

## MODELO MATEMÁTICO PARA LA PLANIFICACIÓN DE LAS INVERSIONES EN FUENTES DE ENERGÍA RENOVABLES PARA LA ARGENTINA

### MATHEMATICAL MODEL FOR PLANNING OF INVESTMENTS IN RENEWABLE ENERGY SOURCES FOR ARGENTINA

**Julio Flores**

INGAR-UTN, Avellaneda 3657, Santa Fe, Argentina.  
[jflores@santafe-conicet.gov.ar](mailto:jflores@santafe-conicet.gov.ar)

**María Analía Rodríguez**

INGAR-UTN, Avellaneda 3657, Santa Fe, Argentina.  
[r\\_analia@santafe-conicet.gov.ar](mailto:r_analia@santafe-conicet.gov.ar)

**Jorge M. Montagna**

INGAR-UTN, Avellaneda 3657, Santa Fe, Argentina.  
[mmontagna@santafe-conicet.gov.ar](mailto:mmontagna@santafe-conicet.gov.ar)

**Aldo Vecchietti**

INGAR-UTN, Avellaneda 3657, Santa Fe, Argentina.  
[aldovec@santafe-conicet.gov.ar](mailto:aldovec@santafe-conicet.gov.ar)

**RESUMEN:** En este trabajo se presenta un programa matemático mixto-entero lineal (MILP) multiperíodo para planificar las inversiones en fuentes de energía convencionales y renovables para la Argentina, poniendo el énfasis en estas últimas. Las fuentes de energía renovables que se incluyen en el modelo son aquellas que presentan una mayor ventaja competitiva para la Argentina y cuyas tecnologías han alcanzado una cierta madurez y confiabilidad. El horizonte de tiempo propuesto es de 20 años. La función objetivo del modelo matemático es minimizar los costos de inversión y operación de las fuentes de energía. El modelo también permite realizar un análisis de escenarios variando fundamentalmente la disponibilidad de las reservas de petróleo. Los resultados que brinda el modelo permiten visualizar las inversiones realizadas, cómo afectan las mismas a la composición de la matriz energética y los momentos en que se deciden las inversiones así como sus montos.

**Palabras clave:** Energía. Fuentes Renovables. Planeamiento de Inversiones. Optimización Discontinua.

**ABSTRACT:** This paper presents a multiperiod mixed integer linear programming (MILP) for planning investment in renewable and conventional energy sources for Argentina. The renewable energy sources considered in this work are those where Argentina has a competitive advantage and whose technologies have reached a certain maturity and reliability. The time horizon

proposed for the study is 20 years. The objective function of is to minimize the investment and operation costs of the energy supply. The model allows the analysis of several scenarios varying the availability of crude oil reserves. The results provided by the model are the visualization of the investments made: time periods in and their amounts and also how the energy matrix is affected by those investments.

**Keywords:** Energy. Renewable Sources. Investment Planning. Discrete Optimization.

## 1 INTRODUCCIÓN

Uno de los mayores desafíos del siglo XXI, es la búsqueda de fuentes de energía alternativas, renovables y no-contaminantes, para reemplazar a la producida por combustibles fósiles no renovables, contaminantes (generadores de CO<sub>2</sub>) como el petróleo, gas y el carbón. En este trabajo se presenta un modelo matemático de planificación de las inversiones en fuentes de energías renovables para la Argentina.

El modelo es multiperíodo y busca minimizar el costo de inversión y operación de los recursos energéticos. La idea es planificar, en un horizonte de tiempo de 20 años, las inversiones e instalación de fuentes de energía no renovables más económicas, con el propósito de reemplazar paulatinamente las fuentes convencionales (derivados del petróleo y gas) y prolongar en el tiempo el uso de estas últimas. El modelo generado es un programa matemático mixto-entero lineal (MILP) multiperíodo. Como fuentes renovables se consideraron aquellas que, en un análisis a priori, parecen las más viables y económicas a implementarse en nuestro país. Para suplir el uso de combustibles derivados del petróleo (gasolina, gasoil, fueloil) para el transporte se considera la producción de biodiesel y de bioetanol.

Para la generación de energía eléctrica se propone el uso de granjas de aerogeneradores y el empleo de turbinas hidrocinéticas para aprovechar las corrientes de los ríos de Argentina. Por último, se considera la energía solar para calefacción de uso domiciliario o comercial. De este modo se espera que el modelo proponga una matriz energética alternativa a la actual, la cual se encuentra sesgada a las fuentes provenientes de los hidrocarburos y sus derivados.

En la literatura existen algunos trabajos que tratan este problema. Ding y Somani (2010) abordan el problema de planeamiento de las inversiones en una infraestructura eléctrica integrada con energía renovable. Presentan dos modelos: el primero de ellos tiene como objetivo minimizar en una base horaria, la volatilidad del precio de la energía en los Estados Unidos debido al desbalance que existe en la demanda de potencia durante las horas del día. El otro contempla un horizonte de tiempo anual y tiene como objetivo minimizar los costos de

transmisión, operación y la inversión en expansión de la capacidad de plantas de potencia de “energías limpias”.

Muñoz et al. (2009) presentan un modelo para la inversión en energías renovables dentro del marco del mercado de energía para España. El objetivo es minimizar el riesgo del inversor mientras maximiza el retorno de la inversión.

