



## CONFERENCIA INTERNACIONAL DE DESARROLLO ENERGÉTICO SOSTENIBLE

### **Integración de sistemas energéticos como alternativa para disminuir los impactos ambientales**

### *Integration of energy systems as an alternative to reduce environmental impacts*

**Yaniel Garcia Lovella<sup>1</sup>, Idalberto Herrera Moya<sup>2</sup>,**

1- Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Facultad de Ingeniería Mecánica e Industrial, Centro de Estudios Energéticos y Tecnologías Ambientales, Cuba,  
yanielg@uclv.cu.

2- Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Facultad de Ingeniería Mecánica e Industrial, Centro de Estudios Energéticos y Tecnologías Ambientales, Cuba,  
iherrera@uclv.edu.cu.

#### **Resumen:**

La energía es un factor clave para las economías de países en vías al desarrollo. Los enfoques actuales para la evaluación y diseño de sistemas de suministro energético integrado ponderan factores económicos por encima de los impactos ambientales provocados por la operación de estos. En el presente trabajo se realizó un análisis crítico de los enfoques metodológicos existentes para el diseño de los sistemas de suministro energéticos integrados en entornos urbanos. Para lo cual se empleó un análisis bibliográfico de la literatura especializada, donde se encontraron los siguientes hallazgos en el conocimiento científico relacionado al tema: 1) dentro de los impactos ambientales producidos por los sistemas de suministro energético integrados, que con mayor fuerza afectan los entornos urbanos, se encuentra las emisiones de sustancias contaminantes al aire, lo que genera la degradación de la calidad del aire y a su vez impactos adversos sobre la salud humana, 2) el diseño de sistemas de suministros energéticos, en general, está ponderado por factores económicos, 3) la evaluación de la calidad del aire en entornos





urbanos es parte del proceso de cuantificación de las externalidades producidas por este concepto, después de la puesta en marcha del sistema energético, 4) Por lo cual es una necesidad de replantearse los enfoques actuales para el diseño de sistemas de suministro energético en entornos urbanos.

**Abstract:**

*Energy is a key factor for the economies of developing countries. Current approaches to the evaluation and design of integrated energy supply systems weighed economic factors above the environmental impacts caused by their operation. In the present work a critical analysis of the existing methodological approaches for the design of integrated energy supply systems in urban environments was carried out. For this purpose, a bibliographic analysis of the specialized literature was used, where the following findings were found in the scientific knowledge related to the topic. 1) within the environmental impacts produced by integrated energy supply systems, which have a greater impact on urban areas, emissions of pollutants into the air, resulting in degradation of air quality and adverse impacts on Human health,. 2) The design of energy supply systems, in general, is weighted by economic factors. 3) The evaluation of air quality in urban environments is part of the quantification process of the externalities produced by this concept, after the implementation of the energy system.. Therefore, it is necessary to rethink current approaches to the design of energy supply systems in urban settings.*

**Palabras Clave:** sistemas energéticos urbanos, contaminación atmosférica, externalidad

**Keywords:** urban energy systems, air pollution, externality.

## 1. Introducción

La energía es un factor clave para el desarrollo económico de países en vías al desarrollo [1]. El incremento de la productividad, como motor impulsor del desarrollo económico, está fuertemente entrelazado con un alto consumo energético [2]. El incremento mundial en la producción ha llevado al consumo de 4 211,1 mtoe (million





tons oil equivalent) de petróleo, 3 881,8 mtoe de gas natural, 574 mtoe de energía nuclear, 879 mtoe de hidroenergía y 316,9 de otras fuentes renovables de energía (FRE), solo en el año 2016 [3]. El consumo de forma de energía versátiles y eficientes (energía eléctrica) ha incrementado dramáticamente [4], de acuerdo a los reportes emitidos por Exxon Mobil en el 2014, se proyecta que entre el 2010 y 2040 habrá un incremento del 35% del consumo de portadores energéticos. Bajo este escenario la comunidad científica mundial discute retos de carácter estratégico como la accesibilidad a fuentes energéticas primarias, seguridad del suministro energético y la sostenibilidad energético-ambiental [5].

La disminución del consumo de combustibles fósiles a nivel mundial es un importante objetivo a alcanzar, gobiernos e importantes empresas del sector privado están alentando un cambio gradual y sostenible de la matriz energética global [6]. Sin embargo, alcanzar altos estándares de vida con bajos consumos energético sigue siendo un asunto pendiente. Las ciudades, como principales centros del desarrollo mundial, son responsable del consumo de alrededor de dos terceras partes del consumo mundial de fuentes primarias de energía y del 71% de las emisiones de gases de efecto invernadero relacionado al uso de la energía [7]. El daño ocasionado al medio ambiente por las emisiones de gases de efecto invernadero y contaminantes al aire ha impactado negativamente el bienestar de habitantes de ciudades alrededor de todo el mundo (e.g. episodio en Londres en diciembre de 1952 [8]). La dificultad en el establecimiento del derecho de propiedad de bienes comunes como el aire y el agua hacen extraordinariamente difícil internalizar externalidades relacionadas a la degradación del aire en ciudades o entornos urbanos en general. El ecologista Barry Commoner comenta lo siguiente: *“definitivamente, hemos recogido un registro de fallas serias en recientes aplicaciones de la tecnología al ambiente natural. En cada caso, la nueva tecnología se ha aplicado sin que se conocieran siquiera los nuevos peligros de esas aplicaciones. Hemos sido muy rápidos en buscar los beneficios y muy lentos en comprender los costes”*[9]. Sin embargo, las posturas clásicas de la internalización de externalidades no pierde de vista la posibilidad de que las personas afectadas por las externalidades negativas terminen pagado parte de la internalización de estas.





ExternE fue uno de los proyectos donde se usa consistentemente una metodología bottom-up para evaluar las externalidades relacionadas a las transformaciones energéticas, permitiendo desde una perspectiva cuantitativa determinar el coste monetario de los impactos ambientales negativos producidos por una amplia variedad de tecnologías energéticas [10]. Sin dejar de ser un proyecto exitoso, donde se logran cuantificar los costes relacionados a los impactos adversos a la salud humana; desde una perspectiva cualitativa surgen interrogantes como, *¿Cuánto vale monetariamente una determinada cantidad de años de vidas perdidos por un grupo de personas expuestas a un nivel dado de contaminantes?* Independientemente de ser posible responder dicha interrogante, surgirían otras como, *¿cómo asegurar que las personas afectadas no terminen pagando parte de esta externalidad que finalmente es internalizada, como parte del carácter participativo del mercado<sup>1</sup>?* Los retos planteados anteriormente suscitan a un replanteamiento de los enfoques tradicionales en el diseño de sistemas energéticos y al manejo de los impactos ambientales negativos ocasionado por la operación de estos en entornos urbanos, donde prime un enfoque preventivo de las posibles externalidades negativas que pudiesen originarse.

