



UNIVERSIDAD CENTRAL "MARTA ABREU" DE LAS VILLAS  
VERITATE SOLA NOBIS IMPONETUR VIRILISTOGA. 1948

*Facultad de Ingeniería Mecánica*

*Departamento de Energía*



*Trabajo de Diploma*

*Título: Modelo matemático para la planeación de la generación de energía eléctrica en un territorio*

*Autor: Alvaro Luis Luna Cintra*

*Tutores: Ing. Carlos Pérez de Alejo Blanco*

*Dr. Víctor Samuel Ocaña Guevara*

**Santa Clara**

**2014**

## **Agradecimientos**

*A mi familia por ser fuente inspiradora, cómplice de mis luchas y retaguardia perfecta de mis batallas.*

*A mi madre por sus consejos en el momento clave, apoyo y ayuda en los momentos difíciles durante mi formación.*

*A mis amigos que siempre estuvieron a mi lado con su apoyo y fresca alegría.*

*Al colectivo de profesores de estos cinco años por sus exactos consejos, instrucción sin igual y ayuda sin condición durante mi formación académica.*

*A la Universidad Central de Las Villas por haberme acogido y dado la posibilidad de formarme como Ingeniero en su seno.*

*A mi profesor y tutor Dr. Víctor Samuel Ocaña Guevara por sus sabios consejos y oportunas correcciones.*

*A mi profesor y tutor Ing. Carlos Pérez de Alejo Blanco por su paciencia y oportunas correcciones.*

*A aquellos que de forma anónima o sin pensarlo apoyaron y ayudaron a este resultado.*

*¡Muchas Gracias!*

## **Resumen**

En ésta tesis se presenta y desarrolla un modelo matemático para ayudar a las personas tomadoras de decisiones a elegir la mejor combinación de tecnologías para la generación de electricidad. El modelo obedece las premisas siguientes: siempre satisfacer la demanda y minimizar el costo teniendo en cuenta las restricciones. El modelo está construido en módulos lo que facilita cambios y la posibilidad de agregar nuevas funciones.

La evaluación del modelo se realiza utilizando el GAMS (Sistema General de Modelaje Algebraico), diseñado para modelar problemas de optimización. El modelo cumple con sus expectativas y funciona como fue pensado, es decir se satisface la demanda con un costo minimizado. El desarrollo futuro del modelo se debe centrar en su mejoramiento de manera de que el mismo tome en cuenta otros factores aumentando su complejidad.

## **Abstract**

In this thesis report and developed a mathematical model to help decision-taking people to choose the best combination of technologies for the generation of electricity. The model obeys the following premises: always meet demand and minimize the cost considering the restrictions. The model is built in modules which facilitates changes and the ability to add new functions.

The model evaluation is performed using the GAMS (General Algebraic Modeling System), designed to model optimization problems. The model meets your expectations and works as it was intended, ie demand is met with a minimized cost. Future model development should focus on its improvement so that it takes into account other factors increasing their complexity.

# Índice

Agradecimientos.....	I
Resumen.....	II
Abstract.....	III
Introducción.....	1
Capítulo 1: Aspectos que caracterizan a los modelos matemáticos empleados en la planeación de la generación de energía eléctrica en un territorio.....	4
1.1. El sistema de suministro de energía eléctrica en un territorio .....	4
1.1.1. Características del sistema de suministro de energía eléctrica desde el punto de vista de la generación distribuida .....	5
1.2. La planificación de sistema de suministro de energía eléctrica en un territorio .....	8
1.3. Aspectos que caracterizan a los modelos matemáticos .....	10
1.3.1. Estructura general de modelado .....	11
1.3.2. Caracterización general del modelo.....	13
1.3.3. Técnicas de modelado .....	14
1.3.4. Formulación del modelo.....	17
1.3.5. Lenguaje de modelado.....	17
1.4. Modelos empleados en la planeación energética.....	18
1.5. Conclusiones Parciales.....	23
Capítulo 2: Desarrollo del modelo matemático.....	24
2.1. Introducción .....	24
2.2. Estructura general de modelado.....	24
2.2.1. Características de cada componente que integra el SER.....	25
2.3. Caracterización general del modelo .....	31
2.4. Técnica de modelado .....	32
2.5. Formulación del modelo matemático.....	32
2.5.1. Definición de las variables de decisión.....	32
2.5.2. Obtención de la función objetivo .....	32
2.5.3. Definición de las Restricciones .....	34

2.6. Lenguaje de modelado .....	35
2.7. Parámetros de salida.....	36
2.8. Conclusiones Parciales .....	37
Capítulo 3: Evaluación y análisis de los resultados del modelo matemático.....	38
3.1. Introducción.....	38
3.2. Datos para la evaluación .....	38
3.2.1. Recursos energéticos.....	38
3.2.2. Demanda energética .....	39
3.2.3. Tecnologías de generación .....	39
3.3. Parámetros generales .....	40
3.4. Resultados del modelo matemático.....	40
3.5. Conclusiones Parciales .....	44
Conclusiones Generales.....	45
Recomendaciones.....	46
Bibliografía.....	47
Anexos.....	50



## Introducción

En la actualidad, la energía es vital para el desarrollo económico de un territorio. Una de sus formas, la energía eléctrica es indispensable en sectores tan importantes como la industria, la agricultura, la construcción y el residencial. Uno de los problemas fundamentales que se ha creado con su uso es el aumento acelerado de la demanda trayendo consigo problemas en el medio ambiente, con el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero e impacto al cambio climático, las consecuencias serían muy serias hasta el punto de que la especie humana se pudiese extinguir.

El aumento de la calidad de vida de las personas que viven en lugares aislados depende en gran medida de la estabilidad de los servicios energéticos, que necesitan de manera sostenida y con la calidad necesaria para los usuarios finales. La planificación energética es un punto clave para lograr estos objetivos, de ella nacen las directrices para un adecuado uso de los recursos energéticos, escasos en muchos casos, así como las configuraciones de las tecnologías para una nación, región o localidad, sin aumentar los costos, con el mínimo daño al medioambiente y que sean socialmente aceptados. Esta idea apunta hacia la búsqueda del desarrollo sostenible en comunidades aisladas que solo puede ser logrado por medio del cumplimiento de estas directrices y estrategias que emergen de una adecuada planificación energética [1].

Uno de los mayores retos de la humanidad es sustituir las tecnologías que se utilizan actualmente que en su mayoría dependen de los recursos fósiles para desempeñar su función, por otras que tengan un mayor equilibrio con el medio ambiente y con la preservación de los recursos naturales. La estructura del sector energético es complicada, ya que para su selección se toman en cuenta muchos factores como son la selección de los recursos energéticos y las tecnologías asequibles, los precios y la disponibilidad de los recursos en el tiempo [2].

Las tendencias y retos del futuro es el desarrollo de la generación distribuida que se extiende, en mayor o menor medida, tanto en países desarrollados como en países en vía de desarrollo y se reparte por toda la geografía mundial.

Existen diversos factores que condicionan notablemente el desarrollo e implantación de estas tecnologías utilizadas en la generación distribuida. Entre ellos, podemos destacar la disponibilidad de recursos, existencia de yacimientos geotérmicos en zonas de naturaleza volcánica, zonas de alta irradiación solar, recursos forestales y agrícolas, yacimientos de gas natural, etc. Las características físicas del país extensión, complejidad orográfica, islas, zonas rurales[3]. Los factores económico, social y políticos consumo y necesidades, grado de liberación del mercado, ayudas de las administraciones públicas, compromisos medioambientales. Asimismo el nivel de madurez tecnológica de los diferentes recursos es un factor claramente determinante en su evolución futura [4].

Por las condiciones geográficas de Cuba, las consecuencias siempre galopantes de las tecnologías de generación centralizada con paradas prolongadas, en tal sentido, el servicio eléctrico cuenta hoy con una fortaleza: la generación distribuida. Gracias a su existencia puede reducirse significativamente el tiempo de interrupción en los circuitos ante las afectaciones. Por sus características el modelo energético de Cuba es bastante tradicional y está basado en el consumo de energías fósiles; recursos energéticos petrolíferos de los que carece en cantidades representativas, lo que genera una alta dependencia del exterior y estar expuesta al inestable nivel de precios del petróleo; situación que sumada a la amenazas del cambio climático, plantea un reto en la búsqueda de un sistema energético eficiente en materia de sostenibilidad. Debido que la dependencia de electricidad de los territorios del país, el sistema de suministro de energía eléctrica se ve obligado a realizar de forma eficiente la planificación energética [5].

Para llevar a cabo una planificación energética hay que tener en cuenta tres aspectos fundamentales como son la energía, la economía y el medio ambiente. Hay que tener en cuenta que muchas veces estos aspectos se encuentran en conflicto entre si ya que la mejor solución económica puede ser una de las que más afecte al medio ambiente por citar algún ejemplo, por lo que es de mucha importancia para los que toman decisiones energéticas, tener las herramientas necesarias y competentes para aplicarlas con un equilibrio lo más proporcionado posible y encontrar la solución más precisa posible.

Los procedimientos más utilizados para la toma de decisiones en la planificación energética se basan en diferentes tipos métodos que pueden ser criterios múltiples o únicos o con el

uso de modelos de optimización. La selección de estos modelos correctamente permite resultados concretos con la información necesaria. Estos métodos también se pueden combinar y es así una manera de manejar las dificultades de ajustar los objetivos económicos y ambientales, ya que tienen diferentes unidades.

### **Problema científico**

¿Cómo seleccionar la combinación óptima de tecnologías de generación de energía eléctrica en un territorio?

### **Hipótesis**

Es posible desarrollar un modelo matemático para la selección de las tecnologías de generación de energía eléctrica en un territorio tomando en cuenta aspectos energéticos, económicos y ambientales.

### **Objetivo general**

Desarrollar un modelo matemático para seleccionar la combinación de tecnologías de generación de energía eléctrica en un territorio tomando en cuenta aspectos energéticos, económicos y ambientales.

### **Objetivos específicos**

1. Identificar los aspectos que caracterizan los modelos empleados en la planeación de la generación de energía eléctrica en un territorio.
2. Desarrollar un modelo matemático que permita la selección óptima de tecnologías de generación de electricidad en un territorio.
3. Evaluar el modelo matemático según las condiciones establecidas.

# **Capítulo 1: Aspectos que caracterizan a los modelos matemáticos empleados en la planeación de la generación de energía eléctrica en un territorio**

## **1.1. El sistema de suministro de energía eléctrica en un territorio**

La forma de energía más versátil es, indudablemente, la energía eléctrica, lo que está dado por la facilidad de su uso en cualquier proporción, su accesibilidad y posibilidad de conversión, de manera relativamente sencilla, a otros tipos de energía. A ello es preciso agregar la facilidad de su transportación económica a grandes distancias y en grandes bloques, todo lo que le ha dado, desde la época de su primera implementación práctica, una preferencia indiscutible y un lugar sin competencia en la vida que llamamos moderna [6].

La electricidad en Cuba es una de las fuentes secundarias de energía más empleada por el hombre, dada las múltiples aplicaciones que tiene. Sin embargo es un servicio muy costoso y su uso indiscriminado afecta al medio ambiente. Es por ello, que la educación energética de la población constituye uno de los pilares fundamentales del Programa de Ahorro de Electricidad en Cuba [5].

Motivo por el cual los sistemas de generación eléctrica han adquirido relevante importancia dentro del sistema de suministro de energía eléctrica (SSEE), tema que es manejado por diferentes autores como se muestran a continuación:

Al conjunto de instalaciones interconectadas utilizadas para la generación y transporte de electricidad que se utilizan para transformar otros tipos de energía primaria en electricidad, transportándola y distribuirla hasta los lugares donde se consume, es lo que se conoce como Sistema Electroenergético o Eléctrico [4].

Se define a un Sistema Energético como “el conjunto de procesos tecnológicos, económicos y sociales que se ponen en juego para transformar la energía primaria en energía útil para el consumo con el fin de satisfacer las necesidades de calor, luz, fuerza motriz y electricidad”[2, 7].

Es decir, el propósito de un SSEE en un territorio en la actualidad es garantizar un servicio de calidad a los consumidores utilizando los recursos energéticos de forma racional con la combinación óptima de tecnologías que permitan satisfacer la demanda energética y a la vez propiciar el menor impacto ambiental.

En los años setentas, factores energéticos (crisis petrolera), ecológicos (cambio climático) y de demanda eléctrica (alta tasa de crecimiento) a nivel mundial, plantearon la necesidad de alternativas tecnológicas para asegurar, por un lado, el suministro oportuno y de calidad de la energía eléctrica y, por el otro, el ahorro y el uso eficiente de los recursos naturales. Una de estas alternativas tecnológicas es generar la energía eléctrica lo más cerca posible al lugar del consumo, incorporando las ventajas de la tecnología moderna y el respaldo eléctrico de la red del SSEE, para compensar cualquier requerimiento adicional de compra o venta de energía eléctrica [8].

### **1.1.1. Características del sistema de suministro de energía eléctrica desde el punto de vista de la generación distribuida**

La generación distribuida (GD), también conocida como generación in-situ, consiste básicamente en la generación de energía eléctrica por medio de pequeñas fuentes de energía en lugares lo más próximos a las cargas [9].

El Distribution Power Coalition of American (DPCA) la define como, cualquier tecnología de generación a pequeña escala que proporciona energía eléctrica en puntos más cercanos al consumidor que la generación centralizada y que se puede concertar directamente al consumidor o a la red de transporte o distribución.

Por otro lado, la Agencia Internacional de la Energía (IEA, International Energy Agency) Considera como GD, únicamente, la que se conecta a la red de distribución en baja tensión y la asocia a tecnologías como los motores, microturbinas, pilas de combustible y energía solar fotovoltaica.

Teniendo en cuenta el concepto de algunos autores se podría traducir GD como:

- Generación a pequeña escala instalada cerca del lugar de consumo.

- Producción de electricidad con instalaciones suficientemente pequeñas en relación con las grandes centrales de generación, de forma que se puedan conectar casi en cualquier punto de un sistema eléctrico.
- Generación conectada directamente a las redes de distribución.
- Generación de energía eléctrica mediante instalaciones mucho más pequeñas que las centrales convencionales y situadas en las proximidades de las cargas.

Podemos decir entonces que la GD es: la generación o el almacenamiento de energía eléctrica a pequeña escala, lo más cercana al centro de carga, con la opción de interactuar (comprar o vender) con la red eléctrica y, en algunos casos, considerando la máxima eficiencia energética.

Según [8] la GD presenta beneficios como:

- Incremento en la confiabilidad.
- Reducción del número de interrupciones.
- Uso eficiente de la energía.
- Uso de energías renovables.
- Facilidad de adaptación a las condiciones del sitio.
- Disminución de emisiones contaminantes.
- Reducción de pérdidas en transmisión y distribución.
- Abasto en zonas remotas.
- Libera capacidad del sistema.

Existe una cierta disparidad de criterios a la hora de establecer el límite de potencia para la GD. El Departamento de Energía (DOE) de Estados Unidos establece unos límites que van desde 1 kW hasta decenas de MW. En España, el régimen Especial contempla un límite máximo de potencia de 50 MW. Esco Vale Consultancy, prestigiosa consultoría del Reino Unido, amplía el rango de potencia hasta 100MW, limitando a 10 MW la potencia máxima para instalaciones basadas en fuentes de energía renovables [3].

