

## Planificación de la infraestructura energética considerando la incertidumbre en los precios de los recursos fósiles.

Maria Laura Cunico, Julio Rolando Flores, Aldo Vecchietti

INGAR-UTN, Avellaneda 3657, Santa Fe, Argentina

{laura-cunico, jflores, aldovec}@santafe-conicet.gov.ar

**Resumen.** El presente trabajo propone un modelo de programación matemática cuyo objetivo se centra en la planificación de inversiones, destinadas a la gestión y empleo eficiente de las fuentes de energías convencionales y renovables en la Argentina. La problemática sobre la actual composición de la matriz energética nacional, notablemente sesgada hacia la utilización de recursos fósiles, puede ser abordada desde distintos puntos claves; todos ellos reunidos bajo el concepto de sustentabilidad. En este caso, el enfoque adoptado se acopla a un análisis socio-económico; el modelo orientado por la maximización del valor presente neto (VPN) es sujeto a variaciones en los precios del petróleo y del gas natural. La incertidumbre, en los precios de las fuentes fósiles, es representada e introducida a partir de números triangulares dando origen a un modelo difuso; la solución exhibida se desprende de un modelo lineal convencional equivalente al que se arriba a partir de una serie de reformulaciones descritas.

**Palabras Claves:** Planeamiento estratégico, Energías renovables, Modelo matemático multiperíodo, Modelo Multiobjetivo, Conjuntos difusos.

### 1 Introducción.

El incremento de la demanda energética, la sobreexplotación de los recursos fósiles, la disponibilidad de reservas y el impacto medioambiental que estas fuentes de energía ocasionan, constituyen tópicos de alto interés socio-económico en la actualidad. Este escenario presenta dos grandes desafíos, no necesariamente excluyentes: la búsqueda de fuentes de energías alternativas, sustentables, renovables y no-contaminantes; y el desarrollo y/o mejora de procesos de aprovechamiento energético tanto en forma primaria como secundaria. Si bien los pronósticos respecto de la vida útil de las reservas fósiles se han extendido, en función del descubrimiento de nuevas reservas de petróleo y el avance de las técnicas de extracción [1], los costos derivados de estas prácticas se incrementan paralelamente con su complejidad y no dan respuestas favorables ni a los efectos dañinos producidos sobre el ecosistema ni a la efímera disponibilidad del recurso. Por lo tanto, las inversiones de capitalización

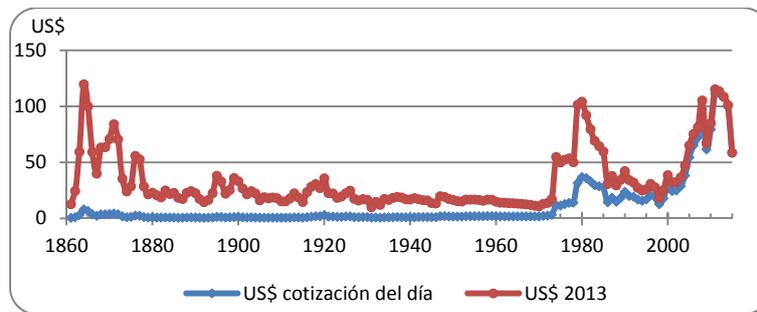
deben ser acompañadas por políticas de planificación eficientes, que apunten a satisfacer las necesidades de las generaciones actuales sin comprometer las futuras.

Algunas fuentes de energía primaria se encuentran actualmente en funcionamiento, como es el caso de la energía nuclear, la biomasa, la geotérmica y la hidroeléctrica. Sin embargo, tanto la energía nuclear como la hidroeléctrica resultan controversiales debido a los efectos nocivos de sus desechos o al requerimiento de represas artificiales [2]. Otras fuentes de energía no convencionales que vislumbran importantes avances en su generación y aplicabilidad, son la energía eólica, la solar y los biocombustibles [3]–[5]. Sin embargo, las características de índole ecológica y renovable que revisten estas fuentes frente al petróleo, al gas natural y al carbón pierden competitividad ante la rentabilidad, la disponibilidad, la versatilidad y el poder de conversión energético que las fuentes de energía fósiles presentan.

