

UCLV
Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas



FIMI
Facultad de
Ingeniería Mecánica
e Industrial

**Centro de Estudio y Tecnologías
Ambientales**

TRABAJO DE DIPLOMA

**Potencialidad del OSeMOSYS como herramienta
para la planeación energética; aproximación a Villa Clara
como caso de estudio**

Autor: Javier Alejandro de Armas Carreira

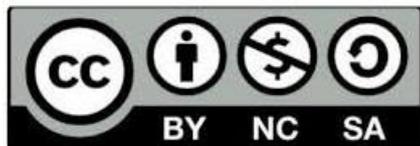
Tutor: Dr. Víctor Samuel Ocaña Guevara

Santa Clara , 6 del 2018
Copyright©UCLV

Este documento es Propiedad Patrimonial de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, y se encuentra depositado en los fondos de la Biblioteca Universitaria “Chiqui Gómez Lubian” subordinada a la Dirección de Información Científico Técnica de la mencionada casa de altos estudios.

Se autoriza su utilización bajo la licencia siguiente:

Atribución- No Comercial- Compartir Igual



Para cualquier información contacte con:

Dirección de Información Científico Técnica. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Carretera a Camajuaní. Km 5½. Santa Clara. Villa Clara. Cuba.
CP. 54 830

Teléfonos.: +53 01 42281503-1419

“El desarrollo del hombre depende fundamentalmente de la invención. Es el producto más importante de su cerebro creativo. Su objetivo final es el dominio completo de la mente sobre el mundo material y el aprovechamiento de las fuerzas de la naturaleza a favor de las necesidades humanas”.

Nicola Tesla

Resumen

El presente trabajo es un acercamiento detallado al modo de simulación energética empleado por el OSeMOSYS para la determinación de las tecnologías más eficientes a emplear en un modelo determinado. Se utiliza el MoManI como sistema de gestión de bases de datos, con el fin de la simplificación del trabajo y aumentar la eficiencia del tiempo empleado. Los datos obtenidos se toman del anuario estadístico de la República de Cuba para la provincia de Villa Clara, y es, a partir de los mismos donde se realizan las simulaciones pertinentes con sus modificaciones, para una primera implementación a gran escala de dicho sistema en el sistema energético nacional. Posteriormente se realizan variaciones de los datos para comprobar cómo se comporta el modelo ante variaciones pequeñas en el sistema de datos. Con estos hechos se arriban a conclusiones específicas que determinan al OSeMOSYS como un sistema, no solo eficiente, sino, con suficiente potencial para una implementación a gran escala al sistema energético nacional.

Abstract

The present work is a detailed approach to the energy simulation mode used by OSeMOSYS to determine the most efficient technologies to use in a given model. The MoManI is used as a database management system, in order to simplify the work and increase the efficiency of the time spent. The data obtained are taken from the statistical yearbook of the Republic of Cuba for the province of Villa Clara, and it is from them where the relevant simulations are carried out with their modifications, for a first large-scale implementation of said system in the national energy system. Later variations of the data are made to check how the model behaves before small variations in the data system. With these facts, specific conclusions are arrived at that determine OSeMOSYS as a system, not only efficient, but with sufficient potential for a large-scale implementation of the national energy system.

Índice:

Introducción.....	1
Hipótesis	4
Objetivo Principal	4
Objetivos Específicos	4
Capítulo I: Marco Teórico.	5
1.1 Conceptos y objetivos de la planificación energética.....	5
1.2 Planificación energética y el paradigma de la sostenibilidad	7
1.3 Planificación energética para fuentes de energía renovables.....	10
1.4 Metodologías multicriterial empleadas en la planificación energética.....	13
1.5 Criterios y subcriterios empleados en la planificación energética	14
1.5.1 Criterios y subcriterios técnicos.....	14
1.5.2 Criterios y subcriterios medioambientales.....	16
1.5.3 Criterios y subcriterios económicos.....	17
1.5.4 Criterios y subcriterios político-sociales	17
1.6 OSeMOSYS y su función como modelo de cálculo energético.	18
1.6.1 Razón fundamental	18
1.6.2 El modelo OSeMOSYS	19
1.6.3 Criterios y Subcriterios empleados por el OSeMOSYS.....	20
1.6.3.1 Criterios y Subcriterios técnicos.....	20
1.6.3.2 Criterios y Subcriterios medioambientales.....	21
1.6.3.3 Criterios y Subcriterios económicos.....	22
1.6.3.4 Criterios y Subcriterios político-sociales	22
1.7 MOMANI como sistema de gestión de bases de datos para OSeMOSYS	22
1.7.1 Modelos de cálculo.....	23
1.7.2 Constantes empleadas en el MoManI.	23
1.7.3 Parámetros ingresados en el MoManI.....	23
1.7.4 Exposición de los resultados.....	23
1.8 Conclusiones del Capítulo	24
Capítulo II: Formulación del modelo de OSeMOSYS y creación de la base de datos.	25

2.1 Descripción del Lenguaje Computacional	25
2.2 Análisis Matemático del Modelo	26
2.2.1 Función Objetivo (OBJ)	26
2.2.2 Costos (TDC).....	26
2.2.3 Costos de operación (OC)	26
2.2.3.1 Costo de Capital (CC).....	27
2.2.3.2 Costo de salvamento (SV)	27
2.2.4 Suficiencia de capacidad (CA).....	27
2.2.4.1 Suficiencia de capacidad “A” (CAa).....	27
2.2.5 El balance de energía (EB).....	28
2.2.5.1 Balance de energía “A” (EBa).....	28
2.2.5.2 Balance de energía “B” (EBb).....	29
2.2.6 Restricciones (TCC – NCC – AAC – TAC – RM – RE).....	29
2.2.7 Contabilidad de emisiones (E)	30
2.2.7.1 Penalización de emisiones (E).....	30
2.2.7.2 Límite anual (E)	30
2.2.7.3 Límite de período modelo (E)	30
2.3 Creación de las bases de datos con la implementación del MoManI como herramienta de gestión.....	31
2.3.1 Creación del sistema energético de referencia (SER).....	31
2.3.2 Definición de las ecuaciones y los parámetros que tendrá en cuenta el modelo.	33
2.3.3 Definición de las constantes.	34
2.3.3.1 Rotación diaria del modelo: “DAILYTIMEBRACKET”	34
2.3.3.2 Definición de la composición de las temporadas “DAYTYPE” ...	34
2.3.3.3 Emisiones revisadas en el modelo: “EMISSION”	35
2.3.3.4 Combustibles utilizados: “FUEL”	36
2.3.3.5 Modo de operación para las tecnologías de almacenamiento: “MODE_OF_OPERATION”	36
2.3.3.6 Nombre de la región a estudiar: “REGION”	37
2.3.3.7 Temporadas analizadas en el modelo: “SEASON”	37
2.3.3.8 Constante de almacenamiento: “STORAGE”	38
2.3.3.9 Definición de tecnologías de trabajo para el sistema: “TECHNOLOGY”	38
2.3.3.10 Tiempos de estudio del modelo: “TIMESLICE”	40

2.3.3.11 Años a analizar por el modelo: "YEAR"	40
2.3.4 Parámetros del Modelo.....	41
2.3.4.1 Demandas	41
2.3.4.2 Tiempo.....	42
2.3.4.3 Costos	43
2.3.4.4 Relaciones de actividad.....	44
2.4 Conclusiones del Capítulo.....	45
Capítulo III: Análisis de resultados entre las simulaciones del modelo.	46
3.1 Análisis de resultados para el caso base de Villa Clara.....	46
3.1.1 Demandas.	46
3.1.2 Capital Invertido.....	47
3.1.3 Emisiones anuales.....	47
3.1.4 Uso de las tecnologías.	48
3.1.5 Producción por tecnologías.	49
3.2 Comparación del caso base con la modificación en la demanda de un 2% en los últimos cuatro años.	50
3.2.1 Demandas.	50
3.2.2 Capital Invertido.....	50
3.2.3 Emisiones anuales.....	51
3.2.4 Uso de las tecnologías.	52
3.2.5 Producción por tecnologías.	52
3.3 Comparación del caso base con los costos presentes en los combustibles fósiles y renovables.....	53
3.3.1 Demandas.	53
3.3.2 Capital Invertido.....	54
3.3.3 Emisiones anuales.....	54
3.3.4 Uso de las tecnologías.	55
3.3.5 Producción por tecnologías.	55
Conclusiones Generales:	57
Recomendaciones:.....	58
Bibliografía:	59
Anexos:	64
Anexo 1: Formulación matemática del modelo.	64

Anexo 2: Principales parámetros a tener en cuenta en la simulación del modelo.....	68
--	----

Introducción

A partir del año 1990 la población mundial se ha incrementado más de cuatro veces, la renta ha crecido por un factor de veinticinco y la utilización de la energía primaria ha aumentado más de veintidós veces (BP, 2017). A partir del año 1966 el consumo de energía mundial se ha incrementado en todas sus formas. El portador energético más cotizado continúa siendo el petróleo y a su vez el más dependiente. Comparadas con las fuentes convencionales, las energías renovables, se utilizan en un menor grado; aunque presentan un alza a partir del año 2006 (figura 1.1)

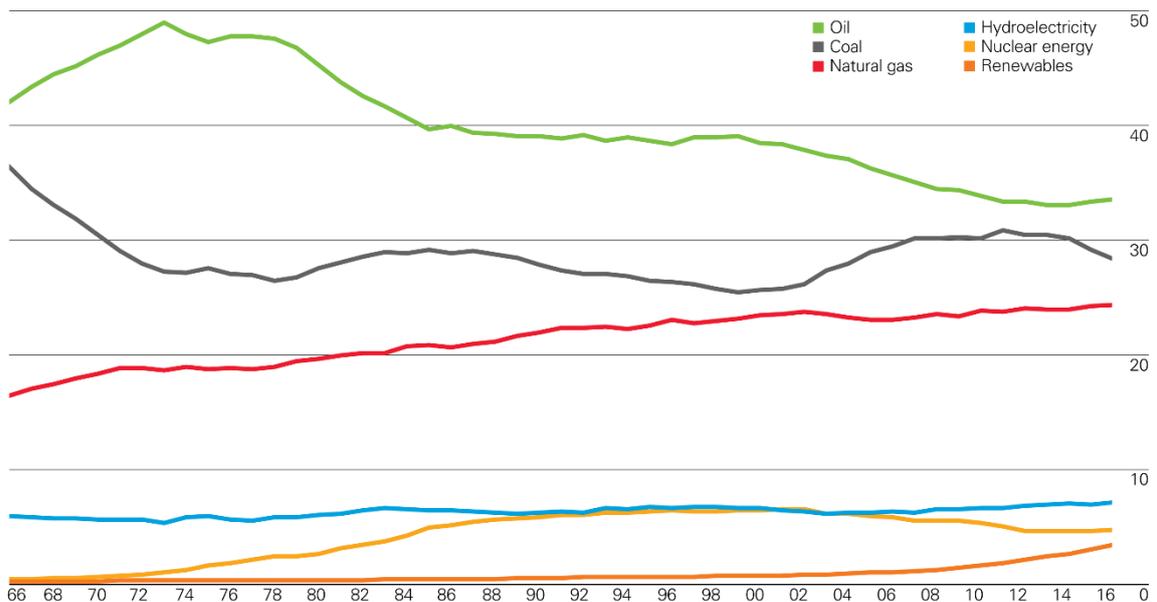


Figura 1.1 Consumo mundial de energía (BP, 2017).

Según la “Energy and Climate Change (WEC.)” (WEC, 2007) para dar respuesta al problema del cambio climático habría que enfocarse en el sector energético. De las emisiones anuales de gases de efecto invernadero, dos tercios son debido a la utilización de sistemas de energía convencional y contribuyen al 80% de las emisiones mundiales de CO₂. Este sector es el responsable directo de la mitad de las emisiones globales del metano.

Pero el sector energético es clave para el crecimiento económico y mejora además la calidad de vida, por lo que el suministro energético ha de estar a disposición de todos y su producción debe ser sostenible a nivel local (Pinell, 2004). Debido a esto, las políticas medioambientales existentes que conciernen a dicho sector se han enfocado en dos ámbitos: el fomento de prácticas encaminadas a lograr el mayor grado de ahorro y de eficiencia energética, y el apoyo a la generación de energía mediante fuentes alternativas más respetuosas con el entorno (Piñeiro and Romero, 2001).

Las utilidades de fuentes alternativas de energía pueden ser empleadas para incrementar el desarrollo económico y social en aras de mejorar la calidad de vida de sus habitantes e impulsar la producción de alimentos. De modo que, un sistema capaz de analizar los sistemas energéticos presentes en una región

y determinar cuál o cuáles y en qué medida se deben de aplicar para lograr un esquema energético eficiente que favorezca el desarrollo sostenible se hace ineludible

Según Canedo y Arriaza (*Canedo, 2005, Arriaza, 2005), el suministro de energía usando fuentes renovables locales constituye una opción viable para garantizar las actividades propias de una zona determinada de modo sostenible. Existen muchos sistemas energéticos que han logrado la descentralización parcial o completamente de modo exitoso [9]. Esto incrementa complejidad en la toma de decisiones entre las opciones de múltiples tecnologías y de los recursos energéticos aplicables en una comunidad, de esta forma la implementación en la misma de modelos de cálculo energéticos garantiza de forma eficiente la sostenibilidad en las tecnologías a aplicar y se logra una reducción de emisiones. Por otra parte, es necesario el cumplimiento de una variedad de criterios, a saber: económicos, medioambientales, sociales, tecnológicos, entre otros. (Bajpai and Dash, 2012, Theodorou et al., 2010, Pohekar and Ramachandran, 2004)

Dentro de la amplia gama de métodos que conforman lo que se denomina Multi-Criteria Decision Making (MCDM), hay algunos usados como apoyo a la planificación energética. Dentro de ellos figura un método desarrollado por Saaty (Saaty, 1980) llamado Analytic Hierarchy Process (AHP) que, aunque se ha usado para la toma de decisiones en una variedad grande de campos, también se ha aplicado en el campo de la energía para determinar las prioridades entre alternativas (Saaty et al., 2007). En muchas ocasiones se ha combinado el método AHP con otros por ejemplo, los métodos multicriteriales Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) desarrollada por (Hwang and Yoon, 1981), Kaya and Kahraman los combinan para determinar la importancia relativa entre los criterios usados en un proyecto con fuentes renovables.

Del mismo modo, otro método usado en la planificación energética es el Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations (PROMETHEE), para encontrar las alternativas energéticas de mayor rango de preferencias del decisor (Behzadian et al., 2010), este método ha sido muy usado para la definición de alternativas energéticas con fuentes renovable para una región (Pohekar and Ramachandran, 2004). Así mismo, el Elimination et Choice Translating Reality (ELECTRE) es un método semejante al PROMETHEE usado para la selección de alternativas y establece un orden de preferencia de mejor rango de los criterios cualitativos y cuantitativos, de este modo ordena las alternativas energéticas (Ming-Che and Ting-Yu, 2011).

Generalmente cuando se realizan procesos de optimización energética es necesario optimizar más de un objetivo por lo que es necesario la implementación de optimización multiobjetivo para lograr una región donde la mayoría de los objetivos se logren de forma óptima. La optimización multiobjetivo tiene una variedad amplia de métodos un ejemplo de esto es el presentado por

(Ren et al., 2010) que formulan un modelo de optimización energética con programación lineal para un pequeño sistema aislado. En él se busca cumplir con el objetivo económico (minimización de costes) y el medioambiental (minimización de emisiones de CO₂) y ambos están en conflicto, para ello utilizan el método Programación Compromiso basado en la distancia de Chebyshev(Ashok, 2007).

Investigadores como (Kanase-Patil et al., 2010), aplican un modelo de programación lineal, para establecer un sistema híbrido comparando cuatro posibles escenarios basado en los costes de la producción de electricidad de cada escenario. Asimismo, se han desarrollado métodos basados en Algoritmo Genético aplicado a la planificación energética con el objetivo de configurar un sistema de suministro híbrido de energía con la combinación de métodos de solución como el TOPSIS para comunidades rurales aisladas (Perera et al., 2013). Por su parte Nasiraghdam H (Nasiraghdam and Jadid, 2012), realizan la misma tarea utilizando un algoritmo multiobjetivo de colonia de abejas.

Paralelamente, se han desarrollado una variedad amplia de aplicaciones informáticas que dan soporte a muchos de los modelos y métodos que anteriormente se mencionan. Entre ellos, se encuentra el modelo PVSol, basado en una metodología que diseña una conexión a red de sistemas fotovoltaicos. Igualmente, el HOMER (Hybrid Optimization Model for Electric Renewable), es un software que simula diferentes configuraciones de sistemas eléctricos con fuentes renovables para sistemas descentralizados, optimiza los costes de ciclos de vida y genera resultados de análisis sensible para la mayoría de los datos de entrada (Saheb-Koussa et al., 2011, Borda Ángel et al., 2011).

SURE (Sustainable Rural Energy) también es una aplicación informática que sirve de soporte a la selección de tecnologías apropiadas de suministro energético, es un modelo multicriterial basado en la teoría de los Medios de Vida Sostenibles que evalúa cinco indicadores llamados capitales de la comunidad (Henao et al., 2012).

Debido a la diversidad de recursos energéticos renovables y convencionales de comunidades, existe la posibilidad de utilización de un procedimiento multicriterial-multiobjetivo de planificación energética a comunidades que valore algunos aspectos tenidos en cuenta de manera insuficiente en la literatura revisada como la aceptación social de la energía.

OSeMOSYS es un modelo completo de optimización de sistemas para la planificación energética a largo plazo. El código de trabajo inicial de OSeMOSYS se publicó en 2008 en una presentación en el International Energy Workshop en París. Luego se llamó SoftMESSAGE, más tarde se renombró OSeMOSYS y se creó un sitio web dedicado el año siguiente. Hasta donde se conoce, este fue el primer marco (completo) de modelado de optimización del sistema de energía cuyo Código y Solver fueron totalmente de código abierto(M. Howells, 2011).

OSeMOSYS está diseñado para llenar un vacío en la caja de herramientas analíticas disponible para la comunidad de investigación energética y los planificadores de energía en los países en desarrollo. En la actualidad existe un conjunto útil pero limitado de modelos de sistemas de energía accesibles. Estas herramientas a menudo requieren una inversión importante en términos de recursos humanos, capacitación y compras de software para aplicarlas o desarrollarlas aún más. Además, su estructura a menudo es tal que la integración con otras herramientas, cuando es posible, resulta muy eficiente aunque puede presentar altas dificultades de implementación. (M. Howells, 2011)

Hipótesis

Es posible modelar, a partir de OSeMOSYS y sobre la base de minimizar el costo total descontado, el comportamiento energético la provincia Villa Clara estructurando y dimensionando su sistema energético.

Objetivo Principal

Realizar una aproximación a la modelación, a partir de OSeMOSYS y sobre la base de minimizar el costo total descontado, el comportamiento energético la provincia Villa Clara estructurando y dimensionando su sistema energético.

Objetivos Específicos

1. Realizar un análisis de las herramientas más usadas para la planeación energética.
2. Valorar el potencial del OSeMOSYS para determinando su eficiencia y ventajas.
3. Modelar, a partir de OSeMOSYS y sobre la base de minimizar el costo total descontado, el comportamiento energético la provincia Villa Clara estructurando y dimensionando su sistema energético.

Capítulo I: Marco Teórico.

El presente capítulo representa una ardua revisión bibliográfica sobre muchos documentos relacionados con la planificación energética y el modelo de cálculo matemático de planificación energética OSeMOSYS (Open Source Energy Model System). En el mismo se expone tanto la importante labor que cumple la planificación energética global como la importancia y el deber que acumula con el planeta la utilización de las energías renovables. Se realizan comparaciones de sostenibilidad con respecto a los dos grupos de energías primarias (convencionales y renovables) y se abordan las bases que tiene la toma de decisión multicriterial con respecto al fenómeno de la energía. Se muestran y definen cuales son los principales criterios y subcriterios que han de tenerse en cuenta a la hora de realizar el proceso de planificación energética. Posteriormente se define la base de funcionamiento del OSeMOSYS, sus principales bloques y como se estructura cada uno, luego se explica detalladamente como funciona cada parte del código fuente del mismo. Y para concluir se realizan conclusiones parciales del capítulo donde se exponen los principales resultados y conclusiones a las que se han arribado.

1.1 Conceptos y objetivos de la planificación energética

El aumento de la calidad de vida de la población depende en gran medida de la estabilidad de los servicios energéticos. La planificación energética es entonces un punto clave para el logro de este objetivo, de ella nacen las directrices para un adecuado uso de los recursos energéticos escasos, así como las configuraciones de tecnologías de transformación energética para una nación, región o localidad; teniendo en cuenta los costes, el daño al medioambiente y que sean socialmente aceptados. Esta idea apunta hacia la búsqueda del desarrollo energético sostenible que solo puede ser logrado por medio del cumplimiento de estas directrices y estrategias que emergen de una adecuada planificación energética.

Se ha comprobado que existen procedimientos matemáticos que sirven de apoyo a la toma de decisiones cuando los objetivos a lograr son variados y en conflicto. Por esto, es necesario realizar una revisión bibliográfica que permita conocer los modelos actuales de apoyo a la planificación energética de manera general, los modelos que configuran sistemas energéticos híbridos, así como los métodos de solución de estos modelos.

El consumo de energía es uno de los principales indicadores de desarrollo de una nación, debido a que existe una relación entre el modo de vida y la demanda de energía (BP, 2017). Hoy día se necesita encontrar un nuevo patrón, que brinde confianza y seguridad en el suministro energético.

Investigadores como Anne (Anne, 2007), resumen lo planteado anteriormente en unas pocas preguntas: ¿cuánto tiempo el mundo podrá sostener el consumo actual de recursos como el petróleo? o, ¿de qué maneras

se puede prevenir una crisis energética o un aumento de los costes de los combustibles?, del mismo modo, ¿por qué la seguridad energética y la calidad de vida de una nación depende necesariamente del petróleo?, ¿pueden las alternativas energéticas renovables desarrollarse rápidamente y sustituir el petróleo? y finalmente, ¿cuán profundas son las consecuencias de la producción de energía para el medioambiente y su uso, y qué se puede hacer al respecto? Sin dudas estas preguntas no tienen una única respuesta, pero sí tiene un eje central en el cual giran la misma idea: tratar de conservar el creciente consumo de energía para no afectar el nivel de vida alcanzado hoy día por la humanidad.

Para lograr mantener el suministro que satisfaga el consumo de energía se hace urgente practicar una adecuada administración de los recursos energéticos disponibles y una correcta selección de las tecnologías de transformación energética (James and van Groenendaal, 2003), asimismo lograr una mayor utilización de los recursos energéticos renovables (Turrini, 2006).

Por tanto, para responder de manera adecuada a los tópicos de esta problemática, es necesario profundizar en la Planificación Energética y los objetivos concretos que persigue. Para aprovechar con seguridad las tecnologías de transformación, lograr la eficiencia económica de los sistemas de administración de energía teniendo en cuenta la fragilidad del medioambiente se hace imprescindible la planificación energética (Mavrotas et al., 2008, Dimopoulos and Frangopoulos, 2008, Turrini, 2006).