### 1.1. Paradigmas en el diseño de sistemas energéticos

Los sistemas de suministro energéticos descentralizados a finales del siglo XIX eran concebidos fundamentalmente para proveer alumbrado a zonas rurales [11]. El avance en la automática y las tecnologías informáticas ha permitido la operación de sistemas descentralizados muy complejos para proveer servicios como la electricidad, calentamiento y refrigeración. Los sistemas energéticos distribuidos han evolucionado, no solo en la diversidad de los servicios que brindan, sino que han crecido en cuanto a la potencia instalada. El incremento en las dimensiones de los sistemas energéticos descentralizados está fuertemente relacionado a la reducción de las pérdidas por transmisión y al incremento de la eficiencia producto a la posible simultaneidad de demandas como energía eléctrica, calor y refrigeración (poligeneración).

Los sistemas energéticos integrados como paradigma del diseño de escenarios energético en entornos urbanos toman fuerza con los intentos de flexibilizar la integración





de fuentes renovables de energía (FRE) con los grandes sistemas energéticos centralizados. En países europeos son alentadas este tipo de prácticas con el objetivo de disminuir la dependencia energética de países que estaban obligados a importar energía del mercado regional, logrando una sustitución de la energía importada por el aprovechamiento de las FRE locales [12]. La diversificación de la generación de servicios energéticos integrados tiene un punto de inflexión, cuando surgen las llamadas redes inteligentes. Este tipo de sistema permite aprovechar los potenciales de las FRE a escala local (edificios y vecindarios) combinando tecnologías basadas en combustibles fósiles, las que garantizarían, junto al almacenamiento de energía flexibilidad a la red y un uso más eficiente de los recursos energéticos, comparado con la generación centralizada [13]. Sin embargo, debido al elevado costo de producción de la energía en este tipo de sistemas solo es justificable en pequeñas islas desconectadas de las grandes redes de distribución de energía eléctrica, donde el LCOE (levelized cost of energy) es aproximadamente USD 0,33/kW-h [14]. Además, este tipo de sistema es incapaz de lidiar con el problema de la baja simultaneidad de las demandas, lo cual limita la implementación de este tipo de solución, haciendo a la generación centralizada más competente económicamente.

En comparación con las tradicionales soluciones de suministro energético, basado en tecnologías de transformación energética operando para cubrir una servicio energético de forma independiente, el diseño de escenarios energéticos más eficiente requiere de información más detallada de los servicios energéticos a cubrir, de las fuentes de energía locales disponibles y la posibilidad de integrar diferentes tecnologías [15]. Esta perspectiva del diseño de escenarios energéticos se conoce como sistemas energético integrados [15, 16]. Sin embargo, a pesar de que se alcanza un equilibrio entre beneficio económico, eficiencia y en consecuencia a este último la reducción de gases de efecto invernadero; el carácter cuantitativo disciplinar de estas perspectivas limita el carácter preventivo respecto a posibles externalidades originadas por la operación de estos sistemas energéticos en las cercanías de entornos urbanos producto al deterioro de la calidad del aire en una ventana espacial local.





## 1.2. Enfoques en la evaluación y modelación de la calidad del aire

Sin embargo, la localización de tecnologías de suministro energético en las cercanías de entornos urbanos ha despertado preocupaciones sociales relacionadas a los impactos sobre la salud humana de las emisiones gaseosas y materiales particulados (degradación de la calidad del aire) [17]. La degradación de la calidad del aire está regulada por un grupo de políticas y estándares internacionales [10, 18-21]. En Cuba han sido adoptadas de la Organización Internacional de Estándares, por sus siglas en Inglés ISO (International Standards Organization), dos de ellas que regulan las emisiones industriales procedentes de fuentes fijas y la otra un grupo de buenas prácticas para la observación de la calidad del aire en establecimientos [22, 23]. En el ámbito de las estrategias del control de la calidad del aire, y sus estrategias de abatimiento o mitigación se destacan particularmente las metodologías de modelación y evaluación (por su acrónimo en inglés IAM). El proyecto APPRAISAL FP7 de la UE (<http://www.appraisal-fp7.eu>), se trazó como objetivo principal identificar las metodologías, sus limitaciones, proponer posibles áreas clave a las que debe hacer frente la investigación y la innovación, basado en la revisión bibliográfica relacionada a las metodologías IAM [24]. Para alcanzar los objetivos mencionados se consideraron temas como: 1) sinergias entre los enfoques nacionales, regionales y locales, incluidas las políticas de reducción de emisiones; (2) evaluación de la calidad del aire, incluyendo modelos y mediciones; (3) enfoques de evaluación del impacto en la salud; (4) reparto de la fuente; Y (5) incertidumbre y robustez, incluyendo aseguramiento de calidad o control de calidad del aire. Como resultado de este proyecto fue encontrado que la metodología IAM es utilizada en proyectos de investigación (RP) y planes de calidad del aire (AQP). Donde, son agrupados dos enfoques de análisis fundamentalmente: a) análisis de escenarios energéticos, el cual consiste en establecer un conjunto de medidas de abatimiento y evaluar su impacto en la calidad del aire a través de técnicas de modelado; optimización de escenarios energéticos el cual son utilizados algoritmos para minimizar automáticamente los costos y / o maximizar los beneficios sobre las relaciones de emisión-concentración con el fin de entregar un conjunto de medidas de reducción eficiente de costos al formulador de políticas de desarrollo o expansión energética. Si bien



las medidas e abatimiento (emitidas a partir del conocimiento y el juicio del experto local) son la entrada en el análisis de escenarios, constituyen los resultados finales de la optimización en el segundo grupo.

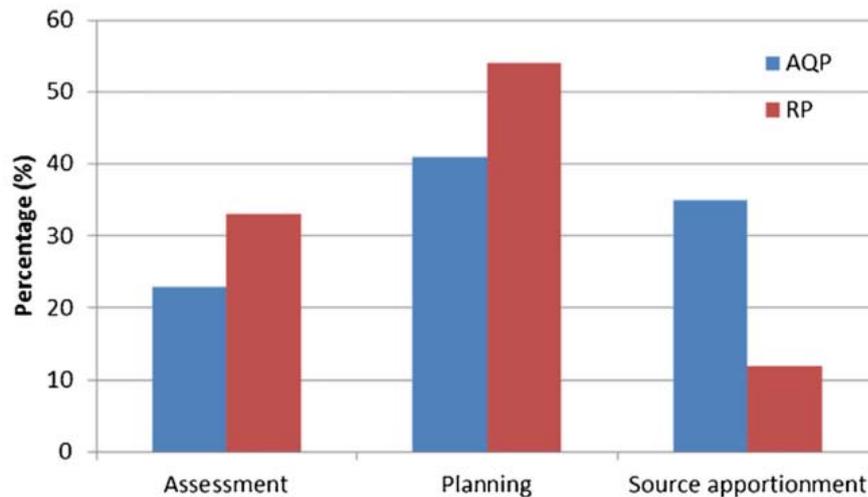


Figura 1. Principal utilización de la metodología IAM para el control y mitigación de la degradación de la calidad del aire. Fuente: tomado de [24].

En la figura 1 se hace un análisis porcentual de la utilización de IAM para proyectos de investigación y planes de calidad del aire. De forma mucho más general se establecen dos grupo, evaluación y planeación (la distribución de las fuentes forma parte de la planeación). En el caso de la evaluación se parte de un escenario energético en funcionamiento, el cual puede ser objeto de análisis a diferentes escalas y ventanas espaciales, dando como resultado un grupo de políticas para mantener estándares de la calidad del aire (e.g. [17, 25, 26]). En el caso de la planeación se parte de un grupo de políticas, previamente establecidas, para establecer las alternativas más eficientes para satisfacer las necesidades energéticas en una ventana y escala de tiempo establecida, manteniendo los estándares de calidad del aire trazados por las políticas energéticas tomadas como punto de partida (e.g. [27, 28]).