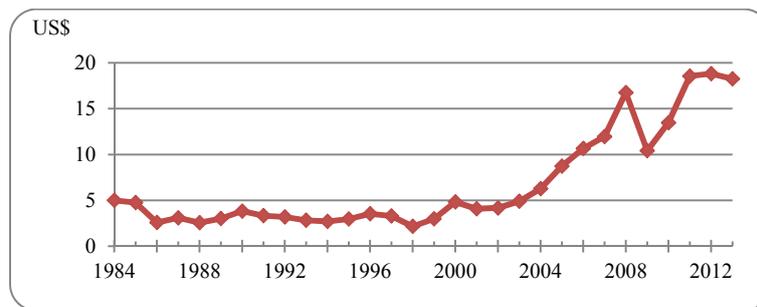
A pesar de los avances en la implementación de energías no convencionales, la matriz energética argentina evidencia aún un marcado sesgo hacia la utilización de recursos fósiles, petróleo y gas. Flores y otros [6] proponen un modelo determinístico de planificación de inversiones, que contempla la utilización de fuentes de energía renovables y convencionales. En este caso, la principal motivación de los autores es incentivar la diversificación de la matriz energética argentina. Sin embargo, este trabajo no tiene en cuenta la incertidumbre presente en los diferentes parámetros involucrados en el proceso de modelado, tales como los costos de procesamiento variables, las demandas crecientes, los descubrimientos de nuevos yacimientos, la variación en los precios, entre otros. Tarhan y otros [7] tratan la incertidumbre en la planificación de infraestructuras en alta mar para yacimientos de petróleo y gas. Los diferentes niveles de incertidumbre varían en función que la fuente ya se encuentre en funcionamiento ó que se trate de un pozo de petróleo nuevo, donde la cantidad y rendimiento del aceite son poco conocidos. Cai y otros [8] desarrollan un modelo de optimización difuso-aleatorio por intervalos, para determinar estrategias de planificación y gestión de energía, bajo múltiples incertidumbres. El enfoque se aplica a una región de tres ciudades, en un horizonte de tiempo a largo plazo. En este caso, los autores infieren que las soluciones obtenidas conforman una herramienta para determinar políticas de acción, que contemplen limitaciones económicas, bajo un sistema de confiabilidad. Por otro lado, Flétan y otros [9] se enfocan en la incertidumbre que recae sobre los precios de la electricidad; evalúan proyectos de inversión de aerogeneradores en Noruega, mediante la maximización del valor actual neto. Al-Qahtani y Elkamel [10] proponen, en cambio, un modelo de programación estocástica "two-stage", mixto entero lineal (MILP), para un problema de integración de múltiples sitios de una red de refinerías de petróleo. Los autores incorporan incertidumbre tanto en los precios del petróleo crudo y de productos importados, como en la demanda de productos; y señalan que los modelos de refinería son más sensibles a las variaciones en los precios que a variaciones en la demanda.

El objetivo de este trabajo es proponer, con base en el modelo presentado por Flores y otros [12], un modelo matemático para la planificación y análisis de las inversiones en las fuentes de energías renovables y convencionales en Argentina, con el propósito de diversificar la matriz energética, previendo la satisfacción de las demandas de los distintos mercados y contemplando la variabilidad en los precios del

petróleo y el gas. Estas fuentes, que se advierten como las más incidentes en la actual composición de la matriz energética, presentan vastas fluctuaciones en sus valores de adquisición. Esta situación puede visualizarse en las Fig. 1 y Fig. 2.



**Fig. 1.** Precio del barril de petróleo [11].



**Fig. 2.** Precio del MBTU de gas natural [11].

A lo largo de la literatura, pueden distinguirse varios enfoques destinados a intensificar el nivel de detalle en el modelado, lo que conlleva a incorporar imprecisiones propias de mediciones y registros escasos, incompletos o aproximados. En una clasificación sintética, puede reconocerse una marcada división entre la programación estocástica y la programación difusa. Cada una de estas metodologías evidencia fortalezas y debilidades que las erigen como candidatas en distintos escenarios. En este caso, la vaguedad en la medición de las reservas disponibles, la variabilidad en el rendimiento energético obtenido (principalmente a partir de fuentes renovables), la necesidad de generar previsiones que reflejen de manera confiable el contexto inflacionario local, la escases de información que limita la inferencia de funciones de distribución de probabilidad, entre otros factores, han derivado en una propuesta de representación de los parámetros imprecisos a partir de conceptos de la lógica difusa; motivo por el cual, el modelo de programación matemático planteado, requiere de una serie de transformaciones para su resolución.

## 2 Modelo Determinístico.

El modelo tiene en cuenta tres sectores de la cadena de producción de energía:

- Diferentes fuentes de energía primaria, que incluyen sus plantas colectoras.
- Plantas de procesamiento en las que se transforman las energías primarias en una forma de energía útil (electricidad, combustibles).
- Los consumidores finales, que para este modelo están representados por la demanda de los mercados del transporte, diferenciados en transporte "liviano" que incluye los consumos de naftas y GNC, y el transporte "pesado" que considera los consumos de diesel oil y biodiesel. También se consideran los consumos de energía eléctrica y de gas natural para uso industrial, comercial y residencial.

Los valores de demanda de los diferentes sectores, incluidos en el modelo, corresponden a valores reportados por las agencias nacionales de la Argentina en 2013 [13]–[16]. Puesto que se considera un modelo multiperíodo hasta el año 2023, las demandas fueron estimadas y se actualizan utilizando un valor constante de crecimiento, que promedia el aumento de la demanda en los últimos años.

La función objetivo elegida consiste en la maximización del Valor Presente Neto (VPN) a lo largo del horizonte temporal considerado. El VPN permite el cálculo al presente de los flujos de inversión futuros. Consiste en la actualización al tiempo cero de futuras inversiones mediante el uso de una tasa de actualización. En la ecuación (1), se calcula el *VPN* que es igual a la cantidad actualizada de todos los flujos de efectivo  $FCS_{i,k,t}$  durante cada periodo  $t$  menos el monto erogado por los impuestos, representado por la variable  $IMP_{i,k,t}$ , para cada fuente de energía  $i$  y el mercado  $k$ , relacionados por el subconjunto  $Mercado_{i,k}$ .

En la ecuación (2) se calcula cada flujo de caja  $FCS_{i,k,t}$  como el balance financiero anual. Los términos  $Pr_{i,k,t} \cdot x_{i,k,t}$  y  $CO_{i,k,t} \cdot x_{i,k,t}$  representan los ingresos obtenidos y los costo de operación respectivamente. La variable  $CI_{i,k,t}$  es el costo de la inversión para una nueva planta, mientras que el costo de puesta en marcha sólo se considera una vez y es representado por  $CS_{i,k,t}$ . Los dos últimos términos del flujo de caja representan las posibles importaciones de energía, considerando el costo de compra de los recursos, y permitiendo discriminar entre sí las fuentes de energía es primaria o y secundaria,  $x_{i,k,t}^{EP}$  y  $x_{i,k,t}^{ES}$ , respectivamente. Por último la energía secundaria importada es vendida o entregada a los consumidores, esto se refleja en el producto  $Pr_{i,k,t} \cdot x_{i,k,t}^{ES}$ .