Durante los años setenta del siglo pasado, se dirigieron esfuerzos al desarrollo de modelos que establecen una relación entre energía y economía, los que tuvieron como objetivo el pronosticar la demanda energética. Durante los años 1980, fueron cada vez mayores las preocupaciones medioambientales y se cambió el diseño de los patrones de la decisión para incluir aspectos medioambientales y sociales (Nijcamp and Volwahren, 1990).

La estructura energética moderna es muy compleja y tiene muchos aspectos a considerar, 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, entre otras (Andrews and Govil, 1995). Uno de los problemas más comunes de la planificación energética, para un sistema 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, estos elementos pueden ser tenidos en cuenta por separado o de manera combinada.

De esta manera, autores como Beccali (Beccali et al., 2003), definen 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”. De igual modo (Kaya and Kahraman, 2010), 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”.

Según (WorldBank, 1994, FAO, 1986, APDC, 1985), la planificación energética tiene cinco etapas principales:

- 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 que permite determinar la infraestructura de transformación energética más adecuada en la que se debe invertir. Los resultados obtenidos serán más adecuados en la medida que se logre evaluar y comparar las opciones tecnológicas que cumplan con restricciones sociales, medioambientales, económicas y tecnológicas. Tener en cuenta todos estos factores provoca altos niveles de incertidumbre a largo plazo, aumentando los costes de inversión en proyectos de este tipo. Por tanto, se puede afirmar que desarrollar hoy día una estrategia energética acertada se ha convertido en algo complejo.

1.2 Planificación energética y el paradigma de la sostenibilidad

Podemos señalar que no heredamos la tierra de nuestros padres, sino que la usamos prestada de nuestros hijos. Esta afirmación expone la idea de administrar adecuadamente los recursos naturales disponibles. La realidad actual difiere un poco de lo anterior, debido que contrariamente la especie humana ha crecido cuatro veces en los últimos cien años. Y, sin embargo, el consumo de todo tipo de recurso incluyendo los energéticos, se ha multiplicado por veinticinco (BP, 2017). Lo anterior evidencia una divergencia que innegablemente puede derivar en un caos en virtud del acelerado ritmo de gastos de recursos agotables.

La *Commission to the European Council* expuso un documento en el que señala que la energía es responsable del 80 % de toda la emisión de gases de efecto invernadero en la Unión Europea (UE); siendo responsable de buena parte de la contaminación atmosférica. Este documento también expone que la UE tiene la necesidad de crear un ambiente sostenible en aras de limitar el incremento de la temperatura a 2 °C como se predice que aumentará. Sin embargo, políticas energéticas actuales significarán un aumento de alrededor 5 % de las emisiones de CO₂ antes de 2030 y las emisiones globales se elevarían hasta el 55 %. Finalmente, concluye el documento, que las actuales políticas energéticas dentro de la UE aún no son sostenibles (WEC, 2007).

El desarrollo sostenible es un concepto conocido en todo el mundo debido a la necesidad de enfrentar las diversas crisis que hoy por hoy agobian a la humanidad sobre todo la energética y la medioambiental. Las políticas actuales de muchos países van enfocadas a la sostenibilidad, sin embargo, se plantean diferentes conceptos y modos de llevarla a cabo.

El objetivo del desarrollo sostenible es una mejora que se alcanzará mientras se mantienen los procesos ecológicos de los cuales la vida depende. En un nivel local, es una progresiva contribución positiva al bienestar económico, social y medioambiental de la comunidad en la cual opera (Twidell and Weir, 2006).

El concepto de desarrollo sostenible surgió en la década de los años 80 y fue planteado primero por la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza en 1980. Cuando se dio a conocer la Estrategia Mundial de la Conservación, la cual puntualizaba la sostenibilidad en términos ecológicos, pero con muy poco énfasis en el desarrollo económico, por lo que fue tachada de anti-desarrollista. Esta estrategia contemplaba tres prioridades: el mantenimiento de los procesos ecológicos, el uso sostenible de los recursos y el mantenimiento de la diversidad genética (Sáez, 2002). Según Ocaña (Ocaña, 2004), se han reconocido más de 200 definiciones desde diferentes puntos de vista científico, que van desde las ciencias ambientales, hasta las naturales y exactas, pasando por las ciencias técnicas y la sociología, entre otras, que han realizado importantes contribuciones al conocimiento y difusión mundial de la Sostenibilidad.

No obstante, existe una definición clara y universalmente aceptada planteada por *World Commission on Environment and Development* y es que el desarrollo sostenible es aquel “que satisface las necesidades del presente sin comprometer la habilidad de las generaciones futuras de satisfacer sus propias necesidades” (WCED, 1987). Esto se ha convertido en un principio rector dominante para la política en el siglo XXI. Por todo el mundo, políticos, industriales, ecologistas, economistas y teólogos afirman que este principio debe ser aplicado a nivel internacional, nacional y local.

Para Mulder (Mulder and Van Den Bergh, 2000), la sostenibilidad se refleja en un énfasis en el bienestar óptimo y las externalidades, la óptima asignación de recursos naturales y el crecimiento óptimo como mezcla de la asignación de recursos y la inversión de capital. De igual forma, otros trabajos realizados demuestran que existen tres aspectos fundamentales para lograr la sostenibilidad total de un sistema, a saber: la sostenibilidad ambiental, la sostenibilidad económica, y la sostenibilidad social (Jiménez, 2000, Elkington, 1997).

Teniendo en cuenta que el centro de la actividad humana son las actividades energéticas, principales causantes del cambio climático (WEC, 2007) y a la misma vez del desarrollo económico y de la calidad de vida de las personas

(Pinell, 2004). Entonces, son a estas actividades a las que se le debe prestar toda la atención para lograr un desarrollo sostenible global.

Algunos investigadores como Wall y Cornelissen (Cornelissen, 1997, Saaty, 1992), aseveran que la humanidad jamás alcanzará el paradigma de desarrollo sostenible hasta tanto no alcance la sostenibilidad energética, debido a que el centro, alrededor del cual gira la actividad material de las sociedades, es la energía. También este tipo de desarrollo es visto como fundamental para lograr la sostenibilidad.

Debido a esto, algunos países como Irlanda llevan a cabo estrategias con la finalidad de conseguir la sostenibilidad energética según el *Department of Communications, Marine and Natural Resources* (DCMNR, 2007), y se plantean aspectos como:

1. Garantizar la seguridad de las fuentes y la diversidad de los combustibles
2. Lograr una preparación para las interrupciones en el suministro energético y asegurar la flexibilidad del mercado con las reservas
3. Tratar el cambio climático a través de la reducción de las emisiones contaminantes
4. Acelerar el crecimiento de fuentes de energías renovables
5. Maximizar la eficiencia energética
6. Lanzar cambios estructurales a los mercados de la energía y de la electricidad para asegurar la competitividad y la elección de los consumidores.

Todos estos objetivos, pueden ser comunes para los países que acogen el desarrollo sostenible como una necesidad y una estrategia, no pueden ser alcanzables sin una debida planificación de las actividades en la producción, distribución y uso de la energía. Esta última puede ser la clave para lograr la sostenibilidad medioambiental y un desarrollo socialmente significativo, solo si está fuertemente centrado en la necesidad de un mercado desarrollo socioeconómico, debidamente articulando con las ofertas de energías a través de fuentes renovables (Nissing and Blottnitz, 2010).

Para alcanzar la sostenibilidad energética resulta necesario tener en cuenta cuatro aspectos fundamentales: la limpieza de la energía consumida, la proporción de la renovabilidad de la misma, la eficiencia de las transformaciones energéticas y de su degradación, así como la capacidad de un sistema de auto abastecerse. Por otro lado, (Ocaña, 2004) plantea que para lograr la sostenibilidad energética y el desarrollo sostenible es necesario pensar en una metodología que permita la selección de una matriz energética que responda a los principios anteriores.

Los aspectos mencionados evidencian una interdependencia entre la sostenibilidad y la planificación energética en virtud de que, para proyectar un

tipo de energía limpia para el consumo, pronosticar el grado de renovabilidad de la energía consumida, garantizar la eficiencia y el autoabastecimiento del sistema es necesaria la planificación. Este problema, no es solucionable fácilmente sin metodologías o herramientas que ayuden a la selección de las tecnologías de transformación, la configuración del sistema y su aplicabilidad según sea la disponibilidad de los recursos energéticos o portadores y las características de los consumidores.

1.3 Planificación energética para fuentes de energía renovables

En los últimos años, el cambio climático ha impulsado estudios e investigaciones a nivel internacional sobre los impactos que produce el uso y transformación de la energía sobre el medioambiente. En algunos se ha llegado a la conclusión que la generación local de calor, de electricidad y el uso local de los recursos energéticos renovables constituyen opciones prometedoras para proporcionar un suministro más seguro, eficiente y limpio de energía (DTI, 2007).

En la (tabla 1.1) se establece una comparación entre los suministros energéticos renovables y convencionales. Esta comparación, deja en relieve algunas ventajas que tienen las fuentes renovables sobre las convencionales, sobre todo en los aspectos relacionados con la sostenibilidad, la seguridad, y el impacto al medioambiente.

Las energías renovables podrían solucionar muchos de los problemas medioambientales (Santamarta, 2004). La explotación de fuentes de energía renovable (ER) ha ganado un enorme interés durante los últimos años. El conocimiento de los efectos negativos de los combustibles fósiles, la naturaleza transitoria de la dependencia en las importaciones de combustible fósil, y el advenimiento de las energías renovables alternativas, han forzado a muchos países, especialmente desarrollados para utilizar las energías renovables. Debido a que éstas son capaces de substituir las fuentes convencionales en una variedad de usos y a precios competitivos (Aras et al., 2004, Haralambopoulos and Polatidis, 2003).

Por otro lado, aunque las ER están ganando terreno a nivel mundial, aún en el sector rural aislado de muchos países en desarrollo no son utilizadas al nivel que se podría y es necesario un cambio en sus condiciones energéticas debido a que una interconexión a la red convencional resulta en muchos casos imposible económicamente.

Tabla 1.1. Comparación de los sistemas de fuentes renovables y convencionales (Twidell and Weir, 2006).

Parámetros de comparación	de Suministros de energía renovables	de Suministros de energía convencional
Ejemplos	Eólica, solar, biomasa	Carbón, petróleo, gas natural, minerales radiactivos
Recursos	Naturales, locales	Abastecimiento concentrado
Intensidad media inicial	Intensidad reducida, dispersa: $\leq 300 \text{Wm}^{-2}$	emisión a $\geq 100 \text{kWm}^{-2}$
Tiempo de vida de la fuente	Infinito	Finito
Coste de la obtención de la fuente	Sin costes	Cada vez más costoso
Coste del capital del equipamiento por kW de capacidad	Costoso, comunmente $\text{US}\$1000 \text{kW}^{-1}$	Moderado, quizás $\text{\$}500 \text{kW}^{-1}$ sin control de emisiones; costoso $> \text{US}\$1000 \text{kW}^{-1}$ con la reducción de emisiones
Variación y control	Fluctúa	Estable
Localización para el uso	Localmente	General y usos variados
Escala	A pequeña y moderada escala a menudo económica, a gran escala puede presentar dificultades	El incremento de la escala mejora a menudo los costes del suministro, a gran escala es favorecido con frecuencia
Habilidades	Interdisciplinario y variado. Amplia una gama de habilidades. Importancia de las ciencias biológica y en la agricultura	Estrecha relación con la ingeniería eléctrica e industrial. Gama estrecha de habilidades personales
Contexto	Tendencia a lo rural, la industria descentralizada	Tendencia a lo urbano, la industria centralizada

Tabla 1.1. Comparación de los sistemas de fuentes renovables y convencionales (Twidell and Weir, 2006). (Continuación)

Parámetros de comparación	Suministros de energía renovables	Suministros de energía convencional
Dependencia	Sistemas autosuficientes y aislados	Sistema dependiente de suministros exteriores
Seguridad	Generalmente seguro en operación	Con grandes peligros potenciales
Contaminación y daño medioambiental	Generalmente poco daño medioambiental, especialmente en la escala moderada	Contaminación ambiental intrínseca y común, especialmente del aire y del agua
	Peligro por exceso de que de biomasa	Daño permanente común de la explotación minera y de los elementos radiactivos que entran en la tabla de agua. Tala de árboles y esterilización ecológica por la contaminación atmosférica excesiva
	Erosión de suelo por el uso excesivo del combustible biológico	Emisiones del cambio de climático
	Destrucción de grandes reservorios hidráulicos	
	Compatible con la ecología natural	
Estética, impacto visual	Las perturbaciones locales pueden ser impopulares, pero generalmente aceptables	Generalmente utilitario, con una centralización y una economía a gran escala

Estos proyectos de energización son dirigidos hacia el aumento de la calidad de vida y de mejoras tecnológicas con fines productivos, en principio porque en este sector se produce una buena parte de los alimentos que se consumen en el sector urbano. No obstante, existen dificultades para llevar a cabo este tipo de proyectos por su alcance y maneras de ejecución.

1.4 Metodologías multicriterial empleadas en la planificación energética

En la toma de decisión tradicional, los criterios han sido normalmente la maximización de los beneficios o la minimización de costes. Estos métodos pueden proporcionar una mejor comprensión de las características inherentes al problema, promueven el papel de los participantes en el proceso de toma de decisiones, facilitan el compromiso, las decisiones colectivas y proporcionan una buena plataforma para entender la percepción y el análisis de los modelos en un escenario realista. Los métodos ayudan a mejorar la calidad de las decisiones haciéndolas más explícitas, racionales y eficientes (Pohekar and Ramachandran, 2004).

La planificación a largo plazo para la asignación y la utilización racional, eficiente, sostenible, segura, ambiental y económica, es uno de los desafíos y responsabilidades que atañen a los decisores. Se deben tomar en cuenta muchos criterios en conflicto para desarrollar una política óptima de la asignación energética y exergética para minimizar los desechos, la destrucción de la exergía y las emisiones dañinas a pesar de estar en conflicto los criterios energéticos, medioambientales, económicos y del bienestar humano. Para decidir teniendo en cuenta el conjunto de criterios anteriores, se utilizan la toma de decisión multicriterios (MCDM, por sus siglas en inglés) (Erol and Kilkis, 2012).

La planificación energética usando modelos con orientación al análisis multicriterial ha atraído la atención de muchos decisores. Éstos modelos pueden proporcionar soluciones al aumentar la complejidad en los problemas de administración de la energía (Cortés and Borroto, 2008).

Por lo tanto, el uso de los Métodos Multicriterial de Toma de Decisiones (en lo adelante MCDM, por sus siglas en inglés) en la planificación de la energía se ha discutido comparándolos en términos de simplicidad, disponibilidad para solucionar los problemas reales y capacidad de estos métodos de incluir las incertidumbres (Theodorou et al., 2010).

Algunas de las aplicaciones de los MCDM para trazar una política energética adecuada son:

- 1- Inversión para la expansión del suministro.
- 2- Evaluación de fuentes de energía renovables.
- 3- Administración y planificación energética desde aspectos medioambientales.

Existe una extensa cantidad de metodologías multicriteriales que han sido aplicadas en apoyo a la toma de decisiones en el ramo de la energía, debido a que los objetivos que se tienen en cuenta están en conflicto. Estos objetivos que hoy día son económicos, energéticos, sociales y ambientales, se pueden satisfacer por medio de estas técnicas para lograr una solución satisfactoria al problema (Theodorou et al., 2010).

1.5 Criterios y subcriterios empleados en la planificación energética

Los criterios y subcriterios son los aspectos que se van a manejar en la planificación de la energía y que estarán implícitos en el modelo o la metodología que se utilice. Los modelos de planificación energética muestran criterios que reflejan las necesidades explícitas de los consumidores y los decisores. Se comprobó en la literatura que los criterios más utilizados son de carácter económico, técnico, medioambiental y sociales, aunque existen otros criterios, pero usados en menor grado. Dentro de los criterios mencionados anteriormente hay aspectos que dependen o influyen en ese subcriterio que se analizarán en el apartado siguiente. Es necesario entonces, identificar estos criterios, apreciar y describir los factores que influyen y sus aplicaciones en la actualidad; de este modo distinguir los criterios aplicables a los métodos y modelos de planificación energética.

1.5.1 Criterios y subcriterios técnicos

Los criterios técnicos son todos aquellos que tienen que ver con las tecnologías de conversión de la energía. Aunque se pueden mencionar muchos, se mencionaran algunos de los revisados:

- **Madurez técnica y confiabilidad:** Está relacionado con el tiempo que se ha investigado y empleado la tecnología. También cuanto más madura, más segura y más eficiente es la tecnología que se utilizan (Erol and Kilkis, 2012).
- **Eficiencia exergética:** se revela como uno de los factores importantes para determinar el potencial de trabajo útil de las tecnologías a emplear (Kaya and Kahraman, 2011).
- **Horas de operación, el tiempo de vida útil y la potencia de la central energética:** está relacionado con el tiempo que puede estar en operación la tecnología, con el tiempo de utilidad de la tecnología y con la capacidad de generación de la central de energía (San Cristóbal, 2012).
- **Sustitución de la energía primaria:** es el decrecimiento del uso de la energía primaria fósil por el de la energía proveniente de recursos como: solar, eólico y la biomasa (Catalina et al., 2011).
- **Reducción de la cantidad de energía convencional:** reducir la cantidad de energía proveniente de un portador energético convencional (Erol and Kilkis, 2012).

- **Confiabilidad:** tiene que tener en cuenta la sumatoria de las opciones energéticas, los recursos energéticos, la eficiencia de la tecnología y el potencial de las energías renovables (Gallego and Mack, 2010, Iniyani et al., 2006).
- **Influencia de las tecnologías en los capitales físicos, financieros, natural, social y humano:** usados en el modelo SURE para cinco indicadores de capital, determina el nivel de afectación positiva o negativa en estos capitales (Cherni et al., 2007).
- **Eficiencia en la transformación:** de aquellos recursos energéticos que influyen el proceso de transportación de combustibles hacia la central energética y las tecnologías de conversión a las diferentes formas de energía (Cai et al., 2009).
- **Capacidad máxima de planta y la cantidad máxima de energía generada por cantidad de portador energético:** estos factores regulan en el modelo la capacidad de las plantas de carbón y biomasa y la cantidad que de energía generadas desde las plantas de estos portadores energéticos (Arnette and Zobel, 2012).
- **Seguridad de la oferta energética:** está relacionada con el porcentaje de importaciones energéticas y la estabilidad del suministro de los proveedores (Browne et al., 2010).
- **Balance energético:** está relacionado con la cantidad de calor provenientes de las tecnologías (aquí indica la utilización eficiente de la electricidad). En este factor también se incluyen el combustible comprado y calor recuperado por un usuario final específico, respectivamente. Todo esto debe ser balanceado con la demanda de energía (Ren et al., 2010).
- **Demanda:** incluido como restricción por una buena parte de los autores. Por ejemplo, lo emplean en un modelo de programación inexacto de energía a escala comunitaria (ICS-EM, del inglés), basado en una integración de la programación lineal con intervalos (ILP, del inglés), la programación del cambio de restricciones (CCP, del inglés) y la programación lineal integral mixta (MILP, del inglés). Se basaron en el consumo de electricidad, la capacidad límite para el suministro de energía de respaldo y realiza unos balances estratificados de la demanda en esos sectores (Cai et al., 2009).
- **Disponibilidad de las unidades generadoras:** es la cantidad de energía que se puede generar por cualquier tipo de unidad y no puede exceder la razón de su capacidad afectada por un factor de disponibilidad (Ren et al., 2010).
- **Límite de calor recuperable por cada tipo de tecnología:** cantidad de calor recuperable de una tecnología es el que es afectado por la eficiencia (Ren et al., 2010).
- **Capacidad de los sistemas de generación de calor:** es la demanda total de calor proveniente de algunas tecnologías entre la capacidad total del sistema de producir calor (Mróz, 2008).
- **Balance de masa, calor y electricidad:** están relacionados con las cantidades de vapor, calor y electricidad desde y hasta los recursos y

tecnologías. En el caso de este criterio se maneja como una restricción del modelo cuyos valores de las variables de decisión deben ser mayor o igual que cero (Lin et al., 2010).

- **Capacidad de planta:** está relacionado con el cociente entre la energía real generada por la central energética durante un período y la energía generada si hubiera trabajado a plena carga durante ese mismo período.

Un modelo lineal desarrollado por Ramanathan (Ramanathan and Ganesh, 1994), en el que se establecen varias funciones objetivo, que abundan en los criterios tecnológicos que no han sido tratados anteriormente, como son:

- **Eficiencia energética:** se maximiza la eficiencia en una de las funciones objetivos.
- **Uso de productos del petróleo:** le otorga un tratamiento de función objetivo en el que se minimiza el uso de los recursos energéticos provenientes del petróleo.
- **Uso de los recursos locales:** otras de las funciones objetivo del modelo en el que se maximiza el uso de los recursos energéticos locales, sobre todo sin tienen carácter renovable.

1.5.2 Criterios y subcriterios medioambientales

Los subcriterios del criterio medioambiental son fuertemente discutidos hoy día en la literatura. La mayor parte de la bibliografía consultada se refiere a que los modelos energéticos deben tener restricciones de emisiones de gases de efecto invernadero debido a que todos tienen en cuenta fuentes convencionales de energía. No obstante, existen otros criterios medioambientales que resultan necesarios recoger.

- **Minimización de emisiones:** es un criterio utilizado para el control de los gases dañinos al medioambiente como el SO₂, CO₂, NO_x, CO, que son emitidos por las tecnologías de combustión (Zhu et al., 2012, Psarras et al., 1990).
- **Requerimiento de tierra:** el requerimiento de la tierra para una central energética es uno de los factores más críticos para la inversión energética. Una fuerte demanda de tierra puede también determinar las pérdidas económicas (Kahraman et al., 2009). Por otro lado, el requerimiento de tierra por centrales de producción de energía puede dañar especies endémicas, lo que causa perjuicios sobre los habitantes.
- **Análisis de ciclo de vida:** esta es una potente herramienta que trata de evaluar todos los impactos medioambientales, contabilizando el consumo de materias primas y las emisiones derivadas de cualquier actividad o proceso energético o industrial (Domínguez et al., 2010, Cai et al., 2009).
- **Calidad del aire:** es un método que considera la toxicidad relevante de cada agente contaminador y de su tiempo de retención medio en la

atmósfera y termina bajo la determinación de “factores de impacto” para cada agente contaminador particular (Georgopoulou et al., 1997).

- **Ruido:** es el nivel contaminación por ruido (Lipscomp and Teylor, 1978).
- **Impacto visual:** es la modificación que producen las instalaciones energéticas al paisaje local. Estos cambios pueden traer perjuicios a los habitantes del sector (Haurant et al., 2011).