Weber, Marechal y Fravat (2007) desarrollan un modelo mixto entero no-lineal (MINLP) para definir el diseño y optimización del suministro de energía en un distrito, cuyo objetivo es reducir la emisión de CO<sub>2</sub> por medio del uso racional de las instalaciones energéticas. Blanco (2009) presenta los resultados obtenidos en un estudio de los fabricantes de aerogeneradores de energía de Europa y los factores que influyen en la evolución de este tipo de energía. Se determinó que su bajo costo de generación compensa los altos costos de inversión que tienen los aerogeneradores; y que, en el futuro, estos últimos se pueden mejorar por la inclusión de nuevos materiales, mejores dispositivos de control y un mejoramiento en la predicción del clima.

Ninguno de estos trabajos presenta el planeamiento de la inversión estratégica, a efectos de contar con una mayor diversidad de fuentes de energía, prolongar la vida útil de las reservas de combustibles fósiles y tomar ventajas competitivas de los recursos naturales.

En las próximas secciones de este artículo, en primer lugar se introduce la composición actual de la matriz energética de la Argentina y las alternativas que se evalúan para diversificar la misma, luego se presenta el modelo matemático propuesto para el planeamiento de las inversiones, en la sección 4 los resultados obtenidos con el mismo y finalmente, las conclusiones del trabajo realizado.

## **2 LA MATRIZ ENERGÉTICA ARGENTINA**

Una matriz energética es una forma de representar y analizar las distintas fuentes de energía (primarias y secundarias) y el destino o uso que se les da a las mismas. Las fuentes de energía primaria se refieren a aquellas que se encuentran en el estado que se extraen o capturan de la naturaleza, como los casos de la energía hidráulica, la eólica, el petróleo, carbón y gas. Por otra parte, las fuentes de energía secundaria son los productos energéticos que salen de los centros de transformación o conversión de energía como la electricidad, gas distribuido en redes, naftas, diesel, fueloil, biodiesel, bioetanol, etc.

La composición de la matriz energética argentina se ilustra en la Figura 1 (Secretaría de Energía de la República Argentina, 2007). Se puede observar que está compuesta por un 49% de gas natural, un 41 % petróleo, 4,5% hidroeléctrica, 2,5 % nuclear, 1,9 % madera y biomasa y 0,8% de otras fuentes. Para Argentina, según un informe presentado por Gerold (2008) en el IV

Seminario Estratégico (SPE 08) organizado por la Sociedad de Ingenieros de Petróleo, se destaca que la matriz está particularmente sesgada hacia el petróleo y el gas, que es necesario realizar un cambio en la misma, aún cuando se tengan costos más elevados en la producción de energía nuclear, hidroeléctrica y de fuentes renovables, que es urgente plantear a futuro un plan integral concreto de implementación efectiva para el sector energético argentino. En concordancia con este objetivo, es que se plantea este trabajo de generar un modelo que permita hacer un análisis futuro de los posibles caminos a seguir en la diversificación de la producción energética, especialmente las energías renovables.

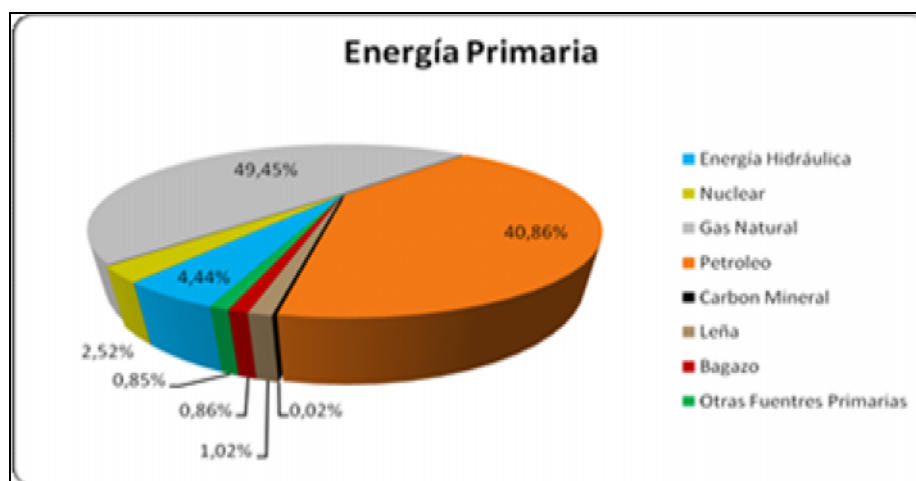


Figura 1 – Matriz energética argentina  
Fuente: BEN serie 1960-2007, p. 20

Entre las fuentes renovables que se consideran en este trabajo se destaca la producción de energía por biomasa, para lo cual se toman las fuentes primarias que se emplean actualmente en Argentina y de las cuales existen ya varias plantas en nuestro país: el cultivo de la soja para biodiesel y la caña de azúcar para bioetanol. Para el análisis de la producción de electricidad se tienen en cuenta el uso de los derivados del petróleo y el gas natural en usinas termogeneradoras, el empleo del viento en turbinas aerogeneradoras en granjas eólicas y la instalación de turbinas hidrocinéticas en los cauces de los ríos. La energía solar que se contempla en el modelo desarrollado se aplica solamente a calefacción comercial o residencial, en reemplazo del uso de gas natural actual. Estas consideraciones están plasmadas en la Figura 2 donde se grafican las fuentes de energía primarias, secundarias y los destinos de las mismas considerados en el desarrollo de este modelo.

