

# **Modelo De Decisión Multi-Criterio Con La Aplicación De La Metaheurística FEPSO Para La Determinación Del Escenario Óptimo Que Propicie La Penetración De Las Fuentes Primarias De Generación Renovables según la Tasa de Retorno Sistémica. Parte 1: Hipótesis Simplificativas, Coeficientes Tecnológicos Y De Las Funciones Objetivos.**

*Federico G. Camargo*  
*cam\_federico@hotmail.com*

*Gustavo A. Schweickardt*  
*schweickardt@frcu.utn.edu.ar*

*CONICET - Universidad Tecnológica Nacional*  
*Facultad Regional Concepción del Uruguay*  
*Ing. Pereira 676 - 3260*  
*Concepción del Uruguay - Argentina*

## **Abstract**

*This work presents a conceptual and preliminary analysis of the concepts and criteria for estimating the Energy Return on Investment (EROI) was developed. Issues and considerations for a standardized methodology that allows comparisons and decision-making were discussed, in order to minimize environmental impact. The method of Life Cycle Analysis (LCA) was used in order to determinate The Technologic Coefficients and Objective Function. Then, a mathematical development was developed, defining the state and auxiliary variables and the adjustment parameters necessary to study the problem.*

## **Keywords**

*Energy Returned On energy Investment (EROI or EROEI), Primary Source of Renewable Generation, Dynamical System, Energy System.*

## **Resumen**

*En el presente trabajo se desarrolló un modelo de optimización basado en las metodologías disponibles en el estado del arte, para la optimización de un sistema. basado en la Tasa de Retorno Energético (TRE) del*

*sistema. Se buscó discutir los problemas y aspectos a considerar para obtener una metodología estandarizada y flexible, la cual resulte factible para realizar comparaciones y tomas de decisiones, con el fin de minimizar el impacto ambiental. Se aplicó el método de Análisis del Ciclo de Vida (LCA) para la determinación de los coeficientes tecnológicos y de la función objetivo. Con estos datos, se hizo un Modelo Matemático definiendo las variables de estado, auxiliares y parámetros de ajustes necesarios para estudiar la problemática.*

## **Palabras Clave**

*Tasa de Retorno Energético (TRE), Fuente Primaria de Generación Renovable, Sistema Dinámico, Sistema Energético.*

## **1. Introducción**

La urgencia de realizar una transición desde las fuentes de generación a base de recursos fósiles hacia las fuentes renovables surge de distintas razones. En primer lugar, el crecimiento sostenido de emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) hacia la atmósfera provocaría cambios climáticos irreversibles. La concentración atmosférica de CO<sub>2</sub> máxima admitida es de 450 ppm, cuya violación

supone un incremento de temperatura terrestre de dos grados centígrados por Efecto Invernadero, situación en la cual el daño ocasionado a los ecosistemas se considera irreversible. En segundo lugar, nos encontramos en el cenit de la producción de hidrocarburos, principal recurso no renovable, que de no encontrarse un sustituto viable, supondría una crisis energética importante para las generaciones futuras. Del conjunto de metodologías disponibles en el estado del arte, la mejora de la Eficiencia Energética es la que mayor impacto supone en este contexto. Esto implica mejoras progresivas en las tecnologías de fabricación, uso eficiente de los recursos (principalmente de los recursos escasos o contaminantes) garantizar la mayor vida útil posible y mejoras en las eficiencias. En el presente trabajo se presenta una metodología para la determinación de los coeficientes tecnológicos y de las funciones objetivos, que sirven como dato para un modelo de Programación Dinámica Difusa resuelto mediante la metaheurística FEPSO [3].

## 2. Fundamentos Teóricos

### 2.1. Definición de Sistema

En forma general, se define un sistema a un conjunto de elementos organizados y relacionados que interactúan entre sí. Todo sistema tiene una o varias entradas y salidas que pueden ser datos, energía o materia prima, en este sentido, los sistemas se categorizan según el tipo de entrada y salida que manejen. Se considera como sistema toda la aparamenta eléctrica correspondiente a la generación de energía como la demanda industrial y transporte. La Eficiencia Energética del sistema implica la minimización de las pérdidas de potencia/energía causantes en la obsolescencia prematura de la aparamenta eléctrica instalada, disminuyendo su vida útil y alterando Rentabilidad Energética. Dicho concepto involucra la energía requerida para producir el dispositivo con cierta vida útil bajo condiciones de operación nominal, supuestas eficientes, conforme la mejor tecnología disponible para su fabricación.

### 2.2. Tasa De Retorno Energético - TRE – Energy Return On Investment - EROI

Según las leyes termodinámicas, la energía no se crea ni se destruye, sino que se transforma. El término generación de energía refiere al proceso de transformación de energía realizado por una máquina, en el cual se transforma el recurso energético de interés, en otro tipo de energía que sí tiene utilidad. En toda transformación se producen pérdidas, es decir parte de la energía se utiliza en procesos irreversibles de índole térmicos, químicos, electromagnéticos, etc., que no aportan en la energía obtenida como útil. Con el fin de

realizar y sustentar el proceso de transformación energética es necesario invertir energía útil en crear y mantener su infraestructura, abastecimiento energético y de insumos, además de las correspondientes pérdidas en su funcionamiento. Considerando la merma y posible agotamiento de los recursos fósiles, preocupa conocer entonces la cantidad de energía útil que se obtiene de una fuente de generación determinada y la energía invertida para lograrlo, y el índice que analiza dichos aspectos se denomina Tasa de retorno energético (TRE) –Energy Return On Investment (EROI). Ambas siglas serán utilizadas indistintamente.

$$EROI = \frac{E_{ret}}{E_{inv}} \quad (1)$$

Donde  $E_{ret}$  es la Energía neta Retornada (ER) por la FGR y  $E_{inv}$  es la Energía Invertida (EI) en el proceso. La disponibilidad de métodos en el estado del arte es amplia, se discutirán algunos índices propuestos hasta ahora. Algunos de ellos son útiles a la hora de hacer estudios comparativos de proyectos semejantes y evaluar la evolución tecnológica del recurso en cuestión, pero inaplicables para comparar distintas categorías de recursos energéticos [1 y 2]. Se desarrolla algunos tipos de generación, que son ampliamente desarrollados y conocidos y componen principalmente la matriz energética: Centrales Hidráulicas, Centrales Fósiles y Centrales Nucleares. Respecto a la generación renovable se estudian únicamente los Aerogeneradores y Energía Solar Fotovoltaica – ASF, excluyendo la Biomasa.

### 2.3. Aerogeneradores

Los aerogeneradores son máquinas que permiten captar la energía proveniente de las masas de aire en energía de rotación a través de aspas y transformarla en energía eléctrica por medio de un generador eléctrico incorporado. Las dimensión de las aspas determina el volumen de aire que participa en el proceso de transformación de energía y consecuentemente la potencia de diseño del generador. Hay factores que participan en la potencia disponible de conversión de energía eólica: velocidad o régimen del viento, la densidad del aire, dependiente de la presión, temperatura ambiente, etc. De estos factores, el más importante corresponde a la velocidad, esto es debido a que la potencia disponible es directamente proporcional al cubo de la misma. Aunque existen distintos tipos constructivos, los aerogeneradores se pueden clasificar según la potencia de diseño: desde potencias menores a 1kW hasta los 10MW. Para la aplicación de esta alternativa en Generación Distribuida (GD) es viable el uso de generadores de baja y media potencia, esto es hasta 1 MW, debido al incremento de los costos de inversión, equipamiento requerido, dimensiones del generador y predio requerido para las instalaciones. Para

finés analíticos, la potencia efectiva de salida de un sistema eólico puede ser aproximada inicialmente por la siguiente ecuación:

$$E_c = 0,045 \text{ a } 0,135D^2V^3 \quad (2)$$

Donde D es el diámetro barrido por el rotor y V es la velocidad del viento. De esta expresión se desglosan tres valores de referencia: a partir de 1000 W/m<sup>2</sup> el aprovechamiento es bueno, desde 200 W/m<sup>2</sup> el aprovechamiento es normal y por debajo de 50 W/m<sup>2</sup> el aprovechamiento es malo, siendo no rentable energética/económicamente el emplazamiento de estas centrales.