1.5.3 Criterios y subcriterios económicos

Los criterios económicos son usados en los modelos energéticos analizados. Se trata de la necesaria reducción de los costes asociados al plan de inversiones. Por tanto, en los modelos examinados casi siempre tratan los costes asociados y la manera de determinarlos, variando esto de un modelo a otro en relación con su aplicación específica. En la gran mayoría de los modelos estudiados, los costes se encuentran como una función objetivo a minimizar debido a la importancia que les conceden los autores a estos criterios. Un ejemplo de esto lo podemos notar en los puntos siguientes:

- **Inversión de capital anualizado:** es la anualización del capital invertido, la cantidad de flujo monetario a pagar en banco por cada año de inversión (Zhu et al., 2012, Arnette and Zobel, 2012, Koo et al., 2011, Keppo and Strubegger, 2010, Nakata et al., 2005).
- **Costes fijos de operación y mantenimiento:** son los relacionados con la operación y que permanecen constantes, no depende de la producción de energía (Zhu et al., 2012, Arnette and Zobel, 2012, Koo et al., 2011, Keppo and Strubegger, 2010, Nakata et al., 2005).
- **Costes variables de operación y mantenimiento:** son los relacionados con la operación que dependen de la producción de energía (Zhu et al., 2012, Arnette and Zobel, 2012, Koo et al., 2011, Keppo and Strubegger, 2010, Nakata et al., 2005).

1.5.4 Criterios y subcriterios político-sociales

Los criterios políticos-sociales son imprescindibles en una comunidad debido a las profundas transformaciones que en este ámbito ocurren consecuencias de la energía. Se ha comprobado en la bibliografía que se emplean en menor medida su combinación los modelos energéticos. A continuación, se presentan varios autores que lo referencia en sus trabajos.

- **Coste social:** se define como “todo el coste para la sociedad que provocan los sistemas de energía”. Según este criterio se le puede agregar varios elementos como precios del mercado (incluyendo tasas), externalidades medioambientales, desempleo, costes de las labores domésticas si estas labores no contribuyen a la riqueza de la sociedad, entre otras (Østergaard, 2009).
- **Aceptación social:** las nuevas tecnologías renovables no pueden ser ampliamente aplicadas a menos que las personas tengan una buena

comprensión de los sistemas de las energías renovables y la importancia de usarlas en vez de las fuentes de energía convencionales. Es necesario llevarla cabo a través de una encuesta para descubrir el nivel social de aceptación de la energía (Iniyan et al., 2006).

- **Generación de empleos:** este objetivo se determinó por otro estudio que fue determinar el potencial de empleos por millones de kWh de energía neta consumida en un año (Beccali et al., 1998).

1.6 OSeMOSYS y su función como modelo de cálculo energético.

OSeMOSYS es un modelo de cálculo energético multicriterial que presenta grandes facilidades a la hora de implementación, ya que como es un software de “Código Abierto” no es necesario la inversión de ningún capital inicial a la hora de obtención de licencias o procedimientos burocráticos para su implementación. Presenta un código limpio y sin restricciones por lo que su estudio y comprensión se simplifican considerablemente.

No todo lo relacionado con el modelo es bueno, ya que su implementación real para la obtención de resultados eficientes supone un reto considerable pues la flexibilidad del código lo hace altamente difícil de implementar, pero esto no es un problema grave que no se pueda resolver con un estudio previo y detallado del mismo y de esta forma se puede ser capaz de darle una solución rápida y sencilla a este problema. Para los usuarios que dominan este modelo las posibilidades que brinda son enormes puesto que es uno de los más utilizados a nivel global por sus eficientes resultados y sus costos de implementación relativamente bajos.

1.6.1 Razón fundamental

OSeMOSYS es un modelo completo de optimización de sistemas para la planificación energética a largo plazo. A diferencia de los sistemas de energía establecidos hace mucho tiempo (equilibrio parcial como MARKAL / TIMES, MENSAJE, PRIMES, EFOM y POLES), OSeMOSYS potencialmente requiere una curva de aprendizaje menos significativa y un compromiso de tiempo para construir y operar. Además, al no usar software propietario o lenguajes de programación comercial y solucionadores, OSeMOSYS no requiere ninguna inversión financiera inicial (Howells et al., 2011).

Estas dos ventajas extienden la disponibilidad del modelado de energía a las comunidades de estudiantes, analistas de negocios, especialistas gubernamentales e investigadores de energía de países en desarrollo.

Permitir que los estudiantes de posgrado construyan y desarrollen iterativamente modelos formales de energía impartirá esta base de conocimiento a una amplia gama de roles y posiciones en el mercado de la energía. Ampliar la capacidad humana de los encargados de formular políticas privadas y públicas

para usar y comprender los modelos energéticos es un paso clave en el uso e interpretación efectivos de las herramientas analíticas formales. Y la creciente capacidad humana en modelos energéticos en países en vías de desarrollo - cuyas instituciones tienen relativamente pocos recursos de investigación- es particularmente importante, dado el crecimiento de los países en vías de desarrollo de emisiones relacionadas con la energía, uso de recursos y demanda de servicios de energía. Sin embargo, en el más reciente International Energy Workshop, la conferencia preeminente de modelación energética internacional, celebrada en Estocolmo en junio de 2010, menos del 10% de los participantes provenían de países en vías de desarrollo(Welsch et al., 2012).

Para los investigadores en energía experimentados, el código OSeMOSYS es relativamente sencillo, elegante y transparente, y permite refinamientos simples y la capacidad de realizar nuevos análisis sofisticados. Como el modelado está diseñado para generar ideas, OSeMOSYS permite un banco de pruebas para nuevos desarrollos de modelos de energía(Weirich, 2013).

1.6.2 El modelo OSeMOSYS

OSeMOSYS está diseñado para actualizarse y modificarse fácilmente, para adaptarse a las necesidades de un análisis en particular. Para proporcionar esta capacidad, el modelo se está desarrollando en una serie de 'bloques' de funcionalidad de componentes. Una colección de bloques de componentes funcionales se combina para formar un modelo personalizado. Además, cada bloque se divide en diferentes niveles de abstracción de la siguiente manera(Howells et al., 2011):

1. Una descripción sencilla de los conjuntos de modelos, parámetros, variables, restricciones y objetivos, así como la forma en que están relacionados.
2. Una formulación algebraica de la descripción simple.
3. La implementación del modelo en un lenguaje de programación.
4. La aplicación del modelo, que depende de cómo se usa en un estudio.

Cada uno de estos niveles es individualmente importante, y al separarlos, esperamos facilitar adiciones o refinamientos independientes y simultáneos. Es notado que estos niveles son un concepto abstracto simple de cuánto tiene lugar el desarrollo de modelo, en modelos de sistema de energía existentes, tales estratos no son identificados prolijamente, ni son separados.

Actualmente el modelo es separado en siete "Bloques" o componentes funcionales. Juntos definen la versión actual de OSeMOSYS. Son compatibles y potencialmente reemplazables con los nuevos bloques (contienen la funcionalidad, diferente o mejorada).

Cada bloque es definido dentro de tres niveles del carácter abstracto. Los bloques incluyen (Howells and Welsch, 2010):

1. Objetivo
2. Costos
3. Almacenamiento
4. Valor de Salvamento
5. Balance de energía
6. Restricciones
7. Emisiones de gases

1.6.3 Criterios y Subcriterios empleados por el OSeMOSYS

El OSeMOSYS no se encuentra exento del trabajo con los criterios relacionados anteriormente, de hecho, al ser un modelo multicriterial utiliza una variedad considerable de estos. Una de las diferencias más significativas del OSeMOSYS con otros modelos es que este presenta un código sencillo y limpio, además no se encuentra atado a ningún tipo de restricciones que impidan su modificación, por lo que si se desea revisar un criterio determinado solo bastaría con implementarlo para revisarlo en el transcurso de tiempo donde se desea aplicar el modelo. En este punto solo se revisarán los criterios que vienen implementados en el código fuente que facilita la web oficial, ya que para este caso no se modificara el mismo pues no se requieren la revisión de otro tipo de criterios aparte de los que ya trae implementados.

1.6.3.1 Criterios y Subcriterios técnicos

Los criterios técnicos como se mencionó anteriormente son aquellos que tratan con las tecnologías de conversión de la energía. Como es de suponer presentan una gran variedad y estaremos revisando solo aquellos que se encuentran implementados directamente en el código del OSeMOSYS.

El primer criterio a revisar es el que define el tiempo de operación, vida útil y la potencia de la central energética, el cual se encuentra relacionado con el tiempo que puede estar en operación la tecnología, la vida útil de la misma y su capacidad de generación a lo largo de su vida útil. Este criterio se encuentra implementado con una alta eficiencia en el OSeMOSYS pues la depreciación de la tecnología es un punto de vital importancia para el modelo, calcular el costo final de una tecnología y cuanto logra generar a lo largo de su vida útil es fundamental para lograr alcanzar el costo de depreciación real que busca el modelo.

El criterio referente a la sustitución de la energía primaria es el encargado de chequear cuanto de energía renovable puedo ir implementando a lo largo del tiempo y ahorrar y reducir los niveles de utilización de energía fósil. Para el modelo esto no es más que una serie de números, el mismo revisara todas las tecnologías de generación de energía y escogerá las que impliquen un mayor beneficio futuro. El modelo no beneficiara a una tecnología renovable, sino que la comparara con las que ya posee y dependiendo de esto escogerá una serie de tecnologías que supongan el menor costo posible. La reducción de energía convencional es la encargada de chequear la minimización de los portadores

energéticos primarios, igual que el anterior si el modelo determina que es más eficiente mantener una tecnología a base de energía convencional sobre una ecológica para lograr un gasto menor no realizara el cambio. Hay que destacar que en el modelo para cada tipo de energía se toman en cuenta las emisiones de las mismas y esto supone un incremento del costo de la energía convencional sobre la energía renovable.

La confiabilidad tiene en cuenta las sumatorias de las opciones energéticas, los recursos energéticos, la eficiencia de la tecnología y el potencial de las energías renovables. Para el modelo este punto es fundamental pues los factores mencionados en el mismo no son más que los que se analizan para alcanzar los costos de las tecnologías. El potencial de los recursos renovables es el único punto que el modelo no revisa concretamente, ya que no es necesario, a lo largo del tiempo de aplicación del modelo, el cual generalmente son años, las energías renovables tienden a ser más baratas que las convencionales, y por este factor, aunque no lo tome concretamente si se verá reflejado en las decisiones tomadas por el modelo a la hora de selección de las tecnologías a utilizar en los periodos de tiempo y en las regiones estudiadas.

La Capacidad máxima de planta y la cantidad máxima de energía generada por cantidad de portador energético son los factores que regulan en el proceso de aplicación del modelo la capacidad de las plantas y la cantidad de energía generada por los portadores energéticos para cada tecnología empleada. Es un punto que se toma claramente en el modelo de OSeMOSYS. La generación de energía y su almacenamiento se define claramente en el modelo. No solo es el hecho de que se defina, sino que es revisada de forma individual para cada tecnología en cada lapso de tiempo y región, asegurando un empleo eficiente del mismo y asegurar un almacenamiento exacto de las tecnologías y sus recursos, ya que un gasto innecesario se ve reflejado en el capital de la entidad y quedarse sin materias primas para la utilización de tecnologías nos es una opción viable en ningún proceso de generación energética.

Balance energético: está relacionado con la cantidad de calor provenientes de las tecnologías (aquí indica la utilización eficiente de la electricidad). En este factor también se incluyen el combustible comprado y calor recuperado por un usuario final específico, respectivamente. Todo esto debe ser balanceado con la demanda de energía.

1.6.3.2 Criterios y Subcriterios medioambientales

En relación con este aspecto OSeMOSYS presenta un balance eficiente en cuanto al tratado de emisiones se refiere. Presenta un algoritmo de cálculo para determinar el comportamiento de las emisiones para cada tecnología en cada periodo de tiempo. La forma que presenta el sistema para el tratado de las emisiones es simple, mientras se analiza cada posible tecnología también se analiza el comportamiento de los contaminantes que presentan las mismas, esto proporciona datos suficientes como para determinar cuan eficiente es un sistema

ya que se pueden analizar económica y medioambientalmente. Esta tecnología, aunque bastante moderna, presenta el problema de que para su correcto funcionamiento se requieren de grandes fuentes de cálculo, a medida que se aumenta la complejidad del sistema a estudiar crece significativamente la tasa requerida para el procesamiento de la misma. Este es un problema general en el algoritmo de cálculo empleado por el OSeMOSYS ya que mientras mayor es la complejidad del sistema a estudiar, mayor capacidad de computo se hace necesaria.

Sin tener en cuenta el problema que procede de la capacidad requerida para poner en funcionamiento el sistema, el algoritmo general empleado para el análisis de emisiones hace que el OSeMOSYS abarque gran parte de los criterios medioambientales más importantes.

1.6.3.3 Criterios y Subcriterios económicos

Las versiones actuales del OSeMOSYS se centran en la minimización de los costos requeridos para un sistema en un tiempo y región determinados. Pero los criterios económicos que se emplean en el mismo se remontan a minimización de costos y almacenamiento de energía. El modelo no es capaz en su versión original de análisis más potentes desde el punto de vista económico, claro que al ser un modelo de código abierto lo que se hace necesario para la implementación de modelos económicos más exactos y que abarquen temas más profundos, es simplemente suficiente conocimiento del sistema.

La versión del modelo estudiado es la original por lo que no se procede a analizar criterios diferentes a los que se programan por defecto. En este trabajo no se hace necesario el empleo de otros criterios para demostrar la importancia de la utilización del OSeMOSYS como modelo de cálculo energético.

1.6.3.4 Criterios y Subcriterios político-sociales

El OSeMOSYS es un modelo puramente matemático de cálculo de capacidades energéticas en entornos determinados por lo que no presenta en su versión oficial criterios de esta índole. Que no presente no se refiere a que no se puedan analizar, ya que bastaría con programar los comportamientos matemáticos de los mismos para su análisis. En este trabajo no se hace revisión a este tipo de criterios ya que para los mismos se es necesario una serie de datos que se nos hace imposible obtener sin un minucioso y extenso trabajo investigativo el cual no es acorde a lo que se intenta abordar.

1.7 MOMANI como sistema de gestión de bases de datos para OSeMOSYS

Para la implementación de la base de datos y la creación del código fuente del OSeMOSYS se procede a utilizar la interfaz web del MoManI las cual es una herramienta desarrollada por los desarrolladores del mismo OSeMOSYS con el fin de simplificar el trabajo con el código fuente y a la vez potenciar su empleo a

nivel mundial. La base del sistema consiste en crear sobre las estructuras de datos que componen el modelo de la región a estudiar, con esto se monta un modelo del OSeMOSYS en el cual solo se tocan los puntos que se desean analizar. Otra ventaja que presenta es que no solo permite la creación de las bases de datos, sino que permite analizar y comparar los resultados obtenidos desde el mismo de modo gráfico. La modificación del código base a partir del momani también se simplifica significativamente ya que el mismo da la posibilidad de modificar las variables y constantes que se analizan en el código fuente. La aplicación de un criterio de cálculo al OSeMOSYS se simplifica considerablemente ya que presenta una estructura de trabajo donde la modificación del código de OSeMOSYS es relativamente sencilla (Youssef Almulla, 2017).

1.7.1 Modelos de cálculo.

Los modelos de cálculo se definen en el MoManI a partir de las ecuaciones presentes en el OSeMOSYS, para ello se crea un modelo inicial dependiendo de los valores que se deseen revisar y se les hacen pequeñas modificaciones a los escenarios modelados en cada uno. Luego estos datos se integran al OSeMOSYS y obtenemos una serie de valores en gráficos y tablas que nos muestran los principales resultados obtenidos para nuestro sistema.

1.7.2 Constantes empleadas en el MoManI.

Las constantes son un grupo de datos donde se definen los elementos que no presentan variación en el modelo, este tipo de datos los componen principalmente los valores que definen las variables de tiempo, tecnologías y demandas. Son de gran importancia puesto que definen los valores en los cuales se estará moviendo el modelo para encontrar los datos correctos para la simulación

1.7.3 Parámetros ingresados en el MoManI.

Los parámetros ingresados al MoManI son específicos para cada escenario en estos se definen parámetros más significativos como son costos y relaciones de actividad de tecnologías. Los parámetros varían en la modelación de cada escenario y son los valores que más influyen en la simulación y datos obtenidos en los modelos. Son los valores que más cuidado y atención se debe tener puesto que presentan gran dificultad a la hora de realizar una correcta implementación y un pequeño error puede provocar errores muy difíciles de detectar.

1.7.4 Exposición de los resultados.

Luego de realizar y simular nuestro modelo de pasa a la revisión de los resultados. El mismo software posee un sistema bastante eficiente para la trata de datos finales, pues es capaz de generar tablas y gráficos de cada escenario con los valores obtenidos durante la simulación. También presenta la ventaja de

comparar múltiples escenarios de un mismo modelo para el análisis más puntual y eficiente de los datos.

1.8 Conclusiones del Capítulo

- En la bibliografía consultada queda evidenciado que los principales criterios sobre los que se basan los modelos matemáticos de planificación energética, que permiten el dimensionamiento de sistemas energéticos, son: los económicos, los medioambientales, los de tipo político-social y los técnicos.
- Los principales criterios sobre los que se basa el OSeMOSYS son principalmente los criterios de tipo económico y los medioambientales haciendo principal énfasis en el primero de estos criterios.
- La interfaz web MoManI permite una mayor facilidad a la hora de trabajar con la modelación del sistema mediante grupos de restricciones que componen el OSeMOSYS, permite también la posibilidad de añadir incluso otros grupos de restricciones adicionales según el caso que se desee analizar.
- Al numerar los principales aspectos que componen la interfaz web del MoManI, se encuentra que se centran en dos tipos principales de datos, los primeros hacen referencia a las constantes (parámetros que no son modificables en el período de la simulación) y los segundos son los parámetros a tener en cuenta por el modelo (parámetros que pueden modificarse en el período de la simulación).

Capítulo II: Formulación del modelo de OSeMOSYS y creación de la base de datos.

En el presente capítulo se expondrá a grueso modo la formulación del código fuente del OSeMOSYS y sus principales aspectos. No se hace de forma muy rebuscada ya que el mismo sigue bastante fiel al modelo matemático ya explicado detalladamente arriba. Solo se explicarán los cambios significativos y aquellos factores que sean de importancia vital y de difícil comprensión debido a la extensión del código. Luego se explicará cómo se diseñó la base de datos utilizada, para ello se toma como referencia al UTOPIA como base de datos primaria para la construcción de la nuestra.

2.1 Descripción del Lenguaje Computacional

Una "descripción del lenguaje computacional" claramente articulada es el primer nivel de abstracción de OSeMOSYS y representa una buena práctica para cualquier documentación de código. Esto es particularmente útil para ayudar a que coincida con las expectativas del analista del sistema de energía y creador de políticas, una caída notoria de muchos esfuerzos de modelado. La descripción completa de cada bloque del modelo actual se proporciona a continuación. (Howells et al., 2011, Weirich, 2013).

La (figura 2.1) muestra gráficamente la conformación previa de los bloques matemáticos y su distribución según se tratan en OSeMOSYS.

Objetivos [1]	Costos [2]	Almacenamiento [3]	Suficiencia de capacidad [4]	Balace de energía [5]	Constantes [6]	Emisiones [7]
	Costo total descontado		Suficiencia de capacidad A: Periodos de tiempo	Balace de energía A: Periodos de tiempo	Capacidad Total	
	Costo de operación		Suficiencia de capacidad B: Anual	Balace de energía B: Anual	Nueva Capacidad	
	Costo Capital				Actividad Total	
	Valor de Salvamento				Actividad Anual	
					Margen de Reserva	

Figura 2.1: Bloques de estructuración del OSeMOSYS

El objetivo (bloque 1 de la Figura 2.1) en la versión actual de OSeMOSYS es calcular el valor presente neto más bajo (VPN) de un sistema de energía para satisfacer la(s) demanda(s) dada(s) para portadores de energía, servicios de energía o sus representantes. El sistema está representado por tecnologías. La mayoría de las tecnologías usan y producen portadores de energía. La producción de portadores de energía debe superar el uso intermedio de las tecnologías más cualquier demanda exógena ingresada por el usuario.

Para cumplir el objetivo, hay una serie de restricciones y reglas específicas que deben seguirse (Bloques 3-7 en la Figura 2.1).

2.2 Análisis Matemático del Modelo

A continuación, se expone una breve explicación de cada bloque matemático que se encuentra contenido en el modelo teórico, la formulación matemática original se encuentra en el Anexo 1.

2.2.1 Función Objetivo (OBJ)

El objetivo de esta versión del modelo es estimar el costo del valor presente neto más bajo (VPN) de un sistema de energía para satisfacer la(s) demanda(s) dada(s) de servicios energéticos. (Howells and Welsch, 2010).

2.2.2 Costos (TDC)

Para hacerlo, debe tener en cuenta los costos incurridos por cada tecnología, en cada año y en cada región modelada. Los costos asociados con cada tecnología incluyen un costo de operación e inversión, así como cualquier penalización de producción de emisiones menos un valor residual. Cada partida de costo debe calcularse en términos monetarios constantes y luego descontarse para determinar un valor presente neto (VPN). Para calcular el costo del VPN, cada tecnología puede tener una tasa de descuento global predeterminada o una específica para esa tecnología. (Howells and Welsch, 2010).

2.2.3 Costos de operación (OC)

El costo anual de operación de cada tecnología es la suma de un costo operativo fijo y variable. El costo variable se calcula inicialmente para cada segmento de tiempo en un año y el fijo, para cada año.

El costo variable es una función de la tasa de actividad de cada tecnología, su modo de operación y un costo por unidad conocido por el analista. Para cada modo de operación, la tasa de actividad se debe multiplicar por el costo operativo específico por unidad. Esto se hace para cada modo de operación en el que la tecnología opera en un intervalo de tiempo y se suma. Estos costos se deben calcular para cada segmento de tiempo durante el año y se suman para determinar un costo operativo anual variable. Esto se debe hacer para cada tecnología, cada año y cada región modelada.

El costo operativo fijo anual se calcula multiplicando la capacidad instalada total de una tecnología con un costo por unidad conocido por el analista. De manera similar, esto debería hacerse para cada tecnología, cada año y cada región modelada.

El costo operativo anual total es la suma de los costos fijos y variables. Ese costo se descuenta nuevamente al primer año modelado. Eso se hace, ya sea

utilizando una tasa de descuento global o específica de la tecnología aplicada a la mitad del año en que se incurre en los costos.(Welsch et al., 2012).

2.2.3.1 Costo de Capital (CC)

Las inversiones se calculan sobre una base anual, y se supone que están en servicio y disponibles a principios de año.

Los costos de capital están determinados por el nivel de la nueva capacidad invertida multiplicada por un costo unitario conocido por el analista. Ese costo se descuenta nuevamente al primer año modelado. Eso se hace, ya sea utilizando una tasa de descuento global o específica de la tecnología aplicada al comienzo del año en el que la tecnología está disponible.

2.2.3.2 Costo de salvamento (SV)

Cuando una tecnología (se invierte durante el período del modelo) pero termina su vida operativa antes, se supone que no tiene valor, al final del período del modelo. Sin embargo, si una tecnología (invertida durante el período modelo) todavía tiene algún componente de su vida operativa al final del período, eso debe ser estimado. Existen varios métodos para determinar en qué medida una tecnología se ha depreciado. Y esto a su vez se usa para calcular su valor de rescate para el final del período. La depreciación del fondo de amortización se asume aquí.

Se determina un valor residual, basado en la vida operativa de la tecnología, su año de inversión y tasa de descuento. Después de esto, se descuenta al comienzo del primer año del modelo mediante una tasa de descuento aplicada durante el período de modelado.

