

Beneficios económicos y ambientales de la energía nuclear

David Juárez-Luna

(Recibido: enero, 2020/Aceptado: mayo, 2020)

Resumen

El objetivo de este artículo es evaluar los beneficios económicos y ambientales de la energía nuclear. Para ello se calcula la participación eficiente de la energía nuclear en portafolios de tres tecnologías de carga base. De esta manera, los beneficios económicos y ambientales de la energía nuclear se obtienen al comparar su participación eficiente, con su participación en el portafolio nacional de 2018. El análisis sugiere que se debe incrementar la participación de la central nuclear en un rango que va de 284% al 810%. Lo que implica una reducción del costo total nivelado de generación con externalidades promedio del portafolio de entre \$4.06 y \$15.34; una reducción importante de las emisiones de CO₂ y, una participación de las energías limpias en la generación eléctrica nacional que va del 35.39% al 58.01%. Existen diversas limitaciones al incremento de la participación de la central nuclear, principalmente técnicas, como el tiempo de construcción de una central nuclear.

Palabras clave: energía nuclear, emisiones de CO₂, generación, electricidad, portafolios eficientes.

Clasificación JEL: D81, G11, Q40, Q53.

* Profesor-investigador en la Universidad Anáhuac México, quinto piso del CAIDE. Av. Universidad Anáhuac, 46, col. Lomas Anáhuac, Huixquilucan, Estado de México, México. CP. 52786. <david.juarez@anahuac.mx>.

Economic and environmental benefits of nuclear energy

Abstract

The objective of this article is to evaluate the economic and environmental benefits of nuclear energy. To do so, we calculate the efficient participation of nuclear energy in portfolios of three base loading technologies. In this way, the economic and environmental benefits of nuclear energy are obtained by comparing its efficient participation, with its participation in the current national portfolio. The analysis suggests that the participation of the nuclear power plant should increase in a range from 284% to 810%. Which implies a reduction of the Total Levelized Cost of Generation with Externalities (CTNGE, in Spanish) of the portfolio between \$4.06 and \$15.34; a significant reduction in CO₂ emissions, and; a participation of Clean Energies in the Mexican national electricity generation that ranges from 35.39% to 58.01%. There are several limitations to the increase in the participation of the nuclear power plant, mainly technical, such as construction time of a nuclear power plant.

Keywords: nuclear energy, CO₂ emissions, generation, electricity, efficient portfolios.

JEL classification: D81, G11, Q40, Q53.

1. Introducción

Entre las tecnologías existentes empleadas para generar electricidad, la energía nuclear es la que crea mayor controversia. Por un lado hay quienes destacan su viabilidad económica y ambiental (ver, por ejemplo, Alonso *et al.*, 2011 Menyah y Wolde-Rufael, 2010 y Al-mulali, 2014, entre otros). Por otro lado, debido al riesgo de que ocurran catástrofes como la de Fukushima en 2011, la energía nuclear tiene muchos detractores (Sarmiento, 2013). Independientemente de si se está a favor o en contra de la energía nuclear, es innegable que constituye una alternativa para atender la creciente demanda de electricidad y para reducir las emisiones de CO₂. Lo que hace necesario evaluar los beneficios económicos y ambientales de la energía nuclear.

El objetivo de este artículo es evaluar los beneficios económicos y ambientales de la energía nuclear. Para ello, se analizan portafolios eficientes de tres tecnologías de carga base:¹ termoeléctrica de carbón, ciclo combinado y central nuclear.

¹ Las que operan de manera continua todos los días del año.

Lo que permite calcular la participación eficiente de la energía nuclear. De esta manera, los beneficios económicos y ambientales de la energía nuclear se obtienen al comparar su participación eficiente, con su participación en el portafolio nacional de 2018. A este respecto, al igual que en el artículo de Gómez-Ríos y Juárez-Luna (2019), los portafolios eficientes se obtienen cuando la media del Costo Total Nivelado de Generación con Externalidades (CTNGE) del portafolio se puede reducir sólo si se acepta un mayor riesgo.

Se emplean datos de la CFE² (2014 citados en Gómez-Ríos y Juárez-Luna, 2019), SENER³ (2017), SENER (2019), así como datos obtenidos de las simulaciones realizadas por Gómez-Ríos y Juárez-Luna (2019).

El análisis sugiere que la generación eléctrica nacional debe incrementar la participación de la energía nuclear en un rango que va de 284% al 810%. Éste hecho tiene las siguientes implicaciones:

- 1) una reducción en el CTNGE promedio del portafolio de entre \$4.06 y \$15.34 dólares por cada MWh generado;
- 2) se reducirán las emisiones de CO₂ en un rango que va de 13 859 646.26 a 51 901 303.79 toneladas;
- 3) un ahorro por la reducción de emisiones de CO₂ que va de \$503 798 141.629 hasta \$1 886 612 392.602 de dólares al año y;
- 4) se garantiza un incremento en la participación de las energías limpias en la generación eléctrica nacional, que va del 35.39% al 58.01%.

Es de hacer notar que el presente análisis se realizó buscando que la participación de las tecnologías de carga base en la generación de electricidad nacional mantuviera la participación que tuvieron en 2018, de 64.5%. No obstante, el análisis se puede extender de manera directa a un escenario en el que las tecnologías de carga base tengan una participación diferente a la establecida.

El resultado obtenido da fundamento teórico al hecho de incrementar, de manera urgente, la participación de la energía nuclear en la generación eléctrica nacional. Lo que ubicaría a México en el contexto internacional de la utilización de la energía nuclear en la generación eléctrica. A este respecto, alrededor del 10% de la electricidad generada en el mundo es generada por 450 reactores nucleares. De manera particular, un porcentaje cercano al 75% de la electricidad generada en Francia proviene de energía nuclear. Más de la mitad de la electricidad generada en Eslovaquia y Ucrania proviene de energía nuclear (WNA, 2019a).⁴ Adicionalmente, más de 100 reactores están en fase de planeación o de construcción, principalmente en Asia (WNA, 2019b).

² Comisión Federal de Electricidad.

³ Secretaría de Energía.

⁴ Asociación nuclear mundial (WNA, por sus siglas en inglés).

El presente artículo se enmarca en dos líneas de literatura. Por un lado, pertenece a la línea de literatura que analiza la viabilidad económica de la generación eléctrica a través de energía nuclear como una alternativa para reducir las emisiones de CO₂. Entre los diversos estudios realizados en esta línea de investigación, se comparan los CTNG de electricidad a través de energía nuclear con otras tecnologías como el ciclo combinado o la termoeléctrica de carbón (Alonso *et al.*, 2007 y Alonso *et al.*, 2016), se analiza la capacidad de generación de los reactores nucleares (Alonso *et al.*, 2011), se explora la relación causal entre las emisiones de CO₂, el consumo de energías nuclear y renovable y el PIB real en Estados Unidos, así como en los 30 principales consumidores de energía nuclear (Menyah y Wolde-Rufael, 2010 y Al-mulali, 2014), se realiza una comparación económica entre la energía nuclear y la generación por viento como alternativas para reducir las emisiones de CO₂ (Alonso y del Valle, 2013), se estima la curva de medio ambiente de Kuznets para Francia (Iwata *et al.*, 2010) y se emplea el vector cointegrado autoregresivo a las seis economías que cuya participación de la energía nuclear en la generación de electricidad es mayor (Baek y Pride, 2014). Por otro lado, el presente artículo también pertenece a la línea que analiza portafolios de generación eléctrica, de la cual se citan varios artículos en (Gómez-Ríos y Juárez-Luna, 2019). En la literatura existente se encuentra evidencia de las ventajas de generar electricidad a través de la energía nuclear: es menos costosa, y; representa un importante papel en la reducción de emisiones de CO₂.