#### 2.4. Energía Solar Fotovoltaica – ASF.

Los paneles solares fotovoltaicos consisten en una celda, construida a base de silicio u otro material semiconductor, que absorbe parte de los fotones del sol. En este proceso se libera un electrón y en consecuencia, se genera una corriente eléctrica que posteriormente es modificada mediante onduladores, equipos de potencia o en su defecto, almacenada en baterías. La energía producida es función de la radiación solar característica del lugar de ubicación, cantidad de horas de luz solar y del diseño constructivo del panel con sus equipos complementarios [2].

#### 2.5. Centrales Hidráulicas

Las Centrales Hidroeléctricas aprovechan la energía de las masas de agua en movimiento que circulan por los ríos para transformarla en energía eléctrica, utilizando turbinas acopladas a los alternadores. Según la potencia instalada: las Centrales Hidráulicas se clasifican en Centrales De Gran Potencia (mayor a 10 MW), Minicentrales hidráulicas (entre 1 MW y 10 MW) y por último las Microcentrales hidroeléctricas (menor a 1 MW). Según el régimen de flujo de agua: se definen las Centrales de Presa, de Centrales De Filo De Agua o De Pasada, Centrales De regulación y Centrales de Bombeo o Reversibles. Las centrales de Embalse consisten en presas o azud con el objetivo de obtener un desnivel, de esta manera el fluido es conducido hasta la sala de máquinas motrices accionando los alternadores. Las centrales de bombeo permiten la generación en zonas horarias de demanda pico y bombeo del agua hacia un embalse aguas arriba con el fin de recuperar nivel o salto. Entre los inconvenientes de estas centrales se encuentra el gran costo e inversión inicial requerido, alto impacto ambiental por destrucción de flora y fauna, deforestación, etc.

#### 2.6. Centrales Fósiles

Las centrales térmicas transforman la energía mediante la combustión de carbón, gas o diesel. En una primera clasificación se encuentran las centrales a vapor, donde el calor es aprovechado para la producción de vapor en una caldera, el cual mueve una máquina rotativa como una turbina y a su vez un alternador. En segundo lugar, se mencionan las centrales de turbinas de gas y motores diesel y por último las Centrales Mixtas o de Ciclo Combinado. Las centrales de Ciclo Combinado comprenden una turbina de gas y una caldera para la recuperación y aprovechamiento energético de los gases de combustión, y por lo tanto son las centrales de mayor rendimiento. Sin embargo la escala de costos constructivos es liderada esta última, y la de menor costo corresponde a las centrales de turbina de gas. Entre los grandes inconvenientes de las centrales fósiles se encuentra el gran consumo de combustible y la generación de dióxido de carbono que agrava el efecto invernadero.

#### 2.7. Centrales Nucleares

La energía necesaria para la producción de vapor se obtiene mediante la fisión nuclear realizada en un reactor nuclear. Un reactor nuclear es una instalación capaz de inicial, mantener y controlar las reacciones de fisión en cadena, con los medios adecuados para extraer el calor generado. Entre los componentes del mismo se encuentran el material combustible, el cual consiste de un material fisionable como Uranio 235 y plutonio 239 donde ocurren las reacciones de fisión y se extrae el calor. También se disponen de dispositivos de refrigeración y control con el fin de controlar la velocidad de reacción. Existen distintos tipos de centrales nucleares, que se diferencian en el tipo de reactor con el que trabajan. En la actualidad se están desarrollando reactores de cuarta generación, que supondrían una gran ventaja debido a la cantidad pequeña de desechos radioactivos que generarían y a su elevado rendimiento. Entre las grandes ventajas que posee la energía nuclear se encuentran, en primer lugar, un bajo costo variable, en segundo lugar posee un alto factor de operación y no emiten gases de efecto invernadero. Sin embargo existen inconvenientes serios en el uso de esta tecnología tales como costos fijos muy grandes, la radioactividad del recurso y de los desechos nucleares. Los principales costos fijos a afrontar son construcción e infraestructura, operación y mantenimiento, los costos variables corresponden a la compra y manipulación del combustible necesario. Al igual que el carbón, el precio del uranio depende de numerosos factores, variando mucho de un país a otro. De los costos totales, más de la mitad son asociados a la construcción y mantenimiento.

El consumo anual de uranio en toneladas es aproximadamente mil veces menor que el consumo de combustibles fósiles a una misma potencia.

## 2.8. Tasa De Retorno Energético - TRE – Energy Return On Investment - EROI

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) – Life Cycle Assessment (LCA) permite realizar un diseño, investigación y evaluación de un proceso productivo y del impacto ambiental asociado durante la explotación del recurso energético en cuestión. La finalidad es evaluar el impacto ambiental potencial a lo largo de todo su ciclo de vida mediante la cuantificación del uso de recursos. El procedimiento es el siguiente: en primer lugar se fijan los límites del sistema, luego se miden las pérdidas de los distintos subsistemas, efectuando correcciones en la calidad de energía. Se definen las entradas como energía, materias primas, maquinarias nuevas y la salida deseada son las emisiones ambientales, en nuestro caso la cantidad de dióxido de carbono producido [1 y 2]. En el estado del arte, se propuso una metodología alternativa basada en el estudios de escenarios de inversión en matriz energética con fuentes de generación y sin ellas. Esto es, considerando cuanto invierte el sistema sin la fuente de generación  $\sum En_{gi1}$ , y cuanto invierte con ella  $\sum En_{gi2}$ . Análogamente, se trabaja con la energía generada durante los escenarios considerados  $\sum En_{g1}$  y  $\sum En_{g2}$  para el recurso en cuestión.

$$EROI = \frac{\Delta En_{gi}}{\Delta En_{Inv}} = \frac{\sum En_{gi2} - \sum En_{gi1}}{\sum En_{gi2} - \sum En_{gi1}} \quad (3)$$

La resolución exacta de la ecuación anterior, exige una gran cantidad de información y métodos de resolución de alta complejidad, sin embargo esta expresión permite obtener conclusiones sobre los factores que intervienen en la EROI. Considerando que cada escenario es una etapa  $[k]$  y  $[k-1]$ , y expresando la energía obtenida e invertida en términos de crecimiento de Potencia Obtenida  $\Delta Pob_{gi}^{[k]}$  e Invertida  $\Delta Pd_{gi}^{[k]}$ , vida útil del equipo  $TVU_{gi}^{[k]}$  y tiempo de inversión  $Tinv_{gi}^{[k]}$ , puede desarrollarse la expresión anterior. Estos términos se estudian en profundidad en los capítulos siguientes, aplicándolos para cada uno de los componentes del sistema. Entonces, la Tasa de Retorno Energético por generador  $EROI_{gi}^{[k]}$  se define en la siguiente ecuación:

$$EROI_{gi}^{[k]} = \frac{\Delta Pob_{gi}^{[k]} * TVU_{gi}^{[k]}}{(1+Fp) * \sum \left( \Delta Pd_{gi}^{[k]} * Tinv_{gi}^{[k]} * \frac{N_{gmax}^{[k]}}{N_{gi}^{[k]}} \right)} = \frac{\left( \frac{P_{gi}^{[k]} * N_{gi}^{[k]}}{P_{gt}^{[k]}} \right) * Pob_{gt}^{[k]}}{(1+Fp) * \sum \left( \frac{\Delta Pd_{gi}^{[k]}}{Pd_{gt}^{[k]}} * Rtn_{gi}^{[k]} * Rt_{gt}^{[k]} \right) * Pd_{gt}^{[k]}} \quad (4)$$

Donde se define al crecimiento de potencia invertida

en generación  $CrP_{gi}^{[k]} = \frac{P_{gi}^{[k]} * N_{gi}^{[k]}}{P_{gt}^{[k]}}$ , asignación de potencia

instalada  $AP_{gi}^{[k]} = \frac{\Delta Pd_{gi}^{[k]}}{Pd_{gt}^{[k]}}$ , relación de tiempos de inversión

y vida útil  $Rt_{gr}^{[k]} = \frac{Tinv_{gi}^{[k]}}{TVU_{gi}^{[k]}}$ , relación de unidades

fabricadas y capacidad máxima  $Rtn_{gi}^{[k]} = \frac{N_{gmax}^{[k]}}{N_{gi}^{[k]}}$ , y

pérdidas  $Fp = \frac{Perd_t^{[k]}}{Pd_t^{[k]}}$ . Se obtiene de esta forma la ecuación 5.

