

## **Impacto económico-ambiental del planeamiento estratégico de inversiones en el sector energético de la Argentina.**

Julio R. Flores, Jorge M. Montagna, Aldo Vecchietti

INGAR-UTN, Avellaneda 3657, Santa Fe, Argentina  
{jflores, mmontagna, aldovec}@santafe-conicet.gov.ar

**Resumen.** En este trabajo se presenta un programa de optimización multiperíodo para analizar un plan estratégico de inversiones en el sector energético, que tiene en cuenta los recursos naturales renovables y no-renovables disponibles en la región. El objetivo es ponderar las inversiones desde el punto de vista económico y el ambiental. Este último medido a través de la emisión de gases de efecto invernadero y su apreciación por medio de los bonos de carbono. Se presentan los resultados obtenidos en la evaluación de diversos escenarios con el objeto de realizar un análisis de sensibilidad respecto del valor de mercado de los bonos de carbono y el aumento de reservas de gas natural.

**Palabras Claves:** Planeamiento estratégico, Energías renovables, Impacto económico-ambiental, Modelo matemático multiperíodo.

### **1 Introducción**

En los últimos años, las fuentes de energía renovables han adquirido una gran relevancia en la producción de energía, para reducir la dependencia en los combustibles fósiles y la emisión de gases con efecto invernadero. Muchos países comenzaron hace ya algunos años el proceso de producción de energía a partir de estas fuentes, considerando que el consumo se incrementa proporcionalmente al crecimiento de la población; que los recursos naturales como el petróleo, gas, carbón y uranio tienen una reserva limitada y que es necesario disminuir el calentamiento global por la concentración de dióxido de carbono y otros gases en la atmósfera. La búsqueda de fuentes de energía sustentables con un bajo impacto ambiental se ha transformado en un elemento fundamental para el desarrollo de los países.

En la bibliografía existen numerosos trabajos en los que se estudian las fuentes de energía renovables y sus efectos beneficiosos para el ambiente. Zhang y colaboradores [1] presentan un modelo multiperíodo para el planeamiento óptimo del sector generador de potencia de China para los años 2010-2050. El horizonte de tiempo lo dividen en varios intervalos de tiempo, sobre los cuales las plantas de potencia son instaladas, modificadas o cerradas. En ellas se estudia la disminución de emisión de gases de efecto invernadero por medio de la captura de CO<sub>2</sub>. Los autores presentan los

resultados obtenidos en la resolución de un caso de estudio con datos reales de la producción de energía de China. Cucek y colaboradores [2] presentan un programa mixto-entero lineal (MILP) para la síntesis del proceso de biogás basado en la evaluación del ciclo de vida en la producción de energía. Ellos emplean el concepto del eco-beneficio que calcula la diferencia entre la carga y la descarga de gases efecto invernadero al medio-ambiente. La función objetivo es la maximización del beneficio ambiental (eco-beneficio) que es medido en términos económicos. Existen otros trabajos que analizan la producción de energía sólo por medio de energías renovables con un bajo impacto sobre el ambiente. Por ejemplo, Conolly y colaboradores [3] analizan el caso de Irlanda por medio de EnergyPLAN que es una herramienta para realizar un análisis que incluye los sectores: eléctrico, calefacción, transporte y otros sectores de consumo de energía. Los autores analizan diversos escenarios y fuentes de energía sustentable, y muestran los resultados obtenidos. Ellos concluyen que el estudio sirve para propósitos ilustrativos y que se debe realizar un análisis más realista que contemple aspectos económicos y ambientales.

El trabajo que se presenta en este artículo, es una evolución de un modelo de optimización matemático multiperíodo disyuntivo lineal para analizar las inversiones en fuentes de energía (renovables o no-renovables) para cubrir las demandas energéticas de la Argentina [4]. En ese estudio, la función objetivo sólo contenía términos económicos, las restricciones estaban centradas en las demandas de los diferentes sectores, la capacidad de producción de las plantas convertoras de materias primas en energía, las nuevas inversiones y las restricciones en recursos renovables y no-renovables. En el modelo que se presenta en este trabajo, se incluye el impacto ambiental en la generación de energía en la función objetivo y en las restricciones. En la función objetivo se incluyen los bonos de carbono (también denominados bonos verdes) que consideran la reducción de emisiones (ERU), que corresponde a la cantidad de gases de efecto invernadero que dejan de generarse por el empleo de combustibles alternativos o tecnologías que permiten la captura de estos gases. Los bonos verdes tienen un valor monetario en el mercado y permiten cuantificar el valor de la reducción de emisiones. En las restricciones entonces se incluye la emisión que cada fuente de energía tiene de acuerdo con su capacidad de producción, que en el trabajo anterior no se había contemplado. En este análisis se tiene en cuenta el hecho que en las próximas décadas, dada la fuerte dependencia actual de los combustibles fósiles y otros recursos naturales no-renovables, la matriz energética seguirá dependiendo de estas fuentes de energía y es por ello que el plan de inversión que se estudia incluye tanto la producción de energía convencional como de fuentes renovables.