Se encontraron dos artículos que pertenecen a las dos líneas de literatura expuestas. Ellos muestran algunas de las potenciales ventajas de la energía nuclear. Por un lado, Roques *et al.* (2006) encuentran que, en un portafolio de tecnologías de carga base, una central nuclear reduce la probabilidad de pérdidas derivadas de la volatilidad de los precios del gas y carbón. Por otro lado, Vithayasrichareon *et al.* (2010) encuentra que la energía nuclear puede contribuir potencialmente a incrementar la seguridad energética, a la vez que reduce las externalidades negativas ocasionadas por la generación eléctrica.

De los artículos mencionados, destacan cuatro por ser los más cercanos al presente artículo. Por un lado, tanto Alonso *et al.* (2007) como Alonso y del Valle (2013) analizan la viabilidad económica de la generación eléctrica a través de energía nuclear. Dichos autores emplean un método determinístico para calcular el Costo Total Nivelado de Generación (CTNG) de diferentes tecnologías de generación eléctrica. Partiendo de ello, dichos autores comparan los CTNG de la energía nuclear con los de ciclo combinado, termoeléctrica de carbón o generación por viento. Para su análisis, ellos plantean diferentes escenarios de inversión, considerando por ejemplo diferentes tasas de interés. Como resultado, dichos autores toman el escenario donde la energía nuclear es más competitiva que las otras tecnologías. No obstante, esos autores no

emplean ningún criterio para verificar que los escenarios que obtuvieron son factibles, probables o posibles de implementarse. A este respecto, el presente análisis toma como referencia la participación eficiente de la energía nuclear en portafolios con tres tecnologías de carga base.

Por otro lado (Roques *et al.* 2008) analizan portafolios de generación eléctrica de las tres tecnologías de carga base: termoeléctrica de carbón, ciclo combinado y central nuclear. Dichos autores emplean el Valor Presente Neto para su análisis. Debido a que su análisis se realiza al considerar pares de tecnologías, sus conclusiones son limitadas al dejar fuera del análisis a los portafolios menos riesgosos. Como consecuencia, ellos concluyen que el portafolio óptimo consiste en generar electricidad únicamente a través de ciclo combinado.

Sin duda, el artículo más cercano al presente artículo es el de Gómez-Ríos y Juárez-Luna (2019), quienes analizan portafolios de las tres tecnologías de carga base de generación eléctrica, basados en CTNGE. Los resultados obtenido por dichos autores son limitados al ser obtenidos al analizar pares de tecnologías. Lo que implica dejar fuera del análisis a los portafolios menos riesgosos y a la termoeléctrica de carbón. Como consecuencia, Gómez-Ríos y Juárez-Luna (2019) concluyen que *“se debe dejar fuera a la termoeléctrica de carbón y centrarse en ciclo combinado y central nuclear, asignando a ésta última una proporción mayor de capital”*. Es evidente que dichas conclusiones, además de ser limitadas, son muy generales ya que no abordan el monto de la reducción de las emisiones de CO₂ debido a la participación de la central nuclear. A este respecto, el presente artículo se diferencia del artículo de Gómez-Ríos y Juárez-Luna (2019) en cuatro aspectos. Primero, emplea la metodología desarrollada por Juárez-Luna (2021) para construir paramétricamente la frontera eficiente de portafolios que incluyen a las tres tecnologías de carga base. Lo que permite calcular de manera precisa las participaciones de las tres tecnologías de carga base en todos los portafolios eficientes y destacar la importante participación de la central nuclear en la generación de electricidad. Segundo, el presente análisis permite comparar el portafolio nacional de 2018 con los portafolios eficientes. Partiendo de dicha comparación se calculan, de manera exacta, los montos en los que debe incrementarse la participación de la energía nuclear para alcanzar su participación eficiente. Como consecuencia, se calculan los montos en los que se reduce el CTNGE, las emisiones de CO₂ así como el monto monetario correspondiente a las emisiones de CO₂. Tercero, se analiza la perspectiva de la energía nuclear. De donde se deriva que las participaciones proyectadas de la energía nuclear en la generación eléctrica nacional no son eficientes. Finalmente, se proponen políticas públicas concretas en torno a la participación de la energía nuclear en la generación eléctrica nacional, destacando el resultado que se obtendría en la participación de las energías limpias en la generación eléctrica nacional.

Al mejor entender de este autor, éste es el primer esfuerzo por analizar los beneficios económicos y ambientales de la energía nuclear, tomando como referencia su participación eficiente en portafolios con tres tecnologías de carga base.

El trabajo se divide en ocho secciones. La segunda presenta una visión general del CTNGE. La tercera presenta los portafolios eficientes de tecnologías de carga base. El análisis de portafolios alternativos al portafolio nacional de 2018 de generación eléctrica se presenta en la cuarta sección. La sección cinco presenta el análisis de resultados. La sexta sección presenta la prospectiva de la energía nuclear. Las implicaciones de política pública se presentan en la sección siete. La sección ocho presenta las conclusiones.

2. Una visión general del CTNGE

El CTNGE representa el costo promedio de por vida de generar un MWh (NEA⁵/IEA,⁶ 2015). Es de destacar que, la metodología de la NEA/IEA (2015) especifica el CTNG. No obstante, en el presente artículo se sigue el enfoque de Gómez-Ríos y Juárez-Luna (2019) al incluir el costo nivelado de las emisiones de CO₂, lo que da lugar al CTNGE. De este modo, el CTNGE, para una planta de generación dada, es el precio de la electricidad constante (en términos reales) que equivaldría al valor presente neto de los ingresos de la producción de la planta con el valor presente neto del costo de producción (Borenstein, 2012).

Formalmente, considere una planta que cuya vida útil consta de N periodos. Donde q_n indica la cantidad de MWh producidos en el periodo n . El costo real en el periodo n (en dólares del periodo cero) de producir la corriente de salida (q_1, \dots, q_N) está dado por $C_n(q_1, \dots, q_N)$. Por lo que, al descontar los costos futuros a la tasa de interés real r , el CTNGE se define como:

$$\sum_{n=0}^N q_n \frac{CTNGE}{(1+r)^n} = \sum_{n=0}^N \frac{C_n(q_1, \dots, q_N)}{(1+r)^n} \quad (1)$$

de esta manera se obtiene:

$$CTNGE = \frac{\sum_{n=0}^N q_n \frac{C_n(q_1, \dots, q_N)}{(1+r)^n}}{\sum_{n=0}^N \frac{q_n}{(1+r)^n}} \quad (2)$$

note que la sumatoria de los costos comienza en el periodo $n=0$. Este hecho se debe a que el CTNGE captura los costos de capital realizados antes de que inicie

⁵ Agencia de Energía Nuclear (NEA, por sus siglas en inglés).

⁶ Agencia Internacional de Energía (IEA, por sus siglas en inglés).

la producción de electricidad. Es evidente que una reducción (aumento) del CTNGE implica una reducción (aumento) del costo de generación de electricidad durante toda la vida útil de la planta. El costo $C_n(q_1, \dots, q_N)$ se compone principalmente de los siguientes cuatro costos: *i*) inversión; *ii*) combustible; *iii*) emisiones de CO_2 y; *iv*) operación y mantenimiento.