Las ecuaciones (3) definen la variable positiva  $IMP_{i,k,t}$  que representa el monto que se debería pagar en impuestos al estado; el parámetro  $NT$  simboliza la tasa de impuestos. Esto se considera un monto erogable, por lo que al ingreso bruto se le realiza el descuento de la depreciación, representada por la variable  $CA_{i,k,t}$ .

$$VPN = \sum_{\substack{i \in \text{Mercado}_{i,k} \\ k \in \text{Mercado}_{i,k} \\ t}} \frac{(FCS_{i,k,t} - IMP_{i,k,t})}{(1+TI)^{t-1}} \quad (1)$$

donde,

$$FCS_{i,k,t} = (Pr_{i,k,t} - CO_{i,k,t}) \cdot x_{i,k,t} \cdot hr - CI_{i,k,t} - CS_{i,k,t} - CIMP_{i,t} \cdot (x_{i,k,t}^{EP} + x_{i,k,t}^{ES}) + Pr_{i,k,t} \cdot x_{i,k,t}^{ES} \quad (2)$$

$\forall t; \forall (i,k) \in \text{Mercado}_{i,k}$

$$\begin{aligned} IMP_{i,k,t} &\geq NT(FCS_{i,k,t} - CA_{i,k,t}) & \forall t; \forall (i,k) \in \text{Mercado}_{i,k} \\ IMP_{i,k,t} &\geq 0 \end{aligned} \quad (3)$$

Las inversiones en nuevas fuentes de energía (decisiones discretas) se modelan empleando programación disyuntiva [17] (DP), con el afán de facilitar tanto la representación de los múltiples niveles de decisión involucrados, como la comprensión del modelo propuesto [18]. Se formulan dos niveles de decisión: el primer nivel permite decidir si la inversión en la fuente  $i$  se hará o no, mientras que el segundo permite decidir su capacidad y determinar los costos relacionados (4).

$$\left[ \begin{array}{c} w_{i,k,t-T_k} \\ y_{r,i,k,t-T_k} \\ \forall_{r=1..R} \left[ \begin{array}{l} CI_{i,k,t-T_k} \geq Cm_{r,i,k} \\ ICap_{i,k,t} \leq Imax_{r,i,k} \\ CS_{i,k,t-1} \geq CSm_{r,i,k} \end{array} \right] \end{array} \right] \vee \left[ \begin{array}{l} -w_{i,k,t-T_k} \\ CI_{i,k,t-T_k} = 0 \\ ICap_{i,k,t} = 0 \\ CS_{i,k,t-1} = 0 \end{array} \right] \quad \forall t > T_{i,k}; \forall (i,k) \in \text{Mercado}_{i,k} \quad (4)$$

La ecuación (5) define la cantidad ( $q_{i,t}$ ) de los combustibles  $i$  (Nafta, gasoil, fuel oil) para el período  $t$  obtenido del fraccionamiento de una cantidad de petróleo crudo ( $q_{P,t}$ ).

$$q_{i,t} = Corte_i \cdot q_{P,t} \quad \forall t; \forall i \in \text{Destilados}_i \quad (5)$$

La ecuación (6) establece que la producción de energía para un mercado particular  $k$ , en cada período  $t$ , debe ser igual a la demanda menos el aporte de las importaciones. El parámetro  $f_{i,k}$  es un factor de conversión que permite determinar la cantidad de energía secundaria que se obtendrá de la fuente  $i$  para el mercado  $k$ .

$$\sum_{i \in \text{Mercado}_{i,k}} f_{i,k} \cdot x_{i,k,t} \cdot hr = D_{k,t} - \sum_{i \in \text{Mercado}_{i,k}} f_{i,k} \cdot x_{i,k,t}^{ES} \quad \forall t; \forall k \quad (6)$$

La ecuación (7) establece el límite de capacidad en la producción de energía.

$$f_{i,k} \cdot x_{i,k,t} \leq Cap_{i,k,t} \quad \forall t; \forall (i,k) \in \text{Mercado}_{i,k} \quad (7)$$

Las ecuaciones (8) y (9) reflejan respectivamente el momento de la construcción del proyecto y la puesta en marcha de las instalaciones, donde se realiza la acumulación de las capacidades futuras. Estas ecuaciones tienen en cuenta un período de tiempo entre el momento en que se decide invertir en una fuente de energía y cuando se comienza a producir.

$$Cap_{i,k,t} = Cap0_{i,k} \quad \forall t \leq T_{i,k}; \forall (i,k) \in Mercado_{i,k} \quad (8)$$

$$Cap_{i,k,t} = Cap_{i,k,t-1} + ICap_{i,k,t} \quad \forall t > T_{i,k}; \forall (i,k) \in Mercado_{i,k} \quad (9)$$

La ecuación (10) define la producción de fuente de energía  $i$  en período  $t$ ,  $q_{i,t}$

$$q_{i,t} = \sum_{k \in Mercado_{i,k}} x_{i,k,t} \cdot hr \quad \forall t; \forall i \quad (10)$$