## **2 El Modelo**

El modelo matemático desarrollado contempla como fuentes de energía no-renovables el uso de petróleo, gas natural y energía nuclear; en cuanto a las renovables incluye el empleo de la energía eólica, biomasa, hidráulica y solar. Los sectores consumidores son el industrial, transporte, calefacción residencial y comercial, energía eléctrica industrial y residencial. Se contemplan los costos de operación de las plan-

tas conversoras existentes y los costos de inversión y operación de las nuevas, así como el “cash flow” necesario para manejar las inversiones. Los aspectos ambientales se contemplan por la inclusión de los bonos de carbono en la función objetivo.

La función objetivo es maximizar el valor presente neto global del mercado energético y, como se comentó en la sección anterior, para los bonos verdes se considera sólo las unidades de reducción de emisiones (ERU), correspondiente al valor de la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero.

## 2.1 Función Objetivo

La función objetivo (1) consiste en la maximización del valor presente neto, considerando las ventas de los derechos de emisiones en el año que se produce la reducción.

$$VPN = \sum_{k \in \text{USO}_{i,k}} \sum_t \frac{\left( \sum_{i \in \text{USO}_{i,k}} \text{CashFlow}_{i,k,t} + Bv_t \cdot (GGEI_{k,t} - XGEI_{k,t}) \right)}{(1+TI)^t} \quad (1)$$

En (1), VPN corresponde al valor presente neto, que es igual a la suma actualizada de: los flujos de cajas ( $\text{CashFlow}_{i,k,t}$ ) de cada una de las industrias que entrega la energía  $i$  al mercado  $k$  en el periodo  $t$ , más las ventas de los derechos de emisión de GEI (Gases de Efecto Invernadero), que se estiman a partir de un balance de los gases de emisión expresados en toneladas equivalentes de  $\text{CO}_2$ .  $GGEI_{k,t}$  corresponde a las emisiones que se producirían si se continúa usando la misma proporción de matriz energética del 2010 durante todo el horizonte de tiempo, satisfaciendo la creciente demanda del mercado  $k$  para el periodo  $t$ , mientras que  $XGEI_{k,t}$  son las emisiones generadas para satisfacer la demanda de  $k$  propuesta por el modelo para el periodo  $t$  (contemplando nuevas inversiones en fuentes de energía) y  $Bv_t$  es el precio de los bonos verdes en cada periodo  $t$  que se expresa en pesos por tonelada de  $\text{CO}_2$ .

El parámetro  $TI$  representa la tasa de interés adoptada para realizar la actualización de los valores.

## 2.2 Flujo de Caja

El flujo de caja (2) es un balance financiero de las empresas que expresa la diferencia entre los ingresos y los egresos, más el pago de impuestos y la deducción impositiva por la amortización de nuevas instalaciones.

$$\text{CashFlow}_{i,k,t} = (1 - \text{Tax}) \cdot (P_{i,k,t} \cdot x_{i,k,t} \cdot \text{hr} - CI_{i,k,t} - \text{CSup}_{i,k,t} - CO_{i,k} \cdot x_{i,k,t} \cdot \text{hr}) + \text{Tax} \cdot CA_{i,k,t} \quad (2)$$

En (2)  $\text{Tax}$  es la tasa de impuestos, por lo que el saldo neto está dado por  $(1 - \text{Tax})$  multiplicado por el saldo bruto y a esto se le suma la deducción de impuestos expresado por  $(\text{Tax} \cdot CA_{i,k,t})$ . El saldo bruto es la resta entre los ingresos por ventas y los egresos de la actividad realizada. El único ingreso considerado es por ventas, que está dado por el producto entre el precio ( $P_{i,k,t}$ ) y la cantidad vendida de energía ( $x_{i,k,t} \cdot \text{hr}$ )

mientras que los egresos contemplan los costos de nuevas inversiones ( $CI_{i,k,t}$ ), de startup de las instalaciones ( $CSup_{i,k,t}$ ) y los costos propios de operación de las plantas expresado por el producto del costo unitario ( $CO_{i,k,t}$ ), por la cantidad producida de energía ( $x_{i,k,t} \cdot hr$ ). Todos estos valores medido para la fuente de energía  $i$  mercado  $k$  en el periodo  $t$ .