Debido a su simplicidad, el CTNGE constituye una herramienta para la toma de decisiones sobre generación eléctrica, ya que permite enfocarse en la tecnología menos costosa. No obstante, el CTNGE presenta dos inconvenientes. Primero, depende de los valores de los parámetros de entrada. Diferentes valores de los parámetros de entrada han sido empleados en diversos artículos donde se emplea el CTNGE. A este respecto, Borenstein (2012) presenta un compendio de los diferentes valores de los parámetros de entrada del CTNGE empleados en diferentes artículos. Segundo, el CTNGE, en principio, no captura las fuentes de incertidumbre a las que está sujeto el sector eléctrico. Ante ello, la alternativa seguida ha consistido en simular distribuciones de probabilidad de los CTNGE de diferentes tecnologías (ver por ejemplo Gómez-Ríos y Juárez-Luna, 2019). Dichas distribuciones mantienen la limitante de que están sujetas a las variaciones de los valores de los parámetros de entrada. No obstante, dichas distribuciones permiten emplear la Teoría de Portafolio de Markowitz (1952) para encontrar los portafolios eficientes de tecnologías de generación eléctrica. En la siguiente sección se encuentran los portafolios eficientes de tecnologías de generación eléctrica.

3. Portafolio eficiente de tecnologías de carga base

En esta sección se encuentran los portafolios eficientes de tecnologías de carga base: *i*) Central nuclear (*cn*); *ii*) Ciclo combinado (*cc*), y; *iii*) Termoeléctrica de carbón (*tc*). Como es usual, la medida de riesgo que se emplea es la desviación estándar (DE).

Formalmente, se tiene lo siguiente: Sea X_i la variable aleatoria que denota el CTNGE de la tecnología $i=cn, cc, tc$. Sea Y la variable aleatoria que denota el CTNGE del portafolio que incluye las tres tecnologías de carga base y se define como sigue:

$$Y = \alpha_1 X_{cn} + \alpha_2 X_{cc} + \alpha_3 X_{tc}, \text{ con } \alpha_{cn} + \alpha_{cc} + \alpha_{tc} = 1 \quad (3)$$

donde α_i denota la participación de la tecnología i en el portafolio. Note que en esta parte del análisis se asume que la participación de las tecnologías de carga base en la generación eléctrica está normalizada a 100%. Posteriormente se relajará este supuesto para analizar el contexto mexicano.

El Lema 1 en Juárez-Luna (2021) muestra que la media de Y es la suma convexa de las medias de X_i . En el mismo Lema, se muestra que el riesgo de Y es una función convexa de las participaciones de las tres tecnologías, a_i . En el análisis sucesivo se asume que no existe correlación entre los CTNGE de las diferentes tecnologías.

Procedemos ahora a construir la frontera eficiente del portafolio compuesto por las tres tecnologías de carga base. Para ello, los datos se toman de la tabla 6 de Gómez-Ríos y Juárez-Luna (2019), página 365. De donde, las medias y las de los CTNGE de las tres tecnologías están expresadas en dólares/MWh generado. De esta manera, $\mu_{tc} = 98.302$, $\mu_{cc} = 76.559$, $\mu_{cn} = 53.785$, $\sigma_{tc}^2 = (10.386)^2 = 107.87$, $\sigma_{cc}^2 = (5.313)^2 = 28.228$, $\sigma_{cn}^2 = (8.063)^2 = 65.012$

A continuación, se adapta la proposición cinco de Juárez-Luna (2021), para ser aplicada a portafolios basados en el CTNGE. En la formulación original, los portafolios se basan en el valor presente neto.

Proposición 1: Sea $\sigma_Y = \sqrt{\alpha_{tc}^2 \sigma_{tc}^2 + \alpha_{cc}^2 \sigma_{cc}^2 + \alpha_{cn}^2 \sigma_{cn}^2}$ la del CTNGE del portafolio. La central de cc es la tecnología menos riesgosa. Para $\sigma_{tc,cc} = \sigma_{tc,cn} = \sigma_{cc,cn} = 0$ para $i = tc, cc, cn$ y $\sum_i a_i = 1$, se cumple que:

a) El riesgo del CTNGE del portafolio, dado por σ_Y , tiene su mínimo global en

$$(\alpha_{tc}^*, \alpha_{cc}^*, \alpha_{cn}^*) = \frac{1}{|A|} (\sigma_{cc}^2 \sigma_{cn}^2, \sigma_{tc}^2 \sigma_{cn}^2, \sigma_{tc}^2 \sigma_{cc}^2)$$

donde $|A| = \sigma_{tc}^2 \sigma_{cc}^2 + \sigma_{tc}^2 \sigma_{cn}^2 + \sigma_{cc}^2 \sigma_{cn}^2$

b) El menor riesgo del CTNGE del portafolio está dado por

$$\sigma_Y^* = \sqrt{\frac{\sigma_{tc}^2 \sigma_{cc}^2 \sigma_{cn}^2}{|A|}} < \sigma_{cc}$$

Demostración: véase Juárez-Luna (2021)

De este modo, las participaciones de las tecnologías que garantizan el portafolio eficiente de menor riesgo son:

$$(\alpha_{tc}^*, \alpha_{cc}^*, \alpha_{cn}^*) = (0.15431, 0.58966, 0.25603)$$

así, el mínimo riesgo del portafolio es $\sigma_Y^* = 4.0798$ dólares/MWh. La máxima media correspondiente a dicho nivel de riesgo es $\mu_Y = 74.083$ dólares/MWh.

Para construir la frontera eficiente se adapta la proposición seis de Juárez-Luna (2021) al presente análisis como sigue:

Proposición 2: Sea $\sigma_Y = \sqrt{\alpha_{tc}^2 \sigma_{tc}^2 + \alpha_{cc}^2 \sigma_{cc}^2 + \alpha_{cn}^2 \sigma_{cn}^2}$ la del CTNGE del portafolio. Tome el hecho de que $\mu_{tc} > \mu_{cc} > \mu_{cn}$, entonces lo siguiente se cumple:

la frontera eficiente corresponde a la siguiente ecuación paramétrica de las participaciones de las tres tecnologías

$$\begin{pmatrix} \alpha_{tc} \\ \alpha_{cc} \\ \alpha_{cn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha^{1+x} \\ \alpha - \alpha^{1+x} \\ 1 - \alpha \end{pmatrix}$$

donde el parámetro α es tal que $[\alpha_{cc}^*]^{(\frac{1}{1+x})} \leq \alpha \leq \alpha^{df} \leq 1$. Sea $x = \frac{\ln[(\alpha_{tc}^*)/(\alpha_{tc}^* + \alpha_{cc}^*)]}{\ln[\alpha_{tc}^* + \alpha_{cc}^*]}$. α^{df} se refiere al valor de α que garantiza el máximo riesgo permitido del portafolio.

El riesgo del portafolio está dado por $\sigma_Y^* \leq \sigma_Y(\alpha) \leq \sigma_Y(\alpha^{df})$. Note que $\sigma_Y(\alpha^{df}) \leq \sigma_{cc}$.

La media máxima del CTNGE para cada nivel de riesgo correspondiente está dada por $\mu([\alpha_{cc}^*]^{(\frac{1}{1+x})}) \leq \mu_Y(\alpha) \leq \mu(\alpha^{df})$. Note que $\mu_Y(\alpha^{df}) \leq \mu_{cc}$.