La ecuación (11) establece que la cantidad producida de fuentes  $i$  debe ser menor o igual a las reservas disponibles para esa fuente  $i$  en período  $t$ ,  $RD_{i,t}$ , más las importaciones de energía primaria en ese periodo.

$$q_{i,t} \leq RD_{i,t} + \sum_k x_{i,k,t}^{EP} \quad \forall i \in NR \quad (11)$$

La ecuación (12) restringe la posibilidad de instalar fuentes de energía renovables.

$$\sum_{k \in Mercado_{i,k}} \frac{Cap_{i,k,t}}{f_{i,k}} \leq CD_i \quad \forall t; \forall i \notin NR \quad (12)$$

La ecuación (13) realiza un balance sobre las reservas a medida que se avanza en los periodos de tiempo.

$$RD_{i,t} = RD_{i,t-1} - q_{i,t-1} + NewR_{i,t} + \sum_k x_{i,k,t-1}^{EP} \quad t^f > t > t^0; \forall i \in NR \quad (13)$$

La ecuación (14) permite proponer políticas de conservación de los recursos no renovables limitando la disponibilidad al finalizar el horizonte de estudio.

$$RD_{i,t^f} \geq (1 - \varepsilon_i) \cdot CD_i \quad \forall i \in NR \quad (14)$$

La ecuación (15) restringe la relación entre la producción de nafta y bioetanol.

$$q_{BEC,t} + q_{BEM,t} \leq BioNF \cdot q_{NF,t} \quad \forall t \quad (15)$$

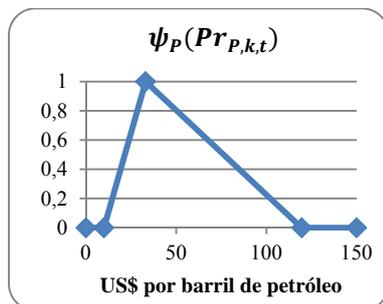
La ecuación (16) relaciona la producción del diesel y con el biodiesel.

$$q_{BD,t} \leq BioD \cdot q_{GO,t} \quad \forall t \quad (16)$$

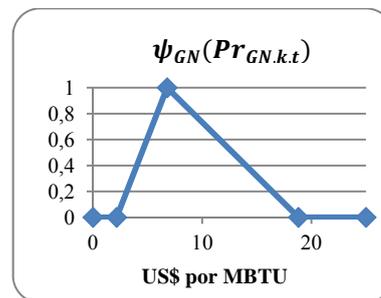
### 3 Reformulación y Transformación.

Del estudio realizado por Flores y otros [19], se desprende que las fuentes de energía de mayor repercusión sobre la composición de la matriz energética nacional son los recursos fósiles, petróleo y gas natural. La naturaleza fluctuante de los precios de estos recursos, impacta en forma directa sobre los costos operativos. Los precios de estas energías en forma consumible se establecen o fijan,  $Pr_{i,k,t}$  para  $i \neq P, GN$ , con el objeto de analizar la rentabilidad de las inversiones ante posibles variaciones de los precios de sus fuentes de obtención. Esto se refleja en los márgenes de ganancia obtenidos al implementar distintas configuraciones de empleo de energías y, por ende, se producen variación tanto en el valor de función objetivo alcanzado como en las decisiones de inversión que toma el modelo.

Para contemplar la incertidumbre en el precio de los recursos fósiles, en el modelo originalmente planteado, se sustituyen los precios del petróleo y del gas natural,  $Pr_{P,k,t}$  y  $Pr_{GN,k,t}$ , por números triangulares definidos respectivamente como  $\tilde{Pr}_{P,k,t} = (Pr_{P,k,t}^{Inf}, Pr_{P,k,t}^{Med}, Pr_{P,k,t}^{Sup})$  y  $\tilde{Pr}_{GN,k,t} = (Pr_{GN,k,t}^{Inf}, Pr_{GN,k,t}^{Med}, Pr_{GN,k,t}^{Sup})$ , y cuyas funciones de pertenencia se muestran en las Fig. 3 y Fig. 4. El modelo resultante es un modelo mixto entero lineal difuso (FMIL). Para alcanzar una única solución, óptima en todo el rango de variación considerado para representar los precios inciertos, dos transformaciones fueron realizadas.



**Fig. 3.** Función de pertenencia del precio del petróleo.



**Fig. 4.** Función de pertenencia del precio del Gas Natural.

La primer reformulación se basa en la metodología desarrollada por Zhang y otros [20] para coeficientes de tipo trapezoidal, y adaptada posteriormente por Mavrotas y otros [21] para el caso de números triangulares. Esta técnica permite reescribir el problema FMIL como un problema MILP multiobjetivo, a partir de la utilización de los valores críticos de las 3-tuplas, que caracterizan a los números difusos involucrados, y de las propiedades de operación de los mismos. Por lo tanto, una nueva función objetivo es planteada para cada cota superior de los intervalos de definición de las funciones de pertenencia; al tiempo que la región factible del problema se mantiene inalterada al no comprometer parámetros fluctuantes en la descripción de las restricciones. La nueva función objetivo, ecuación (17), describe

entonces el impacto de la incertidumbre en los precios de los recursos fósiles sobre los costos productivos, corriente abajo.

$$VPN^\mu = \sum_{\substack{i \in \text{Mercado}_{i,k} \\ k \in \text{Mercado}_{i,k} \\ t}} \frac{(FCS_{i,k,t}^\mu - IMP_{i,k,t}^\mu) + (FCS_{i,k,t} - IMP_{i,k,t})}{(1+TI)^{t-1}} \quad \forall \mu \quad (17)$$

Notar que  $\mu$  es el índice que relaciona cada función objetivo con el valor crítico o característico de definición del número triangular supuesto (valor inferior, valor medio o valor superior).