$$EROI_{gi}^{[k]} = \frac{CrP_{gi}^{[k]} * Pob_{gt}^{[k]}}{(1+Fp) * \sum \left( AP_{gi}^{[k]} * Rtn_{gi}^{[k]} * Rt_{gt}^{[k]} \right) * Pd_{gt}^{[k]}} \quad (5)$$

Si  $Rt_{gi}^{[k]}$  y  $Rtn_{gi}^{[k]}$  es el mismo para todas las etapas, entonces:  $\sum AP_{Si}^{[k]} = 1$ . Entonces la Tasa de Retorno

Energético por generador es:  $EROI_{gi}^{[k]} = \frac{CrP_{gi}^{[k]}}{Rtn_{gi}^{[k]} * Rt_{gi}^{[k]}} *$

$EROI_{Sist}^{[k]}$ . Análogamente, se define la Tasa de Retorno Energético del Sistema  $EROI_{Sist}^{[k]}$  como:

$$EROI_{Sist}^{[k]} = \frac{Pob_{gt}^{[k]}}{Pd_{gt}^{[k]}} = \frac{\sum Crg_{Gsi}^{[k]}}{(1+Fp) * \sum \left( AP_{gt}^{[k]} * Rtn_{gt}^{[k]} * Rt_{gt}^{[k]} \right) * Pd_{gt}^{[k]}} \quad (6)$$

Se observa que la TRE por generador está directamente relacionada con la TRE del Sistema, esto es la Eficiencia Productiva y Asignativa que éste posee. A su vez, la TRE del sistema depende de la matriz energética disponible y consecuentemente de las TRE de cada sector de generación:

$$EROI_{gi}^{[k]} = \frac{Eob_{gi}^{[k]}[TEP]}{\Delta TTEP_{gi}^{[k]}[TEP]} = \frac{\sum_{gi=1}^{gn} \left( \frac{Pob_{gi}^{[k]} * TVU_{gi}^{[k]}}{KVA} \right)}{\sum_{gi=1}^{gn} \left( \frac{Pd_{gi}^{[k]} * Tinv_{gi}^{[k]}}{KVA} \right)} = \frac{\sum_{gi=1}^{gn} \left( \frac{Pob_{gi}^{[k]} * TVU_{gi}^{[k]}}{KVA} \right)}{\sum_{gi=1}^{gn} \left( \frac{Pob_{gi}^{[k]} * (T_{gi}^{[k]} + TVU_{gi}^{[k]})}{EROI_{gi}^{[k]} * KVA} \right)} \quad (7)$$

Teniendo en cuenta la relación  $Rt_{gi}^{[k]} = \left( \frac{Tinv_{gi}^{[k]}}{TVU_{gi}^{[k]}} \right)$ , esta expresión puede linealizarse maximizando el balance

entre la energía obtenida y la energía invertida, con lo cual el  $EROI_{Sist}^{[k]}$  será también máximo:

$$En_{gi}^{[k]} = \sum_{gi=1}^{gn} \left( P_{ob_{gi}^{[k]}} * TVU_{gi}^{[k]} \right) - \sum_{gi=1}^{gn} \left( \frac{P_{ob_{gi}^{[k]}} * (T_{gi}^{[k]} + TVU_{gi}^{[k]})}{EROI_{gi}^{[k]}} \right) = \sum_{gi=1}^{gn} P_{ob_{gi}^{[k]}} * TVU_{gi}^{[k]} \left( \frac{EROI_{gi}^{[k]} - (Rt_{gi}^{[k]} + 1)}{EROI_{gi}^{[k]}} \right) \quad (8)$$

Como  $Rt_{gi}^{[k]} \ll 1 \Rightarrow k_{gi}^{[k]} \approx \left( \frac{EROI_{gi}^{[k]} - 1}{EROI_{gi}^{[k]}} \right)$ , con lo cual se simplifica la expresión anterior. El ahorro energético en emisiones de CO2 será:

$$AE_{CO2}^{[p]} [Tn CO2] = 0.79 * \sum_{p=ki}^k \left( \sum_{gi=1}^3 En_{gi}^{[p]} + En_{g5}^{[p]} \right)$$

## 2.9. Modelo Del Crecimiento De La Potencia Demandada Propuesto En El Estado Del Arte

A partir de la etapa  $[k]$  se determinan las tasas de crecimiento instalada  $crP_{sp}^{[k]}$  y demandada  $crPd_{sp}^{[k]}$  del sector de producción, obteniendo de esta forma la potencia instalada  $P_{sp}^{[k]}$ , demandada  $Pd_{sp}^{[k+1]}$  y demandada satisfecha  $Pd_{sp}^{[k]}$ .

$$Pa_{(gi+sp) x sp}^{[k]} = P_{(gi+sp) x sp}^{[k]} * Fres_{(gi+sp) x sp}^{[k]} \quad (9)$$

$$crPd_{(gi+sp) x sp}^{[k]} = cr_{(gi+sp) x sp}^{[k]} * fti_{(gi+sp) x sp}^{[k]} - f d_{(gi+sp) x sp}^{[k]} \quad (10)$$

$$Pa_{(gi+sp) x sp}^{[k+1]} = Pa_{(gi+sp) x sp}^{[k]} * \left( 1 + crPd_{(gi+sp) x sp}^{[k]} \right) \quad (11)$$

$$crP_{sp}^{[k]} = cr_{(gi+sp) x sp}^{[k]} + crNT^{[k]} - f d_{(gi+sp) x sp}^{[k]} \quad (12)$$

$$P_{sp}^{[k+1]} = P_{sp}^{[k]} * \left( 1 + \Delta P_{(gi+sp) x sp}^{[k]} \right) \quad (13)$$

$$Fcd_{sp}^{[k]} = \frac{Pa_{(gi+sp) x sp}^{[k]}}{P_{(gi+sp) x sp}^{[k]} * Fres_{(gi+sp) x sp}^{[k]}} \quad (14)$$

$$Pds_{(gi+sp) x sp}^{[k]} = \frac{Pa_{(gi+sp) x sp}^{[k]}}{Fcd_{(gi+sp) x sp}^{[k]}} \quad (15)$$

Definiendo una tasa por exceso o defecto de demanda  $tfc_{(gi+sp) x sp}^{[k]} = Fcd_{(gi+sp) x sp}^{[k]} - 1$ , se obtienen las importaciones netas.

$$Imp_{(gi+sp) x sp}^{[k]} = Pds_{(gi+sp) x sp}^{[k]} - Pd_{(gi+sp) x sp}^{[k]} + t f c_{(gi+sp) x sp}^{[k]} * b \quad (16)$$

Se determina el crecimiento consumo energético residencial.

$$PdNT^{[k+1]} = PdNT^{[k]} * \left( 1 + crNT^{[k]} \right) \quad (17)$$

Crecimiento Potencia Demandada Sistema de Potencia (con pérdidas).

$$Pdt^{[k]} = \left( \sum_{gi}^{gn} \sum_{sp}^{sn} Pds_{(gi+sp) x sp}^{[k]} + PdNT^{[k]} \right) * \left( 1 + fp \right) \quad (18)$$

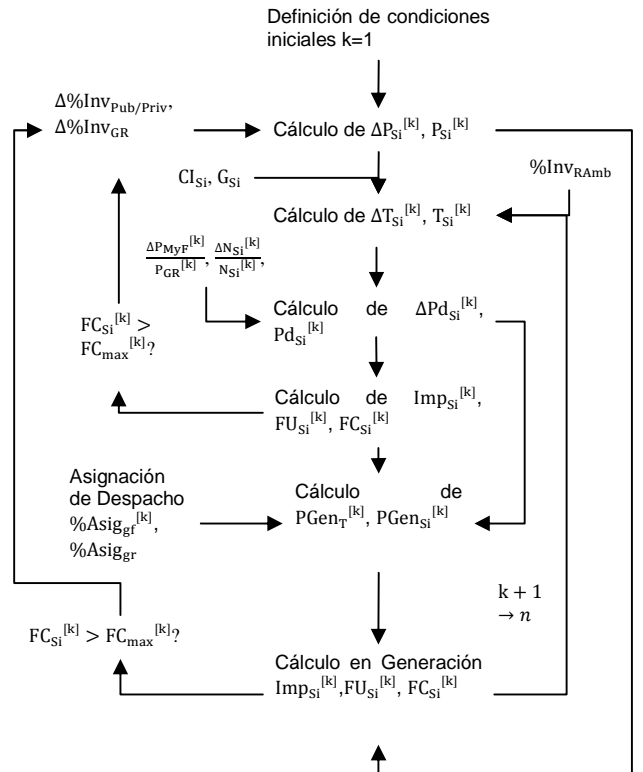


Fig. 1. Diagrama de Flujo del modelo Dinámico.