### 2.3 Amortización

Para el cálculo de la amortización en (2), sólo se consideran las nuevas instalaciones una vez que éstas entraron en producción y se las estima empleando el método de la línea recta, para esto se inicializa la amortización por medio de la ecuación (3). Con (4) se calcula los costos de amortización de las primeras inversiones, pero en (5) se realiza el descuento de las instalaciones que ya se terminaron de amortizar.

$$CA_{i,k,t} = 0 \quad , \forall i \in uso_{i,k}, \quad \forall k \in uso_{i,k} \quad \forall t < T_{i,k} \quad (3)$$

$$CA_{i,k,t} = CA_{i,k,t-1} + 0.85 \frac{CI_{i,k,t-T_{i,k}}}{TVU_{i,k}} \quad , \forall i \in uso_{i,k}, \quad \forall k \in uso_{i,k} \quad \forall t < TVU_{i,k} \quad (4)$$

$$CA_{i,k,t} = CA_{i,k,t-1} + 0.85 \frac{CI_{i,k,t-T_{i,k}} - CI_{i,k,t-(T_{i,k}+TVU_{i,k})}}{TVU_{i,k}} \quad , \forall i \in uso_{i,k}, \quad \forall k \in uso_{i,k} \quad \forall t > TVU_{i,k} \quad (5)$$

### 2.4 Emisiones de Gases

Para la estimación de emisiones de los GEI se emplearon factores de emisión que se encuentran tabulados y son propuestos por “The Intergovernmental Panel on Climate Change” (IPCC) que es el organismo que regula la generación de gases de efecto invernadero [5]. Este organismo tiene tres niveles de factores de emisión, la forma básica o nivel 1, que estima de forma estequiométrica la generación de  $CO_2$ , por tipo de carburante, y con esto se estima una generación de  $NO_x$ , con ambos valores se calcula un factor de generación expresado en equivalentes de  $CO_2$ . El nivel 2, considera que existen medidas o factores a nivel país (“country specific”) y el nivel 3 es más específico y toma en cuenta medidas efectuadas puntualmente. En este trabajo, se adoptaron los valores del nivel 1, ya que no se conocen valores a nivel país, ni específicos. En (6) se realiza el cálculo de las emisiones como la suma de todas las emisiones para el mercado  $k$  en el periodo  $t$ . En donde  $fGEI_{i,k}$  es el factor de generación y ( $x_{i,k,t} \cdot hr$ ) es la producción anual de la fuente  $i$  para el uso  $k$  en el periodo  $t$ .

$$XGEI_{k,t} = \sum_{i \in uso_{i,k}} fGEI_{i,k} \cdot x_{i,k,t} \cdot hr \quad , \forall k, \quad \forall t \quad (6)$$

En (7) se realiza la estimación de las emisiones como si se continuara usando la misma proporción de fuentes para el mercado  $k$ , que se expresa con la relación por-

centual  $PD_{i,k}$ , y por último se estima las unidades de reducción de emisiones directamente en la función objetivo realizando la resta de estos dos valores.

$$GGEI_{k,t} = \left( \sum_{i \in uso_{i,k}} fGEI_{i,k} \cdot PD_{i,k} \right) \cdot D_{k,t} \quad , \forall k, \forall t \quad (7)$$

### 2.5 Decisiones de Inversión

Las decisiones de inversión se modelan por medio de Programación Disyuntiva Generalizada (PDG) a través de una disyunción anidada, en donde el primer nivel de decisión indica si se realiza o no una inversión en la fuente  $i$  al mercado  $k$  y es manejado por la variable  $w_{i,k,t-T_{i,k}}$  y el segundo nivel de decisión considera el tamaño de la nueva instalación, donde cada término está manejado por la variable booleana  $y_{r,i,k,t-T_{i,k}}$  que asume el valor verdadero si se decide invertir en una fuente de energía  $i$  para el uso  $k$  en el periodo  $t-T_{i,k}$ . Cada término tiene un rango de incremento de capacidad y este rango establece el monto que se va a invertir. En (8)  $y_{r,i,k,t-T_{i,k}}$  es la variable de decisión de inversión,  $ICap_{i,k,t}$  es la variable que indica cuánto se incrementa la capacidad productiva de la fuente  $i$  aplicada al uso  $k$  en el periodo  $t$  que está limitada por el parámetro  $Imax_{r,i,k}$ ,  $CI_{i,k,t-T_{i,k}}$  es una variable que indica el monto a invertir en ese rango que está limitado por el parámetro  $Cm_{r,i,k}$  y  $CSup_{i,k,t-1}$  es la variable que representa el costo de “startup” de las nuevas instalaciones y toma valores fijos que dependerán en gran medida de la capacidad y se erogarán un periodo antes de la entrada en producción de la planta. Las disyunciones del segundo nivel son exclusivas por lo que sólo un único miembro puede ser verdadero y todos los otros falsos.