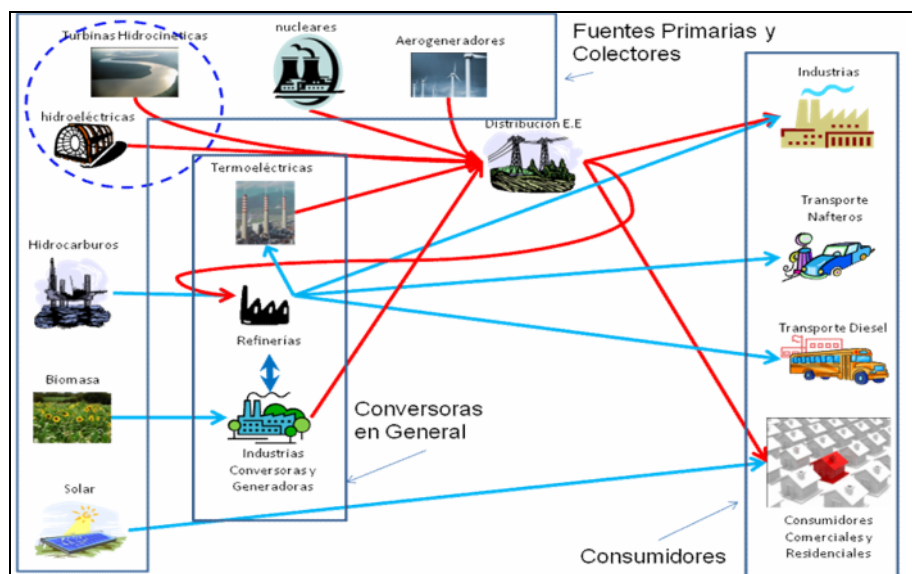


Figura 2 – Cadena de distribución de energía propuesta

En esta Figura 2 se representa con azul las corrientes materiales, en rojo las corrientes energéticas, y se separan las energías primarias de las secundarias, numerándose las instalaciones convertoras que se requieren.

### 3 El Modelo

En esta sección se presenta el modelo matemático de optimización generado para el plan de inversiones en fuentes de energía. Como se puede visualizar de la Figura 2, las fuentes de energía primaria consideradas en el modelo son las siguientes: petróleo, gas natural, biomasa, eólica, hidráulica, solar y nuclear.

Para las fuentes no-renovables, petróleo, gas natural y energía nuclear, se considera que tienen una capacidad limitada (reservas limitadas). Para ello, se tomó como dato la cantidad de reservas de petróleo, de gas y de uranio (para la energía nuclear) existentes al año 2010. En esta primera versión, el modelo considera que no se van a incrementar estas reservas en el futuro.

Las fuentes de energía secundaria que se incluyeron en el modelo son: gas natural tratado, nafta, diesel, fueloil, bioetanol, biodiesel y solar.

El programa vincula las fuentes de energía primarias y secundarias por medio de colectores o plantas convertoras que transforman las primeras en las segundas. Por ejemplo, la transformación de petróleo en diesel, nafta y fueloil tiene un factor de 28%, 37% y 12% respectivamente. Asimismo la cantidad de biodiesel que produce 1 tonelada de soja es de 180 litros. Esto significa que hay una capacidad de producción limitada de fuentes de energía secundaria, dadas las limitaciones de capacidad de las primarias. Para el caso de la energía

hidráulica se consideran dos tipos colectores, las centrales hidroeléctricas en existencia y la posibilidad de instalación de turbinas hidrocinéticas o también denominadas turbinas de río.

### 3.1 Función Objetivo

La función objetivo (Ecuación 1) de este programa consiste en la minimización del costo total actualizado de la producción de energía, que incluye los costos de inversión para el montaje y puesta en marcha de nuevos centros de conversión, más el costo de operación de los centros (existentes y nuevos).

$$CT = \sum_{i \in usO_{i,k}} \sum_{k \in usO_{i,k}} \sum_t \frac{(CO_{i,k} \cdot x_{i,k,t} \cdot hr + CI_{i,k,t})}{(1+TI)^t} \quad (1)$$

En (1),  $CT$  se corresponde con el costo total a minimizar, que es igual a la suma de los costos operativos ( $CO_{i,k}$ ) de los centros de transformación de la fuente  $i$  para el destino  $k$  por la producción de esa fuente en el periodo  $t$  ( $x_{i,k,t}$ ), más el costo de inversión ( $CI_{i,k,t}$ ) en la fuente  $i$  para el destino  $k$  en el periodo  $t$ , donde  $usO_{i,k}$  relaciona para qué usos o destinos  $k$  puede destinarse una fuente  $i$ . Los destinos representados en nuestro modelo son: transporte en base a nafta (TN), transporte diesel (TD), energía eléctrica (EE) y calefacción residencial (CR). Mientras que el parámetro  $hr$  representa la cantidad de horas anuales de operación y el parámetro  $TI$  representa la tasa de interés adoptada para realizar la actualización de los valores.

### 3.2 Restricciones sobre los Hidrocarburos

Las restricciones (Ecuación 2 y 3) limitan el uso de las reservas de petróleo (P) y gas natural (GN) respectivamente, a la cantidad de reservas (parámetro  $Reservas$ ) existentes al año 2010 de estos combustibles fósiles, multiplicadas por un factor ( $\varepsilon_P$  y  $\varepsilon_{GN}$ ). Este factor se emplea para poder realizar análisis de diferentes escenarios. En principio se asigna el valor 1.

$$\sum_t q_{P,t} \leq \varepsilon_P \cdot Reservas_P \quad (2)$$

$$\sum_t q_{GN,t} \leq \varepsilon_{GN} \cdot Reservas_{GN} \quad (3)$$

Las restricciones (2) y (3) especifican que la sumatoria en el horizonte de tiempo considerado, de lo que se produce anualmente de petróleo (representada por la variable  $q_{P,t}$ ) y de gas natural (variable  $q_{GN,t}$ ) debe ser menor o igual que las reservas, respectivamente. En ambos casos, los parámetros  $\varepsilon_P$  y  $\varepsilon_{GN}$  permiten fijar que proporción de las reservas se admite que sean consumidas.

