

# Aplicación local de modelo de planificación energética sostenible

## Local application on sustainable energy planning

Serrano, Ariadne; Méndez, Yarú\*

Coordinación Desarrollo y Ambiente/ Depto. Conversión y Transporte de Energía  
Universidad Simón Bolívar, Venezuela.

[yarumendez@usb.ve](mailto:yarumendez@usb.ve)

### Resumen

Esta investigación pretende mostrar un modelo local de planificación energética sostenible en municipios con la finalidad de simular integralmente la oferta y la demanda de energía en cada sector incorporando los elementos urbanos relacionados con el diseño y la movilidad que impactan en las emisiones de dióxido de carbono, simulando el sistema energético con la herramienta LEAP y elaborando escenarios en el año horizonte donde se contemple las iniciativas de uso eficiente de energía, planes urbanos sostenibles y penetración de energías renovables.

Si bien la estrategia que tiene mayor impacto en la reducción de emisiones es el aprovechamiento del potencial renovable, también se obtiene una importante reducción con iniciativas de uso eficiente de energía.

Adicionalmente, se demuestra como el segundo factor que impacta las emisiones en la ciudad es el transporte, por lo que la estrategia de ciudad compacta y movilidad eléctrica son tan relevantes como las asociadas a la producción de electricidad.

**Palabras claves:** *uso eficiente de energía, energías renovables, potencial solar, planificación energética, emisiones CO2*

### Abstract

This research work discloses the implementation of local sustainable energy planning models applied on municipalities or prefectures, in order to simulate energy production and consumption in each sector, including key elements related with mobility and urban planning that may influence CO<sub>2</sub> emissions. The Long Energy Alternative Planning tool was chosen to simulate the whole energy system and elaborate three scenarios in order to analyze rational use of energy through energy demand indicators, sustainable urban planning and renewables penetration in the horizon year.

Rational use of energy initiatives help reduce CO<sub>2</sub> emissions significantly, although maximizing solar potential shows the greatest impact.

Further, it is shown how the transportation is the second sector that impacts considerably CO<sub>2</sub> emissions reduction, and the compact city and electric mobility scenarios are as relevant as electricity production scenario.

**Keywords** — *rational use of energy, renewable energy, solar penetration, energy planning, CO<sub>2</sub> emission*

## 1 Introducción

En Venezuela, la planificación de los recursos energéticos se ha considerado de manera diferenciada para el sector eléctrico y el sector petrolero, partiendo de la premisa que los combustibles fósiles, aunque son no renovables, su dimensión era casi infinita.

Al introducir el concepto de sostenibilidad, se evalúa no solo el ámbito económico y social, si no también el ambiental. En este sentido, el impacto ambiental producido por esos combustibles fósiles, principalmente en el sector transporte y en la producción de electricidad, los cuales son cuantificados en toneladas de dióxido de carbono emitidas a la atmósfera, son componente de los gases de efecto invernadero que ocasionan el cambio climático.

Es allí donde se comienzan a valorar los recursos no renovables, a saber, hídricos, solar, y eólicos para la producción de energía.

La política energética suele definirse a nivel nacional, ya que los recursos pertenecen al Estado venezolano, sin embargo, se pueden desarrollar iniciativas a escalas reducidas que aporten a la planificación energética local de manera sostenible.

En este trabajo se presenta la aplicación de un modelo de planificación energética en un conjunto de municipios que se ha denominado “Mi Ciudad” con la finalidad de destacar los elementos relevantes a ser considerados para disminuir las emisiones de CO<sub>2</sub>. Cabe destacar que los datos utilizados corresponden a datos reales en su mayoría.

## 2 Planificación energética sostenible

La planificación energética, como proceso de toma de decisiones, se basa en información del presente e incertidumbre a los posibles futuros (Van Beck 2003).