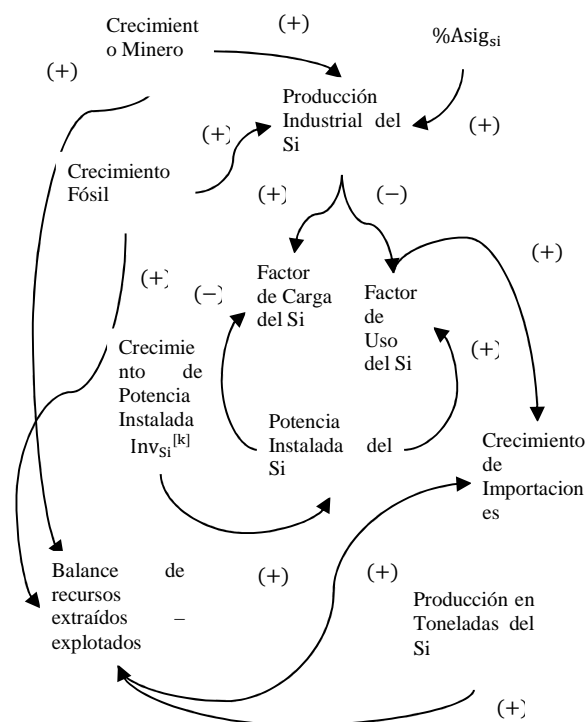


Fig. 2. Diagrama Causal de Producción de un Sector i.

Entre los grandes inconvenientes del análisis de sistemas dinámicos se encuentra la inestabilidad inherente a los sistemas caóticos, que aparejan errores y divergencia en el resultado. Por lo tanto este modelo requiere una gran cantidad de restricciones y buena precisión el relevamiento. Deben conocerse las capacidades instaladas de cada sector de producción de producción y consecuentemente las inversiones realizadas, lo cual hace que este método sea e difícil aplicación.

### 3. Hipótesis Metodológicas Del Modelo De PDD, Alcance Del Modelo Y Supuestos Simplificativos

#### 3.1. Hipótesis Metodológicas

Se plantea un modelo de Programación Dinámica Difusa, mediante la resolución por F-PSO Multi-objetivo. La aplicación de los Modelos Posibilísticos se basan en una serie de hipótesis, en primer lugar, el contexto dominado por incertidumbres no estocásticas del tipo fundamental. El entorno dinámico de decisión se compone de variables que pueden tener incertidumbres de valor, probabilidad y del tipo fundamental. En segundo lugar la existencia de Múltiples Criterios de Optimización para la identificación de la evolución más satisfactoria del sistema, cuyo apartamiento óptimo

supone un sobrecosto de difícil determinación. Se recurre a la búsqueda de un Conjunto de Soluciones acotadas por un Nivel de Riesgo solidario al Arrepentimiento Matemático. Entonces, el concepto de alternativa óptima se sustituye por el de alternativa más satisfactoria. La medida en que un cierto valor de ocurrencia en un criterio es aceptado (utilidad), responde a una función de satisfacción, modelada mediante una distribución de posibilidades.

#### 3.2. Alcance del Modelo:

Se toma como sistema, al sistema energético argentino, considerando que existe capacidad para la fabricación de los elementos necesarios, el sistema de transporte está compuesto por: camiones, trenes de carga y barco. En primera instancia no existen restricciones en la capacidad instalada de cada sector y las inversiones necesarias. Los 5 grandes sectores son extracción, procesamiento, fabricación, montaje y transporte, este último se encuentra distribuido a lo largo de todo el sistema. La transición a la generación renovable requiere una producción en masa y por lo tanto un respaldo del sector energético que debe ser afrontado, existiendo incertidumbre sobre el impacto que este pueda acarrear. Se demostró que la Modelación Determinística es ineficiente ante esta problemática, recurriendo en ese caso a la Programación Dinámica Difusa [3]. Si bien la función objetivo es difusa, las variables son determinísticas, es decir existe certidumbre sobre el comportamiento de los parámetros y restricciones en cada etapa, tales como las curvas de extracción de recursos. Las curvas de crecimiento de petróleo y población determinísticas y no lineales, son independientes de las variables de decisión y asignación. El principal factor que influye en la producción del sistema es la disponibilidad de recursos fósiles, cuya curva de extracción sigue una tendencia llamada "Pico de Hubbert". La disponibilidad, extracción y producción de recursos, sobretudo los recursos fósiles, determinan en gran parte el PBI de un país, ya que el petróleo es el recurso escaso indispensable para el desarrollo industrial. Existen suficientes incentivos de inversión y las inversiones se realizan de acuerdo a lo planificado, sin considerar retrasos por externalidades. Esto si bien es un modelo muy simplificado y totalmente alejado de la realidad, sirve en primera instancia para conocer la máxima TRE del sistema, que podría obtenerse en condiciones ideales.

### 3.3. Comportamiento De Los Parámetros - Coeficientes De La Función Objetivo Y Tecnológicos:

Aún en caso de no incurrir en inversiones que mejoren la eficiencia de la producción en cada generador, los coeficientes de la función objetivo y tecnológicos son variables, dependiendo de las decisiones realizadas en las etapas anteriores (mínimamente de la ampliación de la capacidad instalada de cada generador, en caso de mejorar la eficiencia del sector de transporte, o fabricación, de los gastos respectivos). Estos coeficientes son calculados a partir de un Análisis de Ciclo de Vida - LCA, considerando que las entradas: gastos G, rendimientos  $\eta$  y tiempos por etapa T. En primera instancia, no se considera una inversión tecnológica para disminuir los gastos G. Las unidades utilizadas para las salidas fueron TEP (Toneladas Equivalentes de Petróleo). Respecto al sistema energético estudiado, los parámetros Fres, Fmant, tdep, TVU, Tinv total son constantes. El mantenimiento preventivo y correctivo de los equipos ayuda a la preservación de los mismos, reemplazando las partes defectuosas o de avanzada vida útil con la consiguiente prolongación de la vida útil del equipo. Adicionalmente, se tiene en cuenta toda inversión tecnológica que requiera para cumplir con las reglamentaciones y leyes vigentes con el fin de que el impacto ambiental y social sea lo menor posible  $fia_{(gi+sp) \times sp}^{[k]}$ . Una vez finalizada la vida útil del mismo, se direccionan los equipamientos a empresas especializadas con el fin del desmonte y aprovechamiento de las piezas que puedan ser utilizadas  $Einvoym_{(gi+sp) \times sp}^{[k]}$ .

### 3.4. Suposiciones:

Suposición De Proporcionalidad: en cada etapa k, la contribución de la función objetivo es proporcional a la suma de las contribuciones de las variables de decisión Xi. Suposición De Aditividad: el primer miembro de cada restricción es la suma de las contribuciones de cada variable. Las inversiones realizadas son la suma de la ampliación de la capacidad instalada, depreciación de equipos, compensación del impacto ambiental. Por simplicidad, se supone que se pueden sumar las tasas de crecimiento o decrecimiento (siempre y cuando se refieran a las mismas unidades). Estas suposiciones se cumplen en el caso de optimizaciones mono-objetivo, en el caso de la función multi-objetivo (t - norma), como la función es no lineal ya no se cumplen. Suposición De Certidumbre: de acuerdo a lo explicado respecto al comportamiento de los parámetros respecto a cada etapa [k], se aplicó la suposición de certidumbre, la cual dice que todos los parámetros del modelo son constantes

conocidas. La suposición de divisibilidad implica que todas las variables de decisión asuman valores fraccionarios, para este problema se utilizaron variables de decisión continuas.

## 4. Definición De Parámetros

Se definen en primer lugar los parámetros iniciales que serán utilizados para calcular los coeficientes de las funciones objetivo y tecnológicos, mediante el LCA. Se clasifican según el sector de fabricación y Transporte.