### 3.3 Decisiones de Inversión

Las decisiones de inversión se modelan por medio de Programación Disyuntiva Generalizada (PDG) a través una disyunción con cuatro términos, 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 de la disyunción tiene un rango de incremento de capacidad y este rango establece el monto que se va a invertir. En  $Y_{r,i,k,t-T_{i,k}}$  (Ecuación 4) 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  $Cm_{r,i,k}$ . Las disyunciones son exclusivas por lo que solo un único miembro puede ser verdadero y todos los otros son falsos.

$$\left[ \begin{array}{l} Y_{1,i,k,t-T_{i,k}} \\ ICap_{1,k,t} = 0 \\ CI_{1,i,k,t-T_{i,k}} = 0 \end{array} \right] \vee \left[ \begin{array}{l} Y_{2,i,k,t-T_{i,k}} \\ ICap_{2,k,t} \leq Imax_{2,i,k} \\ CI_{2,i,k,t-T_{i,k}} = Cm_{2,i,k} \end{array} \right] \vee \left[ \begin{array}{l} Y_{3,i,k,t-T_{i,k}} \\ ICap_{3,k,t} \leq Imax_{3,i,k} \\ CI_{3,i,k,t-T_{i,k}} = Cm_{3,i,k} \end{array} \right] \vee \left[ \begin{array}{l} Y_{4,i,k,t-T_{i,k}} \\ ICap_{4,k,t} \leq Imax_{4,i,k} \\ CI_{4,i,k,t-T_{i,k}} = Cm_{4,i,k} \end{array} \right] \quad (4)$$

$$\forall t > T_{i,k}, \quad \forall i \in uso_{i,k}, \quad \forall k \in uso_{i,k}$$

Existe un desfase en el momento en que se decide realizar la inversión y el momento en que la planta convertora se encontrará lista para producir. Este lapso de tiempo se expresa por el parámetro  $T_{i,k}$ .

### 3.4 Derivados del Petróleo

La Ecuación 5 define que la cantidad de energía secundaria  $i$  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 último 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).

En resumen la Ecuación (5) simula una destilería de crudo.

$$q_{i,t} = Corte_i \cdot q_{P,t} \quad \forall i \in Derivados, \quad \forall t \quad (5)$$

### 3.5 Restricciones de Demanda y Capacidad

La demanda energética de la Argentina se calculó para cada destino  $k$  en el período  $t$  (parámetro  $D_{k,t}$ ) y se supuso un crecimiento lineal para cada periodo de tiempo. Entonces, para cada destino  $k$  se estimó un coeficiente promedio ( $\alpha_k$ ) de incremento. La Ecuación (6) 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 ( $DO_k$ ), más el incremento ( $\alpha_k$ ) multiplicados por la cantidad de periodos menos 1.

$$D_{k,t} = DO_k + \alpha_k \cdot (t-1) \quad \forall k, \quad \forall t \quad (6)$$

Las demandas de energía para derivados del petróleo y gas, más el consumo de energía eléctrica para el período inicial, se calcularon en base a datos estadísticos presentados por la Secretaria de Energía de la Nación para el año 2010. Del INDEC (Instituto Nacional de Estadísticas y Censos) (Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, 2007) se discriminaron los consumos de derivados del petróleo y gas para los diferentes usos (domiciliario, industrial, transporte, etc.). Los datos estadísticos para la energía eléctrica se tomaron de los reportes del Mercado Eléctrico Mayorista (MEM) y el Mercado Eléctrico Mayorista Sistema Patagónico (MEMSP) para el 2010 que elaboran informes mensuales sobre la producción y demanda de energía eléctrica, exportación e importación de energía, consumo por bombeo, proyecciones para el sector y otros datos de distribución de energía eléctrica. De estos informes se consultó no sólo la demanda sino también se discriminó entre las diferentes fuentes: termogeneradoras, hidráulicas, etc.

La Ecuación 7 establece que la sumatoria de los flujos energéticos para un determinado uso y período  $t$  tiene que ser mayor o igual que la demanda para ese destino en ese período.

$$\sum_{i \in uso_{i,k}} f_{i,k} \cdot x_{i,k,t} \cdot hr \geq D_{k,t} \quad \forall k, \quad \forall t \quad (7)$$

En la Ecuación 7,  $f_{i,k}$  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. Por ejemplo, el parámetro  $f_{GN,TN}$  vincula el gas natural (GN) como fuente de energía para el empleo en transporte de vehículos nafteros (TN). Su valor, se calcula como la relación entre los poderes caloríficos estándares del gas y de las naftas (NF), esto es, cuántos litros de nafta rendiría un  $m^3$  de gas, que es como se expresa la demanda naturalmente. La variable  $x_{i,k,t}$  se corresponde con el flujo energético de la fuente  $i$  para el destino  $k$  en el período  $t$ .

La Ecuación 8 expresa que la producción de energía tiene un límite de capacidad que está representado por la variable  $Cap_{i,k,t}$ , esta capacidad varía de período en período de acuerdo con las decisiones de inversión que se van realizando. Todas las fuentes tienen un límite máximo en la cantidad de energía que pueden generar, como se explica en la próxima sección.

$$f_{i,k} \cdot x_{i,k,t} \leq Cap_{i,k,t} \quad \forall i \in uso_{i,k}, \quad \forall k \in uso_{i,k}, \quad \forall t \quad (8)$$



### 3.6 Restricciones de Disponibilidad

Estas ecuaciones expresan el límite en la generación de energía de cada fuente, por ejemplo, si consideramos el caso del petróleo no se puede superar la cantidad de reservas disponibles. Para el caso de las energías renovables, las limitaciones son diferentes. La instalación de parques eólicos está restringida por el área libre en la que se pueden instalar los aerogeneradores en aquellas regiones que son propicias para su instalación, es decir, donde soplan vientos en rangos de operación de los aerogeneradores, como mínimo el 80% del tiempo. Para el uso de los cultivos de soja para biodiesel y de caña de azúcar para bioetanol, también se tienen limitaciones en la cantidad de superficie sembrada, su rendimiento y el volumen de la cosecha anual que se destina a la producción de combustibles; para la instalación de centrales nucleares, se consideró como restricción las reservas de uranio disponibles en el país.