En la actualidad a pesar del incremento en la utilización de la metodología IAM, continua el reto de cómo equilibrar los objetivos de la generación de electricidad y la reducción de las emisiones de contaminantes [29]. A pesar de las regulaciones existentes



para controlar la calidad del aire, el diseño y concepción de los sistemas energético integrados carecen de métodos cuantitativos-cualitativos que asistan el proceso de toma de decisiones para determinar, donde, que dimensiones y que tipo de tecnología a instalar, permitiendo así mantener los niveles de calidad del aire regulado. En línea con lo anteriormente planteado, Keirstead plantea que la calidad del aire a escala local debe ser un objetivo a considerar en un proceso de diseño de sistemas energético urbano integrado [30].

## 2. Herramientas para la evaluación y diseño de sistemas energéticos

En la actualidad, el mundo está llamado a transformar los sistemas energéticos, donde las FRE jueguen un rol fundamental [35]. A pesar de ello, los sistemas centralizados de generación de electricidad siguen cubriendo la mayor parte de la demanda de energía eléctrica global [36]. El surgimiento de nuevos paradigmas en el diseño de sistemas energéticos ha dado lugar a la descentralización de la generación de electricidad, junto a otros servicios energéticos como la refrigeración y calentamiento (sistemas de poligeneración) [37]. Aunque es importante mencionar que los esquemas de poligeneración han sido implementados en sus inicios en las grandes plantas térmicas o plantas de generación centralizadas para cubrir las demandas de calor en grandes ciudades de Europa y Norte América.

El desarrollo de herramientas para la evaluación y diseño de sistemas energéticos ha proporcionado una alternativa de soporte al proceso de toma de decisiones en la planeación energética. HOMER (Hybrid Optimization Model for Electric Renewable), es una herramienta creada por NREL (National Renewable Energy Laboratory, USA). HOMER permite evaluar y diseñar sistemas energéticos híbridos (fuentes fósiles y renovables), entre sus principales ventajas están la posibilidad de tener en cuenta una amplia variedad de FRE, permite obtener una óptima combinación de utilización de fuentes energéticas, simular para diferentes ventanas y/o escalas temporales sistemas energéticos [38]. Sin embargo, esta herramienta además de permitir analizar parámetros técnicos relacionados a la estabilidad del sistema está fuertemente centrado en un análisis





del costo del ciclo de vida del proyecto, lo cual limita las soluciones obtenidas a un conjunto de configuraciones factible (e.g. [6, 39]) [40].

HYBRID2 es una herramienta desarrollada por la Renewable Energy Research Laboratory (RERL) de la Universidad de Massachusetts, esta tiene como propósito la modelación y simulación de demandas, fuentes y transformaciones energéticas con alto grado, permitiendo mejorar diseños previamente realizados en software como HOMER [41]. Otra de las herramientas creadas, fundamentalmente para apoyar la toma de decisiones, es el RETSCREEN. En este caso es posible realizar comparaciones con un caso base, basado esencialmente en combustibles fósiles [38], pero igualmente a las herramientas analizadas previamente se centra en el análisis económico. El RETSCREEN permite realizar un análisis de las emisiones de gases de efecto invernadero de forma global relacionadas al nuevo proyecto [42], pero evade las cuestiones de la contaminación local producto a la ventana espacio temporal bajo la cual se analizan los sistemas energéticos.

La herramienta computacional EnergyPLAN tiene como principal propósito asistir el proceso de diseño de estrategias energéticas. Este software es empleado principalmente a nivel nacional, pero permite analizar escenarios energéticos locales [43]. Desde sus inicios esta herramienta, a diferencia de otras analizadas, permite simular estrategias energéticas donde se tenga en cuenta la interacción de plantas de cogeneración con la variabilidad de las FRE y sus efectos en el capital de inversión, así como las emisiones de gases de efecto invernadero. EnergyPLAN es una herramienta que además de la producción de energía eléctrica y calor, analiza el transporte como sector transformador de la energía [44] y como consecuencia es ideal para la planeación energética Top-Down.

MARKAL es una de las herramientas dinámica basada en un modelo de programación lineal multi-periodo, esta adopta un enfoque bottom-up, lo cual la convierte en una de las más utilizadas para el análisis generalizado de sistemas energéticos [45]. En sus inicios esta fue desarrollada por el ETSAP (Energy Technology Systems Analysis Program) de la IEA (International Energy Agency), teniendo como principal limitación





la utilización de un único indicador medioambiental relacionado a las emisiones de gases de efecto invernadero. En la actualidad esta herramienta ha evolucionado al punto en que se permite realizar análisis como el realizado por Nguyen [46], en el cual se ideó la capacidad de expansión del sector de generación de potencia de Vietnam para un periodo de 20 años, estimándose los impactos económicos de las emisiones de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}$  y material particulados (PM) para cada tecnología de generación, basándose en los resultados del proyecto de la Comisión Europea ExternE [47]. La utilización de esta herramienta para la internalización de externalidades relacionada a los sistemas de generación de potencia, calor y la utilización del gas natural, así como para determinar costos de abatimiento de impactos ambientales de esta herramienta es muy amplia (e.g. [48]). Sin embargo, en opinión al autor del presente proyecto de investigación este tipo de herramienta, en cuanto al diseño de nuevos sistemas energéticos, sigue estando un paso atrás de lo que requiere las necesidades actuales. En la actualidad es necesario no solo predecir las posibles externalidades que puedan emerger de un escenario energético y estar preparado para minimizarlas, se impone diseñar escenarios energéticos con un mínimo número de externalidades.

## 2.1. Modelación de sistemas energéticos integrados

Los sistemas energéticos integrados, como alternativa para incrementar la eficiencia de los sistemas energéticos urbanos son necesariamente el resultado de la integración de cinco elementos fundamentales, 1) mejoramiento de la eficiencia energética de edificaciones, 2) desarrollar los sistemas de distribución de energía 3) integración de fuentes de energía endógenas (renovables y no-renovables), 4) incremento de la eficiencia e integración de sistemas de transformación energética, 5) transformar el comportamiento de los usuarios finales de los servicios energéticos [16].

El diseño de sistemas energéticos integrados es una tarea de extraordinaria complejidad, para mejorar los resultados obtenidos se han combinan herramientas de optimización con modelos matemáticos. Sin embargo los resultados obtenidos han sido tan buenos como los modelos generados para llevar a cabo dicha tarea. La obtención de un modelo que integre los cinco aspectos anteriormente mencionados continúa siendo un





reto para la comunidad científica. MODEST es un modelo para la minimización de costos de operación e inversión, donde se integra el manejo de la demanda [49-51]. La formulación de programación lineal utilizada en el modelo permite manejar con facilidad escenarios energéticos complejos a nivel nacional o regional. Pero como consecuencia se asume que el costo de inversión tiene una relación lineal con la potencia instalada, lo cual puede traer consigo la instalación de equipos con potencia instaladas que no satisfagan la demanda. Por otra parte el modelo no toma en cuenta el almacenamiento y no se establece distribución espacial de las tecnologías a instalar [30].