2.2.4 Suficiencia de capacidad (CA)

Debe haber suficiente capacidad en una tecnología particular para que pueda cumplir con su uso de energía o requisitos de producción. Es posible que este sea el caso para cada segmento de tiempo (denominado "Capacity Adequacy A" a continuación). Eso es particularmente importante cuando se consideran combustibles y servicios que son difíciles o costosos de almacenar. También debe haber capacidad suficiente para cumplir con los requisitos anuales de producción y uso (denominado "Capacity Adequacy B").

2.2.4.1 Suficiencia de capacidad "A" (CAa)

Para garantizar que haya una capacidad adecuada, es importante establecer la capacidad total disponible. Por lo tanto, la acumulación de todas las capacidades nuevas de todas las tecnologías invertidas durante el período modelo debe calcularse para cada año (CAa1). A esto debe agregarse cualquier capacidad residual de la misma tecnología heredada antes del período modelo. A partir de la adición de la nueva capacidad acumulada y la capacidad residual en cada año del período de modelado, se determina la capacidad anual total

para cada tecnología. (Esto se hace para cada región en el período de modelado) (CAa2).

Para determinar que hay capacidad suficiente, se determina la tasa total de actividad emprendida por cada tecnología. Esto implica agregar la tasa de actividad para cada modo de operación para cada tecnología. Esta tasa de actividad total se determina para cada tecnología en cada segmento de tiempo en cada región modelada (CAa3).

El usuario debe definir todas las tecnologías que se espera que tengan suficiente capacidad para cumplir con sus requisitos de actividad en cada segmento de tiempo. Luego se restringen de tal manera que su capacidad total devaluada es mayor que su tasa de actividad durante cualquier segmento de tiempo. La capacidad disponible en cualquier intervalo de tiempo está descalificada por un "factor de capacidad". (CAa3)

2.2.5 El balance de energía (EB)

Los niveles de operación (tasa de actividad, uso de energía, producción de energía y emisiones para cada modo de operación para cada tecnología) se calculan para "tiempos cuasi cronológicos", "cortes de tiempo", durante el año. Por lo tanto, es importante asegurarse de que la producción, el uso y la demanda de combustible, servicios de energía y proxys sean factibles en cada segmento de tiempo y anualmente. (Balance de energía " A " explica el equilibrio de la división de tiempo y " B " para el balance anual).

2.2.5.1 Balance de energía "A" (EBa)

La tasa de producción de combustible para cada tecnología se determina multiplicando la tasa de actividad por la relación producción/producción de combustible ingresada por el analista. (EBa1) De manera similar, la tasa de consumo de combustible se determina multiplicando la tasa de actividad por la relación producción/producción de combustible ingresada por el analista (EBa4). Como la tecnología puede estar funcionando en diferentes modos, la tasa de producción por tecnología es la suma de la producción por cada modo (EBa2). Lo mismo es cierto para la tasa de uso (EBa5). Para cada combustible, intervalo de tiempo, año y región, se puede agregar la producción de cada tecnología para determinar la tasa total de producción de cada combustible (EBa4). Un enfoque paralelo produce el uso total de cada combustible (EBa6). Para determinar la producción (en términos de energía) de cada combustible (para cada segmento de tiempo, año y región), la tasa de producción se multiplica por la longitud del segmento de tiempo (EBa7). De manera similar, se determina la tasa de uso (para cada segmento de tiempo, año y región) (EBa8). Para cada combustible, puede haber una demanda exógena, específica para cada segmento de tiempo (y región), ingresada por el analista. La tasa de demanda en cada segmento de tiempo (y cada región) se traduce en una demanda de energía multiplicándola por la longitud de cada segmento de tiempo (EBa9).

Luego, para cada combustible, en cada año, segmento de tiempo y región, la producción total de cada combustible debe ser mayor o igual a su demanda y uso (EBa10)(Howells and Welsch, 2010).

2.2.5.2 Balance de energía “B” (EBb)

Al sumar la producción de cada combustible para cada segmento de tiempo durante un año, se obtiene su producción anual (EBb1). Del mismo modo, al sumar el uso de cada combustible para cada segmento de tiempo se obtiene su uso anual (EBb2). Además, como el analista puede indicar una demanda anual acumulada exógena que se cumplirá cada año (en lugar de una especificada para cada segmento de tiempo).

Por lo tanto, para cada región y año, otro balance de energía que se debe cumplir es que la producción anual debe ser mayor o igual al uso anual y acumulado anual de cada combustible (EBb3).(Howells and Welsch, 2010).

2.2.6 Restricciones (TCC – NCC – AAC – TAC – RM – RE)

Puede haber un límite máximo de capacidad anual (TCC1) o mínimo (TCC2) en la capacidad total de una tecnología particular permitida en un año y región en particular. Del mismo modo, existe un límite de inversión de capacidad máxima (NCC1) o mínimo (NCC2) máximo en una tecnología particular por año y región. Cuando se especifique, se puede ingresar un límite anual máximo (AAC2) o mínimo (AAC3) en la actividad anual de una tecnología. La actividad anual total de una tecnología para cada año se obtiene sumando el producto de la tasa de actividad de cada tecnología con la duración de cada segmento de tiempo durante un año para cada región (AAC1).

Cuando se especifique, se puede ingresar un límite máximo de la constante de actividad (TAC2) o mínimo (TAC3) en la actividad del período del modelo de una tecnología. La actividad del período modelo de cada tecnología se obtiene sumando la actividad anual total de cada tecnología para cada año para cada región (TAC1).

Debe haber suficiente capacidad (de recopilación de tecnologías especificada) para proporcionar un margen de reserva (para un conjunto específico de combustibles) (RM3). Al marcar y agregar todas las capacidades de las tecnologías que pueden agregar al margen de reserva, se determina la capacidad total en el margen de reserva (por año y por región) (RM1). Al etiquetar el combustible y sumarlo, se determina la demanda que necesita un margen de reserva (por año y por región) (RM2).

Al sumar la producción por tecnología sobre cada segmento de tiempo en un año, se obtiene la producción anual por tecnología (por combustible, tecnología y región) (RE1). Al marcar cuáles de esas tecnologías son renovables

y sumar su producción, se obtiene la producción renovable anual de un combustible en particular (por región) (RE2)(Weirich, 2013, Welsch et al., 2012).

2.2.7 Contabilidad de emisiones (E)

Cuando una tecnología está activa en sus diversos modos de operación, puede afectar el medio ambiente. La medida en que se emiten los contaminantes se determina multiplicando una relación introducida por el analista de "emisión por unidad de actividad" para cada modo de operación de una tecnología. Sobre una base anual, solo la actividad anual promedio de cada tecnología y modo se multiplica por una razón. (No toda la tecnología emitirá contaminantes cuando esté activa, por lo tanto, solo se considerarán aquellos que están asociados con "emisiones por unidad de actividad") (E1). Las emisiones anuales, a partir de una tecnología determinada, se determinan sumando sus emisiones anuales para cada uno de sus modos de operación (E2) (Welsch et al., 2012).

2.2.7.1 Penalización de emisiones (E)

Si hay una penalización por unidad asociada con la emisión, se determina la penalización por emisión para cada tecnología. Esto se logra multiplicando las emisiones anuales de cada tecnología con la penalización por emisión unitaria (E3). La suma de la penalización para cada emisión proporciona la penalización total relacionada con las emisiones asociada con el uso de una tecnología determinada (para cada año y región modelo) (E4)(Howells and Welsch, 2010).

2.2.7.2 Límite anual (E)

Las emisiones anuales producidas para cada región se determinan sumando las emisiones de cada tecnología. El analista puede especificar emisiones exógenas derivadas del exterior del sistema modelado. Por lo tanto, la suma de las emisiones producidas y las emisiones exógenas da las emisiones anuales por especie de emisiones y región modelada (E5). Puede haber un límite anual para las emisiones por región y especies emisoras (E7)(Howells et al., 2011).

2.2.7.3 Límite de período modelo (E)

Si se suman estas emisiones para cada año y se agregan las emisiones exógenas para el período modelo, se obtienen las emisiones totales durante el período modelo por especie de emisión para cada región (E6). (Tenga en cuenta que las emisiones exógenas para el período del modelo son independientes de las especificadas a nivel anual). Por región también puede haber un límite en las emisiones del período modelo (E8)(Howells and Welsch, 2010, Welsch et al., 2012).

2.3 Creación de las bases de datos con la implementación del MoManI como herramienta de gestión.

El objetivo es brindar al usuario una experiencia práctica con la Infraestructura de gestión de modelos (MoManI), la interfaz que se desarrolla para utilizar el sistema de modelado de energía de código abierto (OSeMOSYS). Este ejercicio de entrenamiento está diseñado en torno a la provincia de Villa Clara. Para la realización de la base de datos se definen tres pasos prioritarios, el primero consiste en analizar la estructura energética de la provincia para la creación del sistema energético de referencia (SER), posteriormente se definen como será el comportamiento de los días y las temporadas y finalmente con la ayuda del anuario estadístico de la república se ingresan los demás datos.

2.3.1 Creación del sistema energético de referencia (SER).

El Sistema Energético de Referencia (SER) es una esquematización del sistema modelado, este paso es de vital importancia para la correcta creación de las bases de datos ya que aquí se definen las principales tecnologías, demandas e importaciones de portadores energéticos que se desean analizar. El mismo define al mismo tiempo como se comportan las tecnologías y como es el movimiento de las energías primarias y secundarias. Para su explicación se utiliza el SER empleado para el estudio de caso utilizado por la provincia de Villa Clara.

Comenzando desde la derecha tenemos las energías que se importan en el modelo, las cuales son: Diésel, Gasolina, Gas Licuado del Petróleo (GLP), Biogás, Fuel Oil, Keroseno y Electricidad. Aunque se pueden tomar más energías de referencia para esta primera revisión del modelo se decidió utilizar solamente estas por ser las más demandadas en la provincia.

Seguido de las energías se encuentran, en el centro, las tecnologías de transformación, las cuales son: Grupos electrógenos por diésel (EDL), consumo y transporte de energía eléctrica (ECR) la cual no solo define estos factores, sino que es la encargada de revisar el almacenamiento de energía eléctrica que se generan por las otras tecnologías, centrales azucareros (ECT) es importante esta tecnología ya que durante el tiempo de zafra en el país se evidencia un considerable aumento en la generación eléctrica, generación eléctrica por biogás (EBG), y la generación eléctrica por GLP.

En el tercer grupo se encuentran las demandas energéticas principales, las cuales nos definen el funcionamiento del modelo. Estas se pueden subdividir en tres grupos principales:

1. Demandas destinadas a la transportación.
2. Demandas destinadas a la potencia ya sea requerida para uso industrial o domestico
3. Demanda destinada a la generación de calor.

El primer grupo aparecen los consumidores de demanda por diésel (TXD) y gasolina(TXG). En la provincia no existen, en la actualidad, otras fuentes motrices que se encuentren fuera de este grupo.

El segundo grupo son los consumidores de potencia(RP1), en este se encuentran todos los consumidores de energía eléctrica de la región menos los destinados a la creación de calor, los cuales se subdividen en otros grupos. Este grupo es el de mayor importancia pues la tasa más grande de consumo de energía lo posee el mismo, los cambios de tecnologías destinados a los demás no son tan significativo como el que se destina a este. En este caso se deciden unir todos los equipos de la vivienda y la industria en el mismo pues una separación sería demasiado extensa, aunque lo ideal es tomar cada consumo de acuerdo con el tipo de industria al que pertenece.

El último grupo es el destinado a la generación de calor, en el mismo aparece la generación de calor por electricidad (RHE), biogás (RHB), GLP (RHG), keroseno (RHQ) las fuentes tomadas para la generación de calor son algunas de las existentes en la región. Los equipos en este grupo son todos los que transforman una energía determinada para la producción de calor, el uso final de este calor no es requerido por el programa ya que no es necesario chequear su empleo final. Un mayor alcance requerirá una mayor capacidad de cálculo computacional, factor que hoy en día no podemos darnos el lujo de superar.

La (figura 2.2) muestra el sistema energético de referencia elaborado para este sistema, nótese como las energías renovables no requieren de un combustible primario, pero la energía obtenida a partir de las mismas presenta un costo variable de la misma forma que las demás.

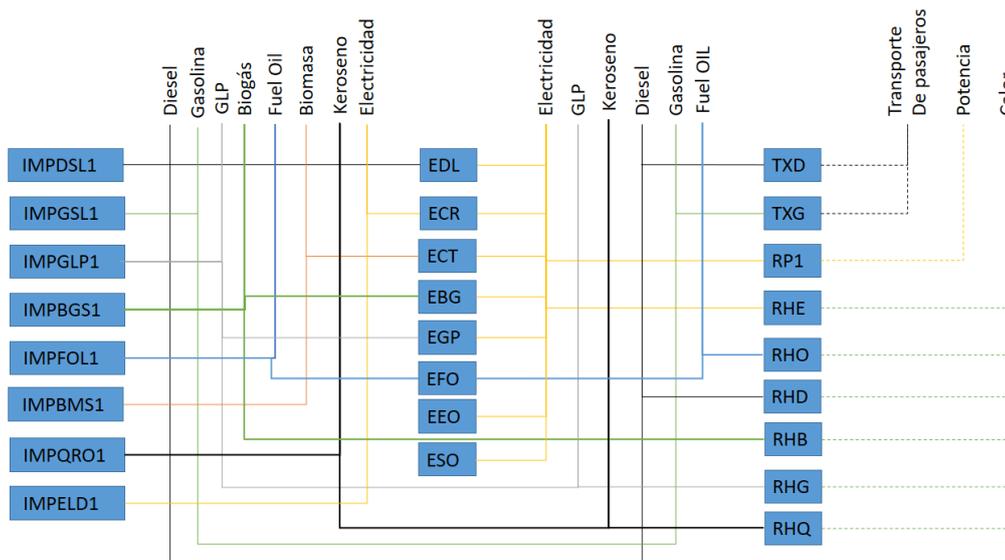


Figura 2.2: Ejemplo de Sistema Energético de Referencia (SER) para la provincia de Villa Clara

2.3.2 Definición de las ecuaciones y los parámetros que tendrá en cuenta el modelo.

MoManI soporta dos versiones de OSeMOSYS, la que integra la función objetiva de “LongCode” la cual es detallada y fácil de leer, pero trabaja con matrices de grandes tamaños y requiere considerable capacidad de cómputo. La segunda versión es llamada “ShortCode” la que se compone de ecuaciones intermedias para reducir los tamaños de las matrices y al mismo tiempo las capacidades de cómputo.

Para nuestro caso utilizamos la versión del “ShortCode”, en primer lugar, porque no poseemos un sistema bastante complejo y la diferencia en los resultados no será tan significativa con la otra versión. En segundo lugar, porque no podemos darnos el lujo de perder procesamiento de cálculo en exceso ya que no disponemos de grandes bancos y se hace indispensable el ahorro del mismo cuanto sea necesario.

En la (figura 2.3) se evidencian la función general utilizada, así como las ecuaciones para el “ShortCode”, utilizamos todas pues queríamos revisar la mayor cantidad de variables posibles a la hora de hacer las comparaciones. Es importante destacar que estas ecuaciones vienen prediseñadas por defecto, pero también se pueden implementar ecuaciones nuevas tantas como comportamientos se deseen chequear.

<p>Objective functions</p> <p><input type="checkbox"/> OFL_Cost</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> OFS_Cost</p>	<p>Constraints</p> <p><input type="checkbox"/> Select all</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Common_Equations</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Acc1_FuelProductionByTechnology</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Acc2_FuelUseByTechnology</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Acc3_AverageAnnualRateOfActivity</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> CAa1_TotalNewCapacity</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> CAa2_TotalAnnualCapacity</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> CAa5_TotalNewCapacity</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> CC1_UndiscountedCapitalInvestment</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> E2_AnnualEmissionProduction</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> EBa10_EnergyBalanceEachTS4</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> EBa1_RateOfFuelProduction1</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> EBa2_RateOfFuelProduction2</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> EBa4_RateOfFuelUse1</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> EBa5_RateOfFuelUse2</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> NCC1_TotalAnnualMaxNewCapacityConstraint</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> NCC2_TotalAnnualMinNewCapacityConstraint</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> OC1_OperatingCostsVariable</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> OC2_OperatingCostsFixedAnnual</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> SI6_SalvageValueStorageAtEndOfPeriod1</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> SV3_SalvageValueAtEndOfPeriod3</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> SV4_SalvageValueDiscountedToStartYear</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> TAC1_TotalModelHorizonTechnologyActivity</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> ShortCode_StorageEquations</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> S11_and_S12_StorageLevelDayTypeStart</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> S13_and_S14_and_S15_StorageLevelDayTypeFinish</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> S5_and_S6_StorageLevelYearStart</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> S7_and_S8_StorageLevelYearFinish</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> S9_and_S10_StorageLevelSeasonStart</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> SC1_LowerLimit_BeginningOfDailyTimeBracketOfFirstInstanceOfDayTypeInFirstWeekConstraint</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> SC1_UpperLimit_BeginningOfDailyTimeBracketOfFirstInstanceOfDayTypeInFirstWeekConstraint</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> SC2_LowerLimit_EndOfDailyTimeBracketOfLastInstanceOfDayTypeInFirstWeekConstraint</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> SC2_UpperLimit_EndOfDailyTimeBracketOfLastInstanceOfDayTypeInFirstWeekConstraint</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> SC3_LowerLimit_EndOfDailyTimeBracketOfLastInstanceOfDayTypeInLastWeekConstraint</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> SC3_UpperLimit_EndOfDailyTimeBracketOfLastInstanceOfDayTypeInLastWeekConstraint</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> SC4_LowerLimit_BeginningOfDailyTimeBracketOfFirstInstanceOfDayTypeInLastWeekConstraint</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> SC4_UpperLimit_BeginningOfDailyTimeBracketOfFirstInstanceOfDayTypeInLastWeekConstraint</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> SC5_MaxChargeConstraint</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> SC6_MaxDischargeConstraint</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> SI7_SalvageValueStorageAtEndOfPeriod2</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> SI8_SalvageValueStorageAtEndOfPeriod3</p>	<p><input checked="" type="checkbox"/> Short_Code_Equations</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> AAC2_TotalAnnualTechnologyActivityUpperLimit</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> AAC3_TotalAnnualTechnologyActivityLowerLimit</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> CAa4_Constraint_Capacity</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> CAb1_PlannedMaintenance</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> E5_DiscountedEmissionsPenaltyByTechnology</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> E6_EmissionsAccounting1</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> E8_AnnualEmissionsLimit</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> E9_ModelPeriodEmissionsLimit</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> EBa11_EnergyBalanceEachTS5</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> EBa9_EnergyBalanceEachTS3</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> EBB4_EnergyBalanceEachYear4</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> RE1_FuelProductionByTechnologyAnnual</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> RE4_EnergyConstraint</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> RM3_ReserveMargin_Constraint</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> SV1_SalvageValueAtEndOfPeriod1</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> SV2_SalvageValueAtEndOfPeriod2</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> TAC2_TotalModelHorizonTechnologyActivityUpperLimit</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> TAC3_TotalModelHorizonTechnologyActivityLowerLimit</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> TCC1_TotalAnnualMaxCapacityConstraint</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> TCC2_TotalAnnualMinCapacityConstraint</p>
--	---	---

Figura 2.3: Ecuaciones utilizadas (tomado del MoManI webserver)

2.3.3 Definición de las constantes.

Luego de definidas las ecuaciones se pasa a definir las constantes. Las mismas definen los lugares, años, combustibles, tecnologías, etc. que se emplearan en el modelo. La (figura 2.4) muestra la página de inicio del MoManI donde se comienzan a integrar todas las constantes.

Villa Clara

Sets

Search:

Name	Description	
DAILYTIMEBRACKET	Daily time brackets define the number of brackets that the days is divided in, e.g., one hour, or mornings, afternoons and evenings. If no storage is modelled, it is sufficient to define each of these three sets with one numerical element, e.g., "1".	Enter data
DAYTYPE	Day-types occurs within a week, e.g., weekdays and weekends. This is only required if storage will be used in the model. Note that this set is need to be defined as numerical, consecutive value, e.g., 1, 2, 3. If no storage is modelled, it is sufficient to define this set with one numerical element, e.g., "1".	Enter data
EMISSION	The EMISSION to be accounted for.	Enter data
FUEL	Energy carriers (fuels) required in the model have to be produced by a technology. Energy carriers (fuels) are only produced if they are going to be consumed or if they feed a final demand. Also demands for energy services are defined as fuels, e.g., a heating demand would be defined as a fuel. It should be written in one word, no spacing is allowed.	Enter data
MODE_OF_OPERATION	Modes of operation are usually defined if a technology can use various input or output fuels and can choose the mix of these input or output fuels. For example, a CHP plant may vary between producing heat in one "mode of operation" and electricity in another.	Enter data
REGION	Commonly, one country is modelled as one region and it may be efficient from a computational point of view to even multiple countries within a single region, e.g., by defining different fuels and technologies for each country.	Enter data
SEASON	Seasons occur within a year and are linked to Timeslices. This set need to be defined as numerical, consecutive values, e.g., 1, 2, 3.	Enter data
STORAGE	It contains the storage facilities	Enter data
TECHNOLOGY	This includes any element of the energy system which generates a fuel (e.g., a coal mine or a wind farm), converts one energy form into another (e.g., a coal-fired power plant), or consumes a fuel (e.g., an air conditioner). It should be written in one word, no spacing is allowed.	Enter data
TIMESLICE	A fraction of the year with specific load and supply characteristics. One time slice could, for example, represent all the weekend evenings in summer, another one the weekday evenings in winter (TIMESLICE = SEASON * DAYTYPE * DAILYTIMEBRACKET)	Enter data
YEAR	Represents the time frame of the model.	Enter data

Figura 2.4: Constantes del modelo (tomado del MoManI webserver)

2.3.3.1 Rotación diaria del modelo: “DAILYTIMEBRACKET”

Esta constante define la división del día, la cual puede ser por horas, u otros parámetros determinados. En nuestro caso subdividimos el día en dos horarios iguales, el primero hace referencia a las doce primeras horas y el segundo a las restantes. Al primer horario se le hace corresponder el nombre de Día y se refiere a las primeras doce horas o conocido también como ante meridiano (a.m.). El segundo por su parte se corresponde con las horas restantes y se le da el nombre de Noche, es el comúnmente conocido como pasado meridiano (p.m.). La (figura 2.5) muestra cómo se realiza la integración de estas constantes en el MoManI. Estos valores deben ser un elemento numérico.

Data entry for set DAILYTIMEBRACKET

Name	Description	Group	ColorRemove
1	Día	<input type="text" value="1"/>	<input type="checkbox"/>
2	Noche	<input type="text" value="1"/>	<input type="checkbox"/>

Figura 2.5: Ingreso de datos para la constante DAILYTIMEBRACKET (tomado del MoManI webserver)

2.3.3.2 Definición de la composición de las temporadas “DAYTYPE”

Esta constante define el tipo de día, solo se utiliza si se aplican sistemas de almacenamiento energético al modelo. En nuestro caso existe la presencia de dos tipos de días, el primero será el laborable que será la semana común cubana y el segundo el no laborable que incluye sábados y domingos, debido a que el comportamiento es desigual en ambos periodos se hace necesario la

revisión de ambos, ya que cada uno presenta sistemas de transformaciones energéticas particulares. Por cada semana del año se asumen dos días no laborables y el resto laborables, ya que, aunque existen sábados laborables y no laborables en la medida que transcurre el año también existen días feriados, razón por lo que se decide tomar una semana típica de cinco días laborables y dos no laborables. El valor que se ingresa debe cumplir dos condiciones estrictas, la primera es que debe ser un valor numérico, y la segunda es que sean valores consecutivos. En el caso de no existir diferencias en la forma de tratar los almacenamientos este valor se indica como “1”. La (figura 2.6) muestra la implementación de este valor en el MoManI para los días tipo: “Laborable” y “No Laborable”.