### 4.1. Sector de Fabricación

$\eta_{spr}^{Sist\ ex/ Sist\ int}_{(mj+cr) \times sp}$	Rendimiento en Cadena De producción
$G_{spr}^{Sist\ ex/ Sist\ int}_{(mj+cr) \times sp}$	Gasto en Cadena De producción
$\left[ \frac{T_{ncomb}}{T_n} \right]$	
$tespr_{(mj+cr) \times sp}^{Sist\ ex/ Sist\ int}$	Tiempos en Cadena De producción [hs]

### 4.2. Sector de Transporte

$\eta_{tr}^{Sist\ ex/ Sist\ int}_{(mj+cr) \times sp \times ts}$	Rendimiento en Cadena De producción.
$G_{tr}^{Sist\ ex/ Sist\ int}_{(mj+cr) \times sp \times ts}$	Gasto en Cadena De producción
$\left[ \frac{T_{ncomb}}{km \times T_n} \right]$	
$D_{tr}^{Sist\ ex/ Sist\ int}_{(mj+cr) \times sp \times ts}$	Distancias De Transporte [km]
$fd_{(gi+sp) \times sp}^{[k]}$	Tasa de crecimiento de depreciación.
$fia_{(gi+sp) \times sp}^{[k]}$	Tasa de crecimiento de Inversión en remediación de impacto ambiental.

## 5. Definición De Variables

### 5.1. Variables de Decisión

$RP_{(gi+sp) \times sp}$  Relación entre la Asignación De Crecimiento De Inversión De Potencia Instalada  $ADP_{(gi+sp) \times sp}$  y la Asignación De Inversión De Potencia Instalada  $DPT_{(gi+sp) \times sp}$ .

$RN_{(gi+sp) \times sp}$  Relación entre la Asignación De Crecimiento De Inversión De Potencia Instalada  $ADN_{(gi+sp) \times sp}$  y la Asignación De Inversión De Potencia Instalada  $DNT_{(gi+sp) \times sp}$ .

Se presenta un cuadro del vector de decisión correspondiente a las variables de decisión, la dimensión del vector del mismo es:  $(ng + ns) \times nx \times nk \times nvar$ . Donde ng es el número de generadores, ns es el número de sectores de producción, nk es el número de etapas y nvar es el número de variables. La dimensión del

espacio de búsqueda es entonces:  $ne^{(ng+ns) \times ns \times nk \times n \text{ var}}$ . Se simplificó el espacio de búsqueda realizando una misma asignación para cada sector productivo, y por lo cual la dimensión del vector de decisión se reduce a:  $(ng + ns) \times nk \times n \text{ var}$ . La dimensión del espacio de búsqueda se reduce a:  $ne^{(ng+ns) \times nk \times n \text{ var}}$ .

## 5.2. Variables Auxiliares:

$\Delta TTEP_{(gi+sp) \times sp}^{Sist \text{ ex/} / Sist \text{ int}}$  Variación de toneladas demandadas para la fabricación de generadores y maquinaria del sector industrial en [TEP].

$\Delta TTEP_{gi \times sp}^{Sist \text{ ex/} / Sist \text{ int}}$  Variación de toneladas demandadas para la fabricación de generadores en [TEP].

$\Delta TTEP_{sp \times sp}^{Sist \text{ ex/} / Sist \text{ int}}$  Variación de toneladas demandadas para la fabricación de generadores en [TEP].

$\Delta TTEP_t$  Variación de toneladas demandadas totales en [TEP].

$crNT_{(gi+sp) \times sp}^{[k]}$  Crecimiento de población

$cr_{(gi+sp) \times sp}^{[k]}$  crecimiento de inversión para la fabricación de generadores y maquinaria del sector industrial.

$cr_{gi \times sp}^{[k]}$  crecimiento de inversión para la fabricación de generadores.

$Cr_{MyF}^{[k]}$  Crecimiento de Extracción minera y Fossil

$Cr_{Imp_{MyF}}^{[k]}$  Crecimiento de Importación total

$fc_{(gi+sp) \times sp}^{[k]}$  Factor de crecimiento de potencia instalada

$fdc_{(gi+sp) \times sp}^{[k]}$  Factor de crecimiento de potencia demandada

$P_{(gi+sp) \times sp}^{[k+1]}$  Potencia invertida en el sector de fabricación de generadores y maquinaria del sector industrial en [MVA].

$P_{gi}^{[k+1]}$  Potencia invertida en el sector de fabricación de generadores y maquinaria del sector industrial en [MVA].

$Ed_{(gi+sp) \times sp}^{[k]}$  Energía invertida en el sector de fabricación de generadores, operación y mantenimiento, en [MVAh].

$Einvoym_{gi \times sp}^{[k]}$  Energía invertida en el sector de fabricación de generadores en operación y mantenimiento, en [MVAh].

$Einvoym_{sp \times sp}^{[k]}$  Energía invertida en el sector de fabricación de maquinaria del sector industrial, en operación y mantenimiento, en [MVAh].

$Einvin_{gi \times sp}^{in}$  Energía invertida en el sector de fabricación de generación del sector industrial, en fabricación, en [MVAh].

$Einvin_{sp \times sp}^{in[k]}$  Energía invertida en el sector de fabricación de maquinaria del sector industrial, en fabricación, en [MVAh].

$Eob_{gi}^{[k]}$  Energía obtenida del generador, en [MVAh].

$Edt^{[k]}$  Energía demandada total, en [MWh].

$P_{g1}^{[k]}$  Potencia instalada total de generación Solar Fotovoltaica [MVA].

$P_{g2}^{[k]}$  Potencia instalada total de generación Eólica [MVA].

$P_{g3}^{[k]}$  Potencia instalada total de generación hidráulica [MVA].

$P_{g4}^{[k]}$  Potencia instalada total de generación fósil [MVA].

$P_{g5}^{[k]}$  Potencia instalada total de generación nuclear [MVA].

$P_g^{[k]}$  Potencia instalada total del sector de generación [MVA].

$Pob_{g1}^{[k]}$  Potencia obtenida total de generación Solar Fotovoltaica [MVA].

$Pob_{g2}^{[k]}$  Potencia instalada total de generación Eólica [MVA].

$Pob_{g3}^{[k]}$  Potencia instalada total de generación hidráulica [MVA].

$Pob_{g4}^{[k]}$  Potencia instalada total de generación fósil [MVA].

$Pob_{g5}^{[k]}$  Potencia instalada total de generación nuclear [MVA].

$Imp_{Si}^{[k]}$  Importaciones totales del sector i

$Bal_{SF}^{[k]}$  Balance de extracción – consumo de materiales.

$P_{tr}^{[k]}$  Potencia instalada total en transporte [MVA]

## 6. Parámetros Iniciales

### 6.1. Gastos de materiales y combustible invertido en fabricación:

$$\frac{Gmspr_{(mj+cr) \times sp}^{Sist \text{ ex/} / Sist \text{ int}} \left[ \frac{Tncomb}{Tn} \right] = \frac{Gspr_{(mj+cr) \times sp}^{Sist \text{ ex/} / Sist \text{ int}} \left[ \frac{Tncomb}{Tn} \right]}{\eta spr_{(mj+cr) \times sp}} \quad (19)$$

### 6.2. Gastos de materiales [Tnmat/Tn] y combustible [Tncomb/Tn] de Transporte (Barco, Tren, Camión)

$$Gmtr_{(mj+cr) \times sp \times ts}^{Sist \text{ ex/} / Sist \text{ int}} \left[ \frac{Tn}{Tn} \right] = \frac{Gtr_{(mj+cr) \times sp \times ts}^{Sist \text{ ex/} / Sist \text{ int}} \left[ \frac{Tn}{km * Tn} \right]}{\eta tr_{(mj+cr) \times sp \times ts}} * Dtr_{(mj+cr) \times sp \times ts}^{Sist \text{ ex/} / Sist \text{ int}} \quad (20)$$

### 6.3. Potencia específica en [Tn/MW]:

$$PE_{gi \times mj} \left[ \frac{Tn}{MW} \right] = \%PE_{gi \times mj} * PEt_{gi \times mj} \left[ \frac{Tn}{MW} \right] \quad (21)$$