En el proceso se identifican 4 etapas (OLADE 2017):

- Diagnóstico actual, donde se caracteriza la oferta y la demanda que logra el balance energético y se contabilizan los recursos renovables y no renovables que son convertidos en combustibles o transformados en electricidad para el uso final de la energía en los diferentes sectores de demanda: residencial, comercial, industrial y transporte.
- Definición de objetivos que se quieren alcanzar, orientados por los Objetivos de Desarrollo Sostenible, principalmente ODS 7 “Garantizar el acceso a una energía asequible, segura y sostenible”, ODS 11 “Comunidades y ciudades Sostenibles” y ODS 13 “Acción por el clima”
- Propuesta de escenarios futuros, con los elementos que se visualizan como posibles en el período de estudio, que puedan afectar tanto la

demanda como la oferta

- Formulación de estrategias, en función del marco regulatorio y el nivel de decisión que tenga la autoridad local

La planificación energética sostenible se define como el proceso en el cual se establecen los posibles escenarios que logren el balance de energía presente y futuro cumpliendo con los objetivos económicos, sociales y ambientales (Farhad 2011).

Para medir dichos objetivos se han tomado como referencia, los indicadores que han propuesto 4 organismos internacionales más reconocidos en el área de energía sostenible: Agencia Internacional de Energía atómica (IAEA 2005), Consejo Mundial de energía (WEC 2017), Organización Latinoamericana de Energía (OLADE 2018) y Banco Interamericano de Desarrollo (BID 2011), a través de su programa de Ciudades Emergentes Sostenibles.

## 3 Modelo local

En la planificación energética se estima la demanda y la oferta futura de energía en un área y periodo determinado. En este caso la estimación se hace a largo plazo, específicamente en el año horizonte, donde se pretende estimar el máximo desarrollo del área y por ende su máximo consumo de energía.

En ciudades pequeñas o intermedias o en municipios, las variables demográficas y económicas no necesariamente responden a proyecciones tendenciales como en los ámbitos nacionales o regionales, por lo que se utilizan métodos causales para el pronóstico de la demanda de energía.

En el método causal (Willis 2002), se parte de la premisa que el consumo de energía aumenta sólo si aumenta la cantidad de elementos que la consumen (personas, edificaciones, etc.) o si aumenta el consumo per cápita (consumo de energía/persona, consumo de energía por edificación).

En este modelo, a partir de la máxima ocupación de la tierra desarrollable en el área, se evalúan diferentes escenarios utilizando los indicadores que definen la planificación energética sostenible.

### 3.1 Herramienta

Se utiliza la herramienta de simulación **Long range Energy Alternative Planning (LEAP)**, con la cual se modela integralmente el consumo y producción de energía en los diferentes sectores con la finalidad de elaborar estudios de planificación energética, se puede realizar la evaluación de la política energética y análisis para mitigación de los gases de efecto invernadero. LEAP está diseñado para planificación a mediano y largo plazo bajo el concepto de análisis de escenarios y es muy flexible (Quijano 2012). Además, cuenta con una base de datos relacionada con las tecnologías que puede ser usada

si no se tienen los valores locales.

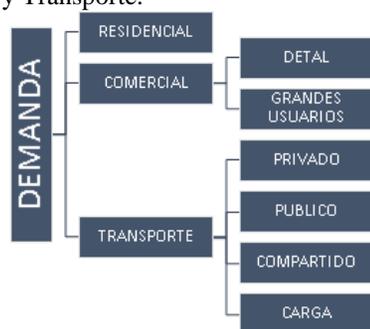
### 3.2 Area de estudio

“Mi ciudad” posee una población de 419.278 habitantes (INE 2014) y ocupa un área de 585 km<sup>2</sup>, lo que implica una densidad de población de 716,71 hab/km<sup>2</sup>

El área se construyó a partir de los datos de 8 municipios que conformarían la ciudad a aplicar la simulación de escenarios futuros.

Los 8 municipios se escogieron por las siguientes razones: a) sus habitantes representan el 80% de la población del estado, por lo que facilita prorratear la información estatal a la municipal, b) existe un pronóstico de la demanda de saturación para el año horizonte, c) conforman un área urbana que califica como ciudad intermedia, entre 200 mil y 2 millones de habitantes, d) por su ubicación geográfica, posee potencial de energías renovables a considerar en los escenarios y 6) por sus límites geográficos se facilita la identificación de entradas y salidas de energía de la ciudad.