Demostración: véase Juárez-Luna (2021)

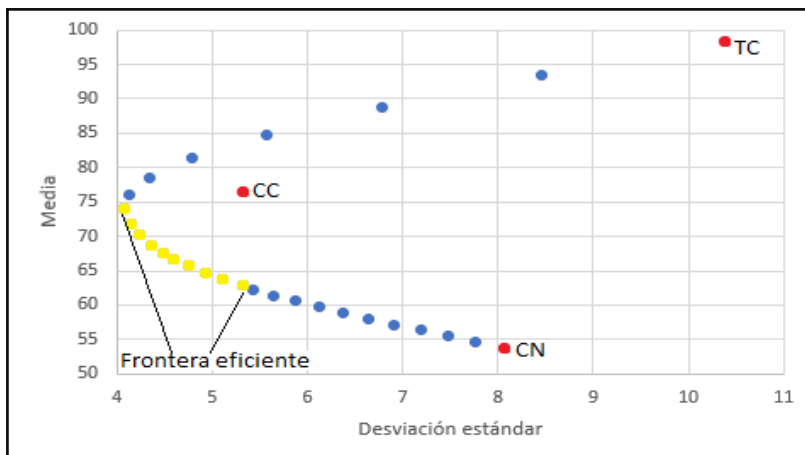
Partiendo de lo anterior, se calcula $x = \frac{\ln[(0.15431)/(0.15431 + 0.58966)]}{\ln[0.15431 + 0.58966]} = 5.3187$

Además, $[\alpha_{cc}^*]^{1/(1+x)} = [0.15431]^{1/6.3187} = 0.74397$. De este modo, el riesgo del portafolio está dado por la siguiente ecuación paramétrica de las participaciones de las tecnologías

$$\begin{pmatrix} \alpha_{tc} \\ \alpha_{cc} \\ \alpha_{cn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha^{6.3187} \\ \alpha - \alpha^{6.3187} \\ 1 - \alpha \end{pmatrix}$$

Para $0.74397 > \alpha > 0.3933$. Donde $\alpha = 0.74397$ garantiza el menor riesgo del portafolio, $\sigma_Y^* = 4.0798$. Note que, en este portafolio la menor media se alcanza cuando $\alpha = 0$, $\mu_Y = \mu_{cn} = 53.785$ dólares/MWh, y el correspondiente riesgo es, $\sigma_Y = \sigma_{cn} = 8.063$ dólares/MWh. No obstante, se puede elegir algún valor del parámetro alfa, para imponer un límite máximo al riesgo del portafolio. Por ejemplo, si se elige $\alpha^{df} = 0.3933$, se garantiza que el máximo riesgo que puede tomar el portafolio corresponde a la de la central de ciclo combinado, $\sigma_{cc} = 5.313$, que es la tecnología menos riesgosa. De este modo, el riesgo de

los portafolios eficientes se encuentra en el intervalo $4.079 < \sigma_y < 5.313$ dólares/MWh. La correspondiente media de los portafolios eficientes se encuentra en el intervalo $74.083 > \mu_y > 62.802$ dólares/MWh. Los portafolios factibles de *tc-cc-cn*, así como la frontera eficiente, se presentan en la figura 1.



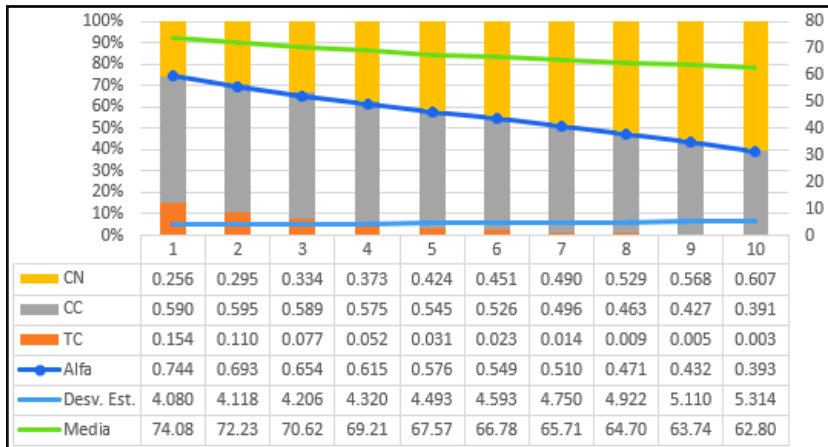
Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de Gómez-Ríos y Juárez-Luna (2019).

Figura 1
Portafolios factibles *tc-cc-cn*

El presente análisis, tiene tres ventajas. Primero, permite calcular las participaciones de las tres tecnologías de carga base en todos los portafolios eficientes, así como la media y el riesgo correspondientes a cada portafolio eficiente. La figura 2 muestra las características de algunos portafolios eficientes. Segundo, destaca la importante participación de la central nuclear en la generación de electricidad. Del 100% de la electricidad generada por las tres tecnologías de carga base, la central nuclear tiene una participación que va del 25.5% al 60.7% en los portafolios eficientes. Y, finalmente, permite comparar el portafolio nacional 2018 con los portafolios eficientes. Esta comparación se realizará en el siguiente apartado.

4. Portafolios alternativos al portafolio nacional de 2018

En México, la generación eléctrica durante 2018 por parte de tecnologías de carga base fue de 204 873 GWh que correspondió al 64.5% de la generación eléctrica nacional. Particularmente, las centrales de ciclo combinado generaron 161 973 GWh

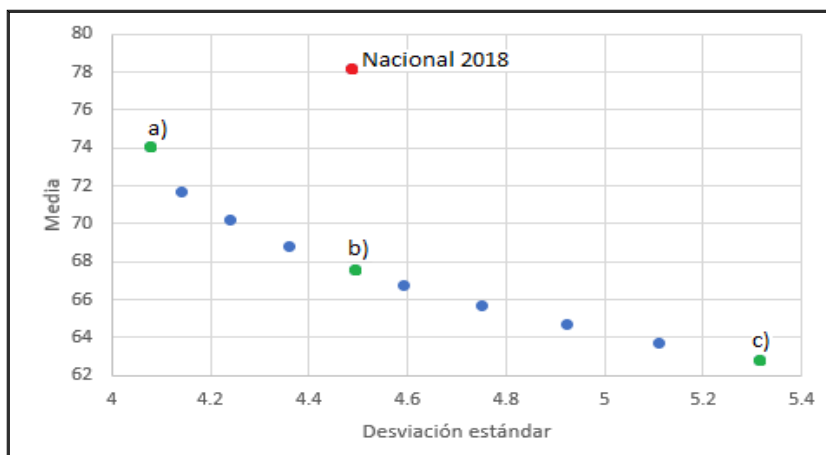


Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de Gómez-Ríos y Juárez-Luna (2019).

Figura 2
Frontera eficiente del portafolio tc-cc-cn.

correspondientes al 51% de la generación total. Las termoeléctricas de carbón generaron 29 345 GWh que representaron el 9.2%. Mientras que la central nuclear generó 13 555 GWh conformando el 4.3% de la generación nacional (SENER, 2019).