Considerando diversos rangos de potencia se habla de microgeneración para instalaciones de potencia inferior a 5 kW, minigeneración entre 5 kW y 5MW y generación de media y

gran escala para sistemas cuya potencia este entre 5 y 50 MW y 50-100 MW respectivamente [3].

Existen diversos tipos de tecnologías utilizadas en la GD como turbina de gas, eólica, solar térmica, fotovoltaica, biomasa, micro turbina, motor alternativo, etc...

Turbina de gas: El combustible suele ser gas natural o diésel. Sus capacidades van de 265 kW a 50,000 kW; permiten obtener eficiencias eléctricas del 30% y eficiencias térmicas del 55%; los gases de combustión tienen una temperatura de 600°C; ofrecen una alta seguridad de operación; tienen un bajo costo de inversión; el tiempo de arranque es corto (10 minutos); y requieren un mínimo de espacio físico. Por otro lado, los gases de combustión se pueden utilizar directamente para el calentamiento de procesos, o indirectamente para la generación de vapor o cualquier otro fluido caliente [8].

Motor de combustión interna: Utilizan combustibles diesel, gasóleo o gas natural; existen en capacidades de 15 kW a mayores de 20,000 kW; alcanzan eficiencias eléctricas del orden del 40% y eficiencias térmicas cercanas al 33%; su temperatura de gases de combustión es de 400°C; tienen un bajo costo de inversión, una vida útil de 25 años, alta eficiencia a baja carga, consumo medio de agua, poco espacio para instalación, flexibilidad de combustibles [8] .

**Tabla 1: Ventajas y desventajas de los MCI [3] .**

Ventajas	Desventajas
Baja inversión de capital	Nivel alto de emisiones
Buena eficiencia en conversión de energía	Nivel excesivo de ruido (>70dB)
Fácil arranque	Mantenimiento frecuente
Alta fiabilidad	
Flexibilidad de combustible	

La máxima dirección del Gobierno cubano ha decidido para los próximos años utilizar de forma intensiva los grupos electrógenos (GE) considerando las ventajas que hoy plantea la generación distribuida. En cualquiera de sus formas de explotación, exigen un análisis de los problemas que puedan manifestarse por su presencia uno de estos problemas está relacionado con la planificación.

## **1.2. La planificación de sistema de suministro de energía eléctrica en un territorio**

La planificación energética permite contar con un plan minuciosamente diseñado que sirve de guía durante un periodo de tiempo determinado. Es una herramienta muy útil para cualquier organización que quiera mejorar su modelo de consumo energético y que desee hacerlo conforme a un plan bien elaborado [4].

La planeación del SSEE establece cómo se va a satisfacer un territorio de energía eléctrica, con un adecuado uso de los recursos energéticos internos y externos, así como las configuraciones de las tecnologías de generación para el suministro de energía eléctrica en un territorio, con el mínimo daño al medioambiente y que sean socialmente aceptados.

También, es necesario considerar el ahorro y hacer un uso eficiente de la energía. La energía es el eje central de la evolución y del desarrollo del mundo. El consumo eléctrico mundial aumenta constantemente y crecerá un 67% para el año 2025. Paralelamente a este desarrollo, el mercado de las tecnologías de generación está en plena expansión y crece al mismo ritmo que la demanda de energía dentro del sector energético [4].

La planificación energética es crucial en la selección tecnológica, para hacer económicamente eficientes los SSEE y responsables de la contaminación al medioambiente [10, 11]. Durante los años 1970, se dirigieron esfuerzos principalmente en los modelos de energía para investigar la relación entre la energía y la economía, tuvieron como objetivo el pronosticar la demanda energética. Durante los años 1980, las preocupaciones medioambientales fueron cada vez mayores y se cambió el diseño de los patrones de la decisión para incluir aspectos medioambientales y sociales [12].

Después de la crisis del petróleo de 1973 los sistemas energéticos renovables (RES, por sus siglas en inglés) y la eficiencia energética (EE) fueron considerados energías mixtas. Hoy en día, se ha extendido la aplicación de la RES y la EE por todo el mundo; sin embargo, su puesta en práctica todavía no está al nivel necesario. Por lo tanto, los planificadores de la energía tienen que reajustar constantemente sus estrategias energéticas, creándose dificultades para lograr un óptimo suministro que satisfaga todas las partes importantes del sistema, entiéndase proveedor-usuario final [13].

La estructura energética moderna es muy compleja y tiene muchos aspectos, pues debe tener en cuenta temas importantes como la seguridad energética, el equilibrio entre la oferta y demanda, las restricciones medioambientales, restricciones socioeconómicas, el desarrollo sostenible, así como las emisiones de gases que producen el efecto invernadero, etc. [14].

Uno de los problemas más comunes de la planificación energética, para un sistema de suministro determinado, es elegir la distribución más conveniente entre varias fuentes energéticas y tecnologías de transformación. Las alternativas energéticas pueden ser basadas en fuentes renovables, el ahorro de energía o el uso de las fuentes convencionales en los sectores industrial y residencial.

De esta manera, autores como Beccalli definen que la planificación energética como “un estudio de la oferta y la demanda, una predicción de las tendencias de los gastos y la producción de energía, basados en modelos económicos y tecnológicos” [15].

De igual modo, Kaya y Kahraman plantean que “la toma de decisiones en la planificación energética implica un proceso de balancear criterios ecológicos, sociales, técnicos, y económicos en un espacio dado y durante un tiempo determinado. Este equilibrio es crítico para la supervivencia de la naturaleza y a la prosperidad energética de las naciones” [16].

Según la literatura, la planificación energética tiene cinco etapas principales [17-19]:

1. Identificación del problema.
2. Identificación de las opciones alternativas.
3. Evaluación y comparación de las opciones.
4. Valoración de las opciones.
5. Seleccionar una opción.

La planificación energética es, por tanto, el procedimiento de toma de decisiones para seleccionar la opción energética de preferencia para la inversión, teniendo como precedente una claridad del problema energético; que solo se soluciona correctamente en la medida que se logre evaluar y comparar las opciones o tecnologías que se han identificado como aplicables, cumpliendo con restricciones sociales, medioambientales, económicas y tecnológicas.

Se ha podido comprobar que existe una necesidad del uso de herramientas que ayuden a planificar la generación de energía eléctrica en todo su ciclo vital. Estas herramientas son básicamente matemáticas, denominadas modelos.

### **1.3. Aspectos que caracterizan a los modelos matemáticos**

Los modelos utilizados en la planificación energética son representaciones simplificadas de sistemas verdaderos [20]. Son herramientas convenientes en situaciones donde la evaluación o los experimentos del mundo real son imprácticos o demasiado costosos. Se puede decir que ofrecen varias ventajas sobre modelos mentales y experimentales [21], a saber:

- Son claros; sus argumentos son (o deberían ser) indicados en la documentación escrita de tal manera que estuvieran abiertos a la revisión.
- Comprueban los efectos lógicos de los argumentos del modelador.
- Son amistosos y capaces de interrelacionar muchos factores simultáneamente.

Existen innumerables modelos aplicados a la planificación energética, variando su estructura matemática en relación con sus propósitos. La mayoría de los modelos matemáticos existentes reflejan un acercamiento centralizado a la planificación energética y aparecen ajustados a las condiciones de regiones de rápido desarrollo y en vías de desarrollo [22].

El uso de modelos se explica por el deseo de lograr reflejar sistemas complejos de manera simple y comprensible. Por otra parte, los modelos contribuyen en la organización de mucha información y brindan un marco consistente para distintas hipótesis. Un gran número de modelos se han desarrollado para llevar a cabo análisis de sistemas energéticos. Estos modelos se basan en enfoques distintos y utilizan una amplia gama de herramientas matemáticas.

Desde hace unos años el número de modelos energéticos disponibles se ha ido incrementando. Con la diversidad de las decisiones en la planeación energética autores como [23, 24] plantean que existen aspectos comunes que caracterizan a estos modelos. En este trabajo se logran unificar los aspectos más importantes y se agrupan en cinco tipos:

- 1-Estructura general de modelado.
- 2-Characterización general del modelo.
- 3-Técnicas de modelado.
- 4-Formulación del modelo
- 5-Lenguaje de modelado.

Algunos de los principales modelos que en la actualidad se están utilizando en la planeación energética en América, Europa y Asia son: MARKAL, MARKAL-MACRO, ENPEP y LEAP [26]. A continuación se caracterizan cada aspectos y como se toma en cuenta en cada modelo.

### 1.3.1. Estructura general de modelado

Los SSEE presentan características propias. Para su modelación se representa en la figura 1 un Sistema Energético de Referencia, (SER), [25]. En el anexo 1 se muestra el SER de alguno de los modelos antes mencionados.

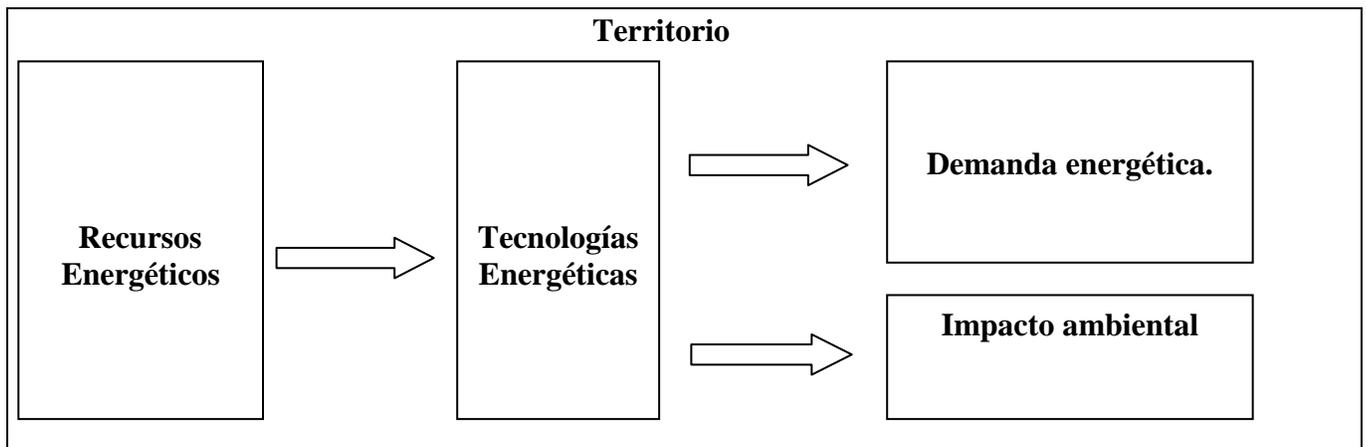


Figura 1

A continuación se explican los componentes que integran el SER.

- **Recursos energéticos**

Representa a los recursos que utilizan las tecnologías energéticas. Se dividen en dos grandes grupos, combustibles y no combustible y se caracterizan por su proceso de obtención y su capacidad de renovación. Su potencial depende del nivel de disponibilidad que existe de cada uno.

- **Demanda energética**

Representa el consumo de energía eléctrica. Su estructura depende de los usuarios finales que forman parte de un territorio. Se determina como el valor medio de la carga de los receptores durante un intervalo de tiempo. Su principal característica es la variabilidad en el tiempo. A pesar de que no se pueden predecir con exactitud presentan una regularidad notable sobre la base de una serie de ciclos temporales, [26].

La carga se representa usando diagramas diarios y anuales, [27]. Existe un aspecto que influye en su selección y es la variación de la misma respecto a su duración en el tiempo.

- **Impactos ambientales**

Como todas las actividades humanas, la generación, transporte y consumo de electricidad producen impactos sobre el medio ambiente y sobre la sociedad. Algunos de ellos son detectables y otros no; algunos son evitables y otros no. En cualquier caso, todos producen daños en el entorno: en las personas, en los materiales, en la flora, y en la fauna. El problema no es sin embargo la existencia o no de estos impactos, que como decimos son inherentes a todas las actividades humanas, sino su magnitud, y sobre todo, su consideración o no a la hora de decidir de la mejor manera los escasos recursos presentes en la sociedad [28].

- **Tecnologías energéticas**

Representa el conjunto de tecnologías que se utilizan en las diferentes etapas: producción, transporte y distribución de la energía. La etapa de producción se compone de las denominadas tecnologías de generación. Se caracterizan por aspectos fundamentales: el tipo de esquema de producción de energía, la forma de generación, el campo de aplicación, relación recursos energéticos y tecnología de generación, el régimen de funcionamiento y el modo de trabajo. La capacidad de potencia total instalada de un sistema de suministro de energía se determina seleccionando la combinación óptima de tecnologías de generación (TG) [24].

### **1.3.2. Caracterización general del modelo**

- **Propósito de modelado**

Los modelos son generalmente desarrollados para resolver problemas específicos y por este motivo solo son aplicables para la problemática para la cual fueron diseñados (oferta, demanda y sistemas) [24].

Los modelos de demanda son aquellos modelos cuya función principal es el pronóstico de la demanda (Por ejemplo, MEDEE-S, MAED). Por otra parte, los modelos de oferta son aquellos cuyo objetivo principal consiste en la predicción, o bien, planificación de oferta (Por ejemplo, MARKAL, EFOM-ENV, WASP, DECPAC). Finalmente, los modelos de sistemas se utilizan para analizar el sistema energético en su totalidad incluyendo tanto oferta como demanda (Por ejemplo, LEAP, ENPEP, NEMS) [29].

- **Nivel de agregación**

La distinción entre modelos top-down y botton-up es particularmente interesante puesto que ellos tienden a producir resultados opuestos para el mismo problema [24]. El enfoque más asociado a los modelos microeconómicos se conocen como “bottom up”. Los modelos de corte macroeconómicos, “top-down” reflejan el hecho de que la información fluye del nivel más agregado al nivel más desagregado [23].

- **Cobertura geográfica**

La cobertura geográfica se refiere a las dimensiones espaciales que abarcan los modelos. Existen modelos desarrollados para la planificación global, regional, nacional, local o a nivel de proyecto. [24]

En general, los modelos energéticos son desarrollados para propósitos de planificación nacional o bien de análisis de política global. Luego, una primera clasificación considera modelos nacionales (como MARKAL, LEAP, MEDEE) y globales (como POLES). En este contexto, además de los modelos globales y nacionales existen los modelos regionales (como PRIMES modelo desarrollado para la Unión Europea). Para estimaciones de demanda eléctrica existen resoluciones espaciales mucho más finas que pueden definirse a nivel de nodo o a través de grillas que suelen ser hexagonales [29, 30]

- **Alcance de planeación: corto, mediano y largo plazo**

No existe una definición estándar de corto, mediano o largo plazo, pero generalmente se clasifican en: 5 años o menos como corto, de 3 a 15 años mediano y 10 o más años largo plazo.[24]

- **Tipos y cantidad de criterios de decisión. (Económicos, ambientales, energéticos y sociales)**

Los modelos energéticos centrarán su accionar en diferentes sectores económicos, ambientales o sociales, estos serán los que definan la cantidad y los tipos de criterios de decisión. Un SSEE bien diseñado es aquél que combina, de manera aceptable, los costes de inversión y explotación, la fiabilidad en el suministro, los impactos medioambientales y no sobrepasa la capacidad de financiación del sistema [31].