Data entry for set DAYTYPE

Name	Description	Group	Color	Remove
1	Laborable	▼	Green	-
2	No Laborable	▼	Red	-

Figura 2.6: Ingreso de datos para la constante DAYTYPE (tomado del MoManI webserver)

2.3.3.3 Emisiones revisadas en el modelo: “EMISSION”

En esta constante se definen los tipos de emisiones que se estarán chequeando por cada tecnología a lo largo del tiempo de ejecución del modelo. Para nuestro caso se decidió realizar las comprobaciones del CO2 y el NOX las cuales son las emisiones más significativas que se presentan en la mayoría de las tecnologías. Este factor además de decidir qué tan limpia es una tecnología también influye considerablemente en el costo de las mismas ya que se define una penalización por emisiones para cada factor lo que hace que los costos de mantención de los combustibles se vean ligados considerablemente a las emisiones. En Cuba no se trabaja la penalización de emisiones de las tecnologías, pero se han decidido incluir ya que es una forma de comprobar las penalizaciones que se tendrán como sería en la mayoría de los países y al mismo tiempo balancea de forma más realista los costos de los combustibles que se encuentran sujetos a algún tipo de emisión. En la (figura 2.7) se muestra la implementación en MoManI de las constantes de emisiones como se mencionan anteriormente, las emisiones por tecnología y su penalización se analiza más adelante con el resto de parámetros más significativos del modelo.

Data entry for set EMISSION

Name	Description	Group	Color	Remove
CO2	CO2	▼	Teal	-
NOX	NOX	▼	Green	-

Figura 2.7: Ingreso de datos para la constante EMISSION (tomado del MoManI webserver)

2.3.3.4 Combustibles utilizados: “FUEL”

La constante combustible no solo hace referencia a las variables de combustible que se encuentran en el modelo, sino que tiene que tener en cuenta variables para los sistemas de almacenamiento y además las demandas generales del sistema. La energía eólica y la solar no requieren de combustibles en sí, pero a la hora de analizarlos presenta costos y variaciones en la demanda y el mantenimiento por lo que se hace necesario incluir variables que simulen combustibles relacionados a estos sistemas, también a la hora de anexarlos al sistema se hace necesario utilizar variables de transporte que serían las definidas en estas constantes. Por otra parte, las demandas generales del sistema (potencia, calor y transporte) también se incluyen en este apartado, ya que a la hora de realizar las conexiones entre las demandas, combustibles y tecnologías serán necesarias tratarlas muchas veces como combustibles. La (figura 2.8) muestra la implementación de esta constante en el MoManI, incluyendo las variables explicadas anteriormente como son las de energías renovables y demandas.

Data entry for set FUEL

Name	Description	Group	Color	Remove
Biogas	Biogas		Green	-
Biomasa	Biomasa		Pink	-
Diesel	Diesel		Purple	-
Electricidad	Electricidad		Blue	-
Eolica	Eolica		Light Green	-
Fuel_Oil	Fuel_Oil		Light Blue	-
Gasolina	Gasolina		Orange	-
GLP	GasLicuadoDelPetroleo		Pink	-
Queroseno	Queroseno		Olive Green	-
RH	DemandaDeCalor		Purple	-
RP	DemandaDePotencia		Pink	-
Solar	Solar		Light Green	-
TX	DemandaDeTransporte		Orange	-

Figura 2.8: Ingreso de datos para la constante FUEL (tomado del MoManI webserver)

2.3.3.5 Modo de operación para las tecnologías de almacenamiento: “MODE_OF_OPERATION”

La constante define los modos en que se trabajan las tecnologías de almacenamientos, cuando se deben suplir la red y en qué punto se hace necesario el almacenamiento. Estos valores deben ser números enteros y consecutivos. La (figura 2.9) muestra su implementación en el MoManI.

Data entry for set MODE_OF_OPERATION

Name	Group	Color	Remove
1		Pink	-
2		Cyan	-

Figura 2.9: Ingreso de datos para la constante MODE_OF_OPERATION (tomado del MoManI webserver)

2.3.3.6 Nombre de la región a estudiar: “REGION”

Esta constante define las regiones de trabajo del modelo. Se ha trabajado con una única región que representa la provincia de Villa Clara pues se ha decidido asumir los valores de importación, capital y demandas generales para toda la provincia. Otra opción (la cual se descartó por poca capacidad computacional) es analizar el comportamiento en todos los municipios de la provincia, en este caso ya no existiría una región única, sino que existiría una cantidad determinada de regiones de acuerdo a la cantidad de municipios presentes. Cada región a su vez requiere de parámetros específicos para cada tecnología presente en las mismas. La (figura 2.10) representa la constante REGION implementada en la interfaz del MoManI con la región única de Villa Clara.

Name	Description	Group	ColorRemove
Villa_Clara			

+

Figura 2.10: Ingreso de datos para la constante REGION (tomado del MoManI webserver)

2.3.3.7 Temporadas analizadas en el modelo: “SEASON”

El modelo tomado tiene como regiones los tiempos de zafra y no zafra, pero como estos coinciden con el invierno y el verano en Cuba, se decidió mantener las descripciones anteriormente dichas. De esta forma se analizan dos factores simultáneamente, el primero es la generación de electricidad en el tiempo de zafra con respecto al tiempo en que no se encuentra en funcionamiento pleno la industria azucarera, el otro factor a tomar en cuenta es la variación del consumo en el tiempo de verano contra el tiempo de invierno, los cuales son los dos picos de consumo de la industria energética cubana. La (figura 2.11) muestra como es la adición de estas constantes al MoManI.

Name	Description	Group	ColorRemove
1	Invierno		
2	Verano		

+

Groups

Name

+

Save Cancel

Figura 2.11: Ingreso de datos para la constante SEASON (tomado del MoManI webserver)

2.3.3.8 Constante de almacenamiento: “STORAGE”

Dependiendo de la cantidad de tecnologías de almacenamientos distintas que pueda poseer una región determinada se añaden constantes de almacenamiento las cuales se utilizan para definir en el código del programa cómo se comportan estas tecnologías (cuando deben almacenar y en que porcentaje deben suplir una demanda determinada) en nuestro caso solo poseemos una tecnología para almacenamiento “ECR” la cual se encarga del consumo y la generación eléctrica mediante sistemas de baterías, y de acuerdo con lo anterior se hace necesario la implementación de una constante de almacenamiento para definir el sistema de trabajo de esta tecnología. La (figura 2.12) muestra la constante de almacenamiento utilizada para la tecnología que se posee en su implementación con MoManI.

Data entry for set STORAGE

Name	Description	Group	Color	Remove
DAM	DAM			-

+

Figura 2.12: Ingreso de datos para la constante STORAGE (tomado del MoManI webserver)

2.3.3.9 Definición de tecnologías de trabajo para el sistema: “TECHNOLOGY”

En esta constante se definen todas las variables relacionadas con las tecnologías. Las tecnologías se subdividen en tres tipos principales: tecnologías de transformaciones energéticas y almacenamiento, importación de combustibles y demandas específicas.

- **Tecnologías de transformaciones energéticas y almacenamiento:** Estas son las tecnologías principales de transformación energética, como son las plantas de generación, energías renovables y sistemas de almacenamiento energéticos. La nomenclatura de estas tecnologías inicia con la letra “E” para especificar que se encuentran en este grupo. Este tipo de tecnología cumple la función de generar energía u otras sustancias específicas, como sería el caso de poseer otro tipo de plantas.
- **Importación de combustibles:** Estas tecnologías definen los tipos de combustibles que se importaran a lo largo de la vida útil del modelo, no necesariamente el programa importara todos los combustibles puesto que es posible que un combustible determinado sea capaz de suplir la demanda total de otro con un menor costo. Para estas tecnologías se utiliza las siglas “IMP” para definir que se encuentran en este subgrupo.
- **Demandas específicas:** Estas tecnologías son las que fijan las principales demandas de la región. Para el software las demandas pueden suplirse unas a otras, por ejemplo, puede darse el caso de que una tecnología de generación de calor por biomasa sea más eficiente que

una generación por Diésel y no sea necesario la importación de Diésel puesto que la demanda de calor quedaría suplida con esta tecnología. Para las demandas de calor se utilizan las siglas “RH”, para las de potencia “RP” y para las de transporte “TX”. Las demandas que terminan con la letra “u” se refieren a las demandas máximas que tendrá una tecnología específica.

La (figura 2.13) muestra la integración al momani de las tecnologías presentes, nótese como aparecen las tecnologías de movimientos de energía que se definen con la letra “u” y se utilizan para las demandas presentes en el modelo. También la importación de los combustibles y las demandas específicas aparecen en esta integración.

Data entry for set TECHNOLOGY

Name	Description	Group	Color	Remove
EBG	Generacion electrica por Biogas	▼	Black	—
ECR	Consumo y generacion electrica	▼	Purple	—
ECT	Generacion electrica por biomasa(Central Azucarero)	▼	Grey	—
EDL	Generacion electrica por Diesel	▼	Brown	—
EEO	Generacion electrica por turbinas eolicas	▼	Yellow	—
EFO	Generacion electrica por Fuel Oil	▼	Cyan	—
EGP	Generacion electrica por GLP	▼	Green	—
ESO	Generacion electrica por paneles solares	▼	Blue	—
IMPBGS	Importacion de Biogas	▼	Green	—
IMPBMS	Importacion de Biomasa	▼	Olive	—
IMPDSL	Importacion de Diesel	▼	Red	—
IMPELC	Importacion de Electricidad	▼	Orange	—
IMPFOL	Importacion de Fuel Oil	▼	Olive	—
IMPGLP	Importacion de GLP	▼	Green	—
IMPGSL	Importacion de Gasolina	▼	Dark Blue	—
IMPQRO	Importacion de Queroseno	▼	Blue	—
RHB	Demanda de calor por Biogas	▼	Purple	—
RHD	Demanda de calor por Diesel	▼	Purple	—
RHE	Demanda de calor por Electricidad	▼	Green	—
RHG	Demanda de calor por GLP	▼	Light Green	—
RHO	Demanda de calor por Fuel Oil	▼	Black	—
RHQ	Demanda de calor por Queroseno	▼	Purple	—
RHu	Demanda de calor maxima	▼	Blue	—
RPT	Demanda de potencia	▼	Brown	—
RPu	Demanda de potencia maxima	▼	Light Green	—
TXD	Demanda de transporte (Diesel)	▼	Purple	—
TXE	Demanda de transporte (Electricidad)	▼	Cyan	—
TXG	Demanda de transporte (Gasolina)	▼	Light Green	—
TXu	Demanda de transporte Maxima	▼	Purple	—

Figura 2.13: Ingreso de datos para la constante TECHNOLOGY (tomado del MoMani webserver)

2.3.3.10 Tiempos de estudio del modelo: “TIMESLICE”

Esta constante define los periodos de tiempo en los que se subdividirá el año para su estudio. Debe cumplir la condición de: $TIMESLICE = SEASON * DAYTYPE * DAILYTIMEBRACKET$, o sea que depende de todas las distribuciones anteriores de horarios. Este factor es uno de los de mayor carga pues en cada uno se hace necesario la revisión de todos los parámetros de cada tecnología. En nuestro caso utilizamos ocho variables para definir estos factores, en un primer nivel tenemos la subdivisión de invierno y verano, posteriormente pasamos a analizar los que son laborables y los que no y finalmente los días y las noches. La (figura 2.14) muestra cómo se distribuyen estos valores en la web de MoManI.

Data entry for set TIMESLICE

Name	Description	Group	Color	Remove
ILBD	Invierno Laborable Dia			-
ILBN	Invierno laborable Noche			-
INLBD	Invierno No laborable Dia			-
INLBN	Invierno No laborable Noche			-
VLBD	Verano Laborable Dia			-
VLBN	Verano Laborable Noche			-
VNLBD	Verano No laborable Dia			-
VNLBN	Verano No Laborable Noche			-

Figura 2.14: Ingreso de datos para la constante TIMESLICE (tomado del MoManI webserver)

2.3.3.11 Años a analizar por el modelo: “YEAR”

Esta constante define el tiempo en el cual el modelo se encuentra en funcionamiento, es recomendable utilizar periodos mayores a los diez años puesto que la utilización de periodos de menor rango significa un menor porcentaje de exactitud. Es importante tener en cuenta que mientras mayor sean los periodos se hace necesario mayores capacidades computacionales, pero de la misma forma la tasa de exactitud que arroja el modelo crece considerablemente. Para nuestro caso estaremos analizando los años que componen desde el 2017 al 2030, de esa forma sobrepasamos el límite de trabajo requerido y no se requieren altas capacidades computacionales.

Esta constante es la de mayor carga a la hora de la simulación del OSeMOSYS ya que es la principal, todas las demás constantes y parámetros se analizarán para cada uno de los años propuestos. Cuando el OSeMOSYS realice la simulación comenzara revisando todos los parámetros a partir de la sucesión de años propuestos, de esta forma el programa es capaz de generar resultados anuales de los mejores requerimientos para nuestro sistema. La (figura 2.15) muestra la implementación en el MoManI de esta constante, nótese que los años deben encontrarse consecutivamente ordenados, aunque no necesariamente

tienen que ser mediante un año de diferencia ya que pueden usarse periodos más largos entre los mismos (ejemplo: 2027, 2020, 2023, 2026, etc.).

Data entry for set YEAR

Name	Group	Color	Remove
2017		Red	-
2018		Blue	-
2019		Yellow	-
2020		Light Green	-
2021		Dark Blue	-
2022		Cyan	-
2023		Green	-
2024		Light Green	-
2025		Dark Blue	-
2026		Dark Blue	-
2027		Light Blue	-
2028		Light Green	-
2029		Dark Blue	-
2030		Green	-

Figura 2.15: Ingreso de datos para la constante YEAR (tomado del MoManI webserver)

2.3.4 Parámetros del Modelo

Los parámetros del modelo definen como será el comportamiento de las tecnologías a lo largo de la vida del sistema modelado. Puesto que presentan un gran número, solo se expondrán las principales características de las que se consideran de mayor importancia, las más importantes se encuentran explicadas brevemente en el anexo 2.

Estos valores se obtienen mediante predicciones estadísticas, por lo que se hace necesario una actualización anual de las mismas, debido a la variación en cada año de sucesos específicos. Para esta simulación se utiliza un software llamado “Sistema de Planificación de Alternativas Energéticas a Largo Plazo (LEAP por sus siglas en inglés)”, pero debido a problemas de restricciones extraterritoriales no ha sido posible conseguir una licencia que permita su utilización. Para resolver este problema se decidió simular los valores mediante métodos estadísticos clásicos, que consiste en tomar una muestra de valores y a partir de estos simular cómo será su comportamiento en los años posteriores, razón por la cual se inicia el modelo en el año 2017.

En este epígrafe se analizarán los parámetros relacionados a los costos, relaciones de actividad, tiempo y demandas, los demás parámetros conjunto con su explicación se podrán encontrar en el anexo 2.

2.3.4.1 Demandas

En nuestro caso existen tres demandas específicas a analizar las cuales hacen referencia al transporte, la demanda de acuerdo a la generación de calor

y potencia. Las mismas fueron obtenidas a partir de los datos existentes en el anuario estadístico de la provincia de Villa Clara. En la (tabla 2.1) se muestran estas demandas, así como su predicción de crecimiento para 13 años futuros. El crecimiento de las demandas es exponencial de acuerdo al crecimiento poblacional. Las unidades de medidas utilizadas son expresadas en PJ/a.

Tabla 2.1: Demandas específicas por años

Recurso	UM	Año de simulacion													
		2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Demanda															
RH	PJ/a	5,13	5,23	5,34	5,44	5,55	5,66	5,78	5,89	6,01	6,13	6,25	6,38	6,51	6,64
RP	PJ/a	3,95	4,02	4,10	4,19	4,27	4,36	4,44	4,53	4,62	4,72	4,81	4,91	5,00	5,10
TX	PJ/a	0,70	0,71	0,73	0,74	0,76	0,77	0,79	0,81	0,82	0,84	0,86	0,87	0,89	0,91

2.3.4.2 Tiempo

Los tiempos de subdivisión del modelo se encuentran dividido en tres constantes definidas anteriormente y tres parámetros. También presentan otros tres parámetros destinados a identificar la rotación y el ordenamiento de cómo deben analizarse.

Los parámetros relacionados a la identificación de la utilización del tiempo y su distribución anual son: “YearSplit”, “SpecificDemandProfile” y “DaySplit”. Estos parámetros definen como es el comportamiento de los años y además los tiempos de trabajo de las tecnologías.

El parámetro “YearSplit” define como es el comportamiento del tiempo en relación a las temporadas y tipos de días que se encuentran en el modelo, la suma anual de todos sus valores debe ser igual a la unidad puesto que esto representan las 8 760 h que componen el año, la distribución del mismo se hace de acuerdo a los meses y los otros factores que componen los días y sus subdivisiones. La (tabla 2.2) muestra cómo se decidió realizar la distribución del “YearSplit” para el sistema. Para cada año la rotación será la misma debido a que las principales estaciones de invierno y verano hacer referencia a los tiempos de zafra y la ausencia de la misma.

Tabla 2.2: Composición del parámetro “YearSplit”.

Designación	Fracción	Leyenda
ILBD	0,117808219	Invierno Laborable Día
ILBN	0,117808219	Invierno Laborable Noche
INLBD	0,046575342	Invierno No Laborable Día
INLBN	0,046575342	Invierno No Laborable Noche
VLBD	0,239726027	Verano Laborable Día
VLBN	0,239726027	Verano Laborable Noche

Composición del parámetro "YearSplit". (Continuación)		
Designación	Fracción	Leyenda
VNLBD	0,095890411	Verano No Laborable Día
VNLBN	0,095890411	Verano No Laborable Noche

2.3.4.3 Costos

El modelo presenta tres tipos diferentes de costos, el primero hace referencia al costo capital de implementación de una tecnología específica, el segundo a la variación de su costo con relación al tiempo y la última con los costos fijos que presentan las tecnologías. No existe ningún costo que sea igual a cero, por lo que los costos que no se indican son tratados como 0.00001 Millones de pesos, esto se hace debido a que algunas tecnologías presentan costos que son demasiado bajos en relación a la tasa de trabajo del modelo y no pueden existir costos que sean iguales a cero.

La (tabla 2.3) muestra una relación de los tres tipos de costos diferentes que se presentan en el modelo.

Tabla 2.3: Costos de las tecnologías presentes en el modelo.

Tecnología	Definición	Costo Inicial	Costo Variable	Costo Capital
		M\$/GW	M\$/PJ	M\$/GW
EBG	Generación eléctrica por biogás	6,9	5,85	1342
ECR	Consumo y generación eléctrica	30	0	900
ECT	Generación eléctrica por Biomasa(Central Azucarero)	110	4,2	4985
EDL	Generación eléctrica por Diésel	30	0	1000
EEO	Sistemas de generación de electricidad eólicos	40	0	1200
EFO	Generación eléctrica por Fuel Oil	35	0,3	100
EGP	Generación eléctrica por GLP	37	0,3	1300
ESO	Sistemas de generación de electricidad solar	80	0	1500
		M\$/PJ/a	M\$/PJ	M\$/PJ/a
IMPBGS1	Importación de Biogás	0	2	0
IPMBMS1	Importación de Biomasa	0	3	0
IMPDSL1	Importación de Diésel	0	10	0
IMPELD1	Importación de Electricidad	0	2	0
IMPFOL1	Importación de Fuel Oil	0	8	0
IMPGLP1	Importación de GLP	0	9	0
IMPGSL1	Importación de Gasolina	0	15	0
IMPKRO1	Importación de Keroseno	0	2	0
RHB	Demanda de calor por Biogás	1	0	95
RHD	Demanda de calor por Diésel	1	0	100
RHE	Demanda de calor por electricidad	0	0	90
RHG	Demanda de calor por GLP	1	0	98
RHK	Demanda de calor por keroseno	1	0	97

Costos de las tecnologías presentes en el modelo. (Continuación)				
Tecnología	Definición	Costo Inicial	Costo Variable	Costo Capital
RHO	Demanda de calor por Fuel Oil	1	0	90
RP1	Demanda de Potencia	9	0	100
TXD	Demanda de transportación por Diésel	52	0	1044
TXE	Demanda de transporte por electricidad	100	0	2000
TXG	Demanda de transportación por gasolina	48	0	1044

2.3.4.4 Relaciones de actividad

La relación de actividad define cuanto de combustible se debe suministrar a una tecnología para producir un PJ de energía. Esta relación se compone de dos partes, la primera es "InputActivityRatio" la cual define cuanto debe entrarle a una tecnología para producir una cierta cantidad de energía o recurso específico. La segunda parte se denomina "OutputActivityRatio" y define que recurso debe salir de una tecnología específica. En ambos casos la unidad representa un PJ de energía y los valores de entrada se dan en relación con el valor de salida. La (tabla 2.4) define el comportamiento específico de esta relación, en nuestro sistema se ha tomado que la relación de entrada/salida se mantendrá constante a lo largo del periodo, ya que su simulación depende de softwares más especializados a los cuales no se presentan acceso.

Tabla 2.4: Relaciones de entrada/salida de energía del modelo

Tecnología	Relación de entrada	Relación de salida
EBG	3,13	1
ECR	1,39	1
ECT	3,6	1
EDL	3,4	1
EEO	2,5	1
EFO	3,13	1
EGP	3,13	1
ESO	2	1
RHB	1	1
RHD	1	1
RHE	1	1
RHG	1	1
RHK	1	1
RHO	1	1
RP1	1	1
TXD	4,33	1
TXE	1,21	1
TXG	4,33	1

2.4 Conclusiones del Capítulo

- Es necesario contar con datos fiables y seguros que permitan tener seguridad en los resultados y su análisis, esto puede provocar decisiones incorrectas.
- Al analizar las principales constantes a tener en cuenta a la hora de realizar la modelación, así como los parámetros más significativos en el modelo se determinó que son los referentes a las relaciones de entrada/salida de las relaciones de actividad, la distribución de los tiempos anuales y por tecnología y los costos asociados a los combustibles y las tecnologías.
- Es importante el diseño del Sistema Energético de Referencia (SER) puesto que de este método depende el resultado final de nuestro modelo. En el mismo se exponen las principales importaciones de combustibles, sistemas de transformaciones energéticas y demandas que se encontraran en un caso determinado
- Resulta de vital importancia establecer cada uno de los conjuntos de parámetros a definir para la construcción de los modelos matemáticos que permitan la optimización de los sistemas; como pueden ser la región, los años de análisis, tecnologías de generación y de almacenamiento, portadores energéticos, emisiones, modos de operación de las tecnologías según las condiciones de la región

Capítulo III: Análisis de resultados entre las simulaciones del modelo.