La Ecuación 9 establece que la producción de energía para una fuente  $i$  en un periodo  $t$  ( $q_{i,t}$ ) es igual a la sumatoria para todos los usos  $k$  del flujo de energía de la fuente  $i$  en el periodo  $t$  por la cantidad de horas de operación anuales. La Ecuación (10) 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 ( $NR$ ). La Ecuación (11) limita la capacidad de instalar fuentes de energía renovables.

$$q_{i,t} = \sum_{k \in \text{uso}_{i,k}} x_{i,k,t} \cdot hr \quad \forall i, \quad \forall t \quad (9)$$

$$\sum_t q_{i,t} \leq CD_i \quad , \quad \forall i \in NR \quad (10)$$

$$\sum_{k \in \text{uso}_{i,k}} \frac{Cap_{i,k,t}}{f_{i,k}} \leq CD_i \quad \forall t, \quad \forall i \notin NR \quad (11)$$

El valor parámetro  $CD_i$ , que limita la instalación de las fuentes de energías renovables, se estimó de la siguiente manera: para el caso del biodiesel (BD) 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. Para el bioetanol (BE) se aplicó un procedimiento similar, sólo que se consideró como principal fuente de materia prima la caña de azúcar.

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 Argentina presenta una serie de mapas que muestran las

regiones con vientos aptos (Figura 3 y 4). En el mapa de la izquierda se presenta en amarillo las regiones que serían aptas para la instalación de parques eólicos mientras que en el mapa de la derecha se muestran las velocidades medias anuales de los vientos a 50 m de altura con respecto del nivel del suelo (CÁMARA ARGENTINA DE ENERGÍAS RENOVABLES, 2010).

Para la energía solar se realizó un análisis similar, recordando que en este trabajo solo se considero su aplicación en calefacción residencial. Por lo tanto, si se toma la distribución espacial del valor medio de la irradiación solar global diaria, recibida sobre una superficie horizontal (Figura 3), se determinan las regiones viables para el uso de este tipo de energía.