### **1.3.3. Técnicas de modelado**

Los principales enfoques utilizados para la evaluación de políticas, planificación de sistemas energéticos y realización de pronósticos se describen a continuación según Raúl O`Ryan [29]:

- ❖ **Optimización**

En general, los modelos de optimización utilizan la programación lineal para identificar la configuración de mínimo costo de los sistemas energéticos y que satisfaga una demanda determinada exógenamente. La minimización se realiza con restricciones adicionales al equilibrio de mercado (se limitan explícitamente las emisiones de CO<sub>2</sub>, las opciones tecnológicas, etc). En la resolución, se asumen típicamente condiciones de competencia perfecta.

Puede optimizar sobre el horizonte completo de la evaluación (“perfect foresight”), o bien, año a año (expectativas miopes). Este tipo de modelos suele seleccionar tecnologías en base a sus costos relativos. La solución del problema dual entrega estimaciones precios sombra de los precios de la energía.

Este tipo de modelos es especialmente útil cuando deben analizarse diversas opciones tecnológicas y se conocen los costos asociados a cada una. Sin embargo, los supuestos que se realizan para la minimización de costos pueden ser inapropiados para representar la evolución de los sistemas en el mundo real.

### ❖ **Modelos de Simulación y Equilibrio Parcial**

Este tipo de modelos simula el comportamiento de consumidores y productores bajo distintos tipos de señales (precios, niveles de ingreso) y restricciones (por ejemplo, límites en la tasa de reemplazo de stock). En esta categoría de modelos, los precios y cantidades se ajustan endógenamente utilizando cálculos iterativos para encontrar los precios de equilibrio. Luego, se iguala oferta y demanda a través de precios de equilibrio de mercado.

En este tipo de modelos es más fácil incluir factores no monetarios que en los modelos de optimización. Sin embargo, las relaciones de comportamiento pueden ser controversiales y difíciles de analizar.

### ❖ **Modelos de Uso Final o Contabilidad**

El enfoque de uso final intenta capturar el impacto de patrones de consumo de distintos sistemas y artefactos. Los modelos de uso final para demanda de electricidad se enfocan en los variados usos de sectores como residencial, comercial, agricultura, e industrial. Por ejemplo, en el sector residencial la electricidad se utiliza para cocinar, aire acondicionado, refrigeración, iluminación mientras que en el sector agrícola se usa para regadío. Este tipo de modelos se basa en la premisa que la energía se requiere por el servicio que habilita y no como un bien de consumo final.

Este tipo de enfoque es especialmente efectivo cuando se introducen nuevas tecnologías y combustibles o cuando no existen series de tiempo adecuadas de tendencias en consumo y otras variables. Sin embargo, este tipo enfoque suele requerir un alto nivel de detalle en usos finales.

### ❖ **Modelos Econométricos**

Estos métodos proyectan la relación entre elementos del sistema y puede incorporar elementos de proyecciones de tendencia. El enfoque econométrico se basa en el análisis de regresión de datos históricos y asume rigidez estructural de la economía.

Los métodos más simples en esta categoría son las de series de tiempo. En éstos se proyectan los elementos claves de un sistema (macro-variables) de manera independiente. Este tipo de construcción asume que el futuro será una extensión suave y continúa del pasado. Estas proyecciones se basan en correlaciones empíricas y funcionan bien en ausencia de cambios estructurales del sistema. La principal deficiencia de este tipo de construcciones es que no se ocupa de identificar o explicar los catalizadores y fuerzas que alteran el sistema.

### ❖ Modelos de Equilibrio General Computable (CGE)

Los modelos de equilibrio general son modelos multisectoriales que incorporan mecanismos de mercado en la asignación de recursos. Su modelación se desarrolla a través de una estructura Neo-Clásica, la que permite describir el comportamiento de los agentes. Difieren de los modelos de equilibrio parcial ya que consideran las interacciones de todos los sectores de la economía lo que permite analizar los efectos directos e indirectos.

Los modelos de CGE incorporan los precios en forma endógena, además permiten la sustitución entre los factores productivos por lo que son adecuados para realizar simulaciones de mediano y largo plazo. Se señala que al integrar la perspectiva de mediano y largo plazo se pueden aplicar en la generación de estrategias de desarrollo asociadas a diversas sendas de crecimiento. También se pueden aplicar desde una perspectiva de corto plazo al análisis de problemas coyunturales y política de estabilización.

Estos modelos se preocupan de las consecuencias de políticas en términos de finanzas públicas, competitividad económica y empleo. Los modelos de CGE intentan representar la respuesta macroeconómica real a políticas, como la sustitución de la energía por otros insumos de bienes de consumo.

### ❖ Modelos de Desarrollo Reciente

Este grupo considera aquellas metodologías que han sido desarrolladas a partir de la década de los 80, siendo hasta hoy en día un área de fuerte investigación. Lo anterior se explica principalmente producto del gran avance que ha sostenido la industria informática, permitiendo incorporar algoritmos cada vez más complejos, manejando tiempos de cálculo razonables. Dentro de este grupo, las metodologías más importantes son:

- Sistemas expertos: Estos modelos intentan simular el razonamiento humano, a través de la incorporación del conocimiento experto, de tal manera de inferir en forma automatizada respuestas frente a casos específicos. Este tipo de metodologías han sido utilizadas satisfactoriamente tanto en estimaciones de corto como de largo plazo.
- Lógica difusa: Este tipo de metodologías está orientado a modelar las incertidumbres, expandiendo las capacidades de los algoritmos clásicos, que sólo permiten manejar atributos determinísticos. Para esto, se reconoce la existencia de grados de pertenencia, los que con un conjunto de reglas, permiten llevar a cabo procesos sobre variables inciertas.

- **Redes Neuronales:** Los modelos de redes neuronales intentan simular el proceso de razonamiento y aprendizaje humano, realizando un entrenamiento de forma iterativa y a través del uso de ejemplos o “patrones”. La gran ventaja que presenta este tipo de modelos es la capacidad de modelar relaciones no lineales, a través de un proceso autónomo, sin especificar a priori alguna forma funcional del modelo. Por el contrario, la desventaja que presentan es que es necesario disponer de una cantidad de datos suficiente, de tal manera que la red logre asimilar el modelo subyacente. Este tipo de metodologías ha sido ampliamente utilizada para estimaciones a corto plazo y se han realizado algunos análisis para estimaciones a largo plazo, aunque este último caso ha estado fuertemente restringido dada la poca disponibilidad de datos.

#### ❖ **Modelos Híbridos**

Este tipo de modelos considera combinaciones entre los enfoques antes presentados. Existen distintas opciones, por ejemplo, enfoques que mezclan metodologías econométricas con otras de uso final. Existen modelos que funden métodos de simulación y optimización. El uso de enfoques híbridos suele recomendarse en la medida que las debilidades de un enfoque sean superadas por las fortalezas del otro creando sinergia.

#### **1.3.4. Formulación del modelo**

Parte del modelo formada por las diferentes variables, que toman presencia en el modelo a utilizar. Con la combinación de las variables y ecuaciones se llega a la función objetivo expresión de variables, o algunas veces una variable que representa el objetivo que se desea alcanzar y expresa el fin que se desea, en una medida específica, al igual que las restricciones relaciones entre las variables y parámetros que se presentan por desigualdades (inecuaciones) o ecuaciones, resultan debido a las limitaciones de recursos o a ciertas disposiciones técnicas de un problema dado [32], [33].

#### **1.3.5. Lenguaje de modelado**

Requerimiento de software donde se realiza el análisis, un entorno de computación y desarrollo de aplicaciones totalmente integrado. Orientado para llevar a cabo proyectos en donde se encuentren implicados elevados cálculos matemáticos y la visualización gráfica de

los mismos. Los poderosos y amplios métodos de cómputo numérico y graficas que permiten la prueba y exploración de ideas alternativas con facilidad, mientras que el ambiente de desarrollo integrado facilita producir resultados prácticos fácilmente.

El GAMS (General Algebraic Modeling System) es un software desarrollado por A. Brooke, D. Kendrick y A. Meeraus. A diferencia de otros paquetes de software de implementación de algoritmos matemáticos que permitan resolver los problemas de optimización, el programa GAMS presenta las ventajas de plantear un lenguaje de modelización que permite el poder escribir en un editor la formulación matemática del problema y posteriormente aplicarle una serie de “solvers” o programas de resolución [34].

MATLAB es un entorno de computación y desarrollo de aplicaciones totalmente integrado orientado para llevar a cabo proyectos en donde se encuentren implicados elevados cálculos matemáticos y la visualización gráfica de los mismos. MATLAB integra análisis numérico, cálculo matricial, proceso de señal y visualización gráfica en un entorno completo donde los problemas y sus soluciones son expresados del mismo modo en que se escribirían tradicionalmente, sin necesidad de hacer uso de la programación tradicional [35].

#### **1.4. Modelos empleados en la planeación energética**

##### **MARKAL y MARKAL-MACRO**

MARKAL identifica soluciones a la planificación del sistema de energía al menor costo y evalúa opciones en el contexto del sistema de energía tales como el balance entre oferta y demanda y restricciones de política ambiental. Selecciona tecnologías basado en los costos de las alternativas. Genera modelos de equilibrio energéticos y económicos. Calcula precios de equilibrio que maximizan la utilidad y además minimizan los costos totales del sistema de energía. MARKAL calcula las cantidades y precios maximizando el excedente del productor/consumidor en el horizonte de planificación, por lo tanto, el costo total de energía del sistema. Además estimaciones de precios de energía, demanda y tecnologías [29, 30].

Hay dos opciones en MARKAL para manejar el costo de los daños creados por las emisiones. Los daños ambientales pueden ser manejados por separado, sin formar parte del

proceso de optimización o pueden ser parte de la función objetivo y por lo tanto tenerse en cuenta en el proceso de optimización [36].

La función objetivo está sometida a una serie de limitaciones, el principal grupo de estas se mencionan a continuación:

- Satisfacción de las demandas de servicio de energía
- Capacidad de transferencia (la conservación de las inversiones).
- Utilización de la capacidad
- Balance para los Productos Básicos (excepto la electricidad y el calor de baja temperatura)
- Electricidad y balance de calor
- Pico de la reserva de restricción (sectores de electricidad y calor)
- Base de carga (producción de electricidad solamente)
- Disponibilidad de factores estacionales (sectores de electricidad y calor)
- Limitar las emisiones

MARKAL ha sido utilizado en:

International Energy Agency (IEA): “Detalles de tecnologías para los escenarios de World Energy Outlook”.

- ❖ Unión Europea. Modelo de 25 estados: “Estudio de externalidades y valoración de temas asociados al ciclo de vida”
- ❖ 6 estados de Nueva Inglaterra: Análisis de Aire limpio, metas y evidencia para el compromiso de cambio climático.
- ❖ USAID: Estableciendo un marco de referencia común para la evaluación de gestión de la demanda.
- ❖ APEC: Niveles de costo-efectividad de generación renovable en cuatro economías de la APEC.
- ❖ Bolivia: Estrategias de reducción de GHG, incluyendo un modelo de forestación como una opción de reducción de carbono.
- ❖ South Africa: Planificación energética y ambiental.

MARKAL-MACRO es una extensión del modelo MARKAL y resuelve simultáneamente los sistemas de energía y economía. MARKAL-MACRO es una mezcla entre modelos bottom-up y top-down. En este modelo la demanda responde a precios, es decir, la demanda es determinada endógenamente. El modelo MARKAL-MACRO maximiza el bienestar del consumidor, optimiza la inversión agregada y provee la configuración del sistema de menor costo. Precios de energía y costos de energía son determinados simultáneamente durante la optimización. Los costos relativos de la energía determinan el tipo y nivel de sustitución de portadores energéticos y tecnologías [29, 30].

MARKAL-MACRO ha sido utilizado en:

- ❖ INET: impacts of emission reductions on China's GDP with MARKAL-MACRO Model; Beijing's energy supply scenarios and possible impacts;
- ❖ SHESRI: responses of the energy system to energy structure adjustment policies in Shanghai
- ❖ Croacia: Institute Hrvoje Požar. Helena Božić. "ENERGY SYSTEM PLANNING ANALYSIS USING THE INTEGRATED ENERGY AND MACROECONOMY MODEL". Interdisciplinary Description of Complex Systems 5(1), 39-47, 2007

## **ENPEP**

ENPEP es un conjunto de herramientas de análisis energéticas, ambientales y económicas integradas. ENPEP realiza análisis macroeconómico, desarrolla estimaciones de demanda de energía y sobre esta base se realiza análisis conjunto de oferta y demanda para todo el sistema energético. Se evalúa en detalle el sistema eléctrico y se determina efectos de configuraciones alternativas [29, 30].

El foco energético está en 2 herramientas de ENPEP: BALANCE y MAED, respecto a MAED un análisis más detallado se presenta en Anexo 1. BALANCE es un modelo de simulación basado en mercado que determina cómo varios segmentos del sistema de energía pueden responder a cambios en la demanda y precios de energía. Balance es un sistema de ecuaciones simultáneas, lineales y no lineales que especifican la cantidad de transformación de energía y precios a través de varios escenarios de producción y usos de energía. Este modelo también calcula emisiones gases efecto invernadero (GEI) [37].

En Sudamérica ha sido aplicado en los siguientes países:

COLOMBIA (MAED, WASP, BALANCE, IMPACTS, VALORAGUA)

- ❖ Análisis Energético Nacional
- ❖ Expansión de Gas Natural
- ❖ Desarrollo del Sistema Eléctrico

PERÚ (WASP, BALANCE, IMPACTS)

- ❖ Estimación de Demanda
- ❖ Expansión del Sistema Eléctrico

BRASIL (WASP, BALANCE, VALORAGUA, IMPACTS)

- ❖ Análisis Sector Energético
- ❖ Desarrollo del Sistema Eléctrico

URUGUAY (BALANCE, IMPACTS)

- ❖ Análisis del Sector Energético
- ❖ Penetración del Gas Natural en el Mercado

## **LEAP**

El LEAP al igual que otros modelos de simulación como el MAED, requieren de información demográfica y socioeconómica, tales como población e ingreso entre otros. En general, se analiza la demanda de diferentes sectores, subsectores y centros de transformación, se consideran variables de stock y se calcula efectos medioambientales y se evalúa costo-beneficio [29, 30, 38].

LEAP ha sido utilizado en:

- ❖ Estudios de reducción de gases efecto invernadero en: Argentina, Bolivia, Ecuador, Korea, Tanzania, Senegal.
- ❖ USA. Estudios de reducción de GHG en California, Washington, Oregon y Rhode Island.
- ❖ APERC Energy Outlook: Pronóstico de Demanda de Energía en Economías de la APEC.
- ❖ Proyectos Energéticos Asia del Este: Estudio de Seguridad Energética en Asia del Este.
- ❖ NDRC Energy Research Institute (ERI), INET and SHESRI
- ❖ ERI: Sustainable Energy Development Scenarios in China
- ❖ INET: China's energy system under future Northeast Asia cooperation scenario

Distintos modelos energéticos cumplen distintos objetivos y se basan en fundamentos conceptuales diferentes. Cada tipo de modelo cuenta con virtudes y defectos, y la elección de un tipo de modelo depende de la pregunta de análisis.