En el presente capítulo se realiza el análisis de los resultados con las variaciones del modelo realizadas. Las variaciones se realizaron en dos factores, el primero consiste en un incremento de las demandas anuales en un 2%, mientras que el segundo presenta un incremento del precio los combustibles fósiles de un 40% y las energías renovables se le decremento un 15%, los costos de importación eléctrica y de la energía suministrada por la red nacional se mantiene constante.

Las comparaciones y graficas obtenidas se toman de la interfaz web del MoManI de los factores más significativos que se presentan. El modelo utilizado es el mismo, solo se varían los parámetros anteriormente mencionado. La variación de más parámetros es una opción, pero se toman estos debido a que representan los más significativos para el modelo.

3.1 Análisis de resultados para el caso base de Villa Clara.

Las gráficas y datos de las simulaciones se obtienen del MoManI, aunque también se genera un archivo de datos con extensión *.txt con los mismos valores. Las gráficas mostradas se obtienen de la web del MoManI, las mismas muestran los valores requeridos ubicándonos en un año determinado o bien descargando un archivo *.csv que contiene esta información. Para una mejor explicación de los datos se muestran las gráficas obtenidas mediante el servidor web.

3.1.1 Demandas.

El crecimiento de la demanda generada por las tecnologías presente se mantiene en crecimiento casi constante en relación a los años modelados. Se evidencia como el tiempo de mayor demanda se acumula en la sección de Invierno No Laborable Día (INLBD), debido al aumento de la demanda de calor que se requeriría en esa fecha, también se puede apreciar como la menor demanda se centra en el Verano Laborable Noche (VLBN), ya que en este punto la generación de calor cae considerablemente. Aunque se evidencia un aumento en la generación de potencia en el verano, la generación de calor del periodo disminuye considerablemente y además el horario nocturno presenta una disminución en los consumos aún mayores, por lo que era de esperarse que este fuese el periodo de menor consumo. Al final del periodo el valor de demanda en el INLBN alcanza los 2,5 PJ, mientras que por otra parte en el VLBN se llegan a los 0,79 PJ. La demanda al final del periodo alcanza el valor de 11,75 PJ. La (figura 3.1) muestra como es el comportamiento de la demanda de acuerdo con los años estudiados, cada color se refiere a un "TIMESLICE" diferente para poder analizar las demandas de forma más simplificada.

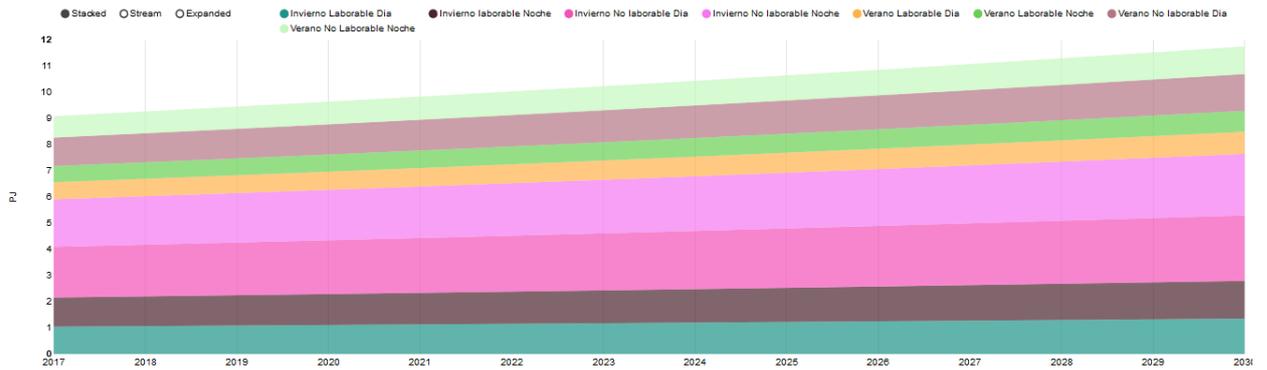


Figura 3.1: Demandas por periodos del modelo.

3.1.2 Capital Invertido.

El programa realiza una estimación inicial en las demandas de potencia sobre los 1 136,18 M\$ inicialmente y también predice una necesidad de demanda de calor por keroseno que se sitúa sobre los 650,29 M\$. Con estas inversiones mantiene una demanda de capital anual que oscila entre los 150 M\$ a 160 M\$. En el 2026 aparece una demanda de inversión en biogás que alcanza el mayor valor en el 2028 con 2 975 M\$, posteriormente disminuyen las inversiones considerablemente, en ese periodo aparece también una inversión destinada a la transportación por diésel que alcanza su máximo valor en el 2028 con 659 M\$. A partir del 2026 vuelve a realizar una inversión en potencia que alcanza el valor máximo en el 2027 con 1 281,68 M\$ y posteriormente disminuye hasta llegar a cero para el 2028. Los datos mencionados se muestran más claramente en la (figura 3.2) la cual representa la gráfica de obtención de estos valores.

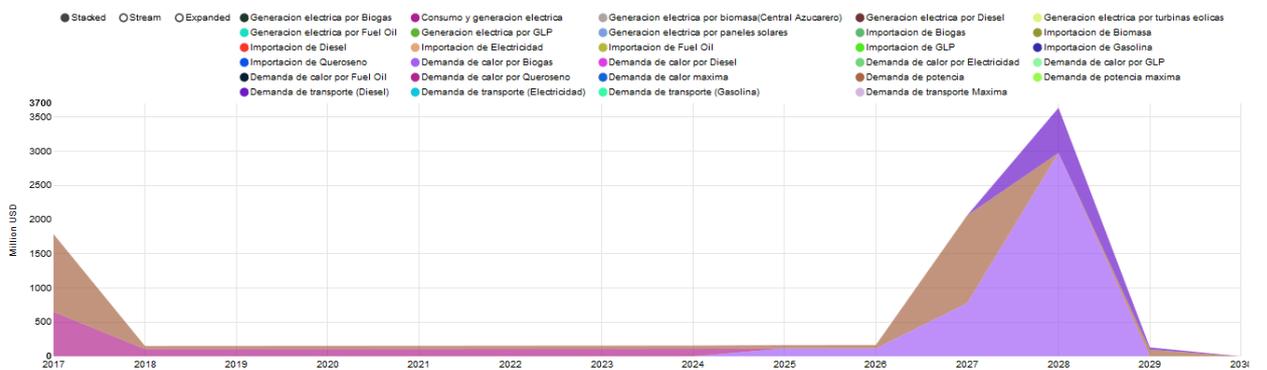


Figura 3.2: Capital Invertido.

3.1.3 Emisiones anuales.

Las emisiones anuales se subdividen en dos grupos, las que se dan por CO₂ y las de NO_x. Las emisiones del CO₂ son realizadas por las tecnologías de transformaciones energéticas, mientras que las obtenidas por el NO_x son dadas

por las tecnologías destinadas a la transportación. Según el OSeMOSYS la principal emisión a tener en cuenta es el NO_x mientras que el CO₂ presenta un consumo relativamente menor. Su incrementación viene dada por la incrementación de las tecnologías, evidentemente a medida que se monten mayores capacidades de carga aumentan las emisiones. Los valores críticos de las mismas se dan en el 2007 alcanzando valores de emisión por CO₂ de 71,22 Kton mientras que el NO_x alcanza un valor de 173,03 Kton. La (figura 3.4) muestra el comportamiento de las mismas en el periodo de tiempo simulado, del 2026 al 2028 se evidencia un incremento de las emisiones, factor que se debe a que en esos mismos años existe un aumento en las demandas de transporte.



Figura 3.4: Emisiones anuales.

3.1.4 Uso de las tecnologías.

La (figura 3.5) muestra como es el comportamiento de las tecnologías utilizadas, estos valores se dan en relación al índice de actividad de las tecnologías por producción de energía. Los picos de demanda que aparecen en el 2027 muestran cómo crecen las demandas de potencia, calor y transporte y al software se le hace necesario recurrir a otras alternativas que se mantienen pasivas en otros años. Para este año las demandas de potencia alcanzan una relación de 4,8 mientras que el transporte por diésel 1,92 y el de gasolina 1,8. En este periodo igualmente el software se le hace necesario recurrir al almacenamiento para satisfacer la demanda, y aumenta las generaciones por diésel, gasolina y GLP. A partir del 2027, las demandas de biogás aumentan con relación de 4.12 y de seguir la simulación en años posteriores muy posiblemente este valor seguirá en ascenso.

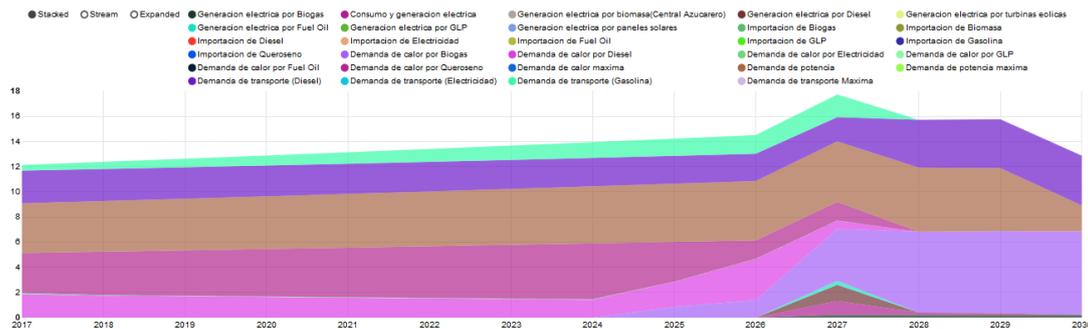


Figura 3.5: Uso de las Tecnologías

3.1.5 Producción por tecnologías.

La (figura 3.6) muestra las producciones por tecnologías presentes, sus valores se dan en PJ y según se evidencia el aumento anual es constante, a partir del 2026 la producción por tecnología varía debido al surgimientos de las nuevas demandas. Lo más significativo en este punto es que a partir del 2026 el software comienza a utilizar las energías renovables y sustituirlas por los combustibles fósiles. Entre lo más significativo que se muestra es la utilización del biogás a partir del 2026 se incrementa su utilización considerablemente y se prioriza la demanda de calor por biogás. En el 2027, el año de mayor utilización, el software comienza a disminuir la importación eléctrica de forma considerable, teniendo 6,67 PJ en el 2027 y para el 2030 solo 3,2 PJ. De la misma forma el biogás aumenta considerablemente su producción teniendo en el 2027 4,36 PJ y para el 2030 6,82 PJ, siendo la tecnología más demandada para el 2030. Las importaciones del diésel disminuyen considerablemente desde los 6,56 PJ en el 2027 hasta alcanzar un valor para el 2030 de 3,99 PJ.

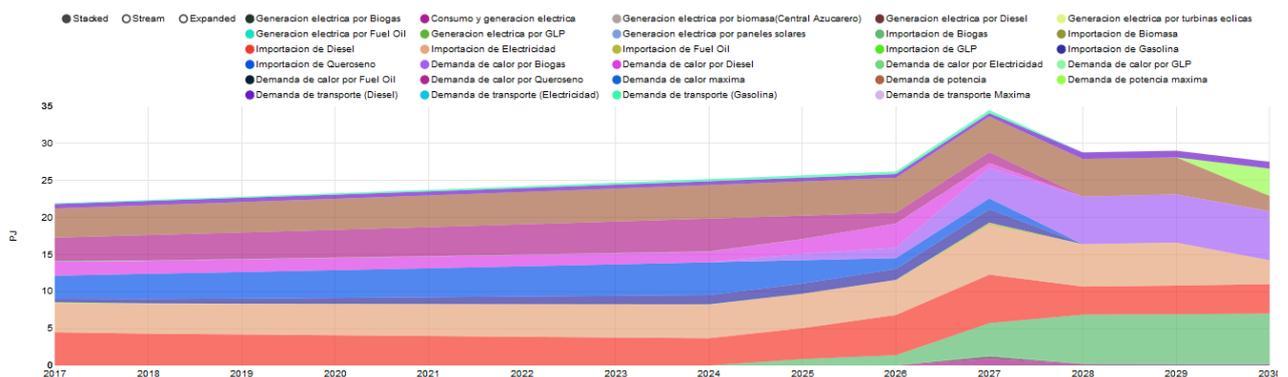


Figura 3.6: Producción de las tecnologías

3.2 Comparación del caso base con la modificación en la demanda de un 2% en los últimos cuatro años.

Para comprobar cómo sería el comportamiento del modelo se le realizaron otras versiones donde se le modifican parámetros específicos. La primera modificación consiste en un aumento de la demanda un 2% los últimos cuatro años, de esta forma se analizará como el modelo se comporta con relación a este suceso. Sobre esta modificación se estará exponiendo los principales resultados en el siguiente epígrafe.

3.2.1 Demandas.

Como era de esperarse el incremento de la demanda trae consigo un incremento de todos los factores. En el caso de la demanda el software mantiene la misma y se ve un crecimiento más acelerado a partir del 2026 (año en que se realiza la primera modificación). El incremento programado por el programa se mantiene sobre un 2% en todo momento a partir del 2026, pero particularmente el incremento del Invierno No Laborable Día (INLBD) aumenta en una tasa del 2,5% a diferencia de los otros. También el incremento del Verano Laborable Noche (VLBN) es de un 1,5%. La (figura 3.7) muestra el nuevo comportamiento de las demandas con el incremento del 2% sobre los cuatro años finales.

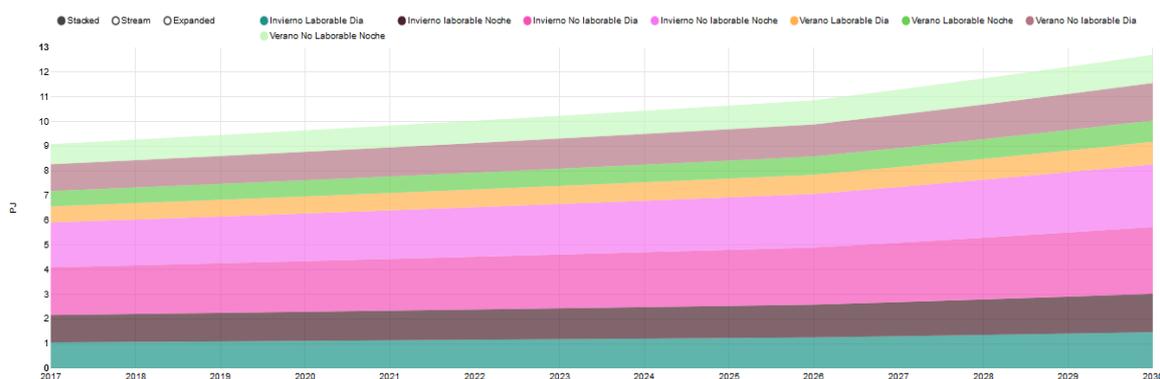


Figura 3.7: Demandas

3.2.2 Capital Invertido.

La (figura 3.8) muestra cómo se evidencia el incremento de la potencia con respecto con el original. Nótese que la inversión en demanda de potencia crece significativamente en el año 2027 mientras que la de biogás es menor, también la demanda de diésel para transportación comienza en el 2027 y su costo se acumula más aisladamente que el año anterior. En este punto si se analizan las demandas de la región ocurre algo interesante, la distribución de demandas en el modelo original arroja un pico de demanda en el 2028 de 3 634,71 M\$ y disminuye considerablemente las inversiones, mientras que al aumentar las demandas en el 2027 ocurre un pico de 2 320,28 M\$ y se demora más en disminuir las inversiones.

Como es necesario suplir las demandas que se poseen el software invierte más en tecnologías de potencia, haciendo que los costos se prolonguen más tiempo a diferencia del modelo original.

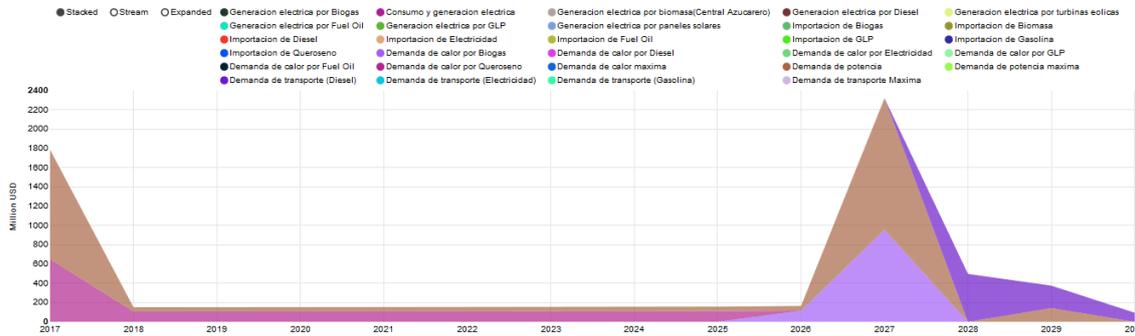


Figura 3.8: Capital Invertido

3.2.3 Emisiones anuales.

Al presentar un incremento de la demanda el OSeMOSYS tiene que incrementar la cantidad de tecnologías para satisfacer la demanda, puesto que este suceso se desarrolla en relación a la cantidad de emisiones estas deben aumentar periódicamente. Como las inversiones de diésel se separan de las demás inversiones aparecen dos picos en las emisiones del NO_x, en el modelo original existía un pico en el 2027 de 173,03 Kton, mientras que en analizado con la variación aparecen dos picos, el primero en el 2027 de 175,78 Kton y el segundo en el 2029 de 202,86 Kton, debido a que las inversiones se reestructuran. También depende de la existencia de mayores generadores para el cubrimiento de esta demanda y las demandas de transporte y generación aumentan significativamente. La (figura 3.9) muestra el comportamiento de las emisiones y se evidencia claramente lo expuesto anteriormente.



Figura 3.9: Emisiones anuales

3.2.4 Uso de las tecnologías.

El uso de las tecnologías aumenta considerablemente en relación al modelo original, la producción de biogás es menos agresiva mientras que la demanda de transporte es mucho mayor a la presentada en el modelo original. También la demanda de potencia presenta un crecimiento más estable y la demanda de calor realizada por keroseno se incrementa considerablemente. Las generaciones eléctricas por Fuel Oil y GLP disminuyen considerablemente y la energía presente en el almacenamiento se utiliza en mayor cantidad. La demanda de biogás utilizada para calentamiento disminuye un 30%. La demanda de transporte por diésel aumenta un 8% al final del periodo del modelo. En relación, al aumentar las demandas totales el programa debe aumentar considerablemente las demandas de combustibles fósiles debido a que necesita suplir las demandas de forma más rápida. La (figura 3.10) muestra el comportamiento del uso de las tecnologías por años y se evidencian las comparaciones hechas anteriormente, así como el aumento en el uso de las tecnologías por combustibles fósiles.

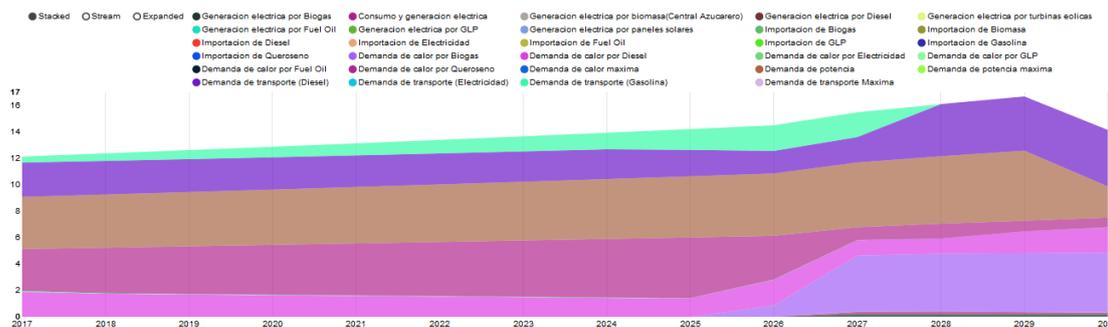


Figura 3.10: Uso de las tecnologías

3.2.5 Producción por tecnologías.

El aumento de la demanda refiere un aumento significativo de las producciones por tecnología, como se evidencia en la (figura 3.11), en relación con el caso base que aparecía un pico de demanda que alcanzaba los 34,51 PJ, ahora presentamos dos los cuales alcanzan valores de 35,76 PJ para el que se realiza en el 2027 y 41,23 PJ para el que aparece en el 2029. Evidentemente al aumentar la demanda en los cuatro últimos años la producción por tecnología deberá satisfacer este valor por lo que se producción se verá en ascenso de forma considerable. Lo más significativo en este caso es como la energía tomada de la red eléctrica en el caso original se disminuye para realizar importaciones de diésel. Para el año 2027 presentábamos una importación de la red en el caso base de 6,67 PJ, y la importación de diésel alcanzaba los valores de 6,56 PJ, al aplicarle la modificación a la demanda estos valores en el 2027 pasan a ser: importación de electricidad 4,48 PJ y la importación de diésel 11,17. Nótese

como para mantener la demanda el software requiere realizar un alza en las tecnologías de producción por diésel.

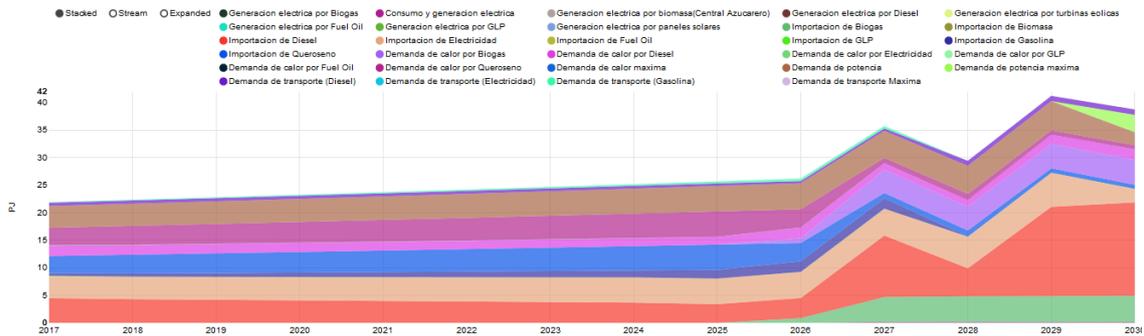


Figura 3.11: Producción de las tecnologías

3.3 Comparación del caso base con los costos presentes en los combustibles fósiles y renovables.

Para la segunda comprobación se les aumentan los costos a los combustibles fósiles en un 40% mientras que se disminuyen los costos de las energías renovables en un 15%. El objetivo es ver la variación de tecnologías y las demandas aplicando esta medida. La utilización de los combustibles fósiles siempre será imprescindible puesto que, aunque se le varíen los costos siguen presentando bajos factores de inversiones, aunque este suceso ocurra su utilización debe disminuir considerablemente en relación al modelo original.

3.3.1 Demandas.

Al realizar la modificación en los costos, las demandas se mantienen constantes. Ya que las mismas se definen a partir de las demandas realizadas y las demandas generales no se le han realizado modificaciones para este modelo. La (figura 3.12) muestra el grafico de demandas, nótese que no presenta absoluta variación con relación al modelo original.