Los sectores de demanda de energía modelados en la herramienta LEAP se han clasificado jerárquicamente como lo muestra el árbol de la figura 1 en Residencial, Comercial y Transporte.



**Figura 1** Clasificación sectores energéticos  
Fuente: elaboración propia

El sector residencial se ha modelado sin disgregación, no así, el sector comercial que se ha dividido en comercio al detal y grandes consumidores por presentar características distintas, ya que el primero se contabiliza en locales y el segundo en edificaciones, pudiéndose aplicar políticas diferenciadas en cada uno.

En Mi Ciudad no se ha considerado el sector industrial por ser menos representativo, por lo que éste estaría contenido en el sector comercial.

De la misma manera el transporte se ha dividido en los subsectores público, que abarca minibuses y autobuses, el subsector privado que abarca los automóviles de uso propio o privado, el subsector carga que contiene camiones de carga liviana y por último el subsector compartido que representa taxis, carros o vehículos en alquiler, o cualquier otra forma de vehículo compartido.

Desagregando el equipamiento eléctrico en el sector residencial, se observa que más del 90% de los hogares

disponen de nevera (refrigerador) y cocina que son equipos eléctricos de alto consumo, seguido por lavadora (73%) y aire acondicionado (70%) por poseer clima cálido durante todo el año y por lo cual se requiere en menos medida la secadora (10%) y calentamiento de agua (6%) (INE 2011).

La actividad económica está orientada al sector servicios, más del 70% comercios al detal, servicios financieros, hoteles y restaurantes; un 10% a la construcción, el resto agrupa transporte, almacenamiento, manufactura, pesca y agricultura. No se identifican grandes industrias. (G.E.N.A 2018).

### 3.3 Variables

En la Figura 2 se muestran las variables a considerar en el modelo en función de los elementos más comunes encontrados en las investigaciones revisadas, que han demostrado que influyen en las emisiones de gases.

Como variable de salida del modelo se presenta la (1) emisión de gas CO<sub>2</sub>, cuyo valor depende del (2) consumo de energía del sector transporte, (3) consumo de energía del sector residencial y (4) consumo de energía del sector comercial-industrial, que actuarían como variables intermedias del modelo. Así como también de la (8) generación térmica.

La variable intermedia (3) consumo de energía residencial está influenciada por variables exógenas al balance de energía como la (6) densidad de población (Lariviere 1999). De la misma manera, el consumo de energía en transporte está relacionado con (6) densidad de población (Creutzig 2015) y la (5) proporción de vehículos privados (Banister 1997).

El (7) uso eficiente de energía afecta al consumo de energía residencial, comercial e industrial (Hui 2000). Si la eficiencia incide sobre el consumo de energía eléctrica, por ende, impacta en la generación de electricidad.

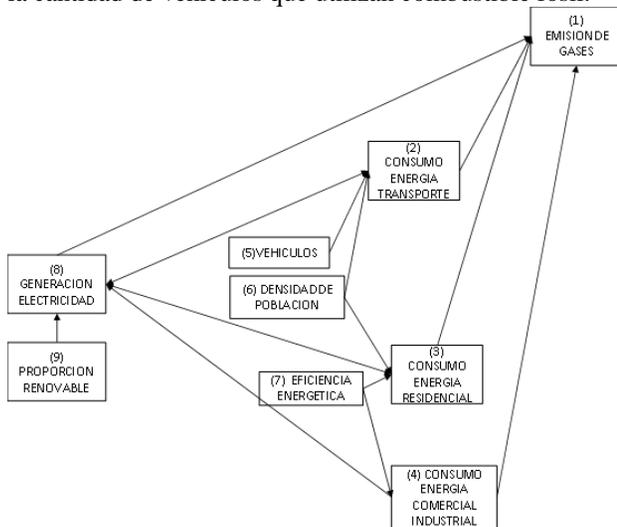
La generación de electricidad generará mayor o menor volumen de emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera en función de la (9) proporción de renovables en la matriz energética (Kammen 2016, Kullman 2016)

Para la evaluación de escenarios futuros, se evalúa el potencial de energías renovables local que modifique la matriz energética futura (Berghi 2016). Esa variable se determina en cada ciudad en función de las condiciones geográficas y meteorológicas. No se pretenden evaluar proyectos específicos, sólo estimar el potencial de energía de acuerdo a indicadores globales.