### **Limitaciones de los modelos**

- ❖ El modelo MARKAL es un modelo estrictamente de sector energético y no establece relaciones con otros sectores de la economía.
- ❖ La demanda es provista exógenamente por esto no responde a precios y no posee determinación de variables económicas endógenas que puedan realimentar el modelo.
- ❖ El modelo MARKAL-MACRO resuelve estos últimos inconvenientes, pero el modelo macroeconómico que incorpora es un modelo neoclásico y adopta una función de producción de elasticidad de sustitución constante (CES). El modelo resuelve para un consumidor representativo óptimo, donde todas las variables relevantes son agregadas.
- ❖ El modelo ENPEP analiza planificación de sistemas desde el punto de vista del mínimo costo, lo cual no necesariamente refleja la realidad.
- ❖ La operación del programa requiere importantes conocimientos de optimización.
- ❖ Es muy intensivo en datos.
- ❖ El modelo LEAP no genera procesos de optimización o de equilibrio de mercados, pero puede ser usado para identificar escenarios de menor costo. Una ventaja importante del LEAP es su flexibilidad y su fácil utilización, el cual permite analizar distintas políticas sin complejidad adicional.
- ❖ El modelo LEAP no evalúa impactos sobre variables económicas como PIB o desempleo, el modelo LEAP es consistente físicamente pero no económicamente.

## 1.5. Conclusiones Parciales

Después de revisar temas relacionados con modelos energéticos que ayudan a la toma de decisiones en la generación de energía eléctrica dentro de un territorio, se pueden definir aspectos que influyen a la hora de tomar decisiones.

-Estructura general de modelado. Donde está presente un sistema energético de referencia (SER) que represente el sistema energético completo del territorio, desde recursos, tecnologías de generación, demanda y emisiones atmosféricas.

-Caracterización general del modelo. Los posibles cambios de tecnología, que podrían darse en el período a analizar.

-Técnicas de modelado. La optimización es la que se va a utilizar.

-Formulación del modelo. Utilizar una función objetivo con sus restricciones para la selección de las tecnologías a instalar.

-Lenguaje de modelado. El GAMS es un software utilizado por MARKAL.

## Capítulo 2: Desarrollo del modelo matemático

### 2.1. Introducción

En este capítulo se observa todo lo relacionado con el modelo matemático a utilizar, se caracteriza el mismo de acuerdo a los aspectos vistos en el capítulo anterior. La optimización del modelo descrito se diseña para presentar la combinación óptima de unidades tecnológicas a ser instalada. El costo anual se minimiza con un acercamiento de la programación lineal. La función objetivo se minimiza sujeta a varias restricciones.

### 2.2. Estructura general de modelado

El SER que se propone se muestra en la figura 1 y lo integran cuatro componentes principales.

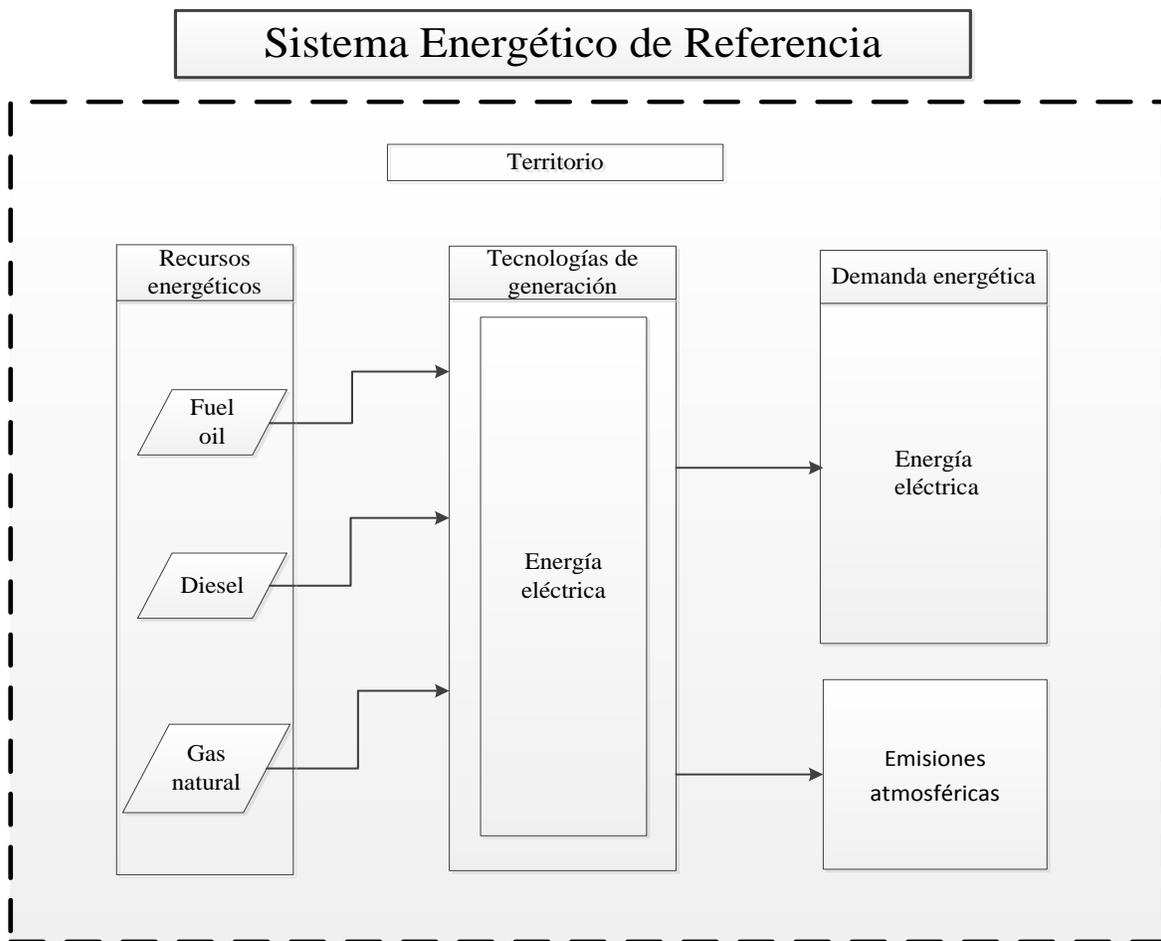


Figura 1

### 2.2.1. Características de cada componente que integra el SER

Cada componente se caracteriza mediante aspectos y parámetros que serán requeridos en la modelación.

Subíndices.

g: representa el alcance temporal

$n_g$ : máximo valor que toma g

c: representa la carga

$n_c$ : máximo valor que toma c

i: representar las tecnologías de generación

$n_i$ : máximo valor que toma i

j: representa el recurso energético

$n_j$ : máximo valor que toma j

#### Recursos energéticos, RE:

Los aspectos que lo caracterizan son los siguientes:

-Proceso de obtención: Primario y secundario.

-Capacidad de renovación: No renovables y renovables

El potencial de recursos energéticos depende de su disponibilidad. En el caso de los combustibles del nivel de reservas, producción e importación.

Parámetros que caracterizan al RE.

-Precio anual del recurso energético combustible j según el alcance temporal g,  $PRE_{g,j}$ . Se expresan en (\$/kg).

-Exergía específica del recurso energético combustible j,  $B_j$  [39]. Se expresan en (kJ/kg).

$$B_j = Q_{i,j}^0 \cdot \varphi \quad \text{ec (1)}$$

-Calor específico de combustión inferior de la masa orgánica del recurso energético j,  $Q_{i,j}^0$ . Se expresan en (kJ/kg).

$$\varphi = 1.0401 + 0.1728 \frac{h}{c} + 0.0432 \frac{o}{c} + 0.2169 \frac{s}{c} \left( 1 - 2.0628 \frac{h}{c} \right) \quad \text{ec (2)}$$

## **Demanda energética, DE:**

Los aspectos que la caracterizan son los siguientes:

-Tipo de demanda de energía consumida por usuario final.

Demanda de energía eléctrica.

Demanda de calor

-Tipos de carga.

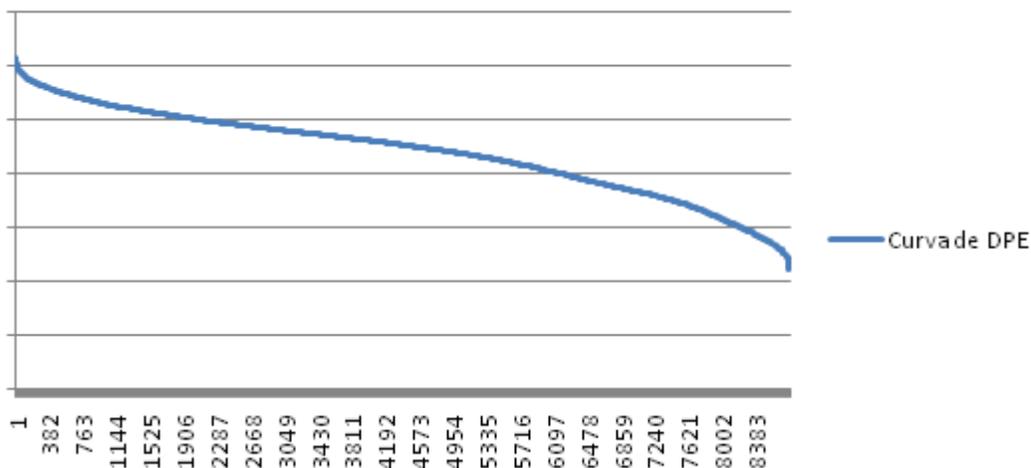
Según se muestra en la figura 2 y 3 la carga se distribuye en tres tipos:

-Base: Rango de menor demanda de potencia y de energía eléctrica que se presenta durante el período considerado de forma constante [29]. Se toma el valor mínimo de la demanda energética en el año.

-Intermedia: Es la demanda de potencia y de energía eléctrica que se presenta en el período (entre carga base y carga pico) [29]. Se toma el valor que corresponde al valor mínimo de la carga pico y el máximo de la carga base.

-Pico: Rango de mayor demanda potencia y de energía que se presenta durante el período considerado de forma variable [29]. Se toma el valor máximo de la demanda energética en el año.

**Diagrama anual de duración de la carga.**



**Figura 2**

La curva de carga muestra el funcionamiento del sistema eléctrico, como se observa en la figura 3 comportamientos para un día (24 h).

### Diagrama diario de duración de la carga.

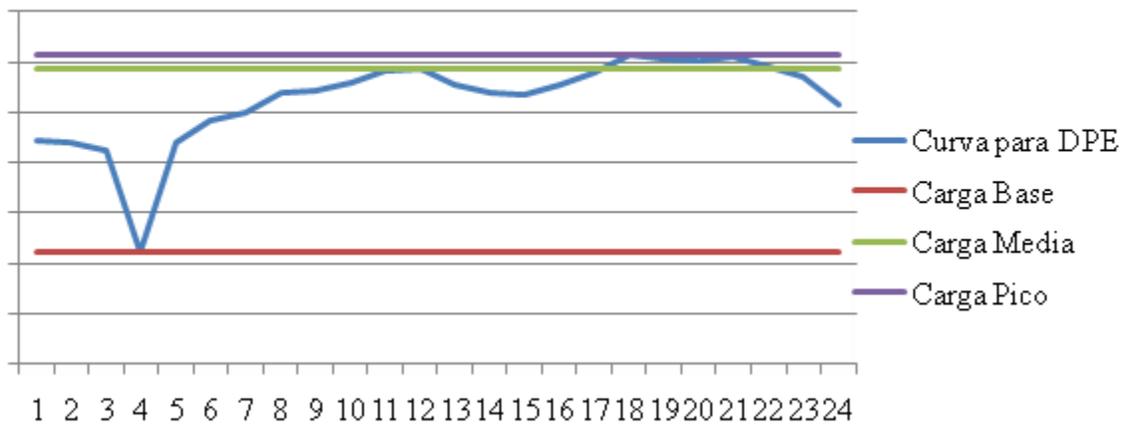


Figura 3

Parámetros que caracterizan a la DE:

-Demanda de potencia eléctrica según la carga  $c$  y en el año inicial  $g=1$ ,  $DPE_{g,c}$ . Se expresa en (kW).

-Demanda de energía eléctrica del territorio según la carga  $c$  y en el año inicial,  $g=1$ ,  $DEE_{g,c}$ . Se expresa en (kWh/año).

-Incremento de la demanda de energía eléctrica del territorio según la carga  $c$  y en el alcance temporal  $g=2 \dots n_g$ ,  $IDEE_{g,c}$ . Se expresa en (kWh/año). Se determina de la forma siguiente:

$$IDEE_{g,c} = DEE_{g,c} - DEE_{g-1,c} \quad \text{ec (3)}$$

Debe satisfacer la condición expresada en la ecuación.

$$DEE_{g,c} > DEE_{g-1,c} \quad \text{ec (4)}$$

### Emisiones atmosféricas, EA:

Los aspectos que lo caracterizan son los siguientes:

-Tipo de emisiones contaminantes.

Las EA se definen para las sustancias consideradas como gases de efecto invernadero emitidas de forma directa e indirecta. Los proyectos de obtención de energía eléctrica emite dióxido de azufre ( $SO_2$ ), óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono ( $CO_2$ ) y Metano. Las cantidades de cada uno dependerán del tipo y el tamaño de la instalación y del tipo y calidad del combustible.

Parámetros que caracterizan a los EA.

-Factor de emisión del dióxido de carbono equivalente para cada unidad de tecnología de generación  $i$  según el recurso energético  $j$ ,  $FE_{i,j}$ . Se expresa en ( $kg_e / kg_{comb}$ ).

### **Tecnologías de generación, TG:**

Los aspectos que la caracterizan son los siguientes:

1-Tipo de esquema de producción de energía.

Producción de energía eléctrica.

2-Tipo de generación.

Centralizada: se trabaja sincronizada a la red (red central con carga interna).

Descentralizada: se trabaja independiente de la red (Isla o aislada con carga interna).

3-Tipo de TG.

Existen diferentes tipos, por ejemplo centrales termoeléctricas, ciclos combinados, grupos electrógenos, turbinas de gas, hidroeléctrica, turbinas eólicas, paneles fotovoltaicos, etc.

4-Régimen de funcionamiento.

Las TG se diferencian en el tiempo de funcionamiento. Debido a la variabilidad de la demanda de potencia eléctrica y a su duración en el tiempo (demanda de energía eléctrica) se distinguen en dos grupos.

Continuo: se caracterizan por funcionar durante largos períodos de trabajo (cumpliendo con las paradas previstas por el mantenimiento preventivo planificado). Está asociado con la carga base e intermedia.

De tiempo limitado: se caracterizan por funcionar durante períodos de trabajo limitados (además de cumplir con las paradas previstas por el mantenimiento preventivo planificado). Está asociado con la carga pico.

5-Modo de trabajo.

Fijo: trabajan a un valor constante de producción de potencia eléctrica. Está asociado con la carga base.

Variable: trabajan en un rango variables de valores de producción de potencia eléctrica. Está asociado con la carga intermedia y pico.

Parámetros que caracterizan a las TG:

Las unidades de tecnología de generación equipo que de una forma u otra genera energía bajo el consumo de un recurso energético.