Para hallar una solución del problema multiobjetivo alcanzado, se emplea una nueva transformación, basada en el método max-min de Zimmernann [22]–[24], enfoque utilizado también por Chanas [25] e incluido en la revisión realizada por Baykasoğlu y Göçken [26]. Se define una función de pertenencia para cada uno de los objetivos  $VPN^\mu$ , como se muestra en la ecuación (18).

$$f_\mu = \begin{cases} 0 & VPN^\mu < Z_{lw}^\mu \\ 1 - \frac{Z_{up}^\mu - VPN^\mu}{Z_{up}^\mu - Z_{lw}^\mu} & Z_{lw}^\mu \leq VPN^\mu \leq Z_{up}^\mu \\ 1 & VPN^\mu > Z_{up}^\mu \end{cases} \quad \forall \mu \quad (18)$$

En esta última expresión,  $Z_{up}^\mu$  representa el valor más optimista del  $VPN^\mu$ , mientras que el valor  $Z_{lw}^\mu$  representa el valor más pesimista de cada función objetivo, es decir, para cada valor asumido por  $\mu$ . Estas cotas se calculan fijando diferentes niveles de reservas de recursos fósiles.

Entonces, el problema multiobjetivo se reescribe como:

$$\begin{aligned} & \text{Max} \left( \text{Min} \left( f_{\text{sup}}, f_{\text{med}}, f_{\text{inf}} \right) \right) \\ \text{s.a.} & \\ & \text{ec (4) – ec (17)} \end{aligned} \quad (19)$$

y se transforma a un problema convencional MILP como se presenta a continuación:

$$\begin{aligned} & \text{Max}(\alpha) \\ \text{s.a.} & \\ & \alpha \leq 1 - \frac{Z_{up}^\mu - VPN^\mu}{Z_{up}^\mu - Z_{lw}^\mu} \quad \forall \mu \\ & \text{ec (4) – ec (17)} \end{aligned} \quad (20)$$

## 4 Resultados.

Las estadísticas del modelo se resumen en la Tabla 1; para la resolución se utilizó GAMS 23.5. Se empleó una CPU con un procesador Intel core i5 con 2 GB de memoria. Se requirieron 0.35 segundos de promedio para resolver cada modelo.

**Tabla 1.** Estadísticas del modelo.

Bloques de ecuaciones	47	Ecuaciones	3200
Bloques de variables	26	Variables	3847
Elementos no nulos	20289	Variables discretas	1300

El modelo final propone un único plan de inversiones, para la diversificación de la matriz energética, bajo una perspectiva financiera que contempla la variación de los precios de las fuentes fósiles en un rango supuesto. Para realizar un análisis más detallado de los resultados alcanzados, se decidió ajustar los valores optimistas y pesimistas en función de la disponibilidad de los recursos fósiles, los cuales juegan un rol destacado en la actual composición de la matriz energética, como se ha mencionado previamente. En la Tabla 2 se muestran las cotas adoptadas para la definición de las funciones de pertenencia, presentadas en la ecuación (30), y requeridas en la formulación del problema (32). En este caso, el valor de  $Z_{up}^{\mu}$  se desprende como solución del modelo hallado tras la primer reformulación, asumiendo una disponibilidad 200% de los recursos fósiles; del mismo modo se obtiene el valor de  $Z_{lw}^{\mu}$  suponiendo una disponibilidad del 45%.

Resulta llamativo que, al incrementar el valor de los recursos fósiles la función objetivo disminuye; esto se debe al incremento de los costos operativos para la obtención de energías secundarias producidas a partir de estos recursos. Dado que el precio de venta de las demás energías no sufre aumentos, el margen de ganancia de estas industrias se reduce, reflejándose en el decrecimiento de la función objetivo.

**Tabla 2.** Cotas empleadas para las funciones pertenencias (MUS\$).

$\mu$	$Z_{up}^{\mu}$	$Z_{lw}^{\mu}$
sup	19201,24	17670,59
med	19235,74	17698,26
inf	19250,60	17710,03

En función de los resultados provistos en [19], donde se destaca el efecto de la disponibilidad de gas natural sobre las decisiones de inversión, se propone realizar un análisis de resultados considerando cuatro niveles 45%, 60%, 80% y 100% de las reservas de gas natural reportadas por la Secretaria de Energía [14]. En la Fig. 5 se exhibe los resultados alcanzados bajo estos supuestos. En el eje vertical se muestra el valor alcanzado por la función objetivo del último modelo presentado, mientras que en el eje horizontal se presenta la disponibilidad de gas natural. Esta función objetivo  $\alpha$ , corresponde al máximo valor que satisface simultáneamente cada función de

pertenencia, es decir, es el máximo valor en la intersección de las  $f_{\mu}$ . Por ejemplo,  $\alpha = 0,6$  representa una pertenencia mayor al 60%, para cada  $NPV^{\mu}$  al intervalo  $[Z_{lw}^{\mu}, Z_{up}^{\mu}]$ . Esto indica que, con una disponibilidad del 100% de gas natural, el menor  $NPV^{\mu}$  obtenido será el 60% de su valor más optimista supuesto. La restricción de la disponibilidad de gas natural al 45% posiciona a cada  $NPV^{\mu}$  en el extremo inferior de su intervalo de acotamiento. El crecimiento que vislumbra la función objetivo es concordante con el aumento de las reservas de gas natural.