EnerGis es un modelo de programación lineal de mixtos enteros que combina un sistema de información geográfica, la demanda promedio anual de calor y electricidad de edificaciones con el diseño de un sistema de generación-distribución de calor y refrigeración [15]. El modelo incluye un sistema de predicción de las demandas de los diferentes tipos de edificaciones basado en la información de los promedios anuales de energía consumida y las variaciones de temperatura ambiente. En este trabajo se integran una amplia variedad de tecnologías y se determina la necesidad de redes de distribución para las diferentes zonas para cubrir las demandas de calor y refrigeración.

## **2.2. Penetración de las fuentes renovables de energía en los sistemas energéticos integrados**

Las crecientes preocupaciones relacionadas a los impactos ambientales globales producidos por los sistemas de transformación energética han conducido a tomar acciones respecto al tema, las que implican el incremento del aprovechamiento de las FRE [52]. Un ejemplo de las acciones implementada son los objetivos 20/20/20 de la Unión Europea para en el 2020 alcanzar un incremento de la eficiencia en las transformaciones energéticas de un 20% y el incremento de un 20% de FRE en su matriz energética [53]. En Cuba la matriz energética de generación eléctrica está compuesta solo por un 0,7 % de hidráulica, 0,1 % de eólica, 3,5 % de biomasa, lo que suma un 4,4 % de participación de las FRE [54]. Para el año 2030 las autoridades del país se proponen alcanzar una penetración de alrededor de un 24% de FRE en la matriz de generación eléctrica nacional, para lo cual se están implementando un grupo de programas de desarrollo de las FRE con



el objetivo de lograr un 1% de hidráulica, 14% de biomasa, 3% de solar y 6% de energía eólica en la matriz de generación [55].

La integración de las FRE en la matriz energética de cualquier nación plantea un reto fundamental para alcanzar uno de los objetivos del desarrollo sostenible (logar la disminución del consumo energético provenientes de combustibles fósiles). La complejidad de los modelos de optimización obtenidos en la actualidad es resultado de la diversidad de tecnologías a tomar en cuenta y de la necesidad de integrar criterios como los económicos, ambientales y sociales [56].

La planeación energética es una de las áreas que con más fuerza ha abordado el problema de la integración de las FRE a los sistemas de transformaciones energéticas. De acuerdo a [57], la planeación de sistemas energéticos ha tenido dos tendencias fundamentalmente, estratégica y de diseño de sistemas energéticos.

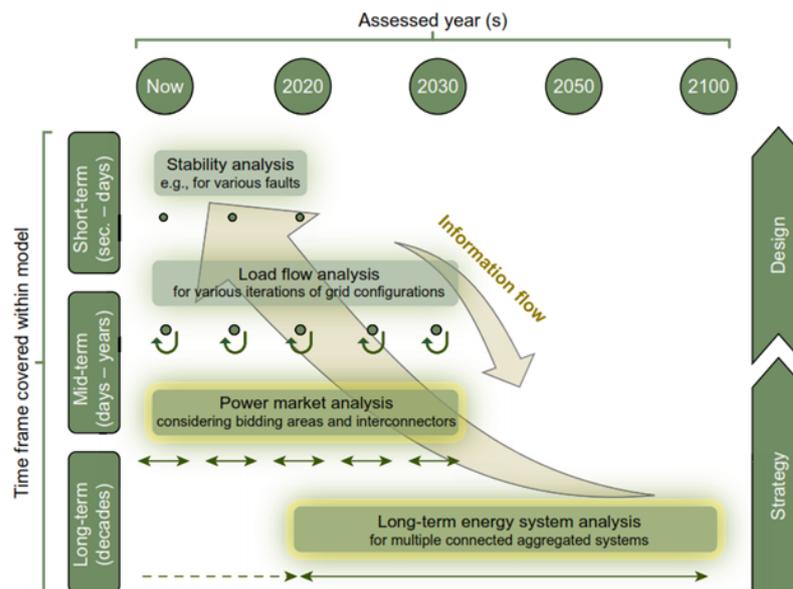


Figura 2. Tendencias en el análisis de sistemas de suministro energético. Fuente: tomado de [57].

La figura 2 muestra una relación entre la ventana temporal y el tipo de modelo, donde los estratégicos están caracterizadas fundamentalmente por dar como resultado



principal sentar las bases de la concepción de políticas energéticas. Los modelos orientados al diseño están centrado al análisis de los flujos energéticos, configuraciones de los escenarios energéticos y a la estabilidad de la red de transmisión. Sin embargo, en ambos casos una de las grandes dificultades de los modelos que integran FRE es la gran variabilidad de estas. La selección de una escala espacio-temporal adecuada para el proceso de modelación determinará la factibilidad de la medida de penetración de las FRE a considerar en términos de operatividad de la reserva de potencia de la red [58].

El aprovechamiento de la energía proveniente del sol mediante la tecnología fotovoltaica es una alternativa que requiere un tratamiento muy riguroso en los procesos de modelación, en [59] es llevada a cabo una planeación diaria para un vecindario con cuatro paneles de una potencia instalada de 30 a 75 W, sumando para un total de 260 W de potencia instalada total, donde se obtuvo una programación del tiempo y duración de la conexión de estos a la demanda doméstica. El proceso de modelación para este caso fue muy riguroso, donde se implementaron un conjunto de técnicas desde modelos de pronóstico de la disponibilidad del recurso energético hasta un híbrido de árboles de decisión y programación difusa que intervinieron en el ajuste de la generación y la demanda doméstica. Sistemas de este nivel de complejidad en cuanto a la operación, cuando se expanden a ventanas espaciales del orden de un pueblo o una pequeña ciudad se torna en gran medida inoperable. Sin embargo, la implementación de pequeños parques fotovoltaicos con almacenamiento de entre 15 minutos a 1 hora, conectados a la red puede dar lugar a una red más flexible y con menor tiempo de respuesta ante las variaciones del recurso solar [1].

### **3. Evaluación de los impactos ambientales producidos por los sistemas energéticos**

El análisis de ciclo de vida (LCA, Live Cycle Assessment) es una metodología que permite la evaluación a lo largo todo el ciclo de vida de un producto (de la cuna a la tumba) y en las diferentes etapas o eslabones de la cadena de producción el consumo de recurso y las emisiones por concepto de la producción del producto analizado [60, 61].





La generación de electricidad y calor ha sido objeto de análisis mediante LCA bajo múltiples escalas y ventanas espacio-temporales, donde se puede encontrar enfoques de optimización de matrices energéticas para una nación (e.g. [62]), evaluación de la generación de electricidad a nivel global para alrededor de 199 países (e.g. [63]), análisis de políticas para sistemas energéticos y manejo medioambiental municipal (e.g. [64]). En cada uno de los casos el medio fue el mismo LCA, pero el fin fue diferente. El LCA contiene un grupo de indicadores, donde se encuentra de interés para la presente investigación el HTP (Human Toxicity Potential). El indicador HTP es una categoría de impacto donde se cuantifican los potenciales daños a la salud humana producto a las emisiones contaminantes a medios como el agua o el aire, este indicador, independientemente de la escala utilizada para el análisis, trabaja con valor promedios de las concentraciones [65]. Es decir no tiene en cuenta la distribución espacial, el tiempo de exposición o la localización de las fuentes de emisión.