### 6.4. Potencia instalada [MW] y Energía demandada [MWh] y [TEP]:

$$P_{gi} [MW] = \eta * n_{gi} * Pu_{gi} [MW] \quad (22)$$

$$E_{gi} [MWh] = \eta * n_{gi} * Pu_{gi} [MW] * VU_{gi} [h] * Fres_{gi} * Fap_{gi} \quad (23)$$

$$E_{gi} [TEP] = E_{gi} [MWh] * Gep_{gi} \left[ \frac{TEP}{MWh} \right] \quad (24)$$

### 6.5. Delta T (variación de toneladas de materiales, según la composición) [Tn]:

$$\Delta T_{(gi+sp) \times (mj+cr)} = P_{(gi+sp)} [MW] * PE_{(gi+sp) \times (mj+cr)} \left[ \frac{Tn}{MW} \right] \quad (25)$$

### 6.6. Gasto de combustible invertido fabricación generador:

#### Gastos en Fabricación:

$$GTEPs_{(mj+cr) \times sp}^{Sist \ ex/ \ Sist \ int} \left[ \frac{TEP}{Tn} \right] = Gep_{(mj+cr) \times sp}^{Sist \ ex/ \ Sist \ int} \left[ \frac{TEP}{Tncomb/Tnmat} \right] * Gmspr_{(mj+cr) \times sp}^{Sist \ ex/ \ Sist \ int} \left[ \frac{Tncomb / Tnmat}{Tn} \right] \quad (26)$$

#### Gastos en Transporte:

$$GTEPt_{(mj+cr) \times sp \times ts}^{Sist \ ex/ \ Sist \ int} \left[ \frac{TEP}{Tn} \right] = Gep_{(mj+cr) \times sp}^{Sist \ ex/ \ Sist \ int} \left[ \frac{TEP}{Tncomb/Tnmat} \right] * Gmtr_{(mj+cr) \times sp \times ts}^{Sist \ ex/ \ Sist \ int} \left[ \frac{Tncomb / Tnmat}{Tn} \right] \quad (27)$$

### 6.7. Gastos totales:

$$\Delta TTEPs_{gi \times sp}^{Sist \ ex/ \ Sist \ int} [TEP] = \Delta T_{gi \times cr} [Tn] * GTEPs_{cr \times sp}^{Sist \ ex/ \ Sist \ int} \left[ \frac{TEP}{Tn} \right] \quad (28)$$

$$\Delta TTEPt_{(gi+sp) \times sp}^{Sist \ ex/ \ Sist \ int} [TEP] = \Delta T_{(gi+sp) \times (mj+cr)} [Tn] * Ast_{(mj+cr) \times sp \times ts}^{Sist \ ex/ \ Sist \ int} * GTEPt_{(mj+cr) \times sp \times ts}^{Sist \ ex/ \ Sist \ int} \left[ \frac{TEP}{Tn} \right] \quad (29)$$

$$\Delta TTEPt [TEP] = \sum_{sp}^{sn} \Delta TTEPt_{(gi+sp) \times sp}^{Sist \ ex/ \ Sist \ int} [TEP] \quad (30)$$

### 6.8. Gasto energético de etapas de producción:

La expresión anterior se puede desglosar en los siguientes términos, según los recursos materiales o combustibles y sectores de producción y transporte.

$$A_{(gi+sp) \times sp}^{Sist \ ex/ \ Sist \ int} [TEP] = \Delta T_{gi \times cr} [Tn] * GTEPs_{cr \times sp}^{Sist \ ex/ \ Sist \ int} \left[ \frac{TEP}{Tn} \right] \quad (31)$$

$$B_{(gi+sp) \times sp}^{Sist \ ex/ \ Sist \ int} [TEP] = \Delta T_{gi \times cr} [Tn] * Astr_{cr \times sp \times ts}^{Sist \ ex/ \ Sist \ int} * GTEPtr_{cr \times sp \times ts}^{Sist \ ex/ \ Sist \ int} \left[ \frac{TEP}{Tn} \right] \quad (32)$$

$$C_{(gi+sp) \times sp}^{Sist \ ex/ \ Sist \ int} [TEP] = \Delta T_{gi \times mj} [Tn] * Astr_{mj \times sp \times ts}^{Sist \ ex/ \ Sist \ int} * GTEPtr_{mj \times sp \times ts}^{Sist \ ex/ \ Sist \ int} \left[ \frac{TEP}{Tn} \right] \quad (33)$$

$$D_{gi \times sp}^{Sist \ ex/ \ Sist \ int} [TEP] = \Delta T_{gi \times mj} [Tn] * GTEPs_{cr \times mj}^{Sist \ ex/ \ Sist \ int} \left[ \frac{TEP}{Tn} \right] \quad (34)$$

$$\Delta TTEP_{(gi+sp) \times sp}^{Sist \ ex/ \ Sist \ int} [TEP] = A_{(gi+sp) \times sp}^{Sist \ ex/ \ Sist \ int} + B_{(gi+sp) \times sp}^{Sist \ ex/ \ Sist \ int} + C_{(gi+sp) \times sp}^{Sist \ ex/ \ Sist \ int} + D_{(gi+sp) \times sp}^{Sist \ ex/ \ Sist \ int} \quad (35)$$

## 7. Variables de Asignación y Espacio de Búsqueda

Las variables de asignación utilizadas fueron  $RP_{(gi+sp) \times sp}^{[k]}$  y  $RN_{(gi+sp) \times sp}^{[k]}$  que se definen como:

$$RP_{(gi+sp) \times sp}^{[k]} = \frac{ADP_{(gi+sp) \times sp}^{[k]}}{DPT_{(gi+sp) \times sp}^{[k]}} \quad (36)$$

$$RN_{(gi+sp) \times sp}^{[k]} = \frac{ADN_{(gi+sp) \times sp}^{[k]}}{DNT_{(gi+sp) \times sp}^{[k]}} \quad (37)$$

Se aclara que las columnas  $sp$  de las variables de decisión  $RP_{(gi+sp) \times sp}^{[k]}$  y  $RN_{(gi+sp) \times sp}^{[k]}$  son iguales, correspondiendo la misma inversión para cada etapa de la cadena productiva, con lo cual el espacio de búsqueda es simplificado.

	<b>ng x ns x nk x n var</b>	<b>ns x ns x nk x nvar</b>
1º División	nk divisiones	nk divisiones
	<i>ng x ns x n var</i>	<i>ns x ns x nvar</i>
2º División	nvar divisiones	nvar divisiones
	<i>ng x ns</i>	<i>ns x ns</i>
3º División	ng divisiones	ns divisiones
	<i>ns</i>	<i>ns</i>
4º División	ns divisiones	ns divisiones

TABLA 1: Resultados de las ejecuciones de las metaheurísticas en el problema del balance de cargas

## 8. Actualización De Los Parámetros En La Etapa [k]

### 8.1. Cálculo Del Crecimiento de Potencias Instaladas en Operarios, Sector de Fabricación de Generación y sector de Producción:

Considerando la inversión pública  $inv^{pub}$  y privada  $inv^{priv}$ , los crecimientos de potencia por sector son para el sector de producción  $RP_{sp}^{[k]} * inv^{pub}$  y generación  $RP_{gi}^{[k]} * inv^{priv}$ . El crecimiento de la potencia equivalente por operarios es:

$$Peq * \frac{crNT_{(gi+sp) \times sp}^{[k]} * RN_{(gi+sp) \times sp}^{[k]} * NT_{(gi+sp) \times sp}^{[k]}}{P_{(gi+sp) \times sp}} = \quad (38)$$

### 8.2. Crecimiento de Inversión por generador y sectores de cadena de producción:

$$cr_{(gi+sp) \times sp}^{[k]} = inv^{pub/priv} * RP_{(gi+sp) \times sp}^{[k]} * (1 - fd_{(gi+sp) \times sp} - fia_{(gi+sp) \times sp}) + crNT_{(gi+sp) \times sp}^{[k]} \quad (39)$$

### 8.3. Crecimiento de Inversión por generador:

Considerando un factor de depreciación de potencia instalada dado por  $fd_{gi} = 1 - 0.25 \frac{1}{TVU_{gi}}$ , donde  $TVU_{gi}$  es la vida util. Entonces el crecimiento de inversión por generador se calcula como:

$$cr_{gi+sp}^{[k]} = inv^{pub/priv} * RP_{gi+sp}^{[k]} * (1 - fd_{gi+sp} - fia_{gi+sp}) + crNT_{gi+sp}^{[k]} \quad (40)$$