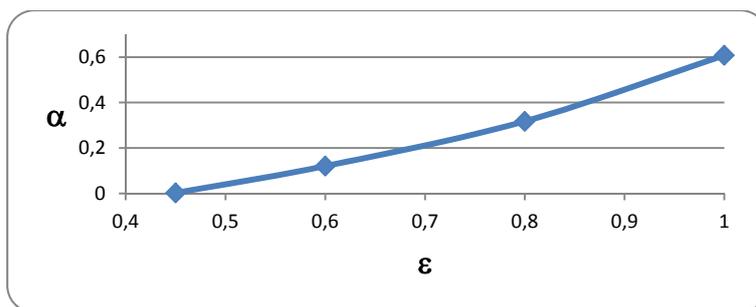


Fig. 5. Función objetivo.

Las inversiones y el empleo de los recursos van cambiando en cada uno de los casos, disminuyendo marcadamente el número de inversiones a medida que se incrementa la disponibilidad de gas natural.

En la Tabla 3 se presentan las inversiones realizadas cuando se dispone de un 45% de las reservas de gas natural. Al contar con una baja cantidad de recursos, el modelo debe realizar instalaciones en recursos alternativos para poder satisfacer las demandas en los diferentes mercados.

Tabla 3. Inversiones realizadas con un 45% de disponibilidad de gas natural.

		2013		2014		2015		2021	
		MUS\$	TOE/hr	MUS\$	TOE/hr	MUS\$	TOE/hr	MUS\$	TOE/hr
Biodiesel	Transporte	144,34	135,94	144,34	135,94	144,34	135,94		
Bioetanol (maíz)	Transporte							230,81	55,06
Eólica	Eléctrico	2335,3	522,4						
Solar	Residencial	414,13	695,55	414,13	695,55				
Hidrocinética	Eléctrico					18,14	1,44		

En la Fig. 6 se muestra la evolución de la matriz energética con una disponibilidad del 45% de las reservas de gas natural. Es interesante observar el ritmo de disminución paulatino que evidencia el uso de gas natural a lo largo del horizonte de estudio; se reserva la venta de petróleo para el último periodo desplazando el empleo de diesel. El modelo decide emplear la energía nuclear como sustituta del gas natural en el mercado eléctrico, mientras que cuando da inicio a la producción de energía eólica, disminuye su empleo. La instalación de los colectores solares, como muestra la

Tabla 3, se realiza al inicio del horizonte de estudio. Se emplea abundantemente el biodiesel a excepción del último periodo.

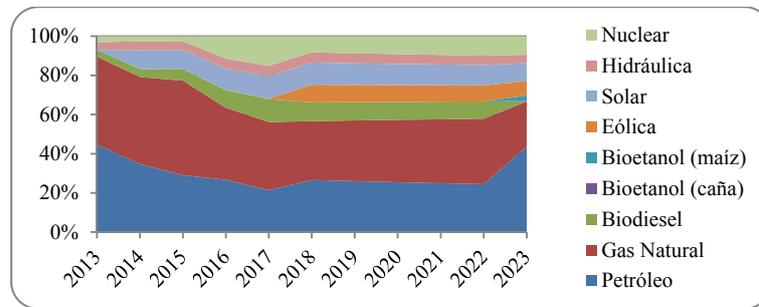


Fig. 5. Evolución de la matriz energética con un 45% de disponibilidad de gas natural.

## 5 Conclusiones.

En este trabajo se analiza el efecto de la incertidumbre en los precios del petróleo y del gas natural, sobre los costos de los derivados o energías secundarias que se producen a partir de estos recursos, restringiendo el reajuste de precios de venta de las energías secundarias. Por esto, un incremento en los precios de las materias primas, afecta de manera severa la viabilidad de las industrias.

El modelo MILP finalmente alcanzado provee una única solución financiera, que se desprende de las decisiones propuestas de inversión y explotación de los recursos, y que resulta óptima en todo el rango de variación de precios de los recursos fósiles.

Al contemplar una alta variación del precio del petróleo, el modelo propuesto decide limitar su uso y considerar fuentes alternativas; la principal preferencia en este caso es la utilización de gas natural. Si bien el gas natural también presenta incertidumbre, el rango de fluctuación es considerablemente menor en amplitud y valor. Además, el modelo original resulta sensible a cambios en la disponibilidad del gas natural, pero no así a su precio. El comportamiento en este nuevo modelo es consecuente; las decisiones se ven fuertemente afectadas por la disponibilidad de este recurso. Las inversiones disminuyen conforme crecen las reservas de gas natural disponible, modificando progresivamente las preferencias de las fuentes, empleando las más convenientes financieramente.

## Nomenclatura

### Sets:

$i$ : Fuentes de Energía

$k$ : Tipos de Mercados

$t$ : Periodos de tiempo

$r$ : Intervalos de Capacidad

$\text{Mercado}_{i,k}$ : Conjunto que indica los tipo de fuentes de energía  $i$  que satisfacen los mercados  $k$ .

$\text{Destilados}_i$ : Conjunto que vincula las fuentes de energía secundaria que

se obtienen del procesamiento del petróleo ( $Nf, GO, FO$ )

$NR$ : Conjunto de fuentes  $i$  no renovables

$NFO$ : Conjunto de fuentes  $i$  que no son fósiles ( $BD, BE$ )

**Parámetros:**

$Corte_i$ : Proporción de combustibles  $i$  obtenidos de la destilación de petróleo crudo.