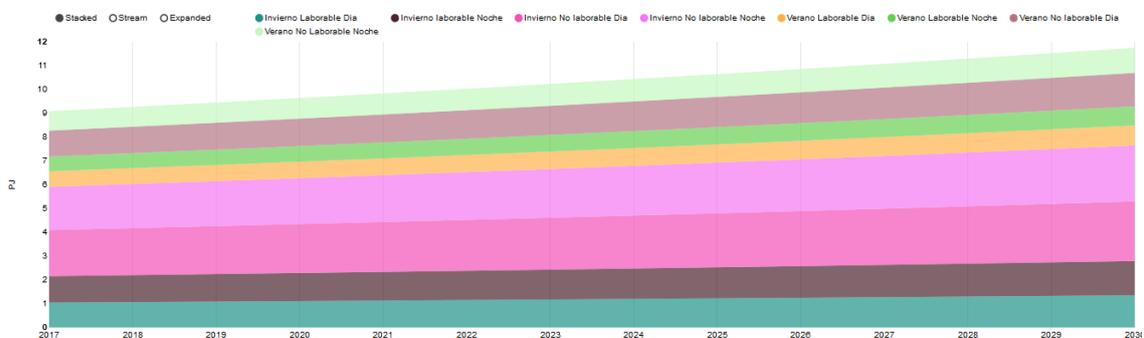


Figura 3.12: Demandas

3.3.2 Capital Invertido.

Las inversiones realizadas durante el periodo de modelaje tienen una disminución a largo plazo de un 4%, este valor se alcanza en el 2028 que es el año de mayor cantidad de inversiones requeridas. La demanda de calor por biogás que es el costo de mayor peso disminuye desde los 2 975,49 M\$ en el modelo original hasta los 2 897,35 M\$. La (figura 3.13) muestra la variación de este parámetro en el sistema.

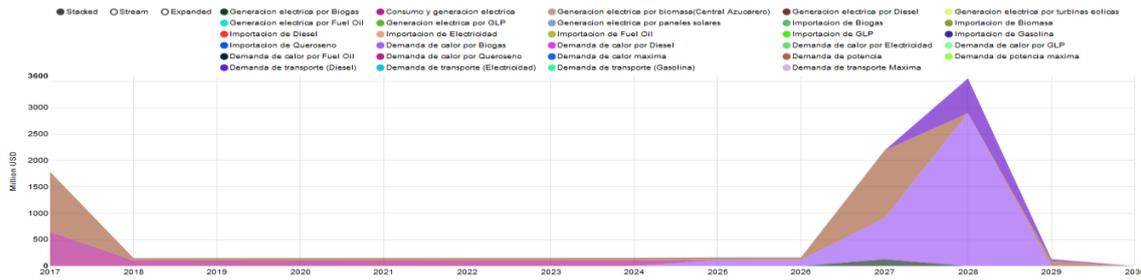


Figura 3.13: Capital Invertido

3.3.3 Emisiones anuales.

Existe una disminución de emisiones totales a partir del 2027 de un 6%, debido a la disminución en la inversión de capital en las tecnologías. Para el modelo original en el 2027 existía una emisión de NO_x de 173,03 Kton y luego de aplicar la modificación de los costos se llega al valor de 166,76 Kton. Las emisiones de CO₂ disminuyen también, teniendo 71,22 Kton en el modelo original en el año 2027 y luego de la simulación actualizada obtenemos 64,99 Kton. En este punto se evidencia una modificación en las emisiones del NO_x de un 4% y en las emisiones del CO₂ un 2%. La (figura 3.14) muestra el comportamiento de este parámetro.

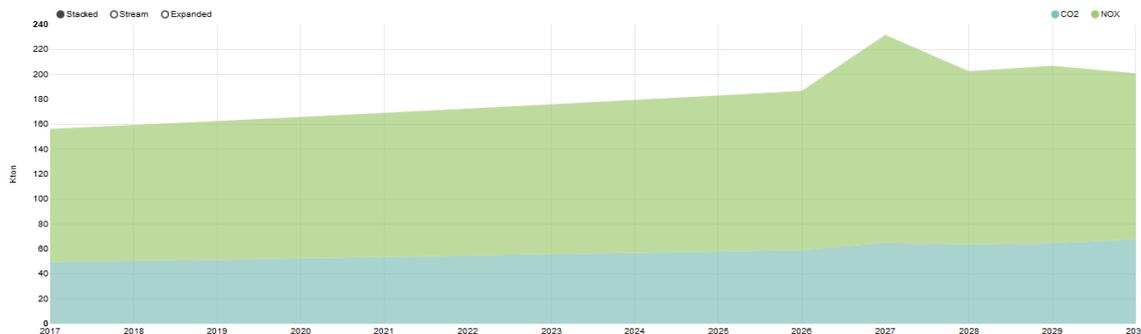


Figura 3.14: Emisiones Anuales

3.3.4 Uso de las tecnologías.

Al disminuir los costos de los combustibles renovables y aumentar el costo de los combustibles fósiles el software disminuye considerablemente la utilización de energías no renovables. Presta la principal atención a la utilización del biogás para generación eléctrica, así como disminuye la energía eléctrica demandada de la red nacional. La demanda de biogás para generación eléctrica pasa de 0,23 en el modelo original en el 2027 a 0,52 en la nueva simulación. Asimismo, las generaciones utilizadas en las energías de reserva disminuyen considerablemente, en el 2027 pasan de un índice de utilización de 1,088 a 0,35 al generar los datos de las nuevas simulaciones. Los datos se muestran en la (figura 3.15), nótese las variaciones en relación al modelo original, las disminuciones considerables que presentan los combustibles fósiles para generación eléctrica y de calor. El transporte no presenta variación en estos años con lo cual se define que, aunque aumenten los precios aun la utilización del diésel y la gasolina para transportación sigue siendo muy imprescindible.

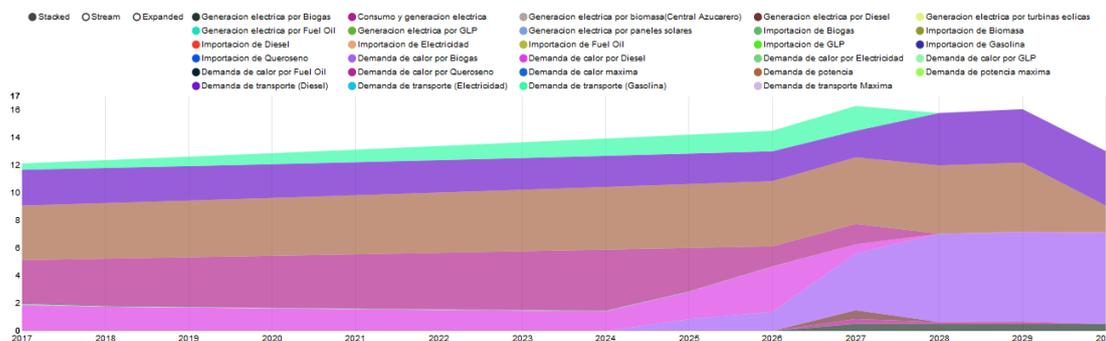


Figura 3.15: Uso de las tecnologías

3.3.5 Producción por tecnologías.

Las producciones por tecnología disminuyen a lo largo de la vida útil del periodo con respecto al original, aunque su disminución no es muy significativa ya que oscila entre un 2% y un 3% con respecto al año anterior. Tomando el año 2027 como referencia para las comparaciones por ser un pico en la producción obtenemos que la importación de electricidad aumenta desde un 6,67 PJ a 7,2 PJ, así mismo las importaciones de diésel disminuyen desde los 6,5 PJ a los 6,03 PJ. La producción de biogás aumenta desde los 4,35 PJ a los 4,64 PJ y su empleo para la generación eléctrica se modifica desde los 0,09 PJ en el modelo original hasta alcanzar valores de 0,21 PJ en la nueva simulación. La (figura 3.16) muestra más detalladamente como es la variación para la nueva simulación del parámetro mencionado anteriormente.

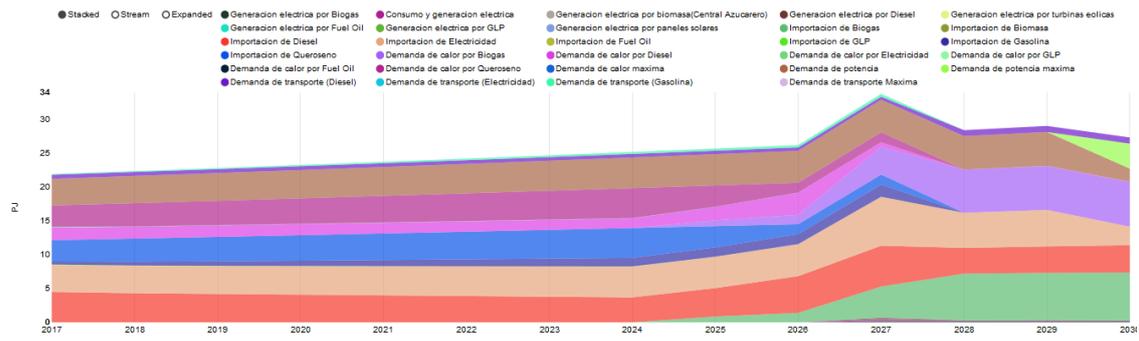


Figura 3.16: Producción por tecnologías

Conclusiones Generales:

- Al analizar minuciosamente el comportamiento en cuanto a la planificación energética, se toman datos de empresas especializadas en este sector. Se realiza un breve análisis de otros modelos que fueron tomados para la confección del OSeMOSYS y se definen cuáles son sus puntos fuertes y desventajas, se definen los principales criterios del OSeMOSYS (económico y medioambiental), se explica la importancia del MoManI como sistema de gestión y sus principales rasgos.
- Es construido correctamente el método de Sistema Energético de Referencia (SER), se realiza un minucioso análisis de todo el sistema matemático que compone el OSeMOSYS y cómo influyen de manera general estas ecuaciones en el modelo. Se muestra como se realizan las definiciones de constantes y parámetros en el MoManI webserver, sobre todo de los parámetros de mayor peso los cuales son los referentes a las relaciones de entrada/salida, tiempo y costos.
- Para la simulación original, el software invierte principalmente en el biogás para satisfacer gran parte de las demandas por generación de calor y electricidad, alcanzando valores de 2 975 M\$, mientras que la demanda por transporte la surte con diésel y este llega a un nivel de inversión de 659 M\$ para mantener cubierta las demandas existentes.
- En el caso de la simulación donde se alteró el crecimiento de la demanda de un 2% a un 4% en los últimos cuatro años, los picos de demanda con respecto a la simulación original disminuyen notablemente, pero al mismo tiempo se prolongan considerablemente e incluso se evidencia como hay un aumento del capital invertido de un 10% en los años posteriores destinados al diésel. En este pico de inversión se alcanzó un valor total de 2 320,28 M\$ con relación al valor original que es de 3 634,71 M\$.
- La simulación que se basa en un aumento del capital de los combustibles fósiles en un 40% y una disminución de las energías renovables en un 15%, es considerable destacar la utilización que hace en este punto del sistema de reserva la cual aumenta en un 10%. Las inversiones por biogás disminuyen a 2 897 M\$ lo que se traduce en una disminución de un 4% con relación al modelo original.

Recomendaciones:

- Implementar el OSeMOSYS en sistemas con mayor capacidad de cómputo para revisar modelos como el estudiado anteriormente, pero con mayor exactitud y una gama más amplia de variables y parámetros.
- Realizar un estudio más profundo de la provincia para la obtención de valores más exactos y resultados más realistas, puesto que los obtenidos en este trabajo no precisan el nivel de exactitud óptimo que se puede alcanzar con una profunda implementación.
- Continuar de cerca el estudio de estos modelos de cálculo energéticos, pues son un paso significativo en la implementación y desarrollo de tecnologías renovables y reducciones de costos de implementación y exportación del resto de los procesos.
- Revisar profundamente los resultados obtenidos en este trabajo para lograr una mayor eficiencia en los mismos, al mismo tiempo trabajar en las optimizaciones necesarias para hacer de este proceso un sistema aplicable y eficiente para la gestión de energía eléctrica en la provincia.

Bibliografía:

- CANEDO, W. 2005. Diagnóstico del Sector Energético en el Área Rural de Bolivia (Proyecto: Electrificación Rural). Organización Latinoamericana de Energía (OLADE), Agencia Canadiense para el Desarrollo Internacional (ACDI) y Universidad de Calgary.
- ANDREWS, C. & GOVIL, S. 1995. Becoming proactive about environmental risks: regulatory reform and risk management in the US electricity sector. *Energy Policy*, 23, 885-892.
- ANNE, R. (ed.) 2007. *Global Issues: Energy supply and Renewable Resources*, United States of America.
- APDC 1985. Integrated Energy Planning: A Manual *Energy Data, Energy Demand*. Kuala Lumpur.: Asian & Pacific Development Centre.
- ARAS, H., ERDOGMUS, S. & KOC, E. 2004. Multi-criteria selection for a wind observation station location using analytic hierarchy process. *Renewable Energy*, 23, 1383-92.
- ARNETTE, A. & ZOBEL, C. 2012. An optimization model for regional renewable energy development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16, 4606-4615.
- ARRIAZA, H. 2005. Metodología para la inclusión de las variables sociales en la formulación, ejecución y administración de proyectos de energía rural. Organización Latinoamericana de Energía (OLADE), Agencia Canadiense para el Desarrollo Internacional (ACDI) y Universidad de Calgary.
- ASHOK, S. 2007. Optimised model for community-based hybrid energy system. *Renewable Energy*, 32, 1155–1164.
- BAJPAI, P. & DASH, V. 2012. Hybrid renewable energy systems for power generation in stand-alone applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16 2926–2939.
- BECCALI, M., CELLURA, M. & ARDENTE, D. 1998. Decision making in energy planning: the ELECTRE multicriteria analysis approach compared to a Fuzzy-Sets methodology. *Energy Conversion and Management*, 39, 1869-1881.
- BECCALI, M., CELLURA, M. & MISTRETTA, M. 2003. Decision-making in energy planning. Application of the Electre method at regional level for the diffusion of renewable energy technology. *Renewable Energy* 28 2063–2087.
- BEHZADIAN, M., KAZEMZADEH, R., ALBADVI, A. & AGHDASI, M. 2010. PROMETHEE: A comprehensive literature review on methodologies and applications. *European Journal of Operational Research* 200, 198–215.
- BORDA ÁNGEL, J., DOMÍNGUEZ, J., AMADOR, J., ARRIBAS, L. & PINEDO, I. 2011. Characterization of Hybrid Systems for Rural Electrification with Renewable Energies Using Geographic Information Systems (GIS). *Informes Técnicos Ciemat*. España: Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT).
- BP 2017. BP Statistical Review of World Energy June 2017. British Petroleum.
- BROWNE, D., O'REGAN, B. & MOLES, R. 2010. Use of multi-criteria decision analysis to explore alternative domestic energy and electricity policy scenarios in an Irish city-region. *Energy*, 35, 518-528.
- CAI, Y., HUANG, G., TAN, Q. & YANG, Z. 2009. Planning of community-scale renewable energy management systems in a mixed stochastic and fuzzy environment. *Renewable Energy* 34 1833–1847.

- CATALINA, T., VIRGONE, J. & BLANCO, E. 2011. Multi-source energy systems analysis using a multi-criteria decision aid methodology. *Renewable Energy*, 36 2245-2252.
- CHERNI, J. A., DYNER, I., HENAO, F., JARAMILLO, P., SMITH, R. & FONT, R. O. 2007. Energy supply for sustainable rural livelihoods. A multi-criteria decision-support system. *Energy Policy*, 35, 1493-1504.
- CORNELISSEN, R. (ed.) 1997. *Thermodyanmics and sustainable development, the use of exergy analysis and the reduction of irreversibility*, Twente the Netherlands, University of Twente.
- CORTÉS, M. & BORROTO, A. 2008. Modelación y Sociedad. *Revista Lationoamericana de Economía*, 39.
- DCMNR 2007. Delivering a sustainable energy future for Ireland. Government Publications. Department of Communications, Marine and Natural Resources
- DIMOPOULOS, G. & FRANGOPOULOS, A. 2008. Optimization of energy systems based on evolutionary and social metaphors. *Energy*, 33, 171–9.
- DOMÍNGUEZ, J., LAGO, C., PRADES, A. & DEL PILAR, M. 2010. Energías renovables y modelo energético, una perspectiva desde la sostenibilidad. *Nimbus*, 43-63.
- DTI 2007. *Energy white paper: meeting the energy challenge* UK, Department of Trade and Industry
- ELKINGTON, J. 1997. Cannibals with forks: the triple bottom line of 21st Century business. Oxford Capstone
- EROL, Ö. & KILKIS, B. 2012. An energy source policy assessment using analytical hierarchy process. *Energy Conversion and Management*, In Press, Corrected Proof.
- FAO 1986. Guide and for Training in the Formulation of Agricultural and Rural Investments Projects. Introduction to the guide. Rome FOA: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- GALLEGO, D. & MACK, A. 2010. Sustainability assessment of energy technologies via social indicators: Results of a survey among European energy experts. *Energy Policy*, 38, 1030-1039.
- GEORGOPOULOU, E., LALAS, D. & PAPAGIANNAKIS, L. 1997. A Multicriteria Decision Aid approach for energy planning problems: The case of renewable energy option *European Journal of Operational Research*, 103, 38-54.
- HARALAMBOPOULOS, D. & POLATIDIS, H. 2003. Renewable energy projects: structuring amulticriteria group decision-making framework *Renewable Energy* 28 961-73.
- HAURANT, P., OBERTI, P. & MUSELLI, M. 2011. Multicriteria selection aiding related to photovoltaic plants on farming fields on Corsica island: A real case study using the ELECTRE outranking framework. *Energy Policy*, 39 676–688.
- HENAO, F., CHERNI, J., JARAMILLO, P. & DYNER, I. 2012. A multicriteria approach to sustainable energy supply for the rural poor. *European Journal of Operational Research*, 218, 801-809.
- HOWELLS, M., ROGNER, H., STRACHAN, N., HEAPS, C., HUNTINGTON, H., KYPREOS, S., HUGHES, A., SILVEIRA, S., DECAROLIS, J. & BAZILLIAN, M. 2011. OSeMOSYS: the open source energy modeling system: an introduction to its ethos, structure and development. *Energy Policy*, 39, 5850-5870.

- HOWELLS, M. & WELSCH, M. OSeMOSYS-The Open Source Energy Modelling System. International Energy Workshop. Stockholm, 2010.
- HWANG, C. L. & YOON, K. 1981. Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications. *In: SPRINGER-VERLAG* (ed.). New York.
- INIYAN, S., SUGANTHI, L. & SAMUEL, A. A. 2006. Energy models for commercial energy prediction and substitution of renewable energy sources. *Energy Policy*, 34, 2640-2653.
- JAMES, J. & VAN GROENENDAAL, W. (eds.) 2003. *A new decision support method for local energy planning in developing countries*.
- JIMÉNEZ, H. (ed.) 2000. *Desarrollo Sostenible*, España.
- KAHRAMAN, C., KAYA, H. & CEBI, S. 2009. A comparative analysis for multiattribute selection among renewable energy alternatives using fuzzy axiomatic design and fuzzy analytic hierarchy process. *Energy*, 34, 1603-1616.
- KANASE-PATIL, A., SAINI, R. & SHARMA, M. 2010. Integrated renewable energy systems for off grid rural electrification of remote area. *Renewable Energy* 35 1342–1349.
- KAYA, T. & KAHRAMAN, C. 2010. Multicriteria renewable energy planning using an integrated fuzzy VIKOR & AHP methodology: The case of Istanbul. *Energy*, 35, 2517-2527.
- KAYA, T. & KAHRAMAN, C. 2011. Multicriteria decision making in energy planning using a modified fuzzy TOPSIS methodology. *Expert Systems with Applications*, 38, 6577-6585.
- KEPPO, I. & STRUBEGGER, M. 2010. Short term decisions for long term problems – The effect of foresight on model based energy systems analysis. *Energy*, 35 2033–2042.
- KOO, J., PARK, K., SHIN, D. & YOON, E. 2011. Economic evaluation of renewable energy systems under varying scenarios and its implications to Korea's renewable energy plan. *Applied Energy* 88 2254-2260.
- LIN, Q., HUANG, G., BASS, B., NIE, X., ZHANG, X. & QIN, X. 2010. EMDSS: An optimization-based decision support system for energy systems management under changing climate conditions – An application to the Toronto-Niagara Region, Canada. *Expert Systems with Applications* 37 5040–5051.
- LIPSCOMP, D. & TEYLOR, A. 1978. *Noise control (handbook of principles and practices)*, USA, Litton Educational Publishing.
- M. HOWELLS, H. R., N. STRACHAN, C. HEAPS, H. HUNTINGTON, S. KYPREOS, A. HUGHES, S. SILVEIRA, J. DECAROLIS Y M. BAZILLIAN 2011. OSeMOSYS: the open source energy modeling system: an introduction to its ethos, structure and development. *Energy Policy*, 39.
- MAVROTAS, G., DIAKOULAKI, D., FLORIOS, K. & GEORGIU, P. 2008. 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*, 36, 2415–29.
- MING-CHE, W. & TING-YU, C. 2011. The ELECTRE multicriteria analysis approach based on Atanassov's intuitionistic fuzzy sets. *Expert Systems with Applications*, 38 12318–12327.
- MRÓZ, T. 2008. Planning of community heating systems modernization and development. *Applied Thermal Engineering*, 28 1844–1852.

- MULDER, P. & VAN DEN BERGH, J. 2000. Evolutionary Economic Theories of Sustainable Development. *Growth and Change*, 32, 110-134.
- NAKATA, T., KUBOA, K. & LAMONT, A. 2005. Design for renewable energy systems with application to rural areas in Japan. *Energy Policy* 33 209–219.
- NASIRAGHDAM, H. & JADID, S. 2012. Optimal hybrid PV/WT/FC sizing and distribution system reconfiguration using multi-objective artificial bee colony (MOABC) algorithm. *Solar Energy*, 86 3057–3071.
- NIJCAMP, P. & VOLWAHSEN, A. 1990. New directions in integrated energy planning. *Energy Policy*, 18, 764-773.
- NISSING, C. & BLOTTNITZ, H. 2010. Renewable energy for sustainable urban development: Redefining the concept of energisation. *Energy Policy*, 38, 2179-2187.
- OCAÑA, V. 2004. *Procedimiento para la valoración de la sostenibilidad energético – ambiental de estrategias energéticas* Tesis Doctoral, Universidad Central de Las Villas
- ØSTERGAARD, P. 2009. Reviewing optimisation criteria for energy systems analyses of renewable energy integration. *Energy* 34, 1236–1245.
- PERERA, A., ATTALAGE, R., PERERA, K. & DASSANAYAKE, V. 2013. A hybrid tool to combine multi-objective optimization and multi-criterion decision making in designing standalone hybrid energy systems. *Applied Energy*, 107 412–425.
- PIÑEIRO, J. & ROMERO, N. 2001. El desarrollo sostenible en el sector energético: las energías renovables en Galicia y su aportación al Grupo Unión Fenosa *Revista Gallega de Economía*, 10, 1-23.
- PINELL, P. 2004. Perspectiva de la promoción del desarrollo local municipal: el caso boliviano. *Documentos de trabajo*. Santa Cruz, Bolivia: El país.
- POHEKAR, S. & RAMACHANDRAN, M. 2004. Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 8 365–381.
- PSARRAS, J., CAPROS, P. & SAMOUILIDIS, J. 1990. Multicriteria analysis using a large-scale energy supply LP model. *European Journal of Operational Research*, 44 383-394.
- RAMANATHAN, R. & GANESH, L. 1994. Energy alternatives for lighting in households: an evaluation using an integrated goal programming-AHP model. *Energy* 20, 63-72.
- REN, H., ZHOU, W., NAKAGAMI, K., GAO, W. & WU, Q. 2010. Multi-objective optimization for the operation of distributed energy systems considering economic and environmental aspects. *Applied Energy*, 87 3642–3651.
- SAATY, T. 1980. *The analytic hierarchy process*. New York.: McGraw-Hill.
- SAATY, T. 1992. *Decision making for leaders*. . Pittsburgh: RWS Publications.
- SAATY, T., PENIWATI, K. & SHANG, J. 2007. The analytic hierarchy process and human resource allocation: Half the story. *Mathematical and Computer Modelling* 46 1041–1053.
- SÁEZ, E. 2002. *El desarrollo sostenible como herramienta transversal para todas las políticas rurales*. España: Universidad de Zaragoza.