En cuanto al uso de la energía de forma eficiente o racional, tanto del punto de vista de tecnología utilizada, como de las iniciativas de uso racional y eficiente de energía, se podrían incluir estrategias de concientización y otras asociadas a equipamiento eficiente.

Como variables exógenas en la demanda se incluyen elementos de la planificación urbana como la densidad de población y la proporción de vehículos privados que

inciden en el consumo de energía del sector transporte y por ende en las emisiones de gases. En este sentido, las ciudades densas han evidenciado reducción en la emisión de gases, lo que puede controlarse localmente a través de las ordenanzas de zonificación. Otro aspecto como el uso de vehículos privados puede ser modificado mediante iniciativas de la autoridad local como desarrollo del transporte público e incentivos en el uso de vehículos eléctricos o electromovilidad y otros vehículos no motorizados como bicicletas, disminuyendo de esa forma la cantidad de vehículos que utilizan combustible fósil.



**Figura 2.** Elementos que inciden en la planificación local energética sostenible  
Fuente: elaboración propia

**Variable de salida**

Emisión de gases, es la variable criterio del estudio, la que se pretende explicar a través del resto de las variables, se mide toneladas de CO2 emitidas a la atmósfera, calculada bajo los parámetros del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC 2006)

Se contabilizan las emisiones de gases de efecto invernadero antropogénicas, es decir aquellas que resultan de la actividad humana. Principalmente el dióxido de carbono (CO2), el metano (CH4) y el óxido nitroso (NxO). Aunque en el caso de estudio solo se evaluará el CO2.

Para el cálculo de las emisiones de Mi ciudad se utiliza la siguiente ecuación

$$E = c \times \text{factor de emisión}$$

*E* es el total de emisiones de CO2

*c* es el consumo de energía por sector

**Variables de entrada**

A. Indicadores de consumo de energía.

Representa una variable intermedia ya que su magnitud

impacta en las emisiones de CO2, pero a su vez es modificado por otras variables exógenas al balance de energía.

Este indicador está diferenciado por la demanda del sector: residencial, comercial y transporte. El consumo de energía está compuesto por 2 variables: el nivel de actividad y la intensidad de uso de energía en dicha actividad.

El nivel de actividad viene dado por la cantidad de viviendas para el sector residencial, la cantidad de vehículos para el sector transporte y cantidad de locales comerciales y pequeñas industrias para el sector comercial. En el caso de los grandes usuarios se toma la edificación como unidad.

La intensidad de uso de energía está expresada en kilovatio-hora (kWh) por nivel de actividad para la energía eléctrica y en barriles equivalentes de petróleo (BEP) o joules por nivel de actividad para los combustibles fósiles.

Se expresa mediante la siguiente fórmula

$$C = a \times i$$

*C*: consumo de energía

*a*: actividad de cada sector

*i*: intensidad de uso/ nivel de actividad

De esa forma, en los escenarios futuros se puede modificar la variable urbana como cantidad de viviendas y vehículos que están asociados a la densidad de población previstas en los Planes Urbanos Locales (PDUL) y por otra parte se puede ajustar la intensidad de uso de energía en función de las eficiencias que puedan derivar de las innovaciones tecnológicas u hábitos de consumo.