Con la finalidad de centrarnos en la generación eléctrica a través de tecnologías de carga base, su participación se normaliza a 100%. En este contexto, el portafolio nacional del 2018 es el siguiente: ciclo combinado 79.07%; Termoeléctrica de carbón 14.26%, y central nuclear 6.67%. Con estas participaciones, es posible calcularla media y el riesgo del CTNGE del portafolio nacional de 2018. De esta manera, el correspondiente CTNGE promedio es $\mu_{\tilde{v}}^{2018} = 78.14$ dólares/MWh, con riesgo de $\sigma_{\tilde{v}}^{2018} = 4.49$ dólares/MWh. Note que el portafolio nacional de 2018 no se encuentre en la frontera eficiente. A pesar de que el riesgo del CTNGE del portafolio nacional del 2018 se encuentre en el rango eficiente, la media del CTNGE es mayor que los CTNGE de los portafolios eficientes (que van de \$62.802 a \$74.083 dólares/MWh). La figura 3 muestra el portafolio nacional de 2018, así como los portafolios eficientes.



Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de Gómez-Ríos y Juárez-Luna (2019) y SENER (2019).

Figura 3
Frontera eficiente y portafolio nacional del 2018

Para realizar un análisis más detallado, se calculan las emisiones de CO_2 del portafolio nacional de 2018. A este respecto, Gómez-Ríos y Juárez-Luna (2019) estimaron que el costo por tonelada de CO_2 emitidas al ambiente es de \$36.35 dólares. Por otro lado, la termoeléctrica de carbón emite 730 Kg de CO_2 por MWh generado, mientras que la central de ciclo combinado emite 376.9 Kg de CO_2 por MWh generado CFE (2014 citado por Gómez-Ríos y Juárez-Luna, 2019). La tabla 1 muestra las toneladas de CO_2 emitidas por el portafolio nacional de 2018, así como el correspondiente costo de dichas emisiones.

Tabla 1
Cantidades y costos de las emisiones de CO_2 del portafolio nacional del 2018

	Generación (GWh)	Toneladas emitidas de CO_2	Costo de las emisiones CO_2
<i>cc</i>	161 973	61 047 623.7	\$2 219 081 121.495
<i>tc</i>	29 345	21 421 850.0	\$778 684 247.5
<i>cn</i>	13 555	0	\$0
Total	204 873	82 469 473.7	\$2 997 765 368.995

Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de Gómez-Ríos y Juárez-Luna (2019) y SENER (2019).

Con la presente información es posible comparar el portafolio nacional de 2018 con los portafolios eficientes de tecnologías de carga base. Para el presente análisis se proponen tres portafolios eficientes: *a*) el portafolio eficiente de mayor costo y menor riesgo; *b*) el portafolio eficiente con el mismo riesgo que el portafolio nacional de 2018, y; *c*) el portafolio eficiente de menor costo y mayor riesgo. Siguiendo el principio *Ceteris Paribus*, para realizar dicha comparación, suponemos la generación eléctrica a través de tecnologías de carga base se mantendrá en 204 873 GWh (64.5% de la generación nacional). No obstante, de manera directa se puede realizar un análisis modificando la proporción de generación eléctrica correspondiente a tecnologías de carga base.

A continuación se analizan los portafolios eficientes propuestos.

4.1. Portafolio eficiente de mayor costo y menor riesgo

Este portafolio eficiente se ubica en el inciso *a*) en la figura 3. Sus parámetros correspondientes se muestran en la columna 1 de la figura 2. En este portafolio, el CTNGE promedio es de $\mu_Y^a = 74.08$ dólares/MWh. El riesgo correspondiente (DE) es $\sigma_Y^a = 4.08$ dólares/MWh. La tabla 2 presenta las participaciones de las tecnologías de carga base en el portafolio eficiente de mayor costo y menor riesgo. También presenta las correspondientes emisiones de CO₂.

Tabla 2
Características del portafolio eficiente de mayor costo y menor riesgo

	Participación (%)	Generación (GWh)	Toneladas emitidas de CO ₂	Costo de las emisiones CO ₂
<i>cc</i>	38.03	120 805.182	45 531 472.9	\$1 655 069 040.795
<i>tc</i>	9.95	31 614.1843	23 078 354.5	\$838 898 186.570
<i>cn</i>	16.51	52 453.6342	0	\$0
Total	64.5	204 873	68 609 827.44	\$2 493 967 227.366

Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de Gómez-Ríos y Juárez-Luna (2019) y SENER (2019).

Es evidente que este portafolio eficiente implica una reducción de las participaciones de las centrales termoeléctricas y de ciclo combinado. Por lo que se da paso a un importante incremento en la participación de la central nuclear en la generación eléctrica nacional, pasando del 4.3% al 16.51%. Este hecho supone una reducción de las emisiones de CO₂.

4.2. Portafolio eficiente con el mismo riesgo que el portafolio nacional del 2018

Este portafolio eficiente está representado por el inciso *b*) en la figura 3. Los parámetros correspondientes a este portafolio se muestran en la columna 5 de la figura 2. En este portafolio el CTNGE promedio es de $\mu_Y^b) = 67.57$ dólares/MWh. El correspondiente riesgo es $\sigma_Y^b) = 4.49$ dólares/MWh, que es el mismo que el riesgo del portafolio nacional de 2018. La tabla 3 presenta las principales características del portafolio eficiente con el mismo riesgo que el portafolio nacional de 2018.

Tabla 3
Características del portafolio eficiente con el mismo riesgo
que el portafolio de 2018

	Participación (%)	Generación (GWh)	Toneladas emitidas de CO ₂	Costo de las emisiones CO ₂
<i>cc</i>	35.18	111 731.1	42 111 447.4	\$1 530 751 111.547
<i>tc</i>	1.98	627 5.8	4 581 304.2	\$166 530 408.843
<i>cn</i>	27.35	868 66.2	0.0	\$0
Total	64.5	204 873	46 692 751.59	\$1 697 281 520.391

Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de Gómez-Ríos y Juárez-Luna (2019) y SENER (2019).

En este portafolio eficiente es evidente el incremento en la participación de la central nuclear en la generación eléctrica nacional, que pasó del 4.3% al 27.35%, lo que supone una importante reducción de las emisiones de CO₂.

4.3. Portafolio eficiente de menor costo y mayor riesgo

Este portafolio eficiente se representa por el inciso *c*) en la figura 3. Sus parámetros correspondientes se describen en la columna 10 de la figura 2. En este portafolio el CTNGE promedio es de $\mu_Y^c) = 62.8$ dólares/MWh. El riesgo correspondiente es $\sigma_Y^c) = 5.314$ dólares/MWh, que es mismo que el riesgo de la central de ciclo combinado, la tecnología menos riesgosa de las tres. Las características de este portafolio se presentan en la tabla 4.

Tabla 4
Características del portafolio eficiente de menor costo y mayor riesgo

	Participación (%)	Generación (GWh)	Toneladas emitidas de CO ₂	Costo de las emisiones CO ₂
<i>cc</i>	25.19	80 013.3	30 157 029.86	\$1 096 208 035.5
<i>tc</i>	0.18	563.2	411 140.05	\$14 944 940.9
<i>cn</i>	39.13	124 296.4	0	\$0
Total	64.5	204 873	30 568 169.91	\$1 111 152 976.4

Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de Gómez-Ríos y Juárez-Luna (2019) y SENER (2019).

Al igual que en los portafolios eficientes analizados anteriormente, en el presente portafolio destaca un importante incremento en la participación de la central nuclear en la generación eléctrica nacional, pasando del 4.3% al 39.13%, lo que supone una importante reducción en las emisiones de CO₂.

5. Análisis de resultados

Las características del portafolio nacional de 2018 y de los tres portafolios eficientes, se presentan en la tabla 5. A continuación se analizan los resultados obtenidos. Para ello, hay que recordar que el análisis considera que la participación de las tecnologías de carga base en la generación eléctrica nacional es de 64.5%.