-Cantidad de unidades de tecnología de generación que se encuentran agrupadas,  $Uni_{c,i,j}$ . Se expresa adimensional.

-Potencia eléctrica nominal de cada unidad de TG: se define como la potencia eléctrica activa obtenida en los terminales del generador eléctrico de la TG para un voltaje nominal, una frecuencia nominal y un factor de potencia para las condiciones ambientales establecidas [40].

Es la máxima potencia que se puede entregar durante un período de tiempo prolongado. Se obtiene como dato de chapa del generador eléctrico [41].

-Potencia eléctrica nominal de cada unidad de tecnología de generación  $i$  según el recurso energético  $j$  y la carga  $c$ ,  $PEN_{c,i,j}$ . Se expresa en (kW).

-Costo de inversión inicial de cada unidad de tecnología de generación  $i$ ,  $CI_i$ . Se expresa en (\$/kW).

-Factor de recuperación del capital de cada unidad de tecnología de generación  $i$ ,  $FRC_i$ . Se expresa en (año<sup>-1</sup>) y se determina según la ecuación [42].

$$FRC_i = \frac{IR \cdot (1 + IR)^{D_i}}{(1 + IR)^{D_i} - 1} \quad \text{ec (5)}$$

-Factor de depósito del fondo de amortización de cada unidad de tecnología de generación  $i$ ,  $FDFA_i$ . Se expresa en (año<sup>-1</sup>) y se determina según la ecuación [42].

$$FDFA_i = \frac{I}{(1+I)^{D_i-1}} \quad \text{ec 6}$$

-Factor simple de capitalización de cada unidad de tecnología de generación  $i$ ,  $FSC_i$ . Se expresa en (año<sup>-1</sup>) y se determina según la ecuación [42].

$$FSC_i = (1 + I)^{D_i} \quad \text{ec 7}$$

-Duración de la inversión de cada unidad de tecnología de generación  $i$ ,  $D_i$ . Se expresa en (años) y se determina según la ecuación.

$$D_i = \frac{Z_i}{\frac{\sum_g^{n_g} top_{g,i}}{n_g}} \quad \text{ec 8}$$

Debe satisfacer la condición expresada en la ecuación.

$$D_i \geq n_g \quad \text{ec 9}$$

-Vida útil de cada unidad de tecnología de generación  $i$ ,  $Z_i$ . Se expresa en (horas) y se determina según la ecuación.

$$Z_i = T_{\text{ciclo}_i} \cdot N_{\text{ciclos}_i} \quad \text{ec 10}$$

-Tiempo de duración del ciclo de reparación: se define como el período de funcionamiento de cada tecnología de generación ( $T_{\text{ciclo}_i}$ ) entre dos reparaciones capitales o entre puesta en marcha y la primera reparación capital cuando son nuevas. Se expresa en (horas/ciclo) [42].

-Números de ciclos de reparación que va a tener cada unidad de tecnología de generación  $i$ ,  $N_{\text{ciclos}_i}$ . Se expresa en (ciclos).

-Tiempo de operación planificado de cada unidad de tecnología de generación  $i$ , según el alcance temporal  $g$ ,  $\text{top}_{g,i}$ . Se expresa en (h/año) y calcula según la ecuación.

$$\text{top}_{g,i} = 8760 - t_{ig,i} - t_{\text{Mttog},i} \quad \text{ec 11}$$

-Hora que tiene el año, 8760h/año.

-Tiempo de inmovilización previsto de cada unidad de tecnología de generación  $i$ , según el alcance temporal  $g$ ,  $t_{ig,i}$ . Se expresa en (h/año).

-Tiempo empleado para el mantenimiento de cada unidad de tecnología de generación  $i$  por concepto de parada por revisión, reparación y reapriete según el alcance temporal  $g$ ,  $t_{\text{Mttog},i}$ . Se expresa en (h/año) y calcula según la ecuación.

$$t_{\text{Mttog},i} = N_{R_{g,i}} \cdot T_{R_i} + N_{R_{SC_{g,i}}} \cdot T_{R_{SC_i}} + R_{C_{g,i}} \cdot T_{R_{C_i}} + N_{R_{ea_{g,i}}} \cdot T_{R_{ea_i}} \quad \text{ec 12}$$

-Número de revisiones de cada tecnología de generación  $i$ , según el alcance temporal  $g$ ,  $N_{R_{g,i}}$ . Se expresa en (revisiones/año).

-Número de reparaciones semicapitales de cada tecnología de generación  $i$ , según el alcance temporal  $g$ ,  $N_{R_{SC_{g,i}}}$ . Se expresa en (reparaciones semicapitales /año).

-Reparación capital de cada tecnología de generación  $i$ , según el alcance temporal  $g$ ,  $R_{C_{g,i}}$ . Se expresa en (reparación capital/año).

-Número de reaprietes de cada tecnología de generación  $i$ , según el alcance temporal  $g$ ,  $N_{R_{ea_{g,i}}}$ . Se expresa en (reaprietes/año).

-Tiempo de duración de cada operación por unidad de TG: Se define como el tiempo que se invierte en ejecutar cada operación.

-Tiempo de duración de una revisión de cada tecnología de generación  $i$ ,  $T_{R_i}$ . Se expresa en (horas/revisión).

-Tiempo de duración de una reparación semicapital de cada tecnología de generación  $i$ ,  $T_{R_{SC_i}}$ . Se expresa en (horas/reparación semicapital).

- Tiempo de duración de una reparación capital de cada tecnología de generación  $i$ ,  $T_{RCi}$ . Se expresa en (horas/ reparación capital).
- Tiempo de duración de un reapriete de cada tecnología de generación  $i$ ,  $T_{Reapi}$ . Se expresa en (horas/reapriete).
- Costo fijo de operación y mantenimiento de cada unidad de tecnología de generación  $i$ ,  $CFOM_i$ . Se expresa en (\$/kW).
- Factor de costo de desmantelamiento de cada unidad de tecnología de generación  $i$ ,  $FCD_i$ . Se expresa adimensional.
- Valor residual de cada unidad de tecnología de generación  $i$ ,  $VR_i$ . Se expresa en (\$/kW).
- Rendimiento del generador eléctrico de cada unidad de tecnología de generación  $i$ ,  $\eta_{gei}$ . Se expresa adimensional.
- Rendimiento efectivo de cada unidad de tecnología de generación  $i$ ,  $\eta_{ei}$ . Se expresa adimensional.
- Factor de carga de cada unidad de TG: se define como una fracción de la potencia mecánica efectiva nominal. Es la razón entre la potencia mecánica efectiva disponible y la potencia mecánica efectiva nominal. Se obtienen para las tecnologías de generación  $i$  ( $FC_i$ ). Es un dato que da el fabricante que oscila en un rango y se expresa adimensional.
- Costo variable de operación y mantenimiento de cada unidad de tecnología de generación  $i$ ,  $CVOM_i$ . Se expresa en (\$/kWh).
- Consumo específico efectivo del combustible referido a la potencia mecánica efectiva de cada unidad de tecnología de generación  $i$ ,  $ge_i$  (g/kWh).

Parámetros generales:

- Tasa de interés anual en un proceso de descuento,  $IR$ . Se expresa en ( $\text{año}^{-1}$ ).
- Tasa de interés anual en un proceso de composición,  $I$ . Se expresa en ( $\text{año}^{-1}$ ).
- Factor de margen de reserva  $fr_{g,c}$ . Se determina por el criterio de confiabilidad Margen de Reserva Porcentual. Se expresan adimensional.

### 2.3. Caracterización general del modelo

El nivel de agregación bottom up, la cobertura geográfica regional y alcance temporal mediano plazo. Todos los datos empleados son de naturaleza determinísticos y dimensión temporal estática. Se emplea un único criterio de decisión, “Costo Total de la combinación de tecnologías de generación instaladas”.

## 2.4. Técnica de modelado

La técnica de modelado empleada es la optimización. Se utiliza la programación lineal entera mixta.

## 2.5. Formulación del modelo matemático

La formulación del modelo se realiza con el objetivo de establecer la relación entre las variables de decisión definidas, la función objetivo y las restricciones en forma de expresiones matemáticas.

### 2.5.1. Definición de las variables de decisión

Se utiliza un tipo de variable.

-Número de unidades de cada tecnología de generación  $i$  a instalar según la carga  $c$ , el alcance temporal  $g$  y el recurso energético  $j$ ,  $N_{g,c,i,j}$ . Se considera como una variable discreta.

### 2.5.2. Obtención de la función objetivo

En orden de estructurar el modelo y facilitar la comprensión del mismo, se desglosan las ecuaciones y se construye la función objetivo de “Costo Total de la combinación de tecnologías de generación instaladas” como una función lineal.

**-Costo Total del sistema de suministro de energía, (CT):** se determina como la suma del Costo Total Anual según la carga  $c$  y el alcance temporal  $g$ . Se expresan en (\$/año) y calcula según la ecuación.

$$CT = \sum_g^{n_g} \sum_c^{n_c} CTA_{g,c} \quad \text{ec 13}$$

**-Costo Total Anual de las tecnologías de generación, (CTA<sub>g,c</sub>):** es el costo total de las tecnologías de generación que se paga anualmente, según la carga  $c$  y el alcance temporal  $g$ . Se determina como la suma del costo fijo ( $CF_{g,c}$ ) y del costo variable ( $CV_{g,c}$ ) de las tecnologías de generación. Se expresan en (\$/año) y calcula según la ecuación.

$$CTA_{g,c} = CF_{g,c} + CV_{g,c} \quad \text{ec 14}$$

Los costos fijos se definen como los costos invariables ante cambios sensibles en los niveles de producción, se consideran como resultados del periodo en el que se incurren [43].

**-Costo Fijo de las tecnologías de generación, (CF<sub>g,c</sub>):** se determina como la suma del costo de inversión anualizado ( $CINVA_{g,c}$ ), el costo fijo anualizado de operación y mantenimiento ( $CFAOM_{g,c}$ ) y el costo de depreciación anualizado ( $CDEA_{g,c}$ ). Se expresan en (\$/año) y calcula según la ecuación.

$$CF_{g,c} = CINVA_{g,c} + CFAOM_{g,c} + CDA_{g,c} + CDEA_{g,c} \text{ ec 15}$$

**-Costo de inversión anualizado de las tecnologías de generación, (CINVA<sub>g,c</sub>):** se enuncia como la anualidad que se paga a intervalos fijos (años) a lo largo de la duración de la inversión para amortizar el costo de inversión inicial de cada unidad de tecnologías de generación. Se expresan en (\$/año) y calcula según la ecuación.

$$CINVA_{g,c} = \sum_i^{n_i} \sum_j^{n_j} N_{g,c,i,j} \cdot Uni_{c,i,j} \cdot PEN_{c,i,j} \cdot CII_i \cdot FRC_i \text{ ec 16}$$

**-Costo fijo anualizado de operación y mantenimiento de las tecnologías de generación, (CFAOM<sub>g,c</sub>):** se enuncia como la anualidad que se paga a intervalos fijos (años) a lo largo de la duración de la inversión para amortizar los costos, para mantener la TCE produzca o no produzca energía. Se expresan en (\$/año) y calcula según la ecuación.

$$CFAOM_{g,c} = \sum_i^{n_i} \sum_j^{n_j} N_{g,c,i,j} \cdot Uni_{c,i,j} \cdot PEN_{c,i,j} \cdot CFOM_i \cdot FRC_i \text{ ec 17}$$

**-Costo de depreciación anualizado de las tecnologías de generación, (CDEA<sub>g,c</sub>):** La depreciación es la pérdida de valor que experimentan los bienes por su edad, uso y obsolescencia. En el cálculo de los costos anuales de producción el valor de adquisición de las máquinas se distribuye en sus años de vida útil; este valor asignado a cada año es la depreciación [44, 45]. Se expresan en (\$/año).

$$CDEA_{g,c} = \sum_i^{n_i} \sum_j^{n_j} N_{g,c,i,j} \cdot Uni_{c,i,j} \cdot PEN_{c,i,j} \cdot FDFA_i \cdot (CII_i - VR_i) \text{ ec 18}$$

Los costos variables varían de acuerdo al nivel de producción, son los que se cancelan de acuerdo al volumen de producción [43].

**-Costo variable de las tecnologías de generación, (CV):** Se determina como la suma del costo anual de los recursos energéticos combustibles, (CARE<sub>g,c</sub>) y del costo anual variable de operación y mantenimiento, (CAVOM<sub>g,c</sub>). Se expresan en (\$/año) y calcula según la ecuación.

$$CV_{g,c} = CARE_{g,c} + CAVOM_{g,c} \text{ ec 19}$$

**-Costo anual de los recursos energéticos combustibles de las tecnologías de generación, (CARE<sub>g,c</sub>):** Se expresan en (\$/año) y calcula según la ecuación.

$$CARE_{g,c} = \sum_i^{n_i} \sum_j^{n_j} \frac{3600}{\eta_{ge_i} \cdot \eta_{e_i} \cdot B_j} \cdot PRE_{g,j} \cdot N_{g,c,i,j} \cdot Uni_{c,i,j} \cdot PEN_{c,i,j} \cdot FC_i \cdot top_{g,i} \quad \text{ec 20}$$

**-Costo variable anual de operación y mantenimiento de las tecnologías de generación, (CVAOM<sub>g,c</sub>):** Se expresan en (\$/año) y calcula según la ecuación.

$$CVAOM_{g,c} = \sum_i^{n_i} \sum_j^{n_j} N_{g,c,i,j} \cdot Uni_{c,i,j} \cdot PEN_{c,i,j} \cdot FC_i \cdot top_{g,i} \cdot CVOM_i \quad \text{ec 21}$$

En la ecuación siguiente se representa la **función objetivo**:

$$FO: \text{Min CT} = \sum_g^{n_g} \sum_c^{n_c} \sum_i^{n_i} \sum_j^{n_j} \left\{ N_{g,c,i,j} \cdot Uni_{c,i,j} \cdot PEN_{c,i,j} \cdot [CII_i \cdot (FRC_i + FDFA_i) - VR_i \cdot FDFA_i + CFOM_i \cdot FRC_i] + N_{g,c,i,j} \cdot Uni_{c,i,j} \cdot PEN_{c,i,j} \cdot FC_i \cdot top_{g,i} \cdot \left( \frac{3600 \cdot PRE_{g,j}}{\eta_{ge_i} \cdot \eta_{e_i} \cdot B_j} + CVOM_i \right) \right\} \quad \text{ec 22}$$

### 2.5.3. Definición de las Restricciones

#### 1-Satisfacción de la demanda de potencia eléctrica para carga base e intermedia.

Las unidades con tecnología de generación deben satisfacer la demanda de potencia eléctrica en el año inicial y en su incremento a lo largo del alcance temporal.

$$\sum_i^{n_i} \sum_j^{n_j} N_{g,c,i,j} \cdot Uni_{c,i,j} \cdot PEN_{c,i,j} \geq (fr_{g,c} + 1) \cdot DPE_{g,c} \quad \text{ec 23}$$

$$g=1; c=1,2$$

$$\sum_i^{n_i} \sum_j^{n_j} N_{g,c,i,j} \cdot Uni_{c,i,j} \cdot PEN_{c,i,j} \geq (fr_{g,c} + 1) \cdot IDPE_{g,c} \quad \text{ec 24}$$

$$g=2 \dots n_g; c=1,2$$

#### 1.1-Satisfacción de la demanda de potencia eléctrica para carga pico

Las unidades con tecnología de generación deben satisfacer la demanda de potencia eléctrica en el año inicial y en su incremento a lo largo del alcance temporal.