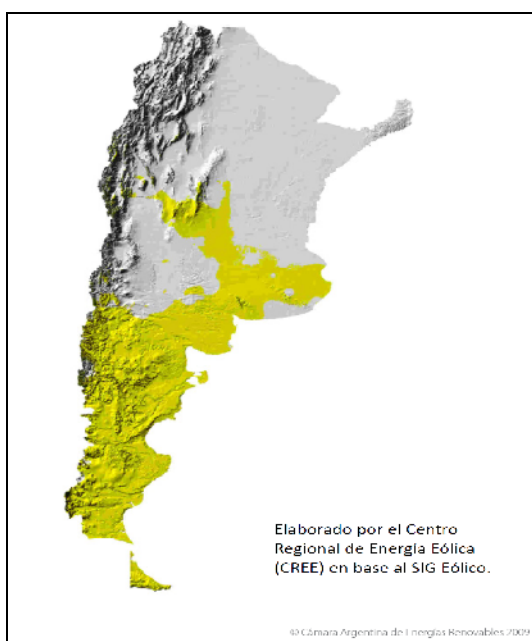


Figura 3 – Mapa de zonas con factor de capacidad mayor a 35% a 70 m de altura

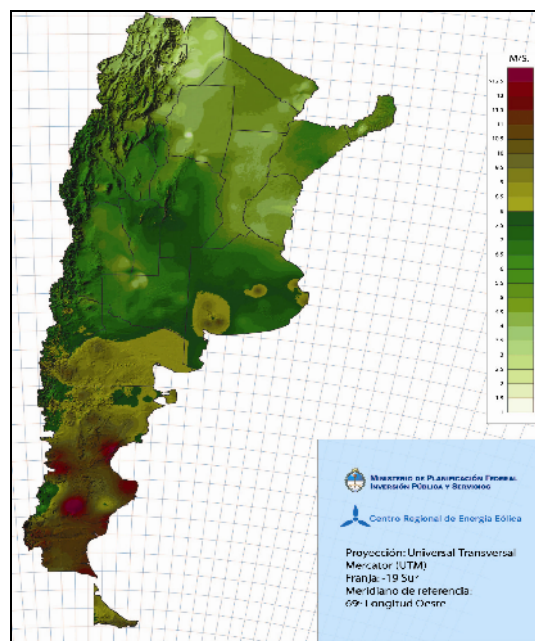


Figura 4 – Mapa de Velocidad Media anual del viento a 50 m de altura

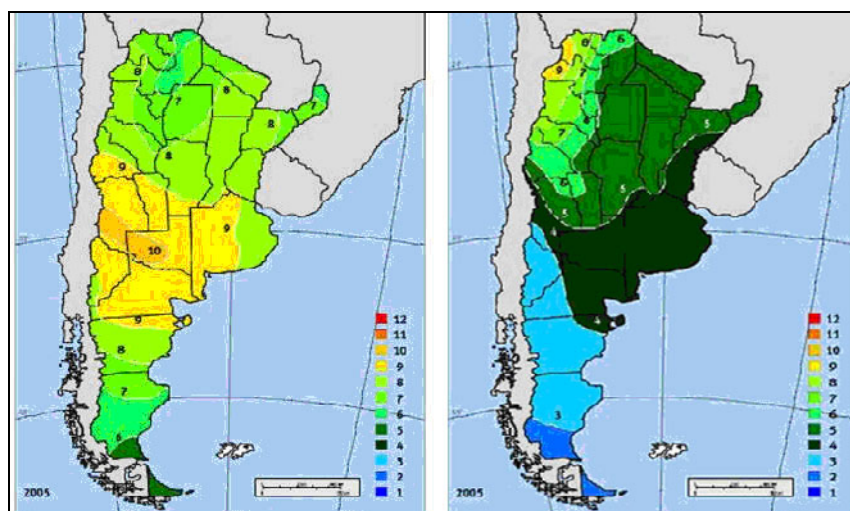


Figura 3 – Radiación media enero y julio

Además, si se considera la densidad poblacional y las familias tipo (con 4 integrantes), se puede estimar el número de instalaciones posibles que se podrían realizar. Adicionalmente, con datos de la Comisión de Energía y Combustible (Expediente 1213-D-06) se calculó el volumen de gas natural a que equivale cada instalación de calefacción solar.

Para la fuente hidráulica, se considera solo la instalación de turbinas hidrocinéticas (HC) y, dado que la tecnología es relativamente nueva, se propuso un número límite de instalaciones y, en base a la potencia media que pueden producir, se determinó el límite superior de potencia que se puede instalar con estas turbinas.

### 3.7 Restricciones de Incremento de la Capacidad

Por medio de las restricciones (Ecuación 12 y 13) se tiene en cuenta que existe un periodo de tiempo desde el momento en que se decide invertir en una fuente de energía y el momento en que ésta se pone en marcha, contemplando el tiempo de ejecución del proyecto. Este lapso de tiempo se expresa por el parámetro  $T_{i,k}$ , que es un dato que depende de la fuente de energía y el uso que se va a hacer de la misma. La Ecuación 12 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 calculada ( $Cap0_{i,k}$ ), en tanto que (13) 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 Ecuación 4.

$$Cap_{i,k,t} = Cap0_{i,k} \quad \forall t \leq T_{i,k}, \quad \forall i \in uso_{i,k}, \quad \forall k \in uso_{i,k} \quad (12)$$

$$Cap_{i,k,t} = Cap_{i,k,t-1} + ICap_{i,k,t} \quad t > T_{i,k}, \quad \forall i \in uso_{i,k}, \quad \forall k \in uso_{i,k} \quad (13)$$

### 3.8 Restricciones de Cortes de Biocombustibles

Por la legislación argentina y las 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, Ecuación 14 y 15.

$$q_{BE,t} \leq 0.2 \cdot q_{Nf,t} \quad \forall t \quad (14)$$

$$q_{BD,t} \leq 0.5 \cdot q_{GO,t} \quad \forall t \quad (15)$$

La Ecuación 14 expresa que como máximo se producirá una nafta con un 16% de bioetanol, mientras que Ecuación 15 expresa que como máximo se producirá un combustible con 25% de biodiesel.

#### 4 RESULTADOS

El modelo permite analizar diversos escenarios en los cuales se condiciona la disponibilidad de las reservas al final del periodo de estudio. Se plantean dos escenarios límites. El primero de ellos, Escenario A, supone que las reservas de hidrocarburos son suficientes para atender a las demandas en cada uno de los periodos, lo que es equivalente a decir que se cuenta con una disponibilidad ilimitada de estos recursos.

En contraposición se propone el Escenario B, en el cual se asume que no habrá incremento de reservas de hidrocarburos y por tanto, éstas se agotarán eventualmente.

En la Figura 4 y 7, se presentan las configuraciones de la matriz energética al inicio y al final del horizonte de estudio para el Escenario A que, al tener disponible una reserva ilimitada de petróleo, prioriza el uso de este recurso debido a que es el más conveniente económicamente, ya que tiene menores costos de inversión, una puesta en régimen más rápida y menores costos de explotación.

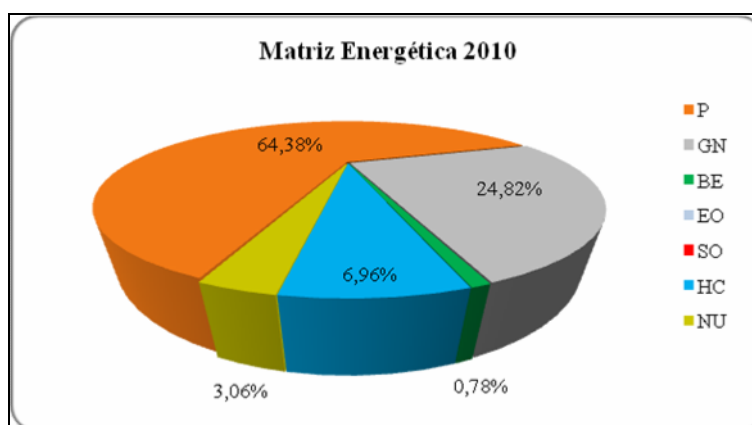


Figura 4 – Matriz energética Escenario A, al año 2010

Para el escenario B en cambio, se nota cómo disminuye la participación de los hidrocarburos en la matriz energética, ya que la mayoría de las inversiones incorporan fuentes de energías renovables para suplir la escasez de hidrocarburos (ver Figura 6 para el inicio del horizonte y Figura 7 para el final del mismo).