### **3.1. Manejo y control de la calidad del aire local**

El desarrollo de economías emergentes es un fenómeno que implica el incremento en el consumo de fuentes primarias de energía, a pesar de los esfuerzos realizados por incrementar el consumo de fuentes primarias de energía renovables, una gran parte de estas sigue siendo de origen fósil. La quema de combustibles fósiles en países en vías al desarrollo ha conducido al empeoramiento de la calidad del aire en entornos urbanos y con esto una gran cantidad de pérdidas económicas relacionada a las externalidades generadas por este concepto [66]. En China para el año 2013 se consideraba un número anual de 500 000 muertes producto a la degradación de la calidad del aire, con un incremento de cáncer de pulmón del 465% en tres décadas [67]. El entendimiento de todas las partes interesadas, de la interrelación existente entre los componentes de los sistemas de manejo y regulación de la calidad del aire es un factor clave para establecer un efectivo control y prevención de las concentraciones nocivas de contaminantes en el aire, especialmente en entornos urbanos donde la concentración de personas e intensidad energética (Consumo de energía por unidad de área) es muy elevada.



El gráfico mostrado en la figura 3 es un clásico modelo estratégico Top-Down de control de la calidad del air. En la parte Botton-up se encuentras componentes claves como la modelación de la calidad de aire y la evaluación de los impactos. El primero de los componentes mencionados se encarga de predecir mediante modelos matemáticos las concentraciones de contaminantes en el aire y el segundo de cuantificar los impactos en el medio ambientes (mayormente el impacto en la salud humana).

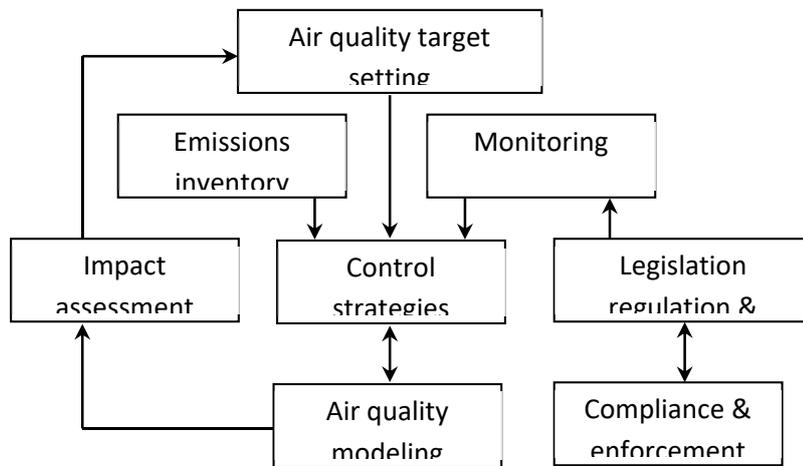


Figura 3. Principales componentes involucrados en la gestión de la calidad del aire.

Fuente: Adoptado de [68].

### 3.1.1. Modelación matemática de la calidad del aire

La calidad del aire está determinada por la concentración de sustancias contaminantes en el mismo. Los modelos de dispersión de contaminantes en medios como el aire son altamente recomendable para la evaluación del impacto que estos producen. En general, para la mayoría de los contaminantes atmosféricos, además de los gases de efecto invernadero que se dispersan a nivel mundial, la dispersión de contaminantes en la atmosfera es significativa importante en ventanas espaciales de entre decenas a miles de kilómetros [69].

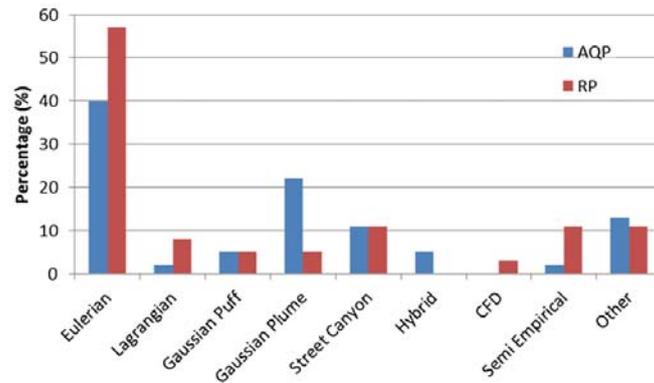


Figura 4. Encuesta sobre los modelos utilizados para elaborar planes de la calidad del aire y proyectos de investigación. Fuente: resultados del proyecto APPRAISAL EU FP7 [24].

La figura 4 muestra un gráfico que es el resultado de una encuesta realizada por el proyecto APPRAISAL EU FP7 de la Unión Europea, donde se identifican los modelos más utilizados para la determinación de la dispersión de contaminantes. Entre los modelos más utilizados resaltan los Eulerianos, estos son basados en técnicas CFD a variadas escala espaciales. Sin embargo, en casos donde se desean obtener los perfiles de concentración de contaminantes en ventanas espaciales donde la línea central de la pluma es menor a 100 km (ver figura 5) este es ampliamente utilizado [70]. Adicionalmente, el modelo de Pluma Gaussiana requiere mucho menos capacidad de cómputo [71] y ofrecen resultados con una certidumbre comparable a los modelos Eulerianos.

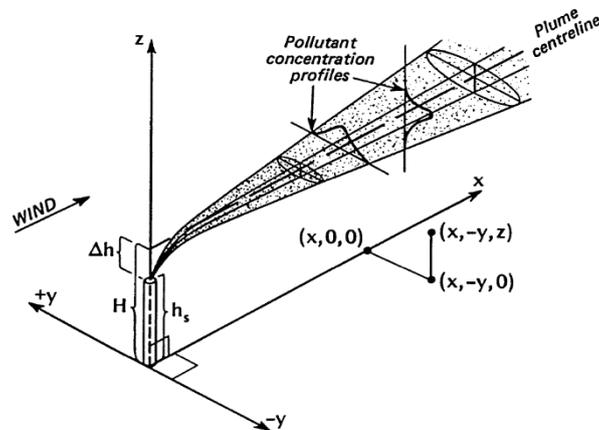


Figura 5. Gaussian plume from an elevated point source. Source: [72].



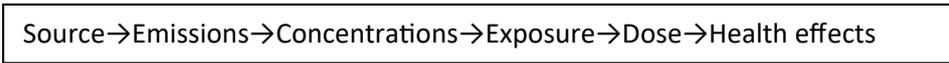
El modelo de Pluma Gausiana tiene dos limitantes fundamentales: 1) el modelo es aplicable solo para ventanas espaciales donde la longitud de la pluma, desde la fuente emisora es menor a 100 km de longitud, 2) las reacciones químicas de los contaminantes en la atmosfera son despreciados, lo cual resulta lógico debido a que para distancias de la pluma menores a 100 km los contaminantes en la atmosfera son bastante estables [73].

### 3.1.2. Impacto sobre la salud humana de la degradación de la calidad del aire

La exposición de personas a contaminantes dispersos en el aire como  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$ , especialmente  $\text{PM}_{10}$  y  $\text{PM}_{2.5}$ , está relacionado con adversos efectos sobre la salud humana [74, 75]. El incremento de enfermedades respiratorias y el cáncer de pulmón son en parte el resultado de largos periodos de exposición a los bajos niveles de calidad del aire [76].