Para el sector residencial quedaría

$$cres = ares \times ires$$

*cres*: consumo residencial

*ares*: nivel de actividad residencial representado por cantidad de viviendas

*ires*: intensidad de de uso por vivienda

**Tabla 1-**La intensidad de uso del sector residencial según la fuente energética (MPPPM,2009,2010,2012,2014)

Sector	Electricidad	Gas Licuado
Residencial	8.300kwh/ vivienda	0,4835BEP/ vivienda

Para el sector comercial la formulación quedaría:

$$ccom = acom \times icom$$

*ccom*: consumo comercial

*acom*: nivel de actividad comercial representado por

locales o edificaciones, según sea el caso  
 icom: intensidad de de uso por local comercial

**Tabla 2.** La intensidad energética del sector comercial según la fuente energética (MPPPM,2009,2010,2012,2014)

Sector	Electricidad	Gas Natural	Gas Licuado	Diésel
Detal	31600 kWh	0	15,73 BEP	46,37 BEP
Gran usuario	15,445 GWh	0,69 BEP	0	0

Para el setor transporte

$$ctra = atra \times itra$$

*ctra*: consumo transporte

*atra*: nivel de actividad transporte, representado por cantidad de vehículos

*itra*: intensidad de uso por vehículo

**Tabla 3.** La intensidad de uso del transporte en el año base (Paez 2018)

Sector	Electricidad	Gasolina	Diésel
Privado	0	2908 lts	0
Público	0	22609 lts	152,55 BEP
Compartido	0	16738 lts	0
Carga	0	14052 lts	104,19 BEP

#### B. Indicador de oferta energética

Dentro de Mi Ciudad existe una planta de generación eléctrica de 300MW que puede utilizar como fuente primaria gas o diésel con una eficiencia del 27%, sin embargo, en estos momentos solo está utilizando diésel por la insuficiencia de suministro la red de gas natural. La planta generó 1800GWh el último año, el resto de la electricidad se importa de la ciudad vecina para satisfacer la demanda.

En los escenarios futuros se simulará la sustitución del diésel a gas, ya que está prevista la expansión de la distribución de gas en la ciudad. También se evaluará la incorporación de fuentes renovables que generen parte de la energía eléctrica.

El resto de los combustibles fósiles (diésel, GLP, gasolina, gas natural) se toman como importación para el balance energético, ya que se producen fuera del área de estudio.

Se muestra cuadro con la contabilidad para el balance energético de la oferta y la demanda obtenido del programa LEAP

Energía (miles BPE)	Gas natural	Electricidad	Derivados petróleo	Total
Producción	-	-	-	-
Importación	0,1	600,2	6.733,1	7.333,4
Exportación	-	-	-	-
Total fuente primaria	0,1	600,2	6.733,1	7.333,4
Generación Térmica	-	1.238,2	-4.586,1	-3.347,8
Transformación	-	1.238,2	-4.586,1	-3.347,8
RESIDENCIAL	-	537,0	26,3	563,3
COMERCIAL	0,1	1.301,4	394,3	1.695,8
TRANSPORTE	-	-	1.726,4	1.726,4
Demanda	0,1	1.838,4	2.147,0	3.985,5

Se requiere la energía de 7.3 millones de barriles de petróleo equivalente, los cuales provienen más del 90% de combustible fósil primario y el restante de importación de electricidad de zonas aledañas. El 30% de ese combustible va en mayor proporción (80%) al sector transporte y el resto a los sectores comercial y residencial.

Antes de realizar la estimación futura es preciso calibrar los indicadores utilizados, como no se tienen mediciones de emisiones locales, para verificar que los indicadores de intensidad de uso utilizados reflejen las emisiones de la ciudad, se comparan con los valores per cápita del inventario de emisiones a nivel nacional (MINEA, 2017). Al comparar los resultados de las emisiones estimadas en la herramienta LEAP y los indicadores a nivel nacional se puede determinar que los sectores transporte y residencial presentan una diferencia aceptable, de 3% y 5% respectivamente. En cuanto a la generación de electricidad se espera una variación mayor 20%, ya que la matriz de combustible a nivel nacional es variada (gas 45%, diésel 30%, fuel oil 25%), a diferencia en el caso local que es solo diésel.

#### 4. Construcción de escenarios

Se establecen 3 escenarios de demanda y luego se analizan modificando la oferta

##### Escenario 1: mismo comportamiento (Business as usual)

El primer escenario está basado en el crecimiento de las actividades, manteniendo los mismos índices de uso de energía. Se pretende mostrar la variación del total de emisiones si crece la ciudad en las mismas condiciones del año base.