- SAHEB-KOUSSA, D., KOUSSA, M., HADDADI, M. & BELHAMELA, M. 2011. Hybrid Options Analysis for Power Systems for Rural Electrification in Algeria. *Energy Procedia* 6, 750–758.
- SAN CRISTÓBAL, J. 2012. A goal programming model for environmental policy analysis: Application to Spain. *Energy Policy* 43 303–307.
- SANTAMARTA, J. 2004. Las energías renovables son el futuro. *La edad de piedra no acabó por falta de piedras, y la era de los combustibles fósiles tampoco terminará por el agotamiento del petróleo, el gas natural y el carbón* [Online]. Available: <http://www.nodo50.org/worldwatch>.
- THEODOROU, S., FLORIDES, G. & TASSOU, S. 2010. The use of multiple criteria decision making methodologies for the promotion of RES through funding schemes in Cyprus, A review. *Energy Policy*, 38, 7783-7792.
- TURRINI, E. 2006. *El camino del sol, un desafío para la humanidad del tercer milenio, una esperanza para los países de sur.*, Cubasolar.
- TWIDELL, J. & WEIR, T. 2006. *Renewable Energy Resource*, London and New York.
- WCED 1987 Our Common Future. *Conferencia de Naciones Unidas para el Medio Ambiente y el Desarrollo*. MOPTMA, Madrid.: World Commission on Environment and Development
- WEC 2007. Energy and Climate Change: promoting the sustainable supply and use of energy for the greatest benefit of all. *Energy and Climate Change Study*. London: World Energy Council 2007
- WEIRICH, M. 2013. Global Resource Modelling of the Climate, Land, Energy and Water (CLEWS) Nexus using the Open Source Energy Modelling System (OSeMOSYS).
- WELSCH, M., HOWELLS, M., BAZILIAN, M., DECAROLIS, J., HERMANN, S. & ROGNER, H. 2012. Modelling elements of smart grids—enhancing the OSeMOSYS (open source energy modelling system) code. *Energy*, 46, 337-350.
- WORLD BANK 1994. World Development Report 1994: Infrastructure for Development. New York: Oxford University.
- YOUSSEF ALMULLA, O. B., ABHISHEK SHIVAKUMAR, FRANCESCO GARDUMI, EUNICE RAMOS, GEORGIOS AVGERINOPOULOS, MARK HOWELLS. 2017. Model Management Infrastructure Training Manual.
- ZHU, Y., HUANG, G., HE, L. & ZHANG, L. 2012. An interval full-infinite programming approach for energy systems planning under multiple uncertainties. *Electrical Power and Energy Systems* 43, 375–383.

Anexos:

Anexo 1: Formulación matemática del modelo.

Designación	Formulación
OBJ	minimize $\sum_{y,t,r} \text{TotalDiscountedCost}_{y,t,r}$
TDC1	$\forall_{y,t,r} \text{TotalDiscountedCost}_{y,t,r} = \text{DiscountedOperatingCost}_{y,t,r} + \text{DiscountedCapitalInvestment}_{y,t,r} + \text{DiscountedTechnologyEmissionsPenalty}_{y,t,r} - \text{DiscountedSalvageValue}_{y,t,r}$
OC1	$\forall_{y,l,t,r} \text{VariableOperatingCost}_{y,t,r} = \sum_m \text{RateOfActivity}_{y,l,t,m,r} * \text{VariableCost}_{y,t,m,r}$
OC2	$\forall_{y,t,r} \text{AnnualVariableOperatingCost}_{y,t,r} = \sum_l \text{VariableOperatingCost}_{y,l,t,r}$
OC3	$\forall_{y,t,r} \text{AnnualFixedOperatingCost}_{y,t,r} = \text{TotalCapacityAnnual}_{y,t,r} * \text{FixedCost}_{y,t,r}$
OC4	$\forall_{y,t,r} \text{OperatingCost}_{y,t,r} = \text{AnnualFixedOperatingCost}_{y,t,r} + \text{AnnualVariableOperatingCost}_{y,t,r}$
OC5	$\forall_{y,t,r} \text{DiscountedOperatingCost}_{y,t,r} = \text{OperatingCost}_{y,t,r} / ((1 + \text{DiscountRate}_{t,r}) ^ (y - \text{StartYear} + 0.5))$
CC1	$\forall_{y,t,r} \text{CapitalInvestment}_{y,t,r} = \text{CapitalCost}_{y,t,r} * \text{NewCapacity}_{y,t,r}$
CC2	$\forall_{y,t,r} \text{DiscountedCapitalInvestment}_{y,t,r} = \text{CapitalInvestment}_{y,t,r} / ((1 + \text{DiscountRate}_{t,r}) ^ (y - \text{StartYear} + 0.5))$
SV1	$\forall_{y,t,r:(y + \text{OperationalLife}[t,r]) < \text{StartYear} + \text{card}(\text{YEAR})} \text{SalvageValue}_{y,t,r} = 0$
SV2	$\forall_{y,t,r:(y + \text{OperationalLife}[t,r]) \geq \text{StartYear} + \text{card}(\text{YEAR})} \text{SalvageValue}_{y,t,r} = \text{NewCapacity}_{y,t,r} * \text{CapitalCost}_{y,t,r} * ((1 - (((1 + \text{DiscountRate}_{t,r}) ^ (\text{StartYear} + \text{card}(\text{YEAR}) - y)) - 1)) / ((1 + \text{DiscountRate}_{t,r}) ^ \text{OperationalLife}_{t,r} - 1))$
SV3	$\forall_{y,t,r} \text{DiscountedSalvageValue}_{y,t,r} = \text{SalvageValue}_{y,t,r} / ((1 + \text{DiscountRate}_{t,r}) ^ (1 + \text{card}(\text{YEAR})))$
S1	$\forall_{y,t,r} \text{StorageCharge}_{s,y,l,r} = \sum_{t,m} \text{RateOfActivity}_{y,l,t,m,r} * \text{TechnologyToStorage}_{t,m,s,r} * \text{YearSplit}_{y,l}$
S2	$\forall_{y,t,r} \text{StorageDischarge}_{s,y,l,r} = \sum_{t,m} \text{RateOfActivity}_{y,l,t,m,r} * \text{TechnologyFromStorage}_{t,m,s,r} * \text{YearSplit}_{y,l}$

Formulación matemática del modelo. (Continuación).

Designación	Formulación
S3	$\forall_{s,y,l,r} \text{NetStorageCharge}_{s,y,l,r} = \text{StorageCharge}_{s,y,l,r} - \text{StorageDischarge}_{s,y,l,r}$
S4	$\forall_{b,s,r} \text{StorageLevel}_{b,s,r} = \sum_{l,y} (\text{NetStorageCharge}_{s,y,l,r} / \text{YearSplit}_{y,l}) * \text{StorageInflectionTimes}_{y,l,b}$
S5 & S6	$\forall_{b,s,r} \text{StorageLowerLimit}_{s,r} \leq \text{StorageLevel}_{b,s,r} \leq \text{StorageUpperLimit}_{s,r}$
CAa1	$\forall_{y,t,r} \text{AccumulatedNewCapacity}_{y,t,r} = \sum_{yy: y-yy < \text{OperationalLife}[t,r] \ \&\& \ y-yy \geq 0} \text{NewCapacity}_{yy,t,r}$
CAa2	$\forall_{y,t,r} \text{TotalCapacityAnnual}_{y,t,r} = \text{AccumulatedNewCapacity}_{y,t,r} + \text{ResidualCapacity}_{y,t,r}$
CAa3	$\forall_{y,l,t,r} \text{RateOfActivity}_{y,l,t,r} = \sum_m \text{RateOfActivity}_{y,l,t,m,r}$
CAa4	$\forall_{y,l,t,r: \text{TechWithCapacityNeededToMeetPeakTS}[t,r] \neq 0} \text{RateOfTotalActivity}_{y,l,t,r} \leq \text{TotalCapacityAnnual}_{y,t,r} * \text{CapacityFactor}_{y,t,r} * \text{CapacityToActivityUnit}_{t,r}$
CAb1	$\forall_{y,t,r} \sum_l \text{RateOfTotalActivity}_{y,l,t,r} * \text{YearSplit}_{y,l} \leq \text{TotalCapacityAnnual}_{y,t,r} * \text{CapacityFactor}_{y,t,r} * \text{AvailabilityFactor}_{y,t,r} * \text{CapacityToActivityUnit}_{t,r}$
EBa1	$\forall_{y,l,t,m,r} \text{RateOfActivity}_{y,l,t,m,r} * \text{OutputActivityRatio}_{y,t,f,m,r} = \text{RateOfProductionByTechnologyByMode}_{y,l,t,m,f,r}$
EBa2	$\forall_{y,l,t,f,r} \text{RateOfProductionByTechnology}_{y,l,t,f,r} = \sum_m \text{RateOfProductionByTechnologyByMode}_{y,l,t,m,f,r}$
EBa3	$\forall_{y,l,f,r} \text{RateOfProductionByTechnology}_{y,l,f,r} = \sum_t \text{RateOfProductionByTechnology}_{y,l,t,f,r}$
EBa4	$\forall_{y,l,f,t,m,r} \text{RateOfUseByTechnologyByMode}_{y,l,t,m,f,r} = \text{RateOfActivity}_{y,l,t,m,r} * \text{InputActivityRatio}_{y,t,f,m,r}$
EBa5	$\forall_{y,l,f,t,r} \text{RateOfUseByTechnology}_{y,l,t,f,r} = \sum_m \text{RateOfUseByTechnologyByMode}_{y,l,t,m,f,r}$
EBa6	$\forall_{y,l,f,r} \text{RateOfUse}_{y,l,f,r} = \sum_t \text{RateOfUseByTechnology}_{y,l,t,f,r}$
EBa7	$\forall_{y,l,f,r} \text{Production}_{y,l,f,r} = \text{RateOfProduction}_{y,l,f,r} * \text{YearSplit}_{y,l}$
EBa8	$\forall_{y,l,f,r} \text{Use}_{y,l,f,r} = \text{RateOfUse}_{y,l,f,r} * \text{YearSplit}_{y,l}$
EBa9	$\forall_{y,l,f,r} \text{Demand}_{y,l,f,r} = \text{RateOfDemand}_{y,l,f,r} * \text{YearSplit}_{y,l}$

Formulación matemática del modelo. (Continuación).

Designación	Formulación
EBa10	$\forall_{y,l,f,r} \text{Production}_{y,l,f,r} \geq \text{Demand}_{y,l,f,r} + \text{Use}_{y,l,f,r}$
EBb1	$\forall_{y,f,r} \text{ProductionAnnual}_{y,f,r} = \sum_l \text{Production}_{y,l,f,r} * \text{YearSplit}_{y,l}$
EBb2	$\forall_{y,f,r} \text{UseAnnual}_{y,f,r} = \sum_l \text{Use}_{y,l,f,r}$
EBb3	$\forall_{y,f,r} \text{ProductionAnnual}_{y,f,r} \geq \text{UseAnnual}_{y,f,r} + \text{AccumulatedAnnualDemand}_{y,f,r}$
TCC1	$\forall_{y,t,r} \text{TotalCapacityAnnual}_{y,t,r} \leq \text{TotalAnnualMaxCapacity}_{y,t,r}$
TCC2	$\forall_{y,t,r} \text{TotalCapacityAnnual}_{y,t,r} \geq \text{TotalAnnualMinCapacity}_{y,t,r}$
NCC1	$\forall_{y,t,r} \text{NewCapacity}_{y,t,r} \leq \text{TotalAnnualMaxCapacityInvestment}_{y,t,r}$
NCC2	$\forall_{y,t,r} \text{NewCapacity}_{y,t,r} \geq \text{TotalAnnualMinCapacityInvestment}_{y,t,r}$
AAC1	$\forall_{y,t,r} \text{TotalTechnologyAnnualActivity}_{y,t,r} = \sum_l \text{RateOfTotalActivity}_{y,l,t,r} * \text{YearSplit}_{y,l}$
AAC2	$\forall_{y,t,r} \text{TotalTechnologyAnnualActivity}_{y,t,r} \leq \text{TotalTechnologyAnnualActivityUpperLimit}_{y,t,r}$
AAC3	$\forall_{y,t,r} \text{TotalTechnologyAnnualActivity}_{y,t,r} \geq \text{TotalTechnologyAnnualActivityLowerLimit}_{y,t,r}$
TAC1	$\forall_{t,r} \text{TotalTechnologyModelPeriodActivity}_{t,r} = \sum_y \text{TotalTechnologyAnnualActivity}_{y,t,r}$
TAC2	$\forall_{t,r} \text{TotalTechnologyModelPeriodActivity}_{t,r} \leq \text{TotalTechnologyModelPeriodActivityUpperLimit}_{t,r}$
TAC3	$\forall_{t,r} \text{TotalTechnologyModelPeriodActivity}_{t,r} \geq \text{TotalTechnologyModelPeriodActivityLowerLimit}_{t,r}$
RM1	$\forall_{y,r} \text{TotalCapacityInReserveMargin}_{y,r} = \sum_t \text{TotalCapacityAnnual}_{y,t,r} * \text{ReserveMarginTagTechnology}_{y,t,r} * \text{CapacityToActivityUnit}_{t,r}$
RM2	$\forall_{y,l,r} \text{DemandNeedingReserveMargin}_{y,l,r} = \sum_t \text{RateOfDemand}_{y,l,f,r} * \text{ReserveMarginTagFuel}_{y,f,r}$
RM3	$\forall_{y,l,r} \text{TotalCapacityInReserveMargin}_{y,r} \geq \text{DemandNeedingReserveMargin}_{y,l,r} * \text{ReserveMargin}_{y,r}$

Formulación matemática del modelo. (Continuación).

Designación	Formulación
E1	$\forall_{y,t,e,m,r} \frac{\text{AnnualTechnologyEmissionByMode}_{y,t,e,m,r}}{\text{AverageAnnualTechnologyActivityByMode}_{y,t,m,r}} = \sum_l \text{EmissionActivityRatio}_{y,t,e,m,r} \quad *$
E2	$\forall_{y,t,e,r} \text{AnnualTechnologyEmission}_{y,t,e,r} = \sum_m \text{AnnualTechnologyEmissionByMode}_{y,t,e,m,r}$
E3	$\forall_{y,t,e,r} \text{AnnualTechnologyEmissionPenaltyByEmission}_{y,t,e,r} = \text{AnnualTechnologyEmission}_{y,t,e,r} * \text{EmissionPenalty}_{y,e,r}$
E4	$\forall_{y,t,e,r} \text{AnnualTechnologyEmissionsPenalty}_{y,t,r} = \sum_m \text{AnnualTechnologyEmissionPenaltyByEmission}_{y,t,e,r}$
E5	$\forall_{y,e,r} \text{AnnualEmissions}_{y,e,r} = \sum_t \text{AnnualTechnologyEmission}_{y,t,e,r} + \text{AnnualExogenousEmission}_{y,e,r}$
E6	$\forall_{e,r} \text{ModelPeriodEmissions}_{e,r} = \sum_y \text{AnnualEmissions}_{y,e,r} + \text{ModelPeriodExogenousEmission}_{e,r}$
E7	$\forall_{y,e,r} \text{AnnualEmissions}_{y,e,r} \leq \text{AnnualEmissionsLimit}_{y,e,r}$
E8	$\forall_{e,r} \text{ModelPeriodEmissions}_{e,r} \leq \text{ModelPeriodEmissionLimit}_{e,r}$

Anexo 2: Principales parámetros a tener en cuenta en la simulación del modelo.

Parámetro	Explicación
AccumulatedAnnualDemand	Demanda anual acumulada
AnnualEmissionLimit	La suma de todas las emisiones del sistema de energía que se está modelando (más cualquier emisión anual exógena), puede limitarse utilizando el Límite de emisiones anual.
AnnualExogenousEmission	Si hay emisiones que deben tenerse en cuenta, pero el modelo no las calcula "anualmente", pueden incluirse como emisiones anuales exógenas.
AvailabilityFactor	Factor de disponibilidad indica el tiempo máximo que una tecnología puede funcionar durante todo el año.
CapacityFactor	Factor de capacidad: se usa para convertir la capacidad anual a la capacidad disponible para cada segmento de tiempo.
CapacityOfOneTechnologyUnit	Capacidad para una unidad de tecnología
CapacityToActivityUnit	Este parámetro efectivamente relaciona la energía que se produciría con una unidad de capacidad utilizada por completo durante un año.
CapitalCost	Costo capital invertido en cada tecnología
CapitalCostStorage	Es el costo de invertir en nuevas instalaciones de almacenamiento, definidas por región, tipo de almacenamiento y año. Se da en unidades de costos por unidades de energía, por ejemplo, Millones EUR / PJ
ConversionId	Define la rotación de las semanas
ConversionIh	Define la rotación de los días
ConversionIs	Define la rotación de las temporadas
DaysInDayType	Representa el número de días para cada tipo de día dentro de una semana
DaySplit	Es la longitud de un día específico como una fracción del año, por ejemplo, al distinguir entre días y noche: $12h / (24h * 365d)$.
DiscountRate	Es una matriz que da la tasa de descuento para cada región.
EmissionActivityRatio	Este parámetro proporciona los niveles de emisión por cantidad de combustible de un modo particular de actividad para una tecnología. (kton / PJ)

Principales parámetros a tener en cuenta en la simulación del modelo. (Continuación).

Parámetro	Explicación
EmissionsPenalty	Se trata de medidas en las unidades de costos por unidad de actividad (\$ / tonelada de emisiones)
FixedCost	Es el costo por unidad de capacidad de esa tecnología.
InputActivityRatio	Da la tasa de entrada (uso) de combustible para una tecnología como una proporción de la tasa de actividad.
MinStorageCharge	La carga mínima de almacenamiento se da como una fracción del nivel máximo de almacenamiento disponible, es decir, entre 0.00 y 0.99. La instalación de almacenamiento no se puede vaciar por debajo de este nivel.
ModelPeriodEmissionLimit	La suma de las emisiones del sistema de energía modeladas a lo largo del período del modelo (más cualquier emisión exógena del período anual o modelo) puede limitarse utilizando el parámetro ModelPeriodEmissionLimit.
ModelPeriodExogenousEmission	Si hay emisiones que deben tenerse en cuenta, pero el modelo no las calcula durante el "período completo del modelo", pueden incluirse como ModelPeriodExogenousEmission.
OperationalLife	Cada tecnología tiene una vida operacional limitada indicada como OperationalLife
OperationalLifeStorage	Es la vida útil operativa de almacenamiento en años.
OutputActivityRatio	El índice de actividad de salida da la tasa de producción de combustible como una relación a la tasa de actividad en la que opera una tecnología.
REMinProductionTarget	Este parámetro indica qué cantidad de combustibles (etiquetados en el parámetro REtagFuel) debe provenir de tecnologías RE (que fueron etiquetadas con el parámetro RETechnology [y, t, r].)
ReserveMargin	Se da por año e indica el nivel de reserva de la capacidad instalada requerida sobre la demanda máxima (como modelada) para el combustible correspondiente.
ReserveMarginTagFuel	Combustible (s) que requieren un margen de reserva tienen un valor de "1" en este parámetro
ReserveMarginTagTechnology	Cada tecnología (en cada región) que puede contribuir al margen de reserva se etiqueta utilizando este parámetro.
ResidualCapacity	Capacidad Residual es la capacidad que queda de un período anterior al período de modelado.
ResidualStorageCapacity	Es la capacidad de almacenamiento que está disponible desde antes del período de modelado, o que se sabe que estará disponible en un año específico. Se da en las unidades de energía.
REtagFuel	Los combustibles (en cada región) para los que hay un objetivo renovable se etiquetan utilizando este parámetro.
REtagTechnology	El "valor de etiqueta" es 1 para una tecnología renovable o 0 en caso contrario.

Principales parámetros a tener en cuenta en la simulación del modelo. (Continuación).

Parámetro	Explicación
SpecifiedAnnualDemand	Este parámetro se usa con demandas para las cuales el 'tiempo de uso' se especifica necesariamente durante el año. Contiene la demanda total especificada para el año.
SpecifiedDemandProfile	Este parámetro indica la fracción anual del servicio de energía o la demanda de combustible que se requiere en cada segmento de tiempo. Para cada año, estos deben sumar hasta uno.
StorageLevelStart	Establece el nivel de almacenamiento al comienzo del primer año en las unidades de energía disponibles en el almacenamiento.
StorageMaxChargeRate	Tasa de carga máxima de almacenamiento indica la carga máxima que el almacenamiento puede almacenar (en unidades de potencia).
StorageMaxDischargeRate	Tasa de descarga máxima de almacenamiento es la velocidad a la que se puede descargar el almacenamiento (en unidades de potencia).
TechnologyFromStorage	Vincula una tecnología a una instalación de almacenamiento para descargar el almacenamiento
TechnologyToStorage	Vincula una tecnología a una instalación de almacenamiento para cargar el almacenamiento
TotalAnnualMaxCapacity	Es el límite superior del nivel de capacidad de la suma de todas las inversiones en tecnología en cada año del período de modelado.
TotalAnnualMinCapacity	Es la capacidad de limitación más baja de una tecnología en la que se debe invertir cada año.
TotalTechnologyAnnualActivityLowerLimit	Límite inferior de actividad anual de tecnología total es la tasa de actividad mínima que una tecnología (considerando la suma de todos los "modos de operación") debe producir cada año.
TotalTechnologyAnnualActivityUpperLimit	Límite superior de la actividad anual de tecnología total es la cantidad total que una tecnología podría producir cada año.
TotalTechnologyModelPeriodActivityLowerLimit	El nivel mínimo de actividad (sumado en todos los modos de actividad) debe ser aplicado por una tecnología durante todo el período modelo
TotalTechnologyModelPeriodActivityUpperLimit	Es el nivel máximo de actividad de una tecnología (sumada a todos los modos de actividad) durante todo el período del modelo.
VariableCost	Es el costo por unidad de actividad para un modo de operación dado de esa tecnología.
YearSplit	Es una matriz que mide la duración de un segmento de tiempo modelado como una fracción del año. La suma de cada entrada durante el año debe ser igual a 1.