Para analizar cuantitativamente el impacto en la salud de la contaminación del aire atmosférico en un área específica, se necesita información sobre: las concentraciones de los contaminantes en el aire, exposición a la contaminación atmosférica, la población expuesta, la mortalidad y morbilidad. Estos cuatro elementos son agrupados en las funciones de Concentración-Respuesta (CRFs), que son ampliamente utilizadas para analizar el impacto en la salud humana debido a los bajos niveles de calidad del aire [10, 77, 78].

La exposición humana puede ser definida como "el evento cuando una persona entra en contacto con un contaminante de una cierta concentración durante un cierto período de tiempo" [20]. Conceptualmente, esto ocurre a lo largo de la "vía ambiental" entre concentración y dosis, como sigue:



Los CRFs son determinados por estudios epidemiológicos usando análisis estadístico. Estudios epidemiológicos recientes han encontrado correlaciones aproximadamente lineales entre el incremento de la concentración de contaminantes y el riesgo para la salud, en un rango aplicable para concentraciones ambientales, sin un umbral por debajo del cual no se podrían esperar efectos adversos [79-83]. Estos





resultados apoyan el planteamiento de la ecuación 3.2.4.1, que suele utilizarse para estimar el impacto en la salud relacionado con la contaminación del aire atmosférico sobre una población de una ciudad o área donde se conoce un nivel de concentración representativo promedio poblacional [10, 20, 77].

$$I_{(A,q)} = \mathbf{Pop}_{(A,q)} \cdot \mathbf{C}_{(A,q)} \cdot \mathbf{S}_{CR(A,q)} \quad \text{Ec. 3.2.4.1}$$

En la ecuación 3.2.4.1  $I_{(A,q)}$  es el impacto sobre la salud humana de un área A por el contaminante q,  $\mathbf{Pop}_{(A,q)}$  es el promedio poblacional en el área A expuesto al contaminante q,  $\mathbf{C}_{(A,q)}$  es la concentración promedio en el aire del contaminante q en el área A y es expresado en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $\mathbf{S}_{CR(A,q)}$  es la pendiente de la función Concentración-Repuesta y es expresada en términos del impacto evaluado/[años · *abitantes* · ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )]. Si la mortalidad crónica o aguda es el impacto evaluado, éstos se expresan como años de vida potencialmente perdidos (YOLL) o número de muertes respectivamente. Esto se debe a que los estudios epidemiológicos dirigidos a evaluar los efectos crónicos proporcionan información sobre la pérdida de esperanza de vida, pero no proporcionan ninguna información sobre el número de muertes. El  $\mathbf{S}_{CR(A,q)}$  puede ser extrapolado de la literatura o calculado sobre la base de la tabla de datos de vida e información epidemiológica.

Las funciones de respuesta a la exposición son un elemento clave para medir el impacto de la contaminación del aire sobre la salud. Estas funciones se derivan de encuestas epidemiológicas muy bien elaboradas utilizando análisis estadísticos. En Cuba sólo se han investigado pocos estudios en este campo, todos ellos con el objetivo de evaluar los efectos agudos, pero los resultados obtenidos no son suficientes para establecer una función aceptable de respuesta a la exposición precisa, de acuerdo a. Sin embargo, estos pueden usarse como referencia para extrapolar los CRF de la literatura internacional. Afortunadamente, los resultados obtenidos en todo el mundo que examinan los efectos sobre la mortalidad debidos a la exposición a contaminantes atmosféricos, incluso en contextos bastante diferentes, han sido similares. Lo que sugiere que es



razonable extrapolar estas estimaciones a aquellas áreas en las que aún no se han realizado exhaustivos estudios epidemiológicos [10].

#### 4. Estado actual en Cuba del control y gestión de la calidad del aire

En Cuba las autoridades han puesto especial interés en los problemas relacionados a la contaminación atmosférica, a pesar de no ser Cuba un país industrializado existen tres ciudades con niveles críticos, tres con niveles pésimos, cinco con niveles malos y diez con niveles deficientes de la calidad del aire [92]

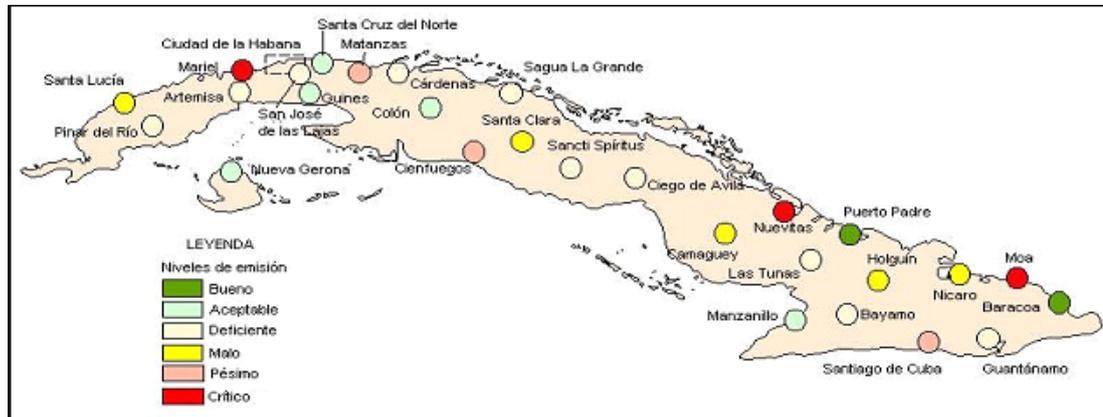


Figura 3.4.1. Mapa representativo del estado de la calidad del aire en las principales ciudades cubanas. Fuente: tomado de [92].

Las tres ciudades cubanas donde los niveles de calidad del aire es crítico deben esta condición a las emisiones relacionado a las tecnologías de transformaciones energéticas que allí operan, además de la industria del cemento y el Níquel [93]. En la ciudad de Cienfuegos fue llevada a cabo una evaluación de la calidad del aire teniendo en cuenta las principales fuentes de emisión, donde, en concordancia con el mapa mostrado en la figura 3.4.1 se determinó que la calidad del aire es clasificada de Pésima. Dentro de las principales causas se encuentran las altas emisiones de  $\text{SO}_2$  provenientes de tecnologías basadas en combustible diésel, donde se sobrepasan los límites normados de 3000 (mg/Nm<sup>3</sup>) y la insuficiente altura de las chimeneas [94].