$$\bigvee_{r=1..R} \left[ \begin{array}{c} w_{i,k,t-T_{i,k}} \\ y_{r,i,k,t-T_{i,k}} \\ CI_{i,k,t-T_{i,k}} \geq Cm_{r,i,k} \\ ICap_{i,k,t} \leq Imax_{r,i,k} \\ CSup_{i,k,t-1} = Sm_{r,i,k} \end{array} \right] \bigvee \left[ \begin{array}{c} \neg w_{i,k,t-T_{i,k}} \\ CI_{i,k,t-T_{i,k}} = 0 \\ ICap_{i,k,t} = 0 \\ CSup_{i,k,t-1} = 0 \end{array} \right] \quad \forall t > T_{i,k}, \quad \forall i \in uso_{i,k}, \quad \forall k \in uso_{i,k} \quad (8)$$

El tiempo que toman la realización de las obras civiles, la puesta en marcha y puesta en punto de una nueva instalación se expresa por el parámetro  $T_{i,k}$ , produciendo un desfase entre el momento de la toma de la decisión de la inversión (tiempo  $t$ ) y el momento del inicio de la vida productiva.

### 2.6 Destilerías

La ecuación (9) vincula la generación de los combustibles derivados del petróleo con su materia prima. La cantidad del combustible  $i$  para el período  $t$  ( $q_{i,t}$ ) se obtiene a partir de lo que se produce de petróleo anualmente  $q_{p,t}$  multiplicado por un coeficiente que se da como parámetro denominado  $Corte_i$ . Este parámetro se calculó como el promedio de la fracción de cada derivado presente en los crudos argentinos, que

fueron estimados a partir de los reportes del Instituto Argentino de Petróleo y Gas (2010) [6].

$$q_{i,t} = Corte_i \cdot q_{P,t} \quad \forall i \in Derivados, \forall t \quad (9)$$

## 2.7 Restricciones de Demanda y Producción

Se estimó la demanda energética de la Argentina a partir de diversos datos históricos de los mercados considerados y a los fines del modelo es un parámetro que se calcula para cada mercado  $k$  en el período  $t$  (parámetro  $D_{k,t}$ ). Se supuso un crecimiento lineal para cada periodo de tiempo. La ec. (10) expresa que la demanda de energía para el uso  $k$ , en periodo  $t$  ( $D_{k,t}$ ) se calcula como la demanda de energía en el periodo inicial ( $D0_k$ ), más el incremento ( $\alpha_k$ ) multiplicados por la cantidad de periodos menos 1.

$$D_{k,t} = D0_k + \alpha_k \cdot (t-1) \quad \forall k, \forall t \quad (10)$$

La ec. (11) establece que la demanda del mercado  $k$  debe ser satisfecha por cualquier combinación posible de las fuentes  $i$  en todos los periodos  $t$ .

$$\sum_{i \in uso_{i,k}} f_{i,k} \cdot x_{i,k,t} \cdot hr = D_{k,t} \quad \forall k, \forall t \quad (11)$$

En la ec. (11),  $f_{i,k}$  es un parámetro que relaciona la fuente de energía  $i$  para el destino  $k$ , indicando el rendimiento y factor de conversión de unidades entre ambos. La variable  $x_{i,k,t}$  se corresponde con el flujo energético de la fuente  $i$  para el destino  $k$  en el período  $t$ ; y el parámetro  $hr$  representa la cantidad de horas de operación anual.

La ec. (12) limita la cantidad que se puede producir considerando que las plantas actualmente instaladas estén produciendo o no a toda su capacidad. La variable  $Cap_{i,k,t}$  es la capacidad y varía de período a período dependiendo de las decisiones de inversión.

$$f_{i,k} \cdot x_{i,k,t} \leq Cap_{i,k,t} \quad \forall i \in uso_{i,k}, \quad \forall k \in uso_{i,k}, \quad \forall t \quad (12)$$

## 2.8 Capacidades

La expresión (13) indica que la capacidad instalada de la fuente  $i$  para el uso  $k$  en el tiempo  $t$  menor o igual a  $T_{i,k}$  ( $Cap_{i,k,t}$ ) es igual a la capacidad inicial ( $Cap0_{i,k}$ ), mientras que (14) establece que la capacidad instalada en el tiempo  $t$  mayor a  $T_{i,k}$  para la fuente  $i$  y el destino  $k$  ( $Cap_{i,k,t}$ ) es igual a la capacidad en el tiempo  $t-1$  ( $Cap_{i,k,t-1}$ ) más el incremento, cuya inversión se decidió en el tiempo  $t-T_{i,k}$  ( $ICap_{i,k,t}$ ), como lo muestra la ec. (8).