### 8.4. Cálculo de Toneladas Demandadas Solicitada:

#### Fabricación:

$$DTinv_{(gi+sp) \times sp}^{[k]} = inv^{pub/priv} * RP_{(gi+sp) \times sp}^{[k]} * (1 - fd_{(gi+sp) \times sp}) * \Delta TTEP_{(gi+sp) \times sp}^{Sist \ ex/ \ Sist \ int} \quad (41)$$

#### Generación:

$$DTinv_{gi}^{[k]} = cr_{gi} * (1 - fd_{gi}^{[k]} - fia_{gi}^{[k]}) * \Delta TTEP_{gi}^{Sist \ ex/ \ Sist \ int} \quad (42)$$

### 8.5. Cálculo de potencias instaladas:

$$P_{(gi+sp) \times sp}^{[k+1]} = P_{(gi+sp) \times sp}^{[k]} * (1 - fd_{(gi+sp) \times sp}^{[k]} - fia_{(gi+sp) \times sp}^{[k]}) \quad (43)$$

$$P_{gi}^{[k+1]} = P_{gi}^{[k]} * (1 - fd_{gi}^{[k]} - fia_{gi}^{[k]}) \quad (44)$$

### 8.6. Cálculo de Toneladas Demandadas Solicitada:

$$\Delta TTEP_t = \sum_{gi}^{gn} \sum_{sp}^{sn} \Delta TTEP_{gi \times sp}^{Sist \ ex/ \ Sist \ int} + \sum_{sp}^{sn} \sum_{sp}^{sn} \Delta TTEP_{sp \times sp}^{Sist \ ex/ \ Sist \ int} [TEP] \quad (45)$$

### 8.7. Método Alternativo Para Calcular El Crecimiento De La Potencia Instalada Y Demandada:

### 8.8. Energía invertida

Definiendo factores de inversión fin y de operación y mantenimiento  $foym = 1 - fin$ , se obtienen la energía invertida en fabricación y operación/mantenimiento respectivamente.

$$Einv_{gi}^{in[k]} = \frac{P_{gi}^{[k]} * TVU_{gi}^{[k]} * Fres_{(gi+sp) \times sp} * fin}{EROI_{gi}^{[k]}} \quad (46)$$

$$Einv_{gi}^{oym[k]} = \frac{P_{gi}^{[k]} * TVU_{gi}^{[k]} * Fres_{(gi+sp) \times sp} * foym}{EROI_{gi}^{[k]}} \quad (47)$$

Se definieron factores de crecimiento de la energía invertida mediante la siguiente expresión:

$$fdc_{(gi+sp) \times sp}^{[k+1]} = fc_{(gi+sp) \times sp}^{[k]} * (1 + inv^{pub/priv} * RP_{(gi+sp) \times sp}^{[k]} - fd_{(gi+sp) \times sp} - fdep) \quad (48)$$

$$fc_{gi}^{[k+1]} = fc_{gi}^{[k]} * (1 + cr * RP_{gi}^{[k]} + crNT_{gi}^{[k]} * RN_{gi}^{[k]} - fdep) \quad (49)$$

Entonces la Energía demandada se calcula como:

$$Ed_{(gi+sp) \times sp}^{[k]} = \left[ \sum_{kinv=2}^n Einv_{oym} * \Pi \left( \frac{t-kinv-Tinv-Tpr}{TVU} \right) + Einv_{in} * N \left( kinv + \frac{Tinv}{2} + Tpr, \frac{Tinv}{6} \right) * \Pi \left( \frac{t-kinv-Tpr}{Tinv} \right) + Einv_{in} * e^{-r*(t-kinv)} * \Pi \left( \frac{t-kinv}{Tpr} \right) \right] * fdc_{(gi+sp) \times sp}^{[k+1]} \quad (50)$$

Donde  $N(\mu, \sigma)$  es una función normal, de las expresiones anteriores se utilizó la definición del pulso rectangular:

$$\Pi \left( \frac{t - k_{inv} - T_{inv} - T_{pr} - \frac{TVU}{2}}{TVU} \right) = u(k - k_{inv} - T_{inv} - T_{pr}) - u(k - k_{inv} - T_{inv} - T_{pr} - TVU) \quad (51)$$

$$\Pi \left( \frac{t - k_{inv} - T_{pr} - \frac{T_{inv}}{2}}{T_{inv}} \right) = u(t - k_{inv} - T_{pr}) - u(t - k_{inv} - T_{inv} - T_{pr}) \quad (52)$$

$$\Pi \left( \frac{t - k_{inv} - \frac{T_{pr}}{2}}{T_{pr}} \right) = u(t - k_{inv}) - u(t - k_{inv} - T_{pr}) \quad (53)$$

## 8.9. Energía obtenida

La energía obtenida por generador  $g_i$  en la etapa  $[k]$  se define como:

$$Eob_{g_i}^{[k]} = \sum_{k_{inv}=2}^n E_{g_i}^{[k]} * \Pi \left( \frac{t - k_{inv} - T_{inv} - T_{pr} - \frac{TVU}{2}}{TVU} \right) * f_{g_i}^{[k+1]} \quad (54)$$

La energía demandada y obtenida total se calcularon respectivamente como:

$$Edt^{[k]} = \sum_{g_i}^{gn} \sum_{sp}^{sn} Ed_{(g_i+sp)x sp}^{[k]} \quad (55)$$

$$Eobt^{[k]} = \sum_{g_i}^{gn} Eob_{g_i}^{[k]} \quad (56)$$

Análogamente, la energía media obtenida y demandada calcularon respectivamente como:

$$\overline{Eobt}^{[k]} = \frac{\sum_1^k \sum_{g_i}^{gn} Eob_{g_i}^{[k]}}{\sum_{p=1}^k p} * a1 \quad (57)$$

$$\overline{Edt}^{[k]} = \frac{\sum_1^k \sum_{g_i}^{gn} \sum_{sp}^{sn} Ed_{(g_i+sp)x sp}^{[k]}}{\sum_{p=1}^k p} * a2 \quad (58)$$

Donde  $a1$  y  $a2$  son constantes de corrección que se obtuvieron por el método de los mínimos cuadrados. A partir de la energía obtenida se actualiza la composición de la matriz energética respecto a la potencia útil aprovechada, según los sectores de generación: Nuclear Fósil, Hidráulico, Solar y Eólico.

## 9. Simulación

### 9.1. Sistema Considerado

El sistema estudiado corresponde al Sistema Energético Argentino, en base a la composición de la matriz energética actual y potencia instalada. Los sectores de generación utilizados son Nuclear (GN), Fósil (GF), Hidráulica (GH), Solar (GSF) y Eólica (GE). Las tablas 1, 2, 3 y 4 se presentan los datos técnicos utilizados para el cálculo de la EROI por generador, se utilizaron también datos correspondientes a los sectores de fabricación, las cuales por extensión no se agregaron. Los rendimientos utilizados  $\eta_{spr}^{Sist ex/ Sist int}_{(mj+cr) x sp}$  oscilan entre 0.7 y 0.9, los gastos por sector  $G_{spr}^{Sist ex/ Sist int}_{(mj+cr) x sp}$

oscilan superan los 0.004 [MWh/Tn de Material/Combustible], donde se le asigna un valor más alto para la generación nuclear en todas las etapas hasta el transporte. En la tabla 1 se presentan los datos utilizados para la fabricación de cada parque de generación. El gasto de combustible representa la equivalencia en Toneladas Equivalentes de Petróleo de la fuente de generación [TEP/TON], para los tres primeros se recurrió a la equivalencia para el vector energético Energía eléctrica [TEP/MWh]. En la Tabla 2 se presentan los datos de composición por cada tipo de generación, según los requerimientos relativos de materiales: polímeros, hierro, aluminio, cobre, hormigón y otros (semiconductores). En la Tabla 4 se presentan los factores utilizados para el factor de seguridad de servicio, correspondiente al aprovechamiento de la potencia instalada (ver Tabla 6).