#### 5. Referencias bibliográficas



1. Emmanuel, M. and R. Rayudu, *Evolution of dispatchable photovoltaic system integration with the electric power network for smart grid applications: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017. **67**: p. 207-224.
2. Neves, A.R., V. Leal, and J.C. Lourenço, *A methodology for sustainable and inclusive local energy planning*. Sustainable Cities and Society, 2015. **17**: p. 110-121.
3. Petroleum, B., *BP Statistical Review of World Energy 2015*. 2015, London.
4. Mobil, E., *The Outlook for Energy: A View to 2040*. 2014.
5. Petroleum, B., *Sustainability Report 2014*.
6. Khan, M.R.B., et al., *Optimal combination of solar, wind, micro-hydro and diesel systems based on actual seasonal load profiles for a resort island in the South China Sea*. Energy, 2015. **82**: p. 80-97.
7. IAE, I., *Key world energy statistics*. 2008, Technical report, International energy agency.
8. Hester, R.E. and R.M. Harrison, *Global environmental change*. Vol. 17. 2002: Royal Society of Chemistry.
9. Commoner, B., *Frail Reeds in a Harsh World*. Journal of the American Museum of Natural History, 1969. **78**(2): p. 44.
10. Bickel, P. and R. Friedrich, *ExternE: externalities of energy: methodology 2005 update*. 2004: EUR-OP.
11. Jones, L.E., *Renewable energy integration: practical management of variability, uncertainty, and flexibility in power grids*. 2014: Academic Press.
12. Orehounig, K., R. Evins, and V. Dorer, *Integration of decentralized energy systems in neighbourhoods using the energy hub approach*. Applied Energy, 2015. **154**: p. 277-289.
13. Zidan, A., H.A. Gabbar, and A. Eldessouky, *Optimal planning of combined heat and power systems within microgrids*. Energy, 2015. **93**: p. 235-244.
14. Agency, I.R.E., *Renewable Energy Opportunities for Island Tourism*. 2014.
15. Girardin, L., et al., *EnerGis: A geographical information based system for the evaluation of integrated energy conversion systems in urban areas*. Energy, 2010. **35**(2): p. 830-840.





16. Girardin, L., *A gis-based methodology for the evaluation of integrated energy systems in urban area*. 2012, ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE.
17. Herrera, I., et al., *Environmental impact of decentralized power generation in Santa Clara City, Cuba: An integrated assessment based on technological and human health risk indicators*. *Applied energy*, 2013. **109**: p. 24-35.
18. Environment, M.o.t., *Environmental Quality Standards in Japan - Air Quality*. 2013.
19. NAAQS, E., *National Ambient Air Quality Standards*. 2012.
20. Organization, W.H., *Air quality guidelines: global update 2005: particulate matter, ozone, nitrogen dioxide, and sulfur dioxide*. 2006: World Health Organization.
21. Brunekreef, B. and S.T. Holgate, *Air pollution and health*. *The lancet*, 2002. **360**(9341): p. 1233-1242.
22. Standards, C.N.B.o., *NC 39: 1999, Air Quality - Health and Sanitary Requirements*. . 1999.
23. Standards, C.N.B.o., *NC 111: 2004, Air Quality - Rules for the observation of air quality in human establishments*. 2004.
24. Thunis, P., et al., *Overview of current regional and local scale air quality modelling practices: Assessment and planning tools in the EU*. *Environmental Science & Policy*, 2016. **65**: p. 13-21.
25. Carnevale, C., et al., *An integrated assessment tool to define effective air quality policies at regional scale*. *Environmental Modelling & Software*, 2012. **38**: p. 306-315.
26. Vinuesa, J.-F., P. Mirabel, and J.-L. Ponche, *Air quality effects of using reformulated and oxygenated gasoline fuel blends: application to the Strasbourg area (F)*. *Atmospheric Environment*, 2003. **37**(13): p. 1757-1774.
27. Guariso, G., G. Pirovano, and M. Volta, *Multi-objective analysis of ground-level ozone concentration control*. *Journal of Environmental Management*, 2004. **71**(1): p. 25-33.





28. Vlachokostas, C., et al., *Multicriteria methodological approach to manage urban air pollution*. Atmospheric Environment, 2011. **45**(25): p. 4160-4169.
29. Chen, Y., et al., *An inexact bi-level simulation–optimization model for conjunctive regional renewable energy planning and air pollution control for electric power generation systems*. Applied Energy, 2016. **183**: p. 969-983.
30. Keirstead, J., et al., *The impact of CHP (combined heat and power) planning restrictions on the efficiency of urban energy systems*. Energy, 2012. **41**(1): p. 93-103.
31. Cartelle Barros, J.J., et al., *Assessing the global sustainability of different electricity generation systems*. Energy, 2015. **89**: p. 473-489.
32. Sharifi, A. and Y. Yamagata, *A Conceptual Framework for Assessment of Urban Energy Resilience*. Energy Procedia, 2015. **75**: p. 2904-2909.
33. Mark Gillott, L.R., Katharina Borsi. *Sustainable and Resilient Cities and Communities*. 2016 [cited 2017 1/31/2017]; Available from: <http://www.nottingham.ac.uk/research/groups/etri/themes/efficientenergybuildings/sustainable-resilient-cities-communities.aspx>.
34. Matzenberger, J., et al., *A novel approach to assess resilience of energy systems*. International Journal of Disaster Resilience in the Built Environment, 2015. **6**(2): p. 168-181.
35. Welsch, M., D. Mentis, and M. Howells, *Long-term energy systems planning: accounting for short-term variability and flexibility*. 2014, Academic Press. p. 215-225.
36. De Souza, G.F.M., *Thermal power plant performance analysis*. 2012: Springer.
37. Liu, M., Y. Shi, and F. Fang, *Combined cooling, heating and power systems: A survey*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014. **35**: p. 1-22.
38. Fathima, A.H. and K. Palanisamy, *Optimization in microgrids with hybrid energy systems – A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015. **45**: p. 431-446.
39. Türkay, B.E. and A.Y. Telli, *Economic analysis of standalone and grid connected hybrid energy systems*. Renewable energy, 2011. **36**(7): p. 1931-1943.





40. Energy, H., *Getting Started Guide for HOMER Legacy (Version 2.68)*. HOMER Energy: Boulder, Colorado, 2011.
41. Chauhan, A. and R. Saini, *A review on integrated renewable energy system based power generation for stand-alone applications: configurations, storage options, sizing methodologies and control*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014. **38**: p. 99-120.
42. Iqbal, M., et al., *Optimization classification, algorithms and tools for renewable energy: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014. **39**: p. 640-654.
43. Lund, H., *EnergyPLAN-Advanced energy systems analysis Computer model*. Documentation version, 2011. **9**.
44. Manfren, M., P. Caputo, and G. Costa, *Paradigm shift in urban energy systems through distributed generation: Methods and models*. Applied Energy, 2011. **88**(4): p. 1032-1048.
45. Oree, V., S.Z. Sayed Hassen, and P.J. Fleming, *Generation expansion planning optimisation with renewable energy integration: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017. **69**: p. 790-803.
46. Nguyen, K.Q., *Internalizing externalities into capacity expansion planning: The case of electricity in Vietnam*. Energy, 2008. **33**(5): p. 740-746.
47. Krewitt, W., *External costs of energy—Do the answers match the questions?: Looking back at 10 years of ExternE*. Energy Policy, 2002. **30**(10): p. 839-848.
48. Unger, T. and T. Ekvall, *Benefits from increased cooperation and energy trade under CO2 commitments—The Nordic case*. Climate Policy, 2003. **3**(3): p. 279-294.
49. Henning, D., *MODEST—an energy-system optimisation model applicable to local utilities and countries*. Energy, 1997. **22**(12): p. 1135-1150.
50. Henning, D., S. Amiri, and K. Holmgren, *Modelling and optimisation of electricity, steam and district heating production for a local Swedish utility*. European Journal of Operational Research, 2006. **175**(2): p. 1224-1247.