Tabla 5
Características de los portafolios de *tc-cc-cn*

	Participación (%)			CTNGE		Emisiones de CO ₂	
	<i>cc</i>	<i>tc</i>	<i>cn</i>	Media	Riesgo	Toneladas	Costo
2018	51	13.2	4.3	\$78.14	\$4.49	82 469 473.7	\$2 997 765 368.995
<i>a)</i>	38.03	9.95	16.51	\$74.08	\$4.08	68 609 827.44	\$2 493 967 227.366
<i>b)</i>	35.18	1.98	27.35	\$67.57	\$4.49	46 692 751.59	\$1 697 281 520.391
<i>c)</i>	25.19	0.18	39.13	\$62.8	\$5.314	30 568 169.91	\$1 111 152 976.4

Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de Gómez-Ríos y Juárez-Luna (2019) y SENER (2019).

Los resultados obtenidos indican lo siguiente:

- a)* El portafolio eficiente de mayor costo y menor riesgo implica un ahorro promedio de \$4.06 dólares por cada MWh generado. Lo que habría

significado un ahorro promedio de 831 784 380 de dólares en la generación eléctrica de 2018. Adicionalmente, el riesgo de este portafolio es menor al riesgo del portafolio nacional de 2018. Este portafolio eficiente emite 13 859 646.26 toneladas de CO₂ menos que en el portafolio nacional de 2018, lo que se traduce en un ahorro de 503 798 141.629 de dólares al año por la reducción de emisiones de CO₂.

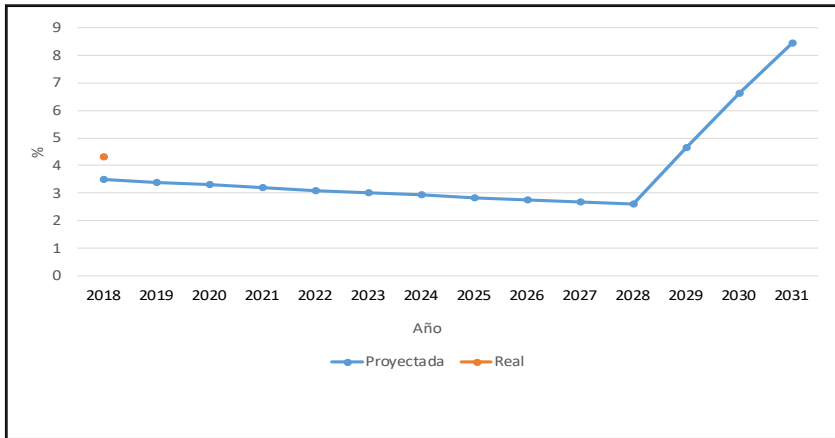
- b) En el portafolio eficiente con el mismo riesgo que el portafolio nacional actual se ahorra un promedio de 10.57 dólares por cada MWh generado. Que tan sólo en 2018 habría significado un ahorro promedio de 2 165 507 610 de dólares en la generación eléctrica. Este portafolio eficiente emite 35 776 722.11 toneladas de CO₂ menos que el portafolio nacional de 2018. Este hecho se traduce en un ahorro de 1 300 483 849 de dólares al año por la reducción de emisiones de CO₂.
- c) El portafolio eficiente de menor costo y mayor riesgo conlleva a ahorrar un promedio de 15.34 dólares por cada MWh generado. Que se traduce en un ahorro de 3 142 751 820 de dólares en la generación eléctrica de 2018. No obstante, el riesgo de este portafolio eficiente es mayor que el riesgo del portafolio nacional de 2018. Si bien este hecho supone una desventaja, el riesgo de este portafolio eficiente es igual al riesgo de la central de ciclo combinado, la tecnología menos riesgosa de las tres. Por lo que, este portafolio eficiente garantiza el menor CTNGE promedio mientras que su riesgo no excede el riesgo de la tecnología menos riesgosa, la central de ciclo combinado. Adicionalmente, este portafolio eficiente emite 51 901 303.79 toneladas de CO₂ menos que el portafolio nacional de 2018. Este hecho se traduce en un ahorro de 1 886 612 392.602 de dólares al año por la reducción de emisiones de CO₂.

Los resultados sugieren, de manera contundente, que se debe incrementar la participación de la energía nuclear en la generación eléctrica nacional. Se debe de pasar de la participación actual, que es del 4.3%, a una participación que va del 16.51% al 39.13%.

6. Prospectiva de la energía nuclear

De acuerdo con SENER (2017) la participación de la energía nuclear en la generación eléctrica nacional no tendrá cambios significativos en los siguientes años. Hasta 2028, la participación de la energía nuclear decrecerá marginalmente llegando a una participación del 2.61%. Los aumentos de la participación que se proyectan a partir de 2029 sugieren que se planea construir plantas nucleares con la misma capacidad de generación con la que actualmente

cuenta la central de Laguna Verde. Así, la participación proyectada del 4.67% para 2029 sugiere que en ese año se pondrá en marcha otra central nuclear. En 2030 y 2031 se planean incrementos en la participación de la energía nuclear que llegarán al 6.62% y 8.48% respectivamente. Lo que implicaría que para 2031 se contaría con cuatro centrales nucleares con capacidad de generación similar a la que cuenta actualmente la central de Laguna Verde. La figura 4 muestra las proyecciones de la participación de la energía nuclear.



Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de SENER (2017 y 2019).

Figura 4

Proyección de la participación de la energía nuclear en la generación eléctrica

Partiendo de las distribuciones de probabilidad de los CTNGE de las tecnologías de carga base empleadas para el presente análisis, es evidente que la participación proyectada de la energía nuclear en la generación eléctrica nacional no sería eficiente. De hecho, los portafolios de tecnologías de carga base proyectados por SENER (2017) distan mucho de encontrarse en la frontera eficiente.⁷ La tabla 6 y la figura 5 muestran que los portafolios proyectados para 2019-2024 son ligeramente más costosos y riesgosos que el portafolio de 2018.

⁷ Es de destacar que para 2019-2024, la participación proyectada de las tecnologías de carga base varía ligeramente con respecto a su participación del 2018, que fue del 64.5%.

Tabla 6
Características de los portafolios proyectados de *tc-cc-cn*

Año	Participación (%)			CTNGE (Media)	Riesgo
	<i>cc</i>	<i>tc</i>	<i>cn</i>		
2018	51	13.2	4.3	78.14	4.49
2019	48.9	10.96	3.39	79.10	4.51
2020	51.81	10.71	3.3	78.95	4.53
2021	50.27	10.37	3.2	78.95	4.53
2022	49.62	10.06	3.1	78.92	4.53
2023	49.26	9.77	3.01	78.88	4.54
2024	48.98	9.49	2.93	78.84	4.55

Fuente: elaboración propia con datos de SENER (2017).

En la figura 5, el punto rojo corresponde al portafolio de 2018. Los puntos azules ubicados por arriba del punto rojo corresponden a los portafolios proyectados para 2019-2024. Debido a que son muy cercanos entre ellos, no se les asignó ninguna etiqueta. No obstante, es evidente que dichos portafolios son aún más ineficientes que el portafolio de 2018.



Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de Gómez-Ríos y Juárez-Luna (2019) y SENER (2017).

Figura 5
Portafolios de 2018-2024 comparados con la frontera eficiente

7. Implicaciones y recomendaciones de política pública

El análisis anterior sugiere importantes implicaciones de política pública con respecto a la participación de la generación eléctrica a través de las centrales nucleares.