$$\sum_i^{n_i} \sum_j^{n_j} N_{g,c,i,j} \cdot Uni_{c,i,j} \cdot PEN_{c,i,j} \cdot FC_i \geq DPE_{g,c} \quad \text{ec 25}$$

$$g=1; c=3$$

$$\sum_i^{n_i} \sum_j^{n_j} N_{g,c,i,j} \cdot \text{Uni}_{c,i,j} \cdot \text{PEN}_{c,i,j} \cdot \text{FC}_i \geq \text{IDPE}_{g,c} \quad \text{ec 26}$$

$$g=2 \dots n_g; c=3$$

## 2-Satisfacción de la demanda de energía eléctrica por las tecnologías de generación

Las unidades con tecnología de generación deben satisfacer la demanda de energía eléctrica en el año inicial y en su incremento a lo largo del alcance temporal.

$$\sum_i^{n_i} \sum_j^{n_j} (N_{g,c,i} \cdot \text{Uni}_{c,i,j} \cdot \text{PEN}_{c,i,j} \cdot \text{FC}_i \cdot \text{top}_{g,i}) \cdot (1 - \text{PERD}_{g,c}) \geq \text{DEE}_{g,c} \quad \text{ec 27}$$

$$g=1; c=1,2,3$$

$$\sum_i^{n_i} \sum_j^{n_j} (N_{g,c,i} \cdot \text{Uni}_{c,i,j} \cdot \text{PEN}_{c,i,j} \cdot \text{FC}_i \cdot \text{top}_{g,i}) \cdot (1 - \text{PERD}_{g,c}) \geq \text{IDEE}_{g,c} \quad \text{ec 28}$$

$$g=2 \dots n_g; c=1,2,3$$

## 3-Condición de no negatividad

Las variables toman valores no negativos y pertenecen al conjunto de los números enteros.

$$N_{g,c,i,j} \geq 0 \quad \text{ec 29}$$

$$g=1 \dots n_g; c=1,2,3; i=1 \dots n_i; j=1 \dots n_j$$

## 2.6. Lenguaje de modelado

Sistema de Modelado General Algebraico (GAMS) es el sistema de modelado elegido para la implementación del modelo. GAMS sistema de modelado de alto nivel diseñado para la programación matemática y optimización. Sus solucionadores de alto rendimiento integrados y compilador de lenguaje permiten la construcción de modelos grandes y complejos de optimización. GAMS se construye sobre el concepto de conjuntos, parámetros, variables y ecuaciones. Además, el diseño del código GAMS para las ecuaciones es muy similar a las expresiones matemáticas que describen este modelo. Esto hace GAMS, un lenguaje de optimización muy adecuado para la aplicación de este modelo [34].

## 2.7. Parámetros de salida

A continuación se determinan los parámetros de salida característicos para el sistema de suministro de energía eléctrica obtenido por el modelo matemático.

1-Parámetros relacionados con el número total de unidades de tecnologías de generación.

- Número total de unidades de tecnologías de generación,  $N_{uni_{g,c}}$ .

$$N_{uni_{g,c}} = \sum_i^{n_i} \sum_j^{n_j} N_{g,c,i,j} \cdot Uni_{c,i,j} \quad \text{ec 30}$$

2-Parámetros relacionados con la potencia eléctrica.

- Potencia eléctrica total instalada de las tecnologías de generación,  $PETI_{g,c}(\text{kW})$ .

$$PETI_{g,c} = \sum_i^{n_i} \sum_j^{n_j} N_{g,c,i,j} \cdot Uni_{c,i,j} \cdot PEN_{c,i,j} \quad \text{ec 31}$$

3-Producción de energía eléctrica,  $PEE_{g,c}$  (kWh/año).

$$PEE_{g,c} = \sum_i^{n_i} \sum_j^{n_j} N_{g,c,i,j} \cdot Uni_{c,i,j} \cdot PEN_{c,i,j} \cdot FC_i \cdot top_{g,i} \quad \text{ec 32}$$

4-Costo total anual (\$/año).

$$CTA_{g,c} = \sum_i^{n_i} \sum_j^{n_j} \left\{ N_{g,c,i,j} \cdot Uni_{c,i,j} \cdot PEN_{c,i,j} \cdot [CII_i \cdot (FRC_i + FDFA_i) - VR_i \cdot FDFA_i + CFOM_i \cdot FRC_i] + N_{g,c,i,j} \cdot Uni_{c,i,j} \cdot PEN_{c,i,j} \cdot FC_i \cdot top_{g,i} \cdot \left( \frac{3600 \cdot PRE_{g,j}}{\eta_{ge_i} \cdot \eta_{e_i} \cdot B_j} + CVOM_i \right) \right\} \quad \text{ec 33}$$

5-Costo unitario de producción de energía eléctrica,  $Cu_{g,c}$  (\$/kWh).

$$Cu_{g,c} = \frac{CTA_{g,c}}{PEE_{g,c}} \quad \text{ec 34}$$

6-Emisiones de  $CO_2$

$$CE_{g,c} = \sum_i^{n_i} \sum_j^{n_j} FE_{i,j} \cdot ge_i \cdot N_{g,c,i} \cdot Uni_{c,i,j} \cdot PEN_{c,i,j} \cdot FC_i \cdot top_{g,i} \quad \text{ec 36}$$

## **2.8. Conclusiones Parciales**

-Se desarrolla un modelo matemático para la toma de decisiones en la planificación energética. Se establecen las variables de decisión, la función objetivo y las restricciones que permiten seleccionar la combinación óptima de tecnologías de generación a instalar en un territorio.

-La herramienta para implementar el modelo por sus potencialidades es el GAMS software utilizado por MARKAL por sus virtudes que le permiten cubrir prácticamente todas las áreas principales de optimización.

## Capítulo 3: Evaluación y análisis de los resultados del modelo matemático

### 3.1. Introducción

En este capítulo se analizan los resultados del modelo desarrollado en el capítulo anterior, un modelo matemático para ayudar a las personas tomadoras de decisiones a elegir la mejor combinación de tecnologías de generación. La evaluación del modelo se realiza utilizando el GAMS (General Algebraic Modeling System, Sistema General de Modelaje Algebraico), diseñado para modelar problemas de optimización. El modelo obedece las premisas siguientes: siempre satisfacer la demanda y minimizar el costo teniendo en cuenta las restricciones del medio ambiente. Por simplicidad el modelo está construido en módulos lo que facilita cambios y la posibilidad de agregar nuevas funciones.

### 3.2. Datos para la evaluación

Los datos y unidades diferentes son reunidos de varias fuentes. Algunos de los datos no están completo y alguno se presenta de una manera diferente que la necesaria y algunos de los datos podrían ser años viejo. El objetivo es usar los datos pertinentes posibles, pero la verdad es que es muy difícil encontrar los datos precisos. Los cambios día a día, de región a región, pueden mostrar una tecnología de poder idéntica con los costos diferentes.

#### 3.2.1. Recursos energéticos

Como los datos del costo para las alternativas diferentes varían el precio, para la evaluación el precio de combustible permanecerá constante durante el análisis y se asume que siempre existe disponibilidad a lo largo de todo el alcance temporal. Los combustibles utilizados se caracterizan como muestra la tabla siguiente. Los precios según Banco Central de Cuba.

**Tabla 2: Datos de los combustibles.**

Recurso	Forma de obtención	Renovación	PRE <sub>g,j</sub> (\$/kg)	B <sub>j</sub> (kJ/kg)
Fuelóleo	Secundario	No renovable	0,589	46092,84
Gasóleo	Secundario	No renovable	0,850	45162,31
Gas natural	Primario	Renovable	0,285	41 868,00

### 3.2.2. Demanda energética

La demanda es dato de entrada al modelo, El modelo debe presentar la combinación óptima a ser instalado, ser capaz de minimizar el costo. Es muy importante mirar la demanda de poder que tiene que ser cubierto en el tiempo investigado. Se buscan los valores característicos para cada tipo de carga, para determinar la demanda de potencia eléctrica para el alcance temporal y energía eléctrica según la carga.

**Tabla 3: Demanda de potencia y energía eléctrica.**

Carga	kW	Carga	kWh/año
DPE g=1,c=1	11080,00	DEEG=1,c=1	97060800,00
DPE g=1,c=2	18220,00	DEEG=1,c=2	131867200,00
DPE g=1,c=3	1360,00	DEEG=1,c=3	1715500,00

### 3.2.3. Tecnologías de generación

Para la evaluación se han usado las tecnologías tipo motores de combustión interna (MCI), con diferentes parámetros como se pueden observar en la tabla siguiente. Los demás parámetros que se utilizan en el modelo se muestran en los anexos.

**Tabla 4: Listado de tecnologías de generación con los parámetros.**

Tecnología	PEN (kW)	CII (\$/kW)	FRC (años <sup>-1</sup> )	FDFA (años <sup>-1</sup> )	FSC (años <sup>-1</sup> )	CFOM (\$/kW)
Hyundai 8H21/32	1520	600	0,078	0,031	2,296	339,74
Hyundai 5H17/28	538	600	0,078	0,031	2,296	339,74
Hyundai 8H17/28	865	600	0,078	0,031	2,296	339,74
Hyundai 5H17/24G	517	800	0,078	0,031	2,296	339,74
Hyundai 6H17/24G	620	800	0,078	0,031	2,296	339,74
Hyundai 7H17/24G	724	800	0,078	0,031	2,296	339,74
Hyundai 9H17/24G	930	800	0,078	0,031	2,296	339,74
Hyundai 12H17/21V	1843	500	0,056	0,008	6,307	473,21
Hyundai 16H17/21V	2458	500	0,056	0,008	6,307	473,21

Tecnología	FC	$\eta_{ge}$	$\eta_e$	CVOM (\$/kWh)	$g_e$ (g/kWh)	Fei (kge/kgcomb)
Hyundai 8H21/32	0,85	0,95	0,43	0,009	189	3,528
Hyundai 5H17/28	0,85	0,94	0,41	0,009	189	3,528
Hyundai 8H17/28	0,85	0,94	0,41	0,009	189	3,528
Hyundai 5H17/24G	0,85	0,94	0,41	0,008	178	2,708
Hyundai 6H17/24G	0,85	0,94	0,41	0,008	178	2,708
Hyundai 7H17/24G	0,85	0,94	0,41	0,008	178	2,708
Hyundai 9H17/24G	0,85	0,94	0,41	0,008	178	2,708
Hyundai 12H17/21V	0,85	0,96	0,37	0,009	215	3,228
Hyundai 16H17/21V	0,85	0,96	0,37	0,009	215	3,228

### 3.3. Parámetros generales

-Tasa de interés anual en un proceso de descuento, IR: 0,05 (año<sup>-1</sup>).

-Tasa de interés anual en un proceso de composición, I: 0,04 (año<sup>-1</sup>).

-Factor de margen de reserva  $fr_{g,c}$ : Carga base 0,24 y carga intermedia 0,23.

### 3.4. Resultados del modelo matemático

En esta sección se presentan los resultados obtenidos del modelo matemático. La figura 4 muestra la combinación óptima de unidades de tecnologías generación en el primer año.

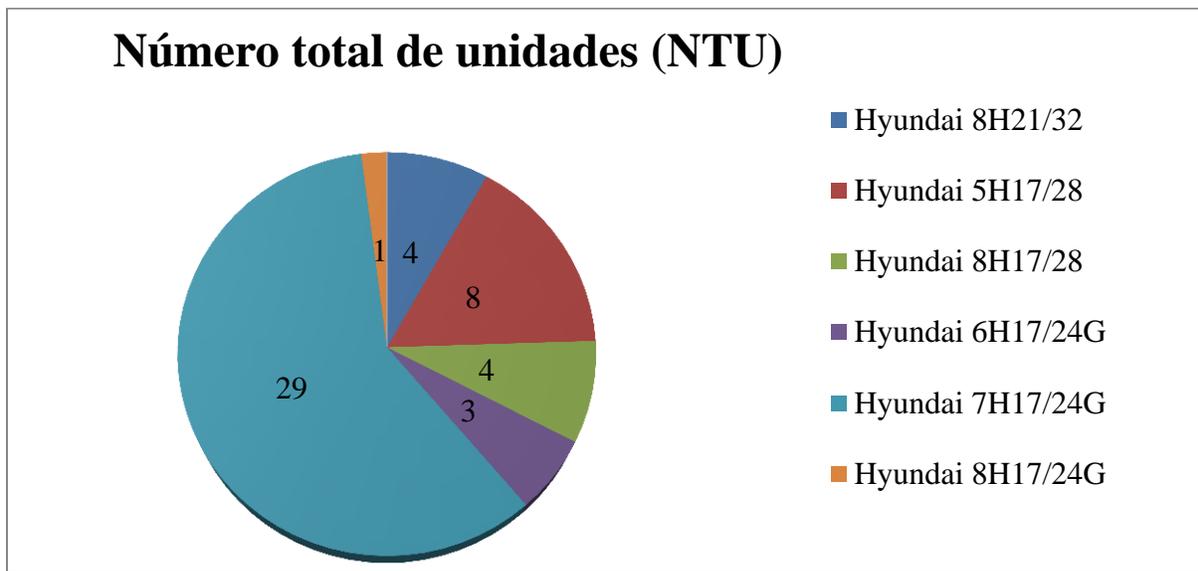


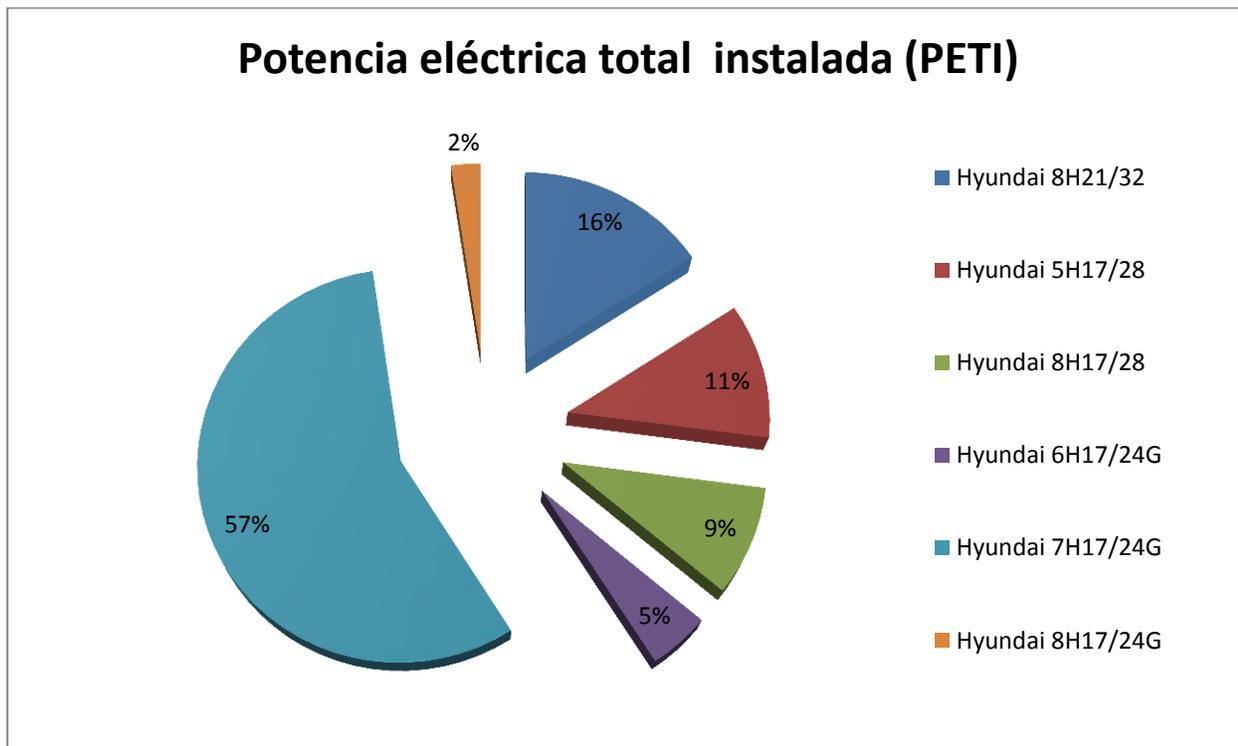
Figura 4

Se obtuvo un total de unidades de tecnologías de 49, donde predomina Hyundai 7H17/24G con 29 distribuidas en 28 para carga intermedia y 1 para carga pico. La combinación de tecnologías para cada carga en el año inicial se muestra en la tabla siguiente.