Observando la Figura 4 y 8 se destaca que la configuración inicial es la misma en ambos modelos. Ésta además es distinta a la que actualmente se emplea en la Argentina. Esto es resultado directo de la minimización de los costos que realiza el modelo. Por otro lado, la

evolución temporal es muy distinta entre ellas por las condiciones impuestas en cada modelo como muestran las Figuras 7 y 9.

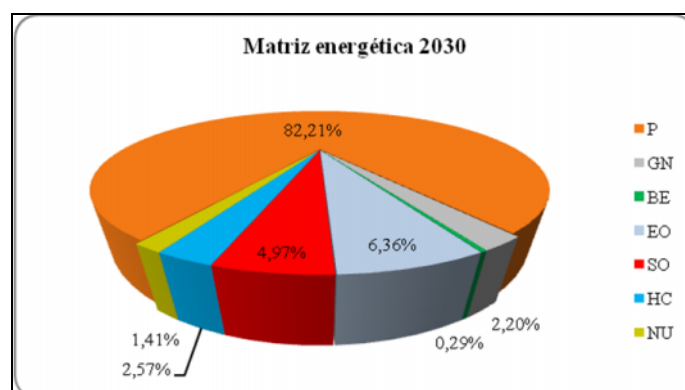


Figura 5 – Matriz energética Escenario A, al año 2030

La evolución temporal de la matriz energética del escenario B se presenta en la Figura 8. El gráfico está construido en escala porcentual en donde claramente se observa la disminución paulatina de la participación del petróleo en la misma, pero mantiene constante la participación total de los hidrocarburos a partir del tercer periodo. Se advierte que el tiempo de ejecución de las inversiones se ve reflejado en los primeros años como un retardo en el incremento de la producción.

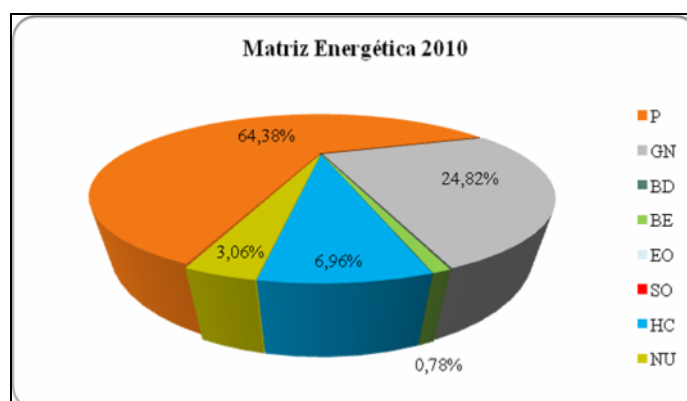


Figura 6 – Matriz energética Escenario B, al año 2010

Lo que resulta muy interesante de analizar es el cambio de destinos que sufren las fuentes de energía y como se relacionan con las demás. El gas en el primer periodo se lo emplea para el consumo residencial, para el transporte de nafteros y como combustible en las Termogeneradoras, por lo que en el segundo periodo al entrar en marcha los colectores solares, las plantas de bioetanol y las turbinas hidrocínicas el consumo de gas cae.

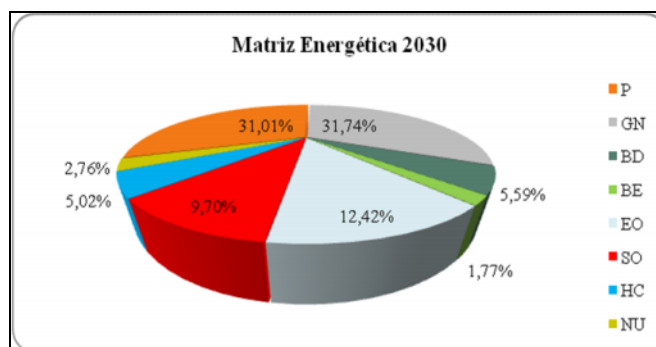


Figura 7 – Matriz energética Escenario B, al año 2030

En el tercer periodo continua la puesta en marcha de colectores solares para suplir el consumo residencial. También entran en marcha plantas de biodiesel que disminuyen el consumo de petróleo y se destina una mayor cantidad de gas al transporte por lo que se produce una fuerte caída en el consumo de petróleo. En adelante se mantiene la participación porcentual de los hidrocarburos constante, supliendo los incrementos en las demandas con puestas en marcha de fuentes alternativas.

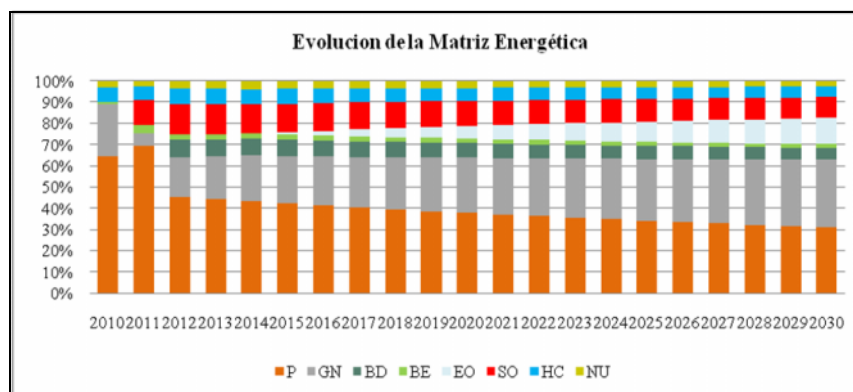


Figura 8 – Evolución de la Matriz energética en el Escenario A

El modelo calcula las inversiones a realizar para incrementar la capacidad instalada en los recursos energéticos. Estos resultados se presentan en la Tabla 1, cuyos valores se expresan en kilo toneladas equivalentes de petróleo (ktep).