$Cap0_{i,k}$ : Capacidad inicial instalada de las plantas que procesan la fuente  $i$  para el mercado  $k$

$Cm_{r,i,k}$ : Costo de inversión para el incremento de la capacidad de planta que procese la fuente  $i$  para el mercado  $k$ , en el intervalo de capacidad  $r$

$CSm_{r,i,k}$ : Costo de puesta en marcha de una planta que procese la fuente  $i$  para el mercado  $k$  en el intervalo de capacidad  $r$

$CO_{i,k,t}$ : Costo operativo de la emplear la fuente  $i$  para satisfacer el mercado  $k$  en el periodo  $t$

$D_{k,t}$ : Demanda Estimada para el mercado  $k$  en el periodo  $t$

$NewR_i$ : Disponibilidad de las nuevas reservas para fuentes no renovables  $i$

$CD_i$ : Disponibilidad del recurso  $i$

$f_{i,k}$ : Factor de rendimiento y conversión de unidades de una planta que procesa la fuente  $i$  para el mercado  $k$

$hr$ : Horas de operación anual

$Imax_{r,i,k}$ : Incremento de la capacidad productiva en las industrias que procesen la fuente  $i$  para el mercado  $k$ , en el intervalo de capacidad  $r$

$BioD$ : Máximo porcentaje admisible de biodiesel vegetal en mezclas de biodiesel

$BioNF$ : Máximo porcentaje admisible de bioetanol en mezclas de alconaftas

$Pr_{i,k,t}$ : Precio de venta de la fuente de energía  $i$  al mercado  $k$  en el periodo  $t$ .

$NT$ : Tasa de impuesto

$TI$ : Tasa de interés

$T_{i,k}$ : Tiempo de edificación de las estructuras civiles para que de inicio la producción de planta que procesa la fuente  $i$  para el mercado  $k$

$TVU_{i,k}$ : Tiempo de vida útil de las instalaciones de las instalaciones que procesan la fuente  $i$  para el mercado  $k$

**Variables:**

$FCS_{i,k,t}$ : Flujo de caja de la actividad de procesar la fuente  $i$  para el mercado  $k$  en el periodo  $t$

$IMP_{i,k,t}$ : Impuestos que se debe pagar por la actividad de procesar la fuente  $i$  para el mercado  $k$  en el periodo  $t$

$VPN$ : Valor presente neto

Variables Positivas:

$RD_{i,t}$ : Cantidad disponible de las reservas de la fuente  $i$  en el periodo  $t$

$RD_{i,t,s}$ : Cantidad disponible de las reservas de la fuente  $i$  en el periodo  $t$  y escenario  $s$

$Cap_{i,k,t}$ : Capacidad acumulada para las plantas que procesan la fuente  $i$  para satisfacer el mercado  $k$  en el periodo  $t$

$CA_{i,k,t,t}$ : Costo de depreciación que corresponde al periodo  $t$ , de una

inversión realizada en el periodo  $t'$  para la fuente  $i$ , y el mercado  $k$

$CS_{i,k,t}$ : Costo de puesta en marcha de una planta que procesa la fuente  $i$  para el mercado  $k$  en el periodo  $t$

$x_{i,k,t}^{EP}$ : Energía primaria  $i$  que se puede exportar para emplearse en el mercado  $k$  en el periodo  $t$

$x_{i,k,t}^{ES}$ : Energía secundaria  $i$  que se puede exportar para emplearse en el mercado  $k$  en el periodo  $t$

$x_{i,k,t}$ : Flujo de la fuente  $i$  al mercado  $k$  en el periodo  $t$

$q_{i,t}$ : Cantidad empleada de la fuente  $i$  en el periodo  $t$ .

$ICap_{i,k,t}$ : Incremento de la capacidad de las nuevas inversiones en la fuente  $i$  para el mercado  $k$  en el periodo  $t$

$CI_{i,k,t}$ : Inversiones realizadas para la fuente  $i$  y el mercado  $k$  en el periodo  $t$

$y_{r,i,k,t}$ : Variable binaria que decide el intervalo de incremento de la capacidad  $r$  en la fuente  $i$  para el mercado  $k$  en el periodo  $t$

$w_{i,k,t}$ : Variable binaria que decide la realización o no de las inversiones en la fuente  $i$  para el mercado  $k$  en el periodo  $t$