**Tabla 5: Tecnologías por carga.**

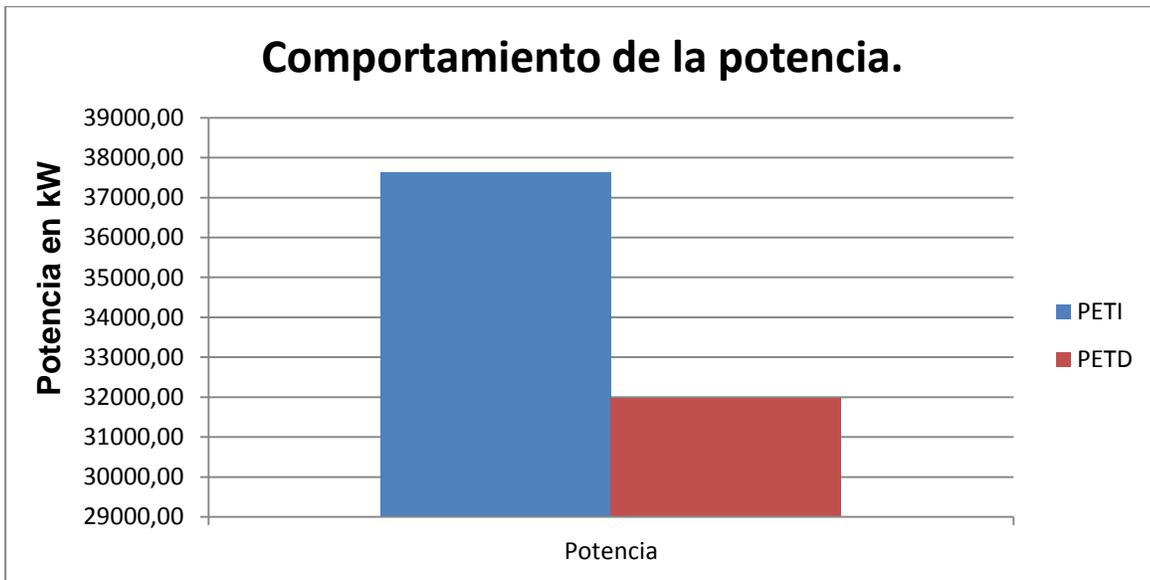
	NTU	Tipo de TG
g1.c1	4	Hyundai 8H21/32
	8	Hyundai 5H17/28
	4	Hyundai 8H17/28
g1.c2	3	Hyundai 6H17/24G
	28	Hyundai 7H17/24G
g1.c3	1	Hyundai 7H17/24G
	1	Hyundai 8H17/24G

La figura 5 equivale al porcentaje potencia eléctrica total instalada de cada tecnología.



**Figura 5**

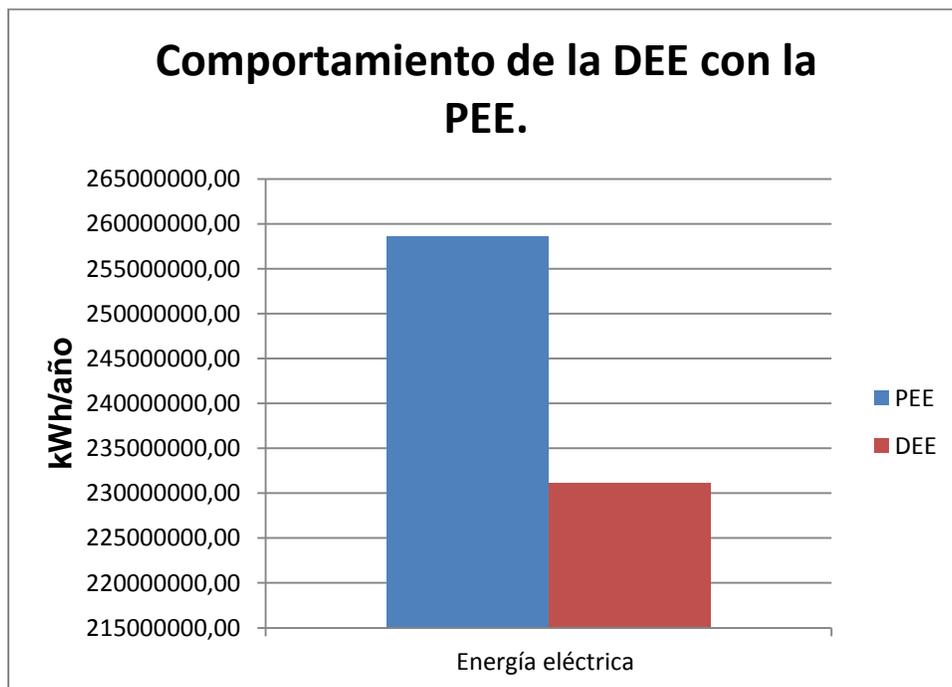
La potencia eléctrica total instalada (PETI) es de 37630,00 kW y la potencia eléctrica total disponible (PETD) es de 31985,50 kW para el grupo de tecnologías instaladas. La figura 6 muestra el comportamiento de la PETI y la PETD.



**Figura 6**

La diferencia que muestra la figura 6 es que para carga base y carga intermedia el factor de reserva 18%, que representa una potencia eléctrica de 7428,00 kW .

Con las tecnologías instaladas se obtuvo una producción de energía eléctrica como muestra la figura 7.



**Figura 7**

Como se puede observar se puede vender energía eléctrica ya que la electricidad prácticamente no se puede almacenar en una base a gran escala, por lo que tiene que ser producida en el mismo instante en que se consume, es decir; la generación total en un sistema de alimentación siempre tiene que ser igual al consumo total, más las pérdidas.

El costo unitario (Cu) para cada carga se puede observar en la tabla 6 y el promedio de producción de 0.09 \$/kW, este valor se debe al precio del gas natural ya que la tecnología que predomina utiliza este combustible.

**Tabla 6: Costo unitario.**

<b>Cu</b>	<b>\$/kWh</b>
g1.c1	0.13
g1.c2	0.07
g1.c3	0.08

Durante el alcance temporal existe un incremento en carga pico de 10056,00 kW y 8468000,00 kWh/año en potencia eléctrica y demanda de energía eléctrica respectivamente.

**Tabla 7: Resultados del incremento de carga.**

Tecnología de generación	Hyundai 5H17/24G
NTU	23
PETI (kW)	11891,00
PETD (kW)	10107,00
PEE (kWh/año)	84902000,00
Costo de generación (\$/año)	6715874,721
Costo unitario (\$/kWh)	0,08

La emisión de CO<sub>2</sub> con esta combinación de tecnologías a instalar en el alcance temporal es de 187778,70 Ton/año.

### **3.5. Conclusiones Parciales**

- El modelo matemático permite la selección de la combinación óptima de unidades de tecnologías de generación eléctrica.
- La selección óptima de tecnologías a instalar para el alcance temporal es de 72, donde tiene predominio Hyundai 5H17/24G y Hyundai 7H17/24G con 23 y 29 respectivamente.
- El margen de reserva obtenido representa el 18 % del total de la capacidad instalada.

## **Conclusiones Generales**

-El desarrollo de un modelo de planificación de la energía es una tarea difícil. Hay aspectos a tener en cuenta como:

- Estructura general de modelado.
- Caracterización general del modelo.
- Técnicas de modelado.
- Formulación del modelo.
- Lenguaje de modelado.

-Se desarrolla el modelo matemático para la combinación de tecnologías de generación a instalar para cubrir la demanda de potencia del territorio.

-El modelo matemático obtuvo un resultado de 72 tecnología de generación con una potencia de 49521,00 kW.

## **Recomendaciones**

1. Adicionar otras tecnologías que utilicen recursos renovables, esto permitirá que las tecnologías con menores impactos ambientales resulten competitivas ante las convencionales con menores costos iniciales.
2. Incluir en el modelo matemático la venta de energía eléctrica y la demanda de calor para reducir los costos.
3. Introducir en la función objetivo parámetros que tomen en cuenta las emisiones.

## Bibliografía

1. Franco, P.S., Hacia un nuevo modelo energético: democracia, tecnología y territorio. 2013.
2. Belandria, N.J., Modelos para el análisis energético integral 2009.
3. CONAE, Guía Básica de la Generación Distribuida Octubre 2005, Comisión Nacional para el Ahorro de Energía México D.F.
4. Martinez, E., Electricidad y sistemas eléctricos. República Dominicana. 2009.
5. HERRERA, J.E.L., SUMINISTRO ELÉCTRICO. 2010.
6. Pereira, M.F.C., LA CALIDAD DEL SUMINISTRO DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA. 2009.
7. Coll P., P.C.y.C.G., Tecnología energética. 2000, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona: Barcelona, España.
8. Marielys Francisco Fernández, Á.C.M., Calidad de la energía y generación distribuida en Cuba. 2010.
9. Johnson, K., "Going Solar Is Harder Than It Looks, a Valley Finds" 2010.
10. Mavrotas, G., et al., A mathematical programming framework for energy planning in services' sector buildings under uncertainty in load demand: the case of a hospital in Athens. Energy Policy, 2008. 36(7): p. 2415–29.
11. Dimopoulos, G. and A. Frangopoulos, Optimization of energy systems based on evolutionary and social metaphors. Energy, 2008. 33: p. 171–9.
12. Nijcamp, P. and A. Volwahren, New directions in integrated energy planning. Energy Policy, 1990. 18: p. 764-773.
13. Brownstein, R. The California Experiment, Atlantic Monthly. 2009; Available from: <http://www.theatlantic.com/doc/200910/california-energy>.
14. Andrews, C. and S. Govil, Becoming proactive about environmental risks: regulatory reform and risk management in the US electricity sector. Energy Policy, 1995. 23: p. 885-892.
15. Beccali, M., M. Cellura, and M. Mistretta, Decision-making in energy planning. Application of the Electre method at regional level for the diffusion of renewable energy technology. Renewable Energy, 2003. 28 p. 2063–2087.

16. Kaya, T. and C. Kahraman, Multicriteria renewable energy planning using an integrated fuzzy VIKOR & AHP methodology: The case of Istanbul. *Energy*, 2010. 35(6): p. 2517-2527.
17. APDC, *Integrated Energy Planning: A Manual in Energy Data, Energy Demand*. 1985, Asian & Pacific Development Centre: Kuala Lumpur.
18. FAO, *Guide and for Training in the Formulation of Agricultural and Rural Investments Projects. Introduction to the guide*. 1986, Food and Agriculture Organization of the United Nations: Rome FOA.
19. WorldBank, *World Development Report : Infrastructure for Development*. 1994, Oxford University: New York.
20. Cortés, M., *Introducción a la investigación de operaciones*. 1999, Guayaquil: Universidad de Guayaquil.
21. Hiremath, R., S. Shikha, and N. Ravindranath, Decentralized energy planning; modeling and application—a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2007. 11 p. 729 – 752.
22. Jebaraj, S. and S. Iniyan, A review of energy models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2006. 10: p. 281-311.
23. Nkanka, B.N., *Planificación Energética en los Países en Vías de Desarrollo. Caso de la República Democrática del Congo*. 2009.
24. Beeck, N.v., *Classification of Energy Models*. 1999.
25. Richard Loulou, G.G., Ken Noble, *Documentation for the MARKAL Family of Models*. 2004.
26. Fernández, A.I.O., *Centrales térmicas I*. 1993.
27. Rizhkin, V.Y., *Centrales termoeléctricas* 1979.
28. Llamas, P.L., *Instrumentos de regulación ambiental en el sector eléctrico*.
29. O`Ryan, R., *Diseño de un Modelo de Proyección de Demanda Energética Global Nacional de Largo Plazo*. 2008, PROGRAMA DE GESTIÓN Y ECONOMÍA AMBIENTAL (PROGEA): Chile.
30. McCarthy, Y., Ogden, *Assessing Strategies for Fuel and Electricity Production in a California Hydrogen Economy*. 2006.
31. Eloy Fernández Domínguez , J.X.B., *Explotación de la Generación Eléctrica en el Sistema Ibérico*.