Tabla 1 – Incrementos de las Capacidades en ktep – Escenario B

Fuente	Uso	2011	2012	2013	2014	2015
BD	TD		64.737,309		32.364,345	
BE	TN	175.157,269				
EO	EE					199.242.100,000
SO	CR	591.199,480				
HC	EE				1.376,000	

En la Tabla 2, se presentan los montos de las inversiones realizadas, los valores están dados en miles de \$ (pesos argentinos).

Tabla 2 – Inversiones en Energías Renovables en miles de pesos – Escenario B

Fuente	Uso	2010	2011	2012	2013
BD	TD		458.234,33		286.396,46
BE	TN	2.308.064,16			
EO	EE	1.396.316,25			
SO	CR	1.972.044,67			
HC	EE			0,96	

En la Tabla 3 se presentan los periodos en los que se decide invertir, que coinciden con las erogaciones realizadas. No obstante, el incremento efectivo de la capacidad de producción energética estará disponible solamente después de cumplido el plazo de ejecución dado por  $T_{i,k}$ .

Tabla 3 – Variable booleana de decisión de inversión – Escenario B

Fuente	Uso	2010	2011	2012	2013
BD	TD		Yes		Yes
BE	TN	Yes			
EO	EE	Yes			
SO	CR	Yes			
HC	EE			Yes	

El primer escenario (Escenario A) tiene un costo de inversión y operación de 182,68 miles de millones de pesos, mientras que para el Escenario B se deberá afrontar un costo de 602,34 miles de millones de pesos. La diferencia entre los costos se debe a las inversiones que se realizan para reemplazar las fuentes de energía convencionales por otras alternativas; los valores de estas inversiones se detallan en la Tabla 2.

## 5 CONCLUSIONES

Se ha desarrollado un modelo matemático de planificación de las inversiones en el sector energético argentino. El modelo matemático es mixto-entero lineal (MILP) multiperíodo y tiene como objetivo minimizar los costos de inversión y operación en la generación de la energía. Se consideró un horizonte de tiempo de 20 años. En el modelo se contempla el uso de fuentes de energías renovables y convencionales. Para las primeras, se han considerado aquellas que a priori son las más viables para la Argentina y que ya han alcanzado una cierta madurez en su desarrollo: aerogeneradores de electricidad, biodiesel a partir de soja, bioetanol a partir de caña de azúcar, turbinas hidrocinéticas, energía solar para calefacción residencial. Los resultados obtenidos con el modelo permiten analizar diferentes escenarios y decidir las fuentes de energía que presentan un balance económico óptimo. También permite comparar la composición de la matriz energética actual con la proyectada en los 20 años de horizonte de tiempo considerados.

De los resultados obtenidos, es claro que los costos de inversión y operación de fuentes no convencionales son más elevados que aquellos que dependen de derivados de hidrocarburos y gas natural. Por ello, se propone como trabajo futuro la inclusión en el modelo de aspectos que son significativos, como son la emisión de gases de efecto invernadero (CO<sub>2</sub>), la sustentabilidad de las fuentes de energía, un análisis de rentabilidad, etc. que permitan extender los resultados alcanzados y resolver el problema considerando otras perspectivas.

## REFERENCIAS

(IAPG). **Instituto Argentino de Petróleo y Gas**. Disponible en: <<http://www.iapg.org.ar/sectores/estadisticas/productos/listados/Suplemento.htm>>. Accedido: 07/2010

BLANCO M. I. The economics of wind energy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, p. 1272-1382, 2009.

CADER. **Cámara Argentina de Energías Renovables**. Disponible en: <<http://www.argentinarenovables.org/index.php>>. Accedido: 07/2010.

DING J.; SOMANI A. A long-term investment planning model for mixed energy infrastructure integrated with renewable energy. **2nd Annual IEEE Green Technologies Conference**, Fort Worth, Texas, Apr. 15-16, 2010.

GEROLD Daniel. La Argentina y el Planeamiento Estratégico: Matriz Energética Actual y Prospectiva. **IV Seminario Estratégico (SPE 08)**, Buenos Aires, 2008.

INDEC. **Instituto Nacional de Estadísticas y Censos**. Disponible en: <<http://www.indec.mecon.ar/>>. Accedido: 07/2010

INTA. **Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria**. Disponible en: <[http://www.inta.gov.ar/iir/info/documentos/energia/indicadores\\_biodiesel.pdf](http://www.inta.gov.ar/iir/info/documentos/energia/indicadores_biodiesel.pdf)>. Accedido: 07/2010

MEM. Mercado Eléctrico Mayorista. Disponible en: <[http://memnet2.cammesa.com/infopub.nsf/navegadores/\\$first?open](http://memnet2.cammesa.com/infopub.nsf/navegadores/$first?open)>. Accedido: 07/2010.

MUÑOZ J.E.; SÁNCHEZ de la Nieta A. A.; CONTRERAS J.; BERNAL-AGUSTÍN, J. L. Optimal investment portfolio in renewable energy: the Spanish case. **Energy Policy**, v. 37, p. 5273-5284, 2009.

**Secretaría de Energía de la República Argentina**, disponible en: <<http://energia3.mecon.gov.ar/contenidos/verpagina.php?idpagina=1582>>. Accedido: 07/2010

WEBER C.; MARECHAL, F.; FRAVAT, D. Design an Optimization of district energy systems. **Computer Aided Chemical Engineering**, v. 24, p 590-595, 2007.

Originais recebidos em: 27/09/11

Aceito para publicação em: 10/04/12