$$Cap_{i,k,t} = Cap0_{i,k} \quad \forall t \leq T_{i,k}, \quad \forall i \in uso_{i,k}, \quad \forall k \in uso_{i,k} \quad (13)$$

$$Cap_{i,k,t} = Cap_{i,k,t-1} + ICap_{i,k,t} \quad t > T_{i,k}, \quad \forall i \in uso_{i,k}, \quad \forall k \in uso_{i,k} \quad (14)$$

## 2.9 Disponibilidad

La ecuación (15) establece que la producción para una fuente  $i$  en un periodo  $t$  ( $q_{i,t}$ ) debe ser igual a la sumatoria para todos los usos  $k$  de la fuente  $i$  en el periodo  $t$  por la cantidad de horas de operación anuales. La ecuación (16) expresa que no se puede producir más energía que la disponible por las reservas de uranio, gas y petróleo para el conjunto de las no-renovables ( $NR$ ). Mientras que las ecuaciones (17) y (18) establecen el balance de las reservas a lo largo del horizonte de estudio, siendo  $CD_i$  las reservas comprobadas al 2010 de la fuente  $i$ , y el parámetro  $\varepsilon_i$  indica cuánto de las reservas se le exige al modelo que queden al final del horizonte de estudio. En (18) se realiza el balance de las reservas para cada fuente  $i$  en el periodo  $t$ , los valores actuales  $RD_{i,t}$  son iguales a las del periodo anterior  $RD_{i,t-1}$ , menos el consumo de las mismas ( $q_{i,t}$ ) más el descubrimiento y explotación de nuevas reservas ( $NewR_{i,t}$ ).

La eq. (19) limita la capacidad de instalar nuevas fuentes de energía renovables de acuerdo con los recursos existentes.

$$q_{i,t} = \sum_{k \in uso_{i,k}} x_{i,k,t} \cdot hr \quad \forall i, \quad \forall t \quad (15)$$

$$q_{i,t} \leq RD_{i,t} \quad , \quad \forall i \in NR, \quad \forall t \quad (16)$$

$$RD_{i,t=1} = \varepsilon_i \cdot CD_i \quad , \quad \forall i \in NR \quad (17)$$

$$RD_{i,t} = RD_{i,t-1} - q_{i,t} + NewR_{i,t} \quad , \quad \forall i \in NR, \quad \forall t > 1 \quad (18)$$

$$\sum_{k \in uso_{i,k}} \frac{Cap_{i,k,t}}{f_{i,k}} \leq CD_i \quad \forall t, \quad \forall i \notin NR \quad (19)$$

El parámetro  $CD_i$ , que limita la instalación de las fuentes de energías renovables, se estimó de diversas maneras: para el caso del biodiesel a partir del cultivo de soja, el valor de  $CD_{BD}$  se corresponde con el 1% del área total cultivada multiplicado por el rendimiento promedio de grano por hectárea por el rendimiento estimado de biodiesel por tonelada de soja. Estos factores se tomaron de acuerdo a los valores sugeridos por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) de la Argentina [7]. Para el bioetanol se aplicó un procedimiento similar, sólo que se consideró como principal fuente de materia prima la caña de azúcar. Para la energía eólica se consideraron regiones factibles para la instalación de parque eólicos aquellas en las que existen vientos en rangos operativos de los aerogeneradores el 80% ó más del tiempo. La Cámara de Energías Renovables de la Argentina [8] presenta datos útiles que facilitaron esta estimación. Para la energía solar se determinó la superficie factible de instalación, recordando que en este trabajo sólo se consideró su aplicación en calefacción residencial, se considera la densidad poblacional y las familias tipo (con 4 integrantes), se estimaron el número de instalaciones posibles que se podrían realizar.

Para la fuente hidrocinética, se propuso un número límite de instalaciones en función de los ríos que podrían alimentar esta tecnología y se consultaron datos del INVAP [9]. Para las reservas y producciones de fuentes de energía convencionales se consultó [10-11].