32. Hiremath, R.B., Shikha, S. and Ravindranath, N.H, Decentralized energy planning; modeling and application-a review. Bangalore : Elsevier. 2005.
33. Linares, P.a.R., C. A multiple criteria decision making approach for electricity planning in Spain: economics versus environmental objectives. Madrid. 2007.
34. Robichaud, V., An Introduction to GAMS. 2010.
35. Cánovas, M.J., Optimización matemática aplicada. Enunciados, ejercicios y aplicaciones del mundo real con Matlab. 2010.
36. Loulou, R., Goldstein, G and Noble, K, Documentation for the MARKAL Family of Models. s.l. : <http://www.etsap.org/tools.htm>. 2004.
37. Conzelmann, G., Greenhouse Gas Mitigation Analysis Using ENPEP – A Modeling Guide. 2002, Prepared for the International Atomic Energy Agency: Vienna, Austria.
38. Sbroiavacca, N.D., 13er Seminario-Taller sobre Política Energética para el Desarrollo Sustentable y el uso del Modelo LEAP 2014: San Carlos de Bariloche, Río Negro, Argentina.
39. Kotas, T.J. (1995) The Exergy Method Of Thermal Plant Analysis.
40. Herrera, S.D., Manual de gestión (MAGEST). Generación Distribuida de Electricidad en Cuba. 2009.
41. Castellanos., M.R.M., Economía de la energética. 1986.
42. GUZMAN, C.A., Matemáticas financieras para toma de decisiones. . 2009.
43. Solorzano, R., Costos fijos y variables. 2011, MINISTERIO DEL PODE POPULOAR PARA LA EDUCACION SUPERIOR INSTITUTO UNIVERSITARIO POLITECNICO DE LOS LLANOS ADMINISTRACION NOCTUNA VALLE DE LA PASCUA-GUARICO.
44. WITNEY, B., Choosing and using farm machines. 1995 Land Technology. p. pp. 129-204.
45. TURNER, M., Depreciation rates for farm machinery. 1993 The Agricultural Engineer

# Anexos

## Anexo 1

### MARKAL y MARKAL-MACRO

A continuación se presenta una esquematización del flujo energético en MARKAL:

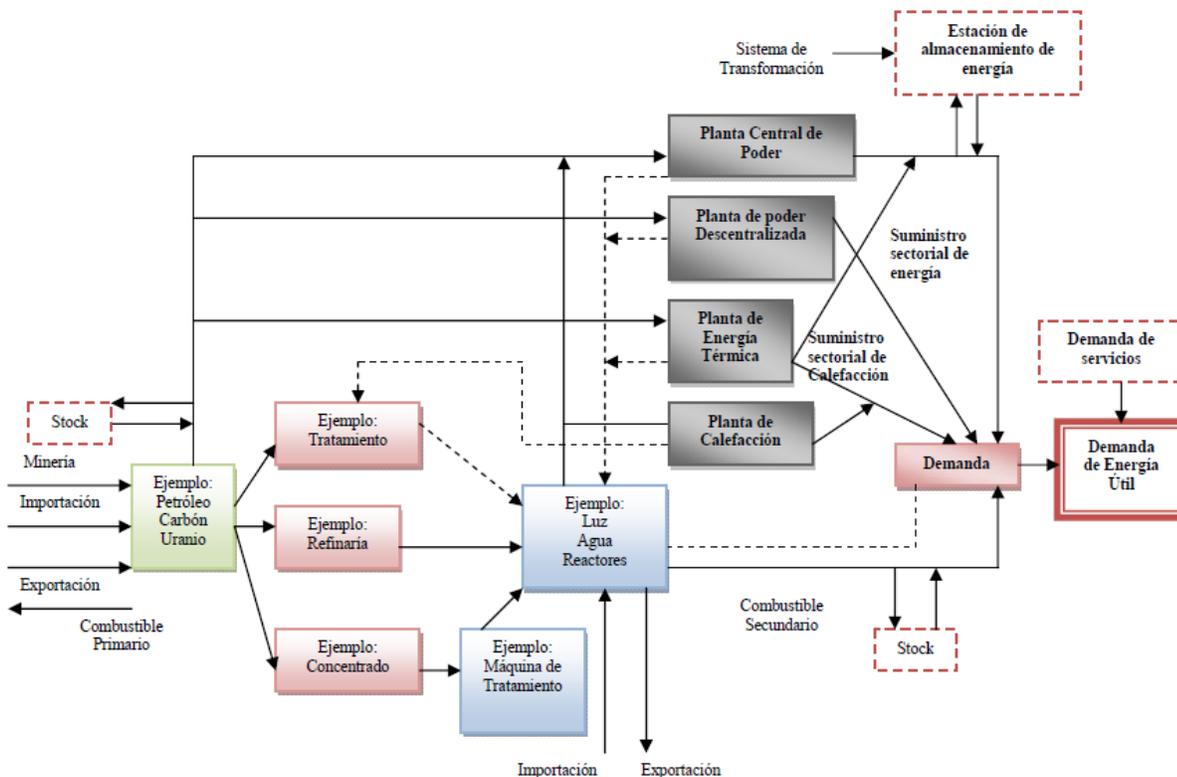


Figura 8. Esquema de flujo energético en MARKAL.

El esquema de flujo de energía muestra las interrelaciones que se producen para llegar a la demanda final, primero considerando combustibles primarios y variable de stock, controlando por importaciones y exportaciones. Luego, combustibles secundarios y variable de stock, controlando por importaciones y exportaciones. Finalmente se encuentran los centros de transformación que satisfacen la demanda final.

## ENPEP

Módulos que lo conforman, cuya interrelación se muestran en la siguiente figura:

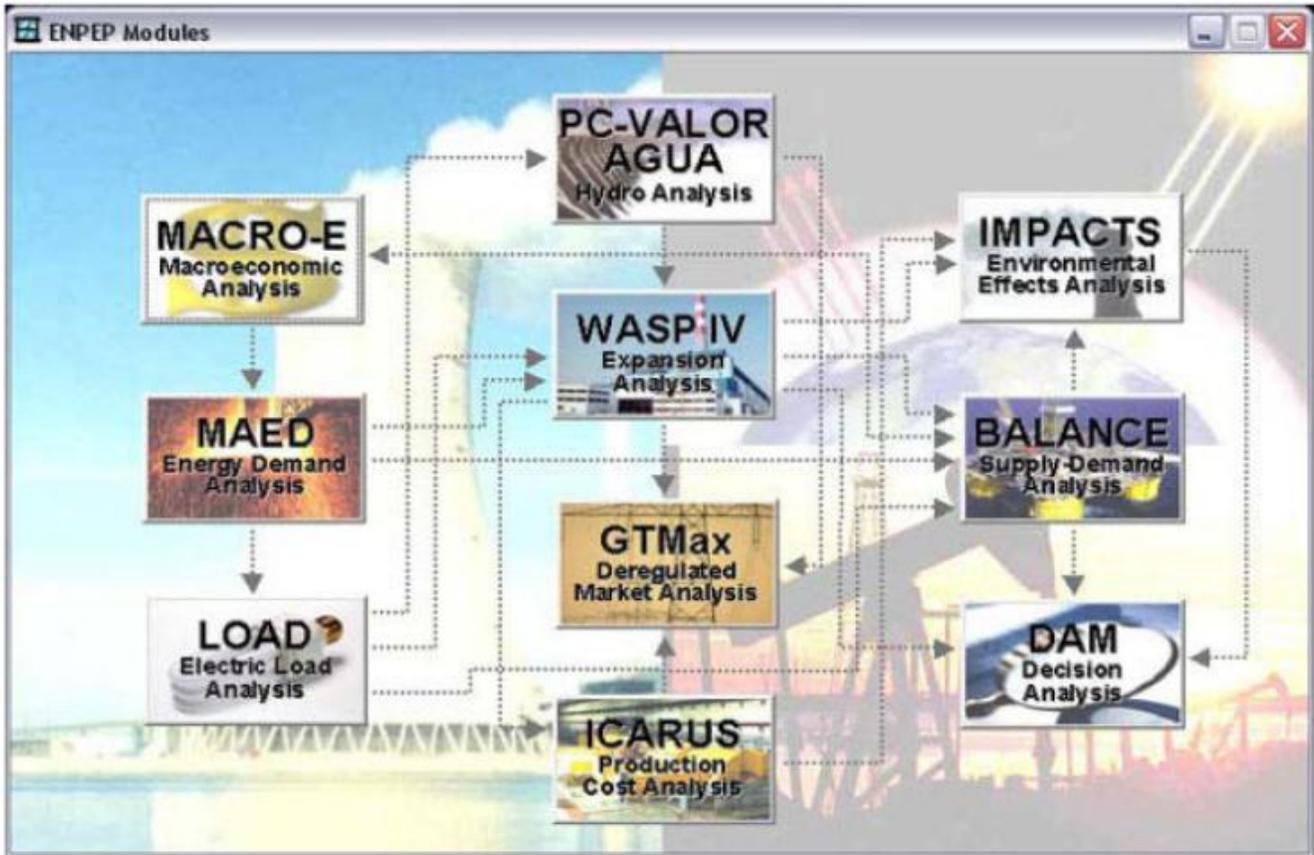


Figura 9: Módulos de ENPEP.

En breve descripción de los módulos:

MACRO-E: Este módulo realiza la retroalimentación entre el sector energético y el resto de la economía.

LOAD: Carga eléctrica horaria y generación de de curva de duración para usos de otros módulos de ENPEP

PC-VALORAGUA: Estrategia óptima de generación para un parque Hidrotérmico.

WASP: Alternativas de expansión de la generación a menor costo.

GTMax: Operación de Sistema Energético en Mercados Desregulados.

ICARUS: Confiabilidad y perspectiva económica de alternativas de expansión de la generación de electricidad.

IMPACTS: Daño físico y económico de la contaminación del aire.

DAM: Herramienta de análisis de decisión para evaluar tradeoffs entre aspectos técnicos, económicos y medioambientales.

## LEAP

Modelo de energías integradas asociadas a un año base y escenarios posibles, basados en contabilidad de flujos energéticos y simulación de modelos aproximados. LEAP tiene un manejo de datos flexible e intuitivo. Su ámbito de operación incluye: demanda, emisiones GHG, análisis de costo-beneficio social entre otros. LEAP es abordado más intensamente en otro apartado de este informe.

Un esquema general del proceso de cálculo realizado por el LEAP se presenta en la siguiente figura:

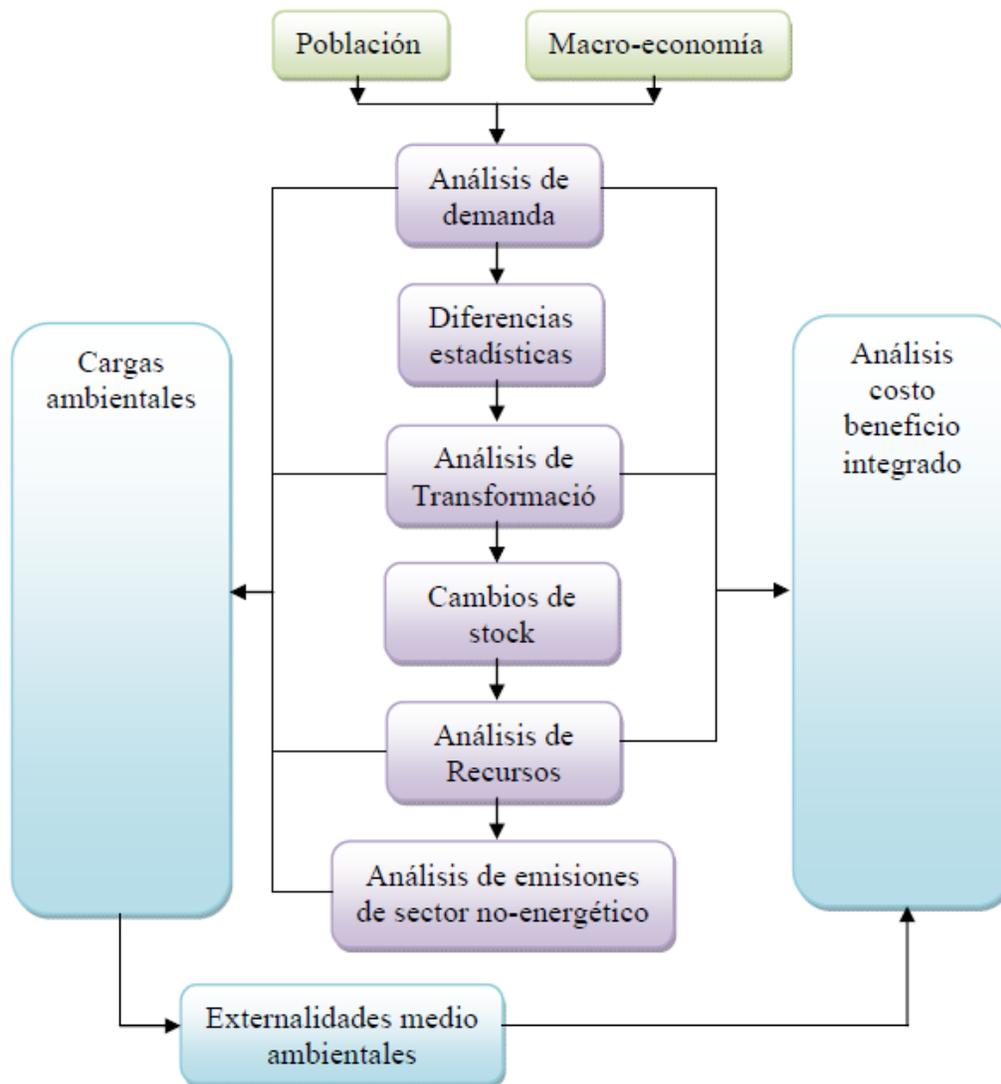
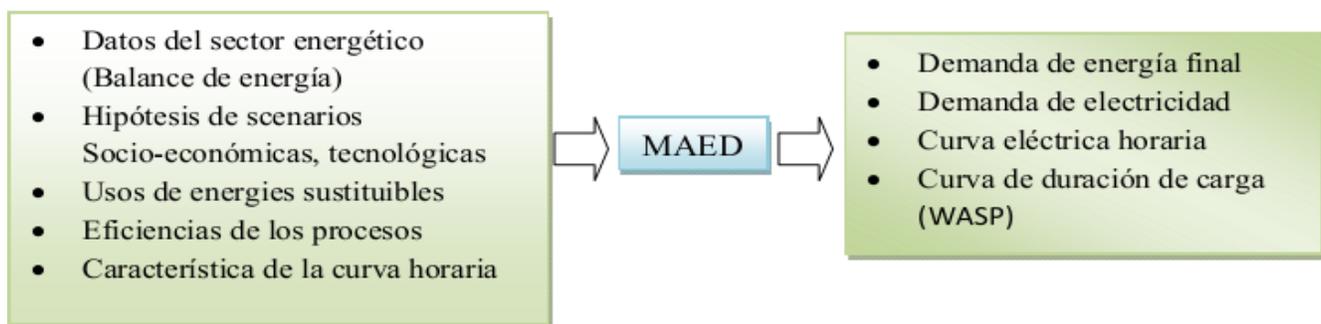


Figura 10. Proceso de cálculo del LEAP.

## MAED

El modelo Model for Analysis of the Energy Demand (MAED) fue desarrollado por la Agencia Internacional de Energía Atómica y es un modelo de simulación diseñado para evaluar la demanda de energía de un país o una región en el mediano y largo plazo. Permite determinar el efecto de cambios estructurales sobre la demanda de energía. Para ello, realiza un análisis detallado de los sistemas sociales, económicos y tecnológicos. También permite observar la evolución de los mercados potenciales para cada forma de energía electricidad, carbón, petróleo, gas y solar. Se puede esquematizar de manera sencilla el MAED de la siguiente forma:



### Anexo 2: Otros datos de las tecnologías de generación.

Tecnología	Tipo	Recurso energético	Régimen de funcionamiento	Modo de trabajo
Hyundai 7H21/32	MCI	Fuel Oil	Continuo	Fijo
Hyundai 5H17/28	MCI	Fuel Oil	Continuo	Fijo
Hyundai 6H17/28	MCI	Fuel Oil	Continuo	Fijo
Hyundai 7H17/28	MCI	Fuel Oil	Continuo	Fijo
Hyundai 8H17/28	MCI	Fuel Oil	Continuo	Fijo
Hyundai 5H17/24G	MCI	Gas natural	Continuo	Variable
Hyundai 7H17/24G	MCI	Gas natural	Continuo	Variable
Hyundai 9H17/24G	MCI	Gas natural	Continuo	Variable
Hyundai 12H17/21V	MCI	Diesel	De tiempo limitado	Variable
Hyundai 16H17/21V	MCI	Diesel	De tiempo limitado	Variable