### 9.2. Análisis de los Resultados Obtenidos

Los principales resultados se presentan en la tabla 5 y 6, obteniendo la Tasa de Retorno Energético por generador en base al análisis de ciclo de vida propuesto. Se observa que la mayor tasa de retorno obtenida corresponde a la generación nuclear, debido a la alta relación de equivalencia [TEP/TN combustible] y al bajo gasto de combustible anual. El requerimiento de combustible es aproximadamente 80 Tn de uranio con un enriquecimiento del 3% aproximadamente, un gasto 1000 veces menor al requerido por las centrales térmicas. Los tiempos de Recuperación de las centrales Eólicas, Nuclear y Fósil son similares, y por lo cual ambas fuentes son reemplazantes viables ante una transición desde las FGNR. La generación Solar e Hidráulica presentan un tiempo de recuperación alto, la primera por la baja EROI que resulta debido al alto gasto de materiales por potencia invertida y bajo factor de Seguridad de Servicio. Respecto a la generación hidráulica, si bien la EROI es alta, el tiempo de Vida Útil (VU) es elevado (80 años aproximadamente). Por esta razón, y debido a los altos costos energéticos y económicos, se buscan alternativas a este tipo de generación.

### 9.3. Presentación de los Resultados

Tabla 1. Datos por Fuente de Generación.

TIPO DE GENERADOR (TDG)	Nº GEN/CENTRAL	POTENCIA INSTALADA/ UNIDAD [MW]	GASTO DE COMB [TEP/TON] o [TEP/MWh]
Generador Eólico	8	3	0.27
Generador Fotovoltaico	250	0.1	0.27
Generador Hidráulico	8	3	0.27
Generador Térmico	1	24	2000
Generador Nuclear	1	24	3646.8

Tabla 2. Datos de Composición de Materiales según Generación y Peso específico [Tn/MW].

TDG	Pol [%]	Fe [%]	Al [%]	Cu [%]	Horm [%]	Otros [%]	Peso [Tn/MW]
GE	0.1	0.5	0.05	0.05	0.2	0.1	300
GF	0	0.3	0.05	0.05	0.1	0.5	500
GH	0.05	0.35	0.05	0.05	0.4	0.1	700
GT	0.1	0.5	0.05	0.05	0.2	0.1	800
GN	0.1	0.5	0.05	0.05	0.2	0.1	500

Tabla 3. Datos Técnicos por Fuente de Generación.

TIPO DE GENERADOR	FACTOR CARGA (FC)	RENDIMIENTO	VU [AÑOS]
Generador Eólico	0.5	0.8	25
Generador Fotovoltaico	0.3	0.4	25
Generador Hidráulico	0.6	0.9	80
Generador Térmico	0.7	0.4	15
Generador Nuclear	0.8	0.4	40

Tabla 4. Datos de Garantía de Potencia en Verano e Invierno, Factores de Mantenimiento Averías y Seguridad de Servicio por Fuente de Generación.

TDG	GARANTIA VERANO	GARANTIA INVIERNO	MANT.	A.	S. D.
GE	0.1	0.1	0	0	0
GF	0.3	0.1	0	0	0
GH	0.9	0.5	0	0	0
GT	0.9	1	0.033	0.062	0.062
GN	1	1	0.07	0.026	0.026

Tabla 5. Vida Útil (VU), EROI, Tiempo de Recuperación (TR) de la Fuente y del Sistema.

TIPO DE GENERADOR	EROI	VU [AÑOS]	TR DE LA FUENTE [AÑOS]
Eólica	11.1	25	2.25
Solar	2.8	25	9.05
Hidráulica	8.7	80	9.25
Fósil	6.5	15	2.33
Nuclear	14.3	40	2.81

Tabla 6. Factor de Seguridad de Servicio.

TIPO DE GENERADOR	FACTOR SEGURIDAD DE SERVICIO SS
Eólica	0.31
Solar	0.44
Hidráulica	0.83
Fósil	0.89
Nuclear	0.93

## 10. Conclusiones

Se presentaron algunas recomendaciones y mejoras en la metodología para el estudio de la TRE, con el fin de conocer el impacto producido por una implementación a gran escala de generación a base de recursos renovables en términos de la sustentabilidad Energética/Ambiental, y la búsqueda continua de la renovación tecnológica. Se obtuvieron los parámetros necesarios para realizar un modelo de programación dinámica, que por la complejidad que este presenta, no puede resolverse por los métodos de optimización convencionales. Del modelo planteado se observó la dependencia de los parámetros con los distintos gastos de etapas intermedias y transporte, vida útil de la instalación y factores técnicos. Los resultados obtenidos son coherentes y satisfactorios para realizar el acople con el modelo sugerido y obtener el escenario óptimo de expansión del sistema energético argentino. La TRE puede ser un buen complemento en la evaluación de un proyecto, que puede ser complementado con otros índices económicos y ambientales para la evaluación del mismo [2]. Estos pueden ser los Costos Energéticos asociados a la inversión en Generación Renovable, Fósil y Nuclear, Costos Energéticos por Importación, etc., los cuales no fueron presentados en este trabajo. Los tiempos de recuperación indican que la generación Eólica y Nuclear son fuentes viables de reemplazo de la generación fósil. Sin embargo, se observó que deben considerarse restricciones en la inversión de las renovables, sobre todo para la generación eólica en las etapas iniciales, buscando no vulnerar la estabilidad y confiabilidad de la red energética.

## 11. Referencias

[1] Camargo F. G., Schweickardt G., Estimación de la Tasa De Retorno Energético: Análisis Comparativo de las Metodologías Disponibles en la Actualidad, . Revista Científica Maskana, Volumen 5, No. 2, Especial Ingeniería Eléctrica & Electrónica, Ecuador: Universidad de Cuenca, Diciembre 2014, ISSN 1390-6143.

[2] Schweickardt G, Perez E. A., Camargo F. G., “Cálculo De La Tasa De Retorno Energético Con Orientación A Los Sistemas Basados En Fuentes Primarias De Generación Renovable” XVI ERIAC Decimosexto Encuentro Regional Iberoamericano de CIGRÉ (Consejo Internacional de Grandes Redes Eléctricas), Argentina, 17 al 21 de mayo de 2015, Puerto Iguazú. ISBN 978-987-25030-3-1.

[3] Schweickardt G. y Miranda V., Optimización Dinámica Difusa con Nivel de Riesgo Acotado. Aplicación en la Planificación y Control Regulatorio de Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica. Parte 1: El modelo. Revista de la Escuela de Perfeccionamiento en Investigación Operativa, Nro. 30, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de

Buenos Aires, Argentina: Provincia de Buenos Aires, 2008. ISSN 0329-7322.

[4] Schweickardt G. y Miranda V., Giménez J. M., Control De La Adaptación Económica En Sistemas De Distribución De Energía Eléctrica Mediante Un Modelo Posibilístico De Optimización Dinámica: Parte 2: Modelo de Control de la Desadaptación Dinámica del Sistema y Estudio de Caso. Revista Investigación Operativa, Nro. 33, pp. 112-134, Escuela de Perfeccionamiento en Investigación Operativa, Octubre 2012. ISSN: 1853-9777.

[5] Schweickardt G. y J. M. G., Un Modelo de Incentivos para las Fuentes Primarias de Energía Renovable por Análisis Envolvente de Datos. Alteración de los Cargos de Acceso de los Generadores en un Sistema de Transmisión Eléctrica Aplicando una Función Virtual de Producción. Revista Investigación Operativa, Nro. 33, pp. 158-180, Escuela de Perfeccionamiento en Investigación Operativa, Octubre 2012. ISSN: 1853-9777.

[6] Schweickardt G. y J. M. G., Un Modelo de Incentivos para las Fuentes Primarias de Energía Renovable por Análisis Envolvente de Datos. Alteración de los Cargos de Acceso de los Generadores en un Sistema de Transmisión Eléctrica Aplicando una Función Virtual de Producción. Revista Investigación Operativa, Nro. 33, pp. 158-180, Escuela de Perfeccionamiento

[7] Wacker, Billiton, Oteng-Adjei and Kos, Determination of Reliability Worth for Power System Design Applications. Austria: 1990. 10th PSCC.

[8] Murphy D. J. and Hall C. A.S., Order from Chaos: A Preliminary Protocol for Determining the EROI of Fuels, Sustainability. Nº 3, 2011. ISSN 1888-1907.

[9] Hossian A., Lilian Cejas, Modelo Conceptual de un Sistema Basado en Conocimiento para la Selección de Estrategias Educativas en Carreras de Ingeniería, CONAIIISI 2013, ISSN 235-587-1. 2013.

[10] Vázquez J. C., Constable L. E., Relaciones entre dos modelos de computación natural, CONAIIISI 2013, ISSN 116-508-1. 2013.