Para ello, hay que tener presente que, de acuerdo con la Ley de Transición Eléctrica y la Ley General de Cambio Climático (citadas en SENER, 2019), México debe contar con una participación mínima de 35% de Energías Limpias⁸ en la generación eléctrica para 2024. Las Energías limpias que actualmente existen en México son Hidroeléctrica, Geotermoeléctrica, Eoloeléctrica, Fotovoltaica, Bioenergía, Cogeneración eficiente y Nucleoeléctrica. A finales de 2018, la participación de las Energías Limpias en las Generación Eléctrica nacional fué de 23.18%. De este porcentaje, 4.3% correspondió a la Nucleoeléctrica mientras que las otras Energías Limpias sumaron 18.88%.

De acuerdo con SENER (2017), se tiene proyectado que para 2024 la participación de las Energías Limpias, sin considerar a la energía nuclear, será del 37.02%. Es evidente que la generación eléctrica a través de las centrales nucleares no está considerada para cumplir los requerimientos establecidos por la Ley de Transición Eléctrica y la Ley General de Cambio Climático para 2024. No obstante, los resultados obtenidos en el presente análisis sugieren que la participación eficiente de la energía nuclear en la generación eléctrica, aumentará considerablemente la participación de las Energías Limpias en la generación eléctrica nacional. Por lo que, a diferencia de lo que se tiene planeado, se debe impulsar también el aumento de la participación de la energía nuclear.

Por lo anterior, se recomienda llevar la participación de la energía nuclear a niveles eficientes. Concretamente, las recomendaciones e implicaciones de política pública, para los portafolios eficientes analizados, son las siguientes:

- a) El portafolio eficiente de mayor costo y menor riesgo sugiere reducir la participación de las termoeléctricas de carbon y las centrales de ciclo combinado en un porcentaje alrededor del 25%. Este hecho esta acompañado de un incremento en la participación de la central nuclear del 284%, lo que equivale a construir tres centrales nucleares con la misma capacidad de generación que la central nuclear de Laguna Verde. Este incremento en la participación de las centrales nucleares garantiza que se tendrá un porcentaje de al menos 35.39% de participación de Energías Limpias en la generación eléctrica nacional. Con lo que se reducirán las emisiones de CO₂ y se cumplirá con la participación

⁸ Ver SENER (2019) para la definición y características de las Energías Limpias.

mínima establecida en la Ley de Transición Eléctrica y en la Ley General de Cambio Climático.

- b) El portafolio eficiente con el mismo riesgo que el portafolio nacional de 2018 sugiere que la participación de la Termoeléctrica de carbón se debe reducir en 85%. Adicionalmente, la central de ciclo combinado debe reducir su participación en más de 31%. Por otro lado, la central nuclear debe aumentar su participación en 536%, lo que equivale a construir seis centrales nucleares con la misma capacidad de generación que la central nuclear de Laguna Verde. Este portafolio eficiente garantiza una importante reducción en las emisiones de CO₂, así como garantiza una participación de Energías Limpias de al menos 46.23% en la generación eléctrica nacional.
- c) El portafolio eficiente de menor costo y mayor riesgo sugiere reducir la participación de la termoeléctrica de carbón en casi 99%. La central de ciclo combinado deberá reducir su participación en poco más del 50%. Por otro lado, la central nuclear incrementará su participación en 810%, que es equivalente a construir ocho centrales nucleares con la misma capacidad de generación que la central nuclear de Laguna Verde. Este portafolio eficiente garantiza una participación de Energías Limpias de al menos 58.01% en la generación eléctrica nacional. Lo que conlleva a una significativa reducción de emisiones de CO₂.

El análisis sugiere que se debe incrementar la participación de la central nuclear en un rango que va de 284% al 810%. Este hecho va acompañado de reducciones de las participaciones de la Termoeléctrica de carbón y de las centrales de ciclo combinado. Lo que en conjunto significa un incremento significativo en la participación de las Energías Limpias en la generación eléctrica nacional. Además, se garantiza una reducción importante en las emisiones de CO₂.

Note que los tres portafolios eficientes analizados ofrecen importantes ventajas sobre el portafolio nacional de 2018. La elección de un portafolio en particular dependerá de la aversión al riesgo del tomador de decisiones. No obstante, independientemente del portafolio eficiente que se elija, el presente análisis muestra que se debe incrementar, de manera urgente, la participación de la central nuclear en la generación eléctrica nacional.

Los resultados del presente análisis dan sustento teórico a lo planteado por el gobierno del presidente López Obrador: contemplar generar más electricidad a través de energía nuclear (Solís, 2019).

Es de hacer notar que las implicaciones del presente análisis enfrentan diversas limitaciones, principalmente técnicas, de las cuales destacan las siguientes:

1. Construir una central nuclear implica un plan de inversión que excede a un periodo presidencial mexicano.

2. Las centrales nucleares tienen mucha oposición social derivada de algunos accidentes como el de Fukushima en 2011.¹⁰
3. México cuenta con muy poca investigación destinada a energía nuclear. Se cuenta con dos lugares destinados a esa tarea. Por un lado, se tiene al Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ). Por otro lado, la Universidad de Zacatecas cuenta con un reactor nuclear que se emplea para entrenamiento (WNA, 2019c).
4. La Constitución mexicana establece en el artículo 27 que “Corresponde también a la Nación el aprovechamiento de los combustibles nucleares para la generación de energía nuclear y la regulación de sus aplicaciones en otros propósitos. El uso de la energía nuclear sólo podrá tener fines pacíficos” (Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, 2016). Por lo que no se prevé una liberalización en la generación de electricidad a través de energía nuclear.

8. Conclusiones

El presente análisis sugiere un incremento importante de la participación de la central nuclear en la generación eléctrica nacional. Como mínimo, se deben construir tres centrales nucleares con la misma capacidad de generación que la central nuclear de Laguna Verde. Este hecho implica:

- i) un ahorro promedio de 4.06 dólares por cada MWh generado;
- ii) una reducción en el riesgo del portafolio;
- iii) una reducción de 13 859 646.26 toneladas de CO₂ comparado con el portafolio nacional de 2018, lo que se traduce en un ahorro de 503 798 141.629 de dólares al año por la reducción de emisiones de CO₂.
- iv) Una participación de al menos 35.39% de Energías Limpias en la generación eléctrica nacional.

Al incrementar la participación de la energía nuclear en la generación eléctrica nacional en más de tres centrales nucleares, el ahorro promedio por cada MWh generado aumenta; el riesgo del portafolio aumenta; las emisiones de CO₂ así como los costos relacionados a ellas se reducen, y; la participación de Energías Limpias en la generación eléctrica nacional aumenta.

Es importante destacar dos cosas: primero, los resultados del presente análisis, en cuanto a la participación de la central nuclear, se pueden modificar si se incluyen otras energías limpias en el portafolio de generación eléctrica. Por lo que, un análisis más completo incluirá otras alternativas de energías limpias, como la fotovoltaica y la eólica, por ejemplo.

¹⁰ Roques *et al.* (2006) señala algunas características que hacen poco atractivas a las centrales nucleares.