### 2.10 Cortes de Biocombustibles.

Por condiciones operativas de los motores, se tienen límites en la cantidad de biocombustible que se puede usar, si bien es cierto que existen motores que pueden trabajar puramente con biocombustibles sin problemas, el parque automotor argentino está constituido, en su mayoría, por vehículos que requieren combustibles fósiles para su correcto funcionamiento, por lo que se decidió contemplar los límites operativos máximos en lo que respecta a la cantidad de biocombustibles a mezclar con los combustibles fósiles líquidos, ec. (20) y ec. (21).

$$q_{BE,t} \leq \frac{1}{4} q_{NF,t} \quad \forall t \quad (20)$$

$$q_{BD,t} \leq q_{GO,t} \quad \forall t \quad (21)$$

La ec. (14) expresa que como máximo se producirá una nafta con un 20% de bioetanol, mientras que (15) expresa que como máximo se producirá un combustible con 50% de biodiesel. Estas cotas máximas de empleo de biocombustibles solo establecen un límite superior técnico factible, para permitir que el modelo decida el valor económico dependiendo del combustible que se emplea. Se debe destacar que nuestra legislación admite valores diferentes, pero que se fueron modificando con el tiempo, y se prevé en el futuro un incremento en la proporción.

## 3 Resultados

Se presentan 4 escenarios para evaluar la sensibilidad del modelo de acuerdo con el valor de los bonos de carbono y el descubrimiento de nuevas reservas de gas natural. Se planteó la variación en las reservas de este combustible por varios motivos, en primer lugar porque es el que se emplea en mayor proporción en la matriz energética actual, es el más económico y el que menos emisiones produce entre los de procedencia fósil. Los escenarios que se plantearon son los siguientes:

1. En el primer escenario se considera un caso en donde el valor del bono verde es bajo y no se presentan cambios en las reservas actuales de fuentes no-renovables.
2. En el segundo escenario se incrementa el valor del bono verde respecto del primero.
3. En el tercer escenario se regresa al caso de un valor bajo del bono verde y se incrementan las reservas de gas en un 50% en el año 2020.
4. En el cuarto escenario se incrementa el valor del bono verde respecto del escenario 3.



### 3.1 Escenario 1

En este escenario se plantea que a lo largo de todo el horizonte de estudio, el precio de los bonos verdes se mantendrán en un valor bajo, y que se pueden emplear todas las reservas de combustibles no renovables. La función objetivo alcanza un valor de 53931,18 MUS\$, se realizan inversiones en nuevas instalaciones con un valor de aproximadamente 5516937,75 MUS\$ con un incremento en la capacidad total de 2271,8 TOE (Tonnes of Oil Equivalent).

Observando los resultados obtenidos en la Fig. 1 y en la Tabla 1, se puede decir que desde el comienzo del horizonte de tiempo, se emplea toda la capacidad instalada de energía nuclear, dado que no produce emisiones de gases efectos invernadero, por el mismo motivo, se realizan inversiones iniciales en energía solar para calefacción y en plantas de biodiesel, dado que tiene un impacto importante en el ecuación económica ambiental, en el año 2021 se ponen en marcha los generadores eléctricos eólicos para satisfacer la demanda (que ya no es posible con las otras fuentes de energía) y porque en ese momento su operación se hace económica.

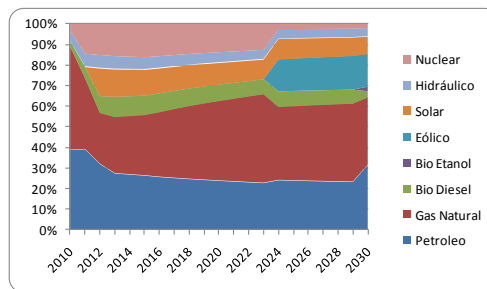


Fig. 1. Empleo de los recursos en el horizonte de estudio. Escenario 1.

Tabla 1. Inversiones realizadas en el escenario 1

		2010		2011		2019		2021		2028	
		MUS\$	TOE	MUS\$	TOE	MUS\$	TOE	MUS\$	TOE	MUS\$	TOE
Bio Diesel	Transporte	144,34	135,95	137,47	97,1					461,61	140,49
Bio Etanol	Transporte										
Eólico	Energía Electrica					3736484	1054,94	1779278,06	179,52		
Solar	Consumo Residencial	414,13	662,43								
Hidráulico	Energía Electrica	18,14	1,37								

### 3.2 Escenario 2

Para este escenario se mantiene la misma situación en las reservas, pero se aumenta el valor de los bonos verdes 100 veces el valor anterior, por lo que el modelo busca disminuir las emisiones empleando fuentes de energía renovables. La función objetivo alcanza un valor de 515398,466 MUS\$, se realizan inversiones de 1780452,43 MUS\$ que producen un incremento de la capacidad de producción de unos 2311,89 TOE.