## Bibliografía

- [1] Alexis Caporal, «Libro - El Futuro De La Energía», *Instituto Baikal*.
- [2] S. Panwar, D. K. Agrawal, G. C. S. Negi, K. S. Kanwal, V. Sharma, M. S. Lodhi, J. Singh, y V. Bhatt, «Impact assessment of a hydroelectric project on the flora in the Western Himalayan region based on vegetation analysis and socio-economic studies», *J. Environ. Plan. Manag.*, vol. 53, n.º 7, pp. 907-923, oct. 2010.
- [3] The International Energy Agency, «Energy sustainability and tracking clean energy - IEA, Energy sustainability and tracking clean energy - IEA». [En línea]. Disponible en: <http://www.iea.org/etp/tracking/>. [Accedido: 21-jul-2014].
- [4] «IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change». [En línea]. Disponible en: <http://www.ipcc.ch/index.htm>. [Accedido: 10-nov-2014].
- [5] R. Wüstenhagen y E. Menichetti, «Strategic choices for renewable energy investment: Conceptual framework and opportunities for further research», *Energy Policy*, vol. 40, pp. 1-10, ene. 2012.
- [6] J. Flores, M. A. Rodriguez, J. M. Montagna, y A. Vecchietti, «Modelo Matemático para la Planificación de las Inversiones en Fuentes de Energía Renovables para la Argentina», *Iberoam. J. Ind. Eng.*, vol. 3, n.º 6, pp. 87-102, dic. 2011.
- [7] B. Tarhan, I. E. Grossmann, y V. Goel, «Stochastic Programming Approach for the Planning of Offshore Oil or Gas Field Infrastructure under Decision-Dependent Uncertainty», *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 48, n.º 6, pp. 3078-3097, mar. 2009.
- [8] Y. P. Cai, G. H. Huang, Z. F. Yang, y Q. Tan, «Identification of optimal strategies for energy management systems planning under multiple uncertainties», *Appl. Energy*, vol. 86, n.º 4, pp. 480-495, abr. 2009.
- [9] S.-E. Fleten, K. m. Maribu, y I. Wangensteen, «Optimal investment strategies in decentralized renewable power generation under uncertainty», *Energy*, vol. 32, pp. 803-815, ene. 2007.

- [10] K. Al-Qahtani y A. Elkamel, «Robust planning of multisite refinery networks: Optimization under uncertainty», *Comput. Chem. Eng.*, vol. 34, pp. 985-995, ene. 2010.
- [11] «Energy economics | About BP | BP Global». [En línea]. Disponible en: <http://www.bp.com/en/global/corporate/about-bp/energy-economics.html>. [Accedido: 05-ago-2014].
- [12] J. Flores, M. L. Cunico, M. A. Rodriguez, y A. Vecchietti, «Optimizing the Energy Production Infrastructure Considering Uncertainty in Fossil Resource Availability», *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 53, n.º 44, pp. 16984-17001, nov. 2014.
- [13] «Estadísticas - IAPG - Instituto Argentino del Petróleo y del Gas». [En línea]. Disponible en: [http://www.iapg.org.ar/web\\_iapg/sectores/estadisticas/productos/listados/listado\\_todos\\_1os\\_productos.htm](http://www.iapg.org.ar/web_iapg/sectores/estadisticas/productos/listados/listado_todos_1os_productos.htm). [Accedido: 17-sep-2014].
- [14] T. de la I.-S. de Energía, «Secretaría de Energía - República Argentina». [En línea]. Disponible en: <http://www.energia.gov.ar/contenidos/verpagina.php?idpagina=3300>. [Accedido: 26-ago-2014].
- [15] «INDEC:INSTITUTO NACIONAL DE ESTADISTICA Y CENSOS DE LA REPUBLICA ARGENTINA». [En línea]. Disponible en: <http://www.indec.mecon.ar/>. [Accedido: 05-ago-2014].
- [16] Mercado Eléctrico Mayorista de la República Argentina, «Publicaciones MEMNet», *Publicaciones MEMNet*. [En línea]. Disponible en: [http://memnet2.cammesa.com/infopub.nsf/navegadores/\\$first?open](http://memnet2.cammesa.com/infopub.nsf/navegadores/$first?open).
- [17] J. P. Ruiz, J.-H. Jagla, I. E. Grossmann, A. Meeraus, y A. Vecchietti, «Generalized Disjunctive Programming: Solution Strategies», *Algebr. Model. Syst.*, p. 57, ene. 2012.
- [18] J. M. Montagna, O. A. Iribarren, y A. R. Vecchietti, «Synthesis of Biotechnological Processes Using Generalized Disjunctive Programming», *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 43, n.º 15, pp. 4220-4232, jul. 2004.
- [19] J. R. Flores, J. M. Montagna, y A. Vecchietti, «An optimization approach for long term investments planning in energy», *Appl. Energy*, vol. 122, pp. 162-178, jun. 2014.
- [20] G. Zhang, Y.-H. Wu, M. Remias, y J. Lu, «Formulation of fuzzy linear programming problems as four-objective constrained optimization problems», *Appl. Math. Comput.*, vol. 139, n.º 2-3, pp. 383-399, jul. 2003.
- [21] G. Mavrotas, H. Demertzis, A. Meintani, y D. Diakoulaki, «Energy planning in buildings under uncertainty in fuel costs: The case of a hotel unit in Greece», *Energy Convers. Manag.*, vol. 44, n.º 8, pp. 1303-1321, may 2003.
- [22] H.-J. Zimmermann, «Description and Optimization of Fuzzy Systems», *Int. J. Gen. Syst.*, vol. 2, n.º 4, p. 209, ene. 1976.
- [23] H.-J. Zimmermann, «Fuzzy mathematical programming», *Comput. Oper. Res.*, vol. 10, n.º 4, pp. 291-298, 1983.
- [24] H.-J. Zimmermann, «Applications of fuzzy set theory to mathematical programming», *Inf. Sci.*, vol. 36, n.º 1-2, pp. 29-58, jul. 1985.
- [25] S. Chanas, «The use of parametric programming in fuzzy linear programming», *Fuzzy Sets Syst.*, vol. 11, n.º 1-3, pp. 229-241, 1983.
- [26] A. Baykasoğlu y T. Göçken, «A review and classification of fuzzy mathematical programs», *J. Intell. Fuzzy Syst.*, vol. 19, n.º 3, pp. 205-229, jun. 2008.