Segundo, en la central de Laguna Verde se emplean dos reactores BWR,¹¹ que corresponden a reactores de segunda generación. Para el presente análisis se consideró un reactor ABWR,¹² que pertenece a la tercera generación. Actualmente se está realizando investigación para la construcción de reactores de generación iv (Goldberg y Rosner, 2011). Se espera que los reactores de generación iv alcancen la máxima sostenibilidad posible, sean más pequeños, requieran la inversión económica más baja posible, y sean tan seguros y fiables que minimizarán la probabilidad de que el núcleo del reactor sufra daños (López, 2019). Por lo que, futuros estudios deben considerar las características económicas y técnicas de los diferentes reactores nucleares disponibles. A este respecto, se puede hacer el análisis de un portafolio que contenga diferentes reactores nucleares, como el realizado por Jain *et al.* (2014). Con ello, se podrían encontrar combinaciones de reactores que reduzcan los costos de generación eléctrica aún más de lo que se ha encontrado en el presente análisis.

Referencias

- Al-mulali, U. (2014). "Investigating the impact of nuclear energy consumption on GDP growth and CO₂ emission: A panel data analysis", *Progress in Nuclear Energy*, vol. 73: 172-178. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2014.02.002>.
- Alonso G.; S. Bilbao y E. del Valle (2016) "Economic competitiveness of small modular reactors versus coal and combined cycle plants", *Energy*, 116, pp. 867-879. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.10.030>.

¹¹ Reactor de ebullición de agua (BWR, por sus siglas en inglés).

¹² Reactor avanzado de ebullición de agua (ABWR, por sus siglas en inglés).

- Alonso, G. y E. D. Valle (2013). "Economic analysis of an alternative strategy for CO₂ mitigation based on nuclear power", *Energy*, 52, pp. 66-76. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.02.028>.
- Alonso, G.; J. Ramírez y J. Palacios (2011). "Energía nuclear en México, como alternativa para la reducción de emisiones de CO₂". *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, pp. 271-273. <http://www.scielo.org.mx/pdf/rica/v27n3/v27n3a12.pdf>.
- Alonso G.; J. R. Ramirez y J. C. Palacios (2007). Nuclear Energy Economical Viability. In: Klapp J., Cervantes-Cota J. L., Chávez Alcalá J. F. (eds) Towards a Cleaner Planet. Environmental Science and Engineering (Environmental Science). Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-71345-6_14.
- Baek, J., y D. Pride (2014). "On the income–nuclear energy–CO₂ emissions nexus revisited", *Energy Economics*, vol. 43: 6-10. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2014.01.015>.
- Borenstein, Severin (2012). "The Private and Public Economics of Renewable Electricity Generation." *Journal of Economic Perspectives*, 26 (1): 67-92. <https://doi.org/10.3386/w17695>.
- Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos (2016). <http://www.ordenjuridico.gob.mx/Constitucion/cn16.pdf>, 5 de noviembre de 2019.
- Goldberg, S. M. y R. Rosner (2011). *Nuclear Reactors: Generation to Generation*, American Academy of Arts and Sciences. <https://www.amacad.org/sites/default/files/academy/pdfs/nuclearReactors.pdf>, 25 de octubre de 2019.
- Gómez-Ríos, María del Carmen y Juárez-Luna, David (2019). "Costo de generación eléctrica incorporando externalidades ambientales: Mezcla óptima de tecnologías de carga base" *Revista Mexicana de Economía y Finanzas Nueva Época*, vol. 14, núm. 3, julio-septiembre 2019, pp. 353-377. <https://doi.org/10.21919/remef.v14i3.308>.
- Gómez-Ríos, María del Carmen y Juárez-Luna, David (2018). "Precio de las emisiones de CO₂ en la generación eléctrica". MPRA Paper 89915. University Library of Munich, Germany. https://mpra.ub.uni-muenchen.de/89915/1/MPRA_paper_89915.pdf.
- Iwata, H.; K. Okada and S. Samreth (2010). "Empirical study on the environmental Kuznets curve for CO₂ in France: The role of nuclear energy", *Energy Policy*, vol. 38 (8): 4057-4063. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.03.031>.
- Jain, S.; F. Roelofs y C. W. Oosterlee (2014). Decision-support tool for assessing future nuclear reactor generation portfolios. *Energy Economics* 44: 99-112. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2014.03.021>.
- Juárez-Luna, David (2021), "Power generation portfolios: A parametric formulation of the efficient frontier" *Revista Mexicana de Economía y Finanzas Nueva Época*, Volumen 16, número 1, Enero- marzo 2021, pp. 1-29. <https://doi.org/10.21919/remef.v16i1.447>.
- López, J. C. (2019). "Reactores nucleares más pequeños, limpios, seguros y baratos: esto es lo que nos promete la fisión nuclear de cuarta generación", <https://www.xataka.com/investigacion/reactores-nucleares-pequenos-limpios-seguros-baratos-esto-que-nos-promete-fision-nuclear-cuarta-generacion>, 25 de octubre de 2019.

- Markowitz, H. M. (1952). "Portfolio Selection", *Journal of Finance*, vol. 7, pp 77-91. <https://doi.org/10.1111/j.1540-6261.1952.tb01525.x>.
- Menyah, K. y Wolde-Rufael, Yemane (2010). "CO₂ emissions, nuclear energy, renewable energy and economic growth in the US", *Energy Policy*, vol. 38 (6): 2911-2915. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.01.024>.
- Nuclear Energy Agency (NEA) e International Energy Agency (IEA) (2015). Projected Costs of Generating Electricity. <https://www.oecd-nea.org/ndd/pubs/2015/7057-proj-costs-electricity-2015.pdf>.
- Roques, F. A.; D. M. Newbery y W. J. Nuttall (2008). "Fuel mix diversification incentives in liberalized electricity markets: A Mean-Variance Portfolio theory approach", *Energy Economics*, vol. 30, Issue 4: 1831-1849. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2007.11.008>.
- Roques, F. A.; W. J. Nuttall; D. M. Newbery; R. de Neufville y S. Connors (2006). "Nuclear Power: a Hedge against Uncertain Gas and Carbon Prices?" *The Energy Journal*, 27 (4): 1-24. <https://doi.org/10.5547/issn0195-6574-ej-vol27-no4-1>.
- Sarmiento A. (2013). "La energía nuclear no es un componente en la mitigación del Calentamiento Global Antropogénico". *Tamoanchan-Revista de Ciencias y Humanidades*, 4(6). <http://www.matcuer.unam.mx/~ansar/NoNuclearVScalGlo.pdf>.
- Secretaría de Energía (2019) [SENER (2019)]. Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2019-2033. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/475497/PRODESEN_V.pdf
- Secretaría de Energía (2017) [SENER (2017)]. Prospectiva del sector eléctrico 2017-2031. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/284345/Prospectiva_del_Sector_El_ctrico_2017.pdf.
- Solís, A. (2019). "Gobierno de AMLO contempla generar más electricidad con energía nuclear". Forbes México. <https://www.forbes.com.mx/gobierno-de-amlo-contempla-generar-mas-electricidad-con-energia-nuclear/> 20 de octubre de 2019.
- Vithayasrichareon, P.; I. F. MacGill y F. Wen (2010). "Electricity Generation Portfolio Analysis for Coal, Gas and Nuclear Plant under Future Uncertainties". 4th IASTED Asian Conference on Power and Energy Systems. <https://doi.org/10.2316/p.2010.701-027>.
- World Nuclear Association (2019a). "Nuclear Power in the World Today", <https://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/nuclear-power-in-the-world-today.aspx>, 28 de octubre de 2019.
- World Nuclear Association (2019b). "Plans For New Reactors Worldwide", <https://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/plans-for-new-reactors-worldwide.aspx>, 28 de octubre de 2019.
- World Nuclear Association (2019c). "Nuclear Power in Mexico", <https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-g-n/mexico.aspx>, 29 de octubre de 2019.