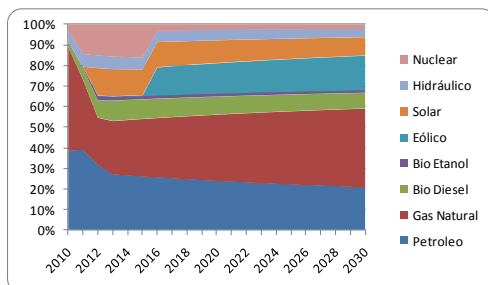


Fig. 2. Empleo de los recursos en el horizonte de estudio. Escenario 2.

Como consecuencia, la inversión en parques eólicos se adelanta al 2015, porque en este caso el impacto económico ambiental permite poner en marcha este tipo de fuente de energía como se observa en la Fig. 2. Por otra parte, se ajusta de forma notoria el empleo de los combustibles fósiles. Las inversiones en energía solar y en biodiesel se realizan de manera similar que en el escenario 1. Otra diferencia que presenta este caso es que la producción de bioetanol comienza en las etapas tempranas del horizonte de tiempo. En la Tabla 2 se presentan las inversiones realizadas en este caso.

Tabla 2. Inversiones realizadas en el escenario 2

		2010		2011		2024	
		MUS\$	TOE	MUS\$	TOE	MUS\$	TOE
Bio Diesel	Transporte	144,34	135,95	144,34	135,08	68,74	32,36
Bio Etanol	Transporte	384,68	110,12				
Eólico	Energía Eléctrica			1779278,06	1234,58		
Solar	Consumo Residencial	414,13	662,43				
Hidráulico	Energía Eléctrica	18,14	1,37				

### 3.3 Escenario 3

En este escenario se propuso un incremento en las reservas disponibles al año 2020, equivalente a un 50% de las reservas actuales manteniendo el precio de los bonos de verdes de acuerdo con el escenario 1. La función objetivo alcanza un valor de 59245,35 MUS\$ y se realizan inversiones por 714,08 MUS\$, que produce un incremento en la capacidad de 896,85 TOE.

Los resultados se organizan en la Fig. 3 y la Tabla 3 de donde se observa que se realiza un importante uso del gas y al final del horizonte se emplea la energía nuclear, se llega al punto de no realizar las inversiones en los parques eólicos lo que lleva a la reducción de los costos de inversión. Las inversiones en energía solar y biodiesel se mantienen similares a los escenarios anteriores.

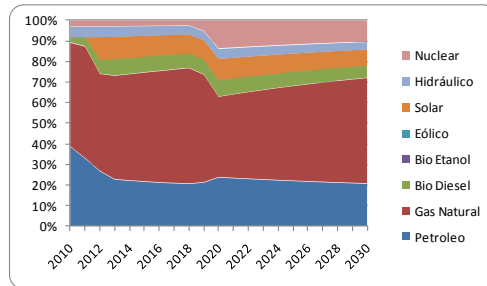


Fig. 3. Empleo de los recursos en el horizonte de estudio. Escenario 3.

Tabla 3. Inversiones realizadas en el escenario 3

		2010		2011		2021	
		MUS\$	TOE	MUS\$	TOE	MUS\$	TOE
Bio Diesel	Transporte	144,34	135,95	137,47	97,1		
Solar	Consumo Residencial	414,13	662,43				
Hidráulico	Energía Electrica					18,14	1,37

### 3.4 Escenario 4

En este escenario se tiene un incremento en cuanto a las reservas de gas pero el precio de los bonos de carbono se ubica en el valor del escenario 2. La función objetivo en este caso alcanza el valor de 515398,46 MUS\$, y se realizan inversiones totales por el monto de 1780452,43 MUS\$ que llevan a un incremento de la capacidad de 2268,51 TOE.

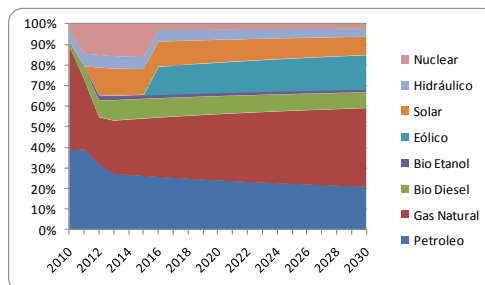


Fig. 4. Empleo de los recursos en el horizonte de estudio. Escenario 4.

Los resultados que se obtienen en este escenario son similares a los del escenario 2 y se presentan en la Fig 4 y la Tabla 4, el incremento en el costo de los bonos verdes es más importante en el balance económico que el descubrimiento de nuevas reservas de gas natural, que es la fuente de combustibles fósiles más barata y menos contaminante.

