como para acercarse a la meta de cero emisiones netas de gases de efecto invernadero en 2050? Sí, es factible incluso hoy; las tecnologías ya existen. Pero una transformación de esa magnitud del sistema energético será costosa y difícil si se la intenta de un solo golpe, sobre todo si se consideran los fuertes costos a corto plazo que esa transición supondría para los países en desarrollo que dependen completamente de los combustibles fósiles. Claro que hay medidas poco costosas que se pueden implementar en la actualidad, como la conservación de energía, “empujoncitos” a favor de la eficiencia y la sustitución de las fuentes de generación de electricidad basadas en combustibles fósiles con fuentes renovables. Los costos de estas medidas ya son más bajos que los daños climáticos que evitarían, según estimaciones del costo social del carbono. Pero muchas otras estrategias son muy costosas a corto plazo, en especial los esfuerzos para promover nuevas tecnologías de baja emisión de carbono. No obstante, si las políticas tienen una gran capacidad para estimular la innovación, es posible que den lugar a costos totales mucho más bajos a más largo plazo.

A la hora de considerar las diferentes formas de abordar el cambio climático es crucial adoptar una perspectiva a largo plazo que tenga en cuenta la innovación. Las innovaciones como los reactores nucleares modulares pequeños y las tecnologías de captura de carbono pueden ser decisivas para lograr la meta de emisiones netas de gases de efecto invernadero iguales a cero a bajo costo. Ahora bien, lo que dijo el físico danés Niels Bohr es cierto: “Predecir es muy difícil, sobre todo si se trata del futuro”. No se sabe qué trayectoria seguirá la tecnología en el futuro, así que en el mejor de los casos lo que cabe hacer es especular sobre lo que a la larga costaría alcanzar un nivel de emisiones netas igual a cero. De todos modos, no hace ningún daño trazar planes para el futuro que incentiven tanto medidas de bajo costo para mitigar los gases de efecto invernadero como innovaciones de bajo uso de carbono, como la tarificación del carbono para toda la economía, y al mismo tiempo invertir inteligentemente en nuevas tecnologías. **FD**

KENNETH GILLINGHAM es Profesor Adjunto de Economía Ambiental y Energética en la Universidad de Yale. Este artículo es una adaptación de un artículo de 2018 escrito con James H. Stock, “The Cost of Reducing Greenhouse Gas Emissions”, publicado en *Journal of Economic Perspectives*.

Referencias:

- Acemoglu, Daron, Ufuk Akcigit, Douglas Hanley y William Kerr. 2016. “Transition to Clean Technology.” *Journal of Political Economy* 124, no. 1: 52–104. <https://www.journals.uchicago.edu/doi/abs/10.1086/684511>
- Irwin, Douglas y Peter Klenow. 1994. “Learning-by-Doing Spillovers in the Semiconductor Industry.” *Journal of Political Economy* 102, no. 6: 1200–27. <https://doi.org/10.1086/261968>
- Joskow, Paul L. 2019. “Challenges for Wholesale Electricity Markets with Intermittent Renewable Generation at Scale: The US Experience.” *Oxford Review of Economic Policy* 35, no. 2: 291–331. <https://doi.org/10.1093/oxrep/grz001>
- Millar, Richard J., Jan S. Fuglestedt, Pierre Friedlingstein et al., 2017. “Emission Budgets and Pathways Consistent with Limiting Warming to 1.5°C.” *Nature Geoscience* 10: 741–47. <https://www.nature.com/articles/ngeo3031>
- Vogt-Schilb, Adrian, Guy Meunier y Stephane Hallegatte. 2018. “When Starting With the Most Expensive Option Makes Sense: Optimal Timing, Cost and Sectoral Allocation of Abatement Investment.” *Journal of Environmental Economics and Management* 88: 210–33. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2017.12.001>