51. Henning, D., *Optimisation of local and national energy systems: development and use of the MODEST model*. LINKOPING STUDIES IN SCIENCE AND TECHNOLOGY-DISSERTATIONS-, 1999.
52. Chatzivasileiadis, S., D. Ernst, and G. Andersson, *Global power grids for harnessing world renewable energy*. Renewable Energy Integration: Practical Management of Variability, Uncertainty and Flexibility in Power Grids, 2014: p. 175-188.
53. Böhringer, C., T.F. Rutherford, and R.S. Tol, *The EU 20/20/2020 targets: An overview of the EMF22 assessment*. Energy economics, 2009. **31**: p. S268-S273.
54. Office, S.N., *Statistical Yearbook of Cuba 2014*. 2015: La Habana.
55. Minas, M.d.E.y., *Políticas para el desarrollo prospectivo de las fuentes renovables y el uso eficiente de la energía*. 2016.
56. Li, Y., et al., *Regional-scale electric power system planning under uncertainty—A multistage interval-stochastic integer linear programming approach*. Energy Policy, 2010. **38**(1): p. 475-490.
57. Welsch, M., *Enhancing the treatment of systems integration in long-term energy models*. 2013, KTH Royal Institute of Technology.
58. Kirby, B., E. Ela, and M. Milligan, *Analyzing the impact of variable energy resources on power system reserves*. 2014.
59. Ammar, M.B., M. Chaabene, and A. Elhajjaji, *Daily energy planning of a household photovoltaic panel*. Applied Energy, 2010. **87**(7): p. 2340-2351.
60. Klöpffer, W., *The role of SETAC in the development of LCA*. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2006. **11**: p. 116-122.
61. Astrup Jensen, A., et al., *Life Cycle Assessment (LCA)-A guide to approaches, experiences and information sources*. Environmental Issues Series, 1997.
62. Rodríguez, M.R., et al., *Life cycle modeling of energy matrix scenarios, Belgian power and partial heat mixes as case study*. Applied energy, 2013. **107**: p. 329-337.
63. Laurent, A. and N. Espinosa, *Environmental impacts of electricity generation at global, regional and national scales in 1980–2011: What can we learn for future energy planning?* Energy & Environmental Science, 2015. **8**(3): p. 689-701.





64. Kostevšek, A., et al., *Conceptual design of a municipal energy and environmental system as an efficient basis for advanced energy planning*. Energy, 2013. **60**: p. 148-158.
65. Goedkoop, M., et al., *The Eco-indicator 98 explained*. The International Journal of Life Cycle Assessment, 1998. **3**(6): p. 352-360.
66. Tan, D., et al., *Environmental, health and economic benefits of using urban updraft tower to govern urban air pollution*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017.
67. Liu, G., et al., *Spatial correlation model of economy-energy-pollution interactions: The role of river water as a link between production sites and urban areas*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017. **69**: p. 1018-1028.
68. EPA, *Air Quality Management Online Portal*. 2012.
69. Gu, Y. and S. Yim, *The air quality and health impacts of domestic trans-boundary pollution in various regions of China*. Environment International, 2016. **97**: p. 117-124.
70. Eliassen, A., *A review of long-range transport modeling*. Journal of Applied Meteorology, 1980. **19**(3): p. 231-240.
71. Matthies, M., *Ekkehard Holzbecher: Environmental Modeling Using MATLAB*. 2013, Springer Science & Business Media.
72. Nesaratnam, S. and S. Taherzadeh, *Air Quality Management*. 2014: John Wiley & Sons.
73. Petry, H., et al., *Chemical conversion of subsonic aircraft emissions in the dispersing plume: Calculation of effective emission indices*. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1998. **103**(D5): p. 5759-5772.
74. Brunt, H., et al., *Air pollution, deprivation and health: understanding relationships to add value to local air quality management policy and practice in Wales, UK*. Journal of Public Health, 2016.
75. l'Europe, O.m.d.l.s.B.r.d. and M. Martuzzi, *Health impact of PM10 and ozone in 13 Italian cities*. 2006: WHO Regional Office for Europe.





76. Park, Y.M. and M.-P. Kwan, *Individual exposure estimates may be erroneous when spatiotemporal variability of air pollution and human mobility are ignored*. Health & Place, 2017. **43**: p. 85-94.
77. Ostro, B., *Outdoor air pollution*. WHO Environmental Burden of Disease Series, 2004. **5**.
78. Caiazzo, F., et al., *Air pollution and early deaths in the United States. Part I: Quantifying the impact of major sectors in 2005*. Atmospheric Environment, 2013. **79**: p. 198-208.
79. Daniels, M.J., et al., *Estimating particulate matter-mortality dose-response curves and threshold levels: an analysis of daily time-series for the 20 largest US cities*. American journal of epidemiology, 2000. **152**(5): p. 397-406.
80. Samoli, E., et al., *Investigating the dose-response relation between air pollution and total mortality in the APHEA-2 multicity project*. Occupational and environmental medicine, 2003. **60**(12): p. 977-982.
81. Samet, J.M., et al., *The national morbidity, mortality, and air pollution study. Part II: morbidity and mortality from air pollution in the United States* Res Rep Health Eff Inst, 2000. **94**(pt 2): p. 5-79.
82. Dominici, F., *Time-series analysis of air pollution and mortality: a statistical review*. Research report (Health Effects Institute), 2004(123): p. 3-27; discussion 29-33.
83. Ren, C. and S. Tong, *Health effects of ambient air pollution—recent research development and contemporary methodological challenges*. Environmental Health, 2008. **7**(1): p. 56.
84. Holling, C.S., *Resilience and stability of ecological systems*. Annual review of ecology and systematics, 1973. **4**(1): p. 1-23.
85. Callister, W.D., *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales*. Vol. 1. 2002: Reverté.
86. Gordon, J., *Structures*, ed. P. Books. 1978, Harmondsworth.
87. Coaffee, J., *Risk, resilience, and environmentally sustainable cities*. Energy Policy, 2008. **36**(12): p. 4633-4638.





88. Rose, A., *Economic resilience to natural and man-made disasters: Multidisciplinary origins and contextual dimensions*. Environmental Hazards, 2007. 7(4): p. 383-398.
89. O'Brien, G. and A. Hope, *Localism and energy: Negotiating approaches to embedding resilience in energy systems*. Energy policy, 2010. 38(12): p. 7550-7558.
90. Hodbod, J. and W.N. Adger, *Integrating social-ecological dynamics and resilience into energy systems research*. Energy Research & Social Science, 2014. 1: p. 226-231.
91. Sharifi, A. and Y. Yamagata, *Principles and criteria for assessing urban energy resilience: A literature review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016. 60: p. 1654-1677.
92. Cuesta, O., *Nueva política de calidad del aire y sus respectivos desarrollos normativos 2007 - 2010*, in *III Taller Contaminación Atmosférica Vs Desarrollo Sostenible*. 2016.: La Habana, Cuba.
93. Hughes, L., *The effects of event occurrence and duration on resilience and adaptation in energy systems*. Energy, 2015. 84: p. 443-454.
94. Viroso, M.S.I.E.C., et al., *Evaluación de la calidad del aire urbano en Cienfuegos. Mejoras en el desempeño ambiental local*.