**Tabla 4.** Inversiones realizadas en el escenario 4

		2010		2011		2024	
		MUS\$	TOE	MUS\$	TOE	MUS\$	TOE
Bio Diesel	Transporte	144,34	135,95	144,34	135,08	68,74	20,89
Bio Etanol	Transporte	384,68	78,21				
Eólico	Energía Eléctrica			1779278,06	1234,58		
Solar	Consumo Residencial	414,13	662,43				
Hidráulico	Energía Eléctrica	18,14	1,37				

## 4 Conclusiones

Se presentó un programa mixto entero lineal (MILP) multiperíodo para analizar un plan estratégico de inversiones en el sector energético, que tiene en cuenta los recursos naturales renovables y no-renovables disponibles en la región. La función objetivo planteada contempla dos aspectos fundamentales a la hora de evaluar alternativas, la valoración económica y el impacto ambiental, medido a través de la emisión de gases de efecto invernadero y su apreciación por medio de los bonos de carbono. Se realizó un análisis de sensibilidad evaluando cuatro escenarios que contemplan el valor de mercado de los bonos de carbono y el aumento de reservas de gas natural, principal componente de la matriz energética en la Argentina.

El análisis de los resultados de los escenarios planteados permite visualizar la fuerte influencia del valor de mercado de los bonos verdes. La inversión en aerogeneradores de energía eléctrica y la producción de bioetanol, que son fuentes de energía sustentable con bajo impacto ambiental pero con altos costos de inversión y operación, dependen fuertemente del valor de los bonos, si su cotización es alta, las inversiones se realizan en las primeras etapas del horizonte de tiempo, aplazándose las mismas cuando baja su valor. En cambio, las inversiones más económicas con bajo impacto ambiental, como la energía solar para calefacción domiciliar y comercial, la producción de biodiesel para el transporte y el empleo de turbinas hidrocinéticas para energía eléctrica son independientes de la cotización de los bonos de carbono. Si se comparan los resultados obtenidos en este trabajo con los presentados en [4] se puede ver que incluir el impacto ambiental afecta fuertemente las inversiones y la operación de las fuentes de energía, esa comparación no se incluye en este artículo por razones de espacio.

El modelo propuesto permite el análisis y la evaluación de diferentes escenarios y sirve para la toma de decisiones en la elaboración de un plan estratégico de inversiones en fuentes de energía que satisfaga las demandas futuras y que tengan un bajo impacto económico-ambiental.

## Referencias

1. Zhang D., Liu P., Ma L., Li Z. y Ni W. "A multi-period modelling and optimization approach to the planning of China's power sector with consideration of carbon dioxide mitigation". Computers and Chemical Engineering 37, p. 227– 247, (2012).
2. Cucek L., Drobe R., Pahor B. y Kravanja Z. "Sustainable synthesis of biogas processes using a novel concept of eco-profit". Computers and Chemical Engineering, 42, p. 87–100, (2012).

3. Connolly D., Lund H., Mathiesen B.V. y Leahy M. *The first step towards a 100% renewable energy-system for Ireland*. Applied Energy, 88, p. 502-507 (2011).
4. Flores J., Rodriguez M. A., Montagna J.M. y Vecchiotti A. "Modelo Matemático para la planificación de inversiones en fuentes de energía renovables para la Argentina" Iberoamerican Journal of Industrial Engineering, Florianópolis, SC, Brasil, v. 3, n. 2, p. 87-102, (2011).
5. Intergovernmental Panel on Climate Change, "2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories", Edited by Simon Eggleston, Leandro Buendia, Kyoko Miwa, Todd Ngara y Kiyoto Tanabe. [accedido: 10/5/2013] < <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol2.html> >.
6. Instituto Argentino de Petróleo y Gas (IAPG), [accedido: 10/5/2013] <<http://www.iapg.org.ar/sectores/estadisticas/productos/listados/Sumplemento.htm>>.
7. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, [accedido: 10/5/2013] < [http://www.inta.gov.ar/iir/info/documentos/energia/indicadores\\_biodesel.pdf](http://www.inta.gov.ar/iir/info/documentos/energia/indicadores_biodesel.pdf) >.
8. Cámara Argentina de Energías Renovables, [accedido: 10/5/2013] <<http://www.argentinarenovables.org/index.php>>.
9. Invap, Turbina Hidrocinética [accedido: 10/5/2013] <<http://www.invap.com.ar/es/area-industrial/proyectos/turbina-hidrocinetica.html>>.
10. Secretaria de Energía de la República Argentina, [accedido: 10/5/2013] <<http://energia3.mecon.gov.ar/contenidos/verpagina.php?idpagina=1582>>.
11. Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INDEC), [accedido: 10/5/2013] < <http://www.indec.mecon.ar/>>.