Se parte del cálculo de saturación del área de estudio (Gonzalez 2009), en el cual se desarrollan las variables urbanas al 80% de su capacidad de acuerdo a lo establecido en los Planes de Ordenación Urbana Local. En función de la cantidad de área a desarrollar (Ha) por cada zonificación establecida en las Ordenanzas Municipales, se estima la máxima ocupación de viviendas (usuarios residenciales) y locales (usuarios comerciales). Los grandes usuarios se determinan individualmente y están caracterizados como edificaciones que tienen una carga eléctrica concentrada

mayor a 2000KVA y su expansión se realiza en función de los proyectos conocidos en el área.

De allí se obtiene la demanda de energía para los sectores residenciales y comerciales, utilizando los mismos indicadores de consumo del año base. Aunque el trabajo de González (2009) está enfocado a la demanda de electricidad, se utiliza el nivel de actividad de saturación aplicando los indicadores de uso para cada fuente energética que fueron calibrados en el año base.

El año horizonte se define como el año de máxima expansión por lo que no corresponde a un año en particular, pero se esperaría que pudiera suceder en 40 años

#### Escenario 2: Uso eficiente de la energía (EE)

En el segundo escenario planteado, a partir del nivel de actividad del primer escenario, se modifican los indicadores de uso de energía eléctrica de las viviendas y los locales comerciales, así como también se sustituye el consumo de bombonas de gas por gas natural, basado en los proyectos de distribución de gas previstos en la ciudad (PDVSA GAS 2014).

La sustitución de equipos de más eficientes energéticamente a través de incentivos a usuarios o regulaciones a los proveedores, han demostrado conseguir disminución de un 10% de la energía. En el caso de la Unión Europea se ha establecido meta de reducción del 20%. Según la experiencia en 3 ciudades italianas (Berghi 2016) la meta para la eficiencia energética en las edificaciones privadas residenciales y comerciales se situó entre un 30% y un 50%, ya que en las edificaciones públicas solo se preveía solo entre un 3% y un 5%. Es por ello que en este escenario se plantea una conservadora reducción del 10% en la intensidad de uso de la energía eléctrica.

Adicionalmente, se pueden agregar medidas de ahorro energético, como por ejemplo el Plan de desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional PDSN 2013-2019 (MPPEE 2012) con el Programa de uso racional y eficiente de la energía, se espera una reducción del consumo de energía del 5% con acciones conjuntas de concientización en el uso de la energía y sustitución de equipos con mayor eficiencia energética.

Para incentivar un uso más eficiente de la energía, a través del cambio de los hábitos de consumo, es de suma importancia que el consumidor tenga la información necesaria sobre la energía que utiliza y los costos que le genera, para ello existen en el mercado medidores de consumo de electricidad inteligentes y programas para el tratamiento de los datos y su implementación va a depender de la regulación en cada ciudad tanto para la privacidad de los datos como para la escogencia de tarifas de los servicios. (San Martí 2018).

#### Escenario 3: Ciudad compacta y movilidad (MOV)

Para el tercer escenario se parte de dos premisas: la

primera premisa esta basada en que las ciudades densas y compactas, poseen un crecimiento vertical y sus funciones, usos y actividades se mezclan, de manera de recorrer menos distancias en viajes de los hogares al trabajo, a los centros de compras o entretenimiento, lo que mejora el desempeño energético, así como también cambia la forma de movilidad, ya que los ciudadanos pueden desplazarse caminando (Brune 2015). Adicionalmente, ayuda a limitar la expansión hacia territorios sensibles que requieran protección ambiental o zonas de alto riesgo de desastres o a tierras aprovechables para cultivo.

En los planes urbanos de "Mi Ciudad", ya se contemplan altas densidades desde 150 hasta 400 habitantes por hectárea (Hab/Ha) y también usos mezclados residencial y comercial, solo manteniendo un 6% de urbanizaciones estrictamente residenciales, por lo que no requiere de mayores intervenciones en las ordenanzas de zonificación, ya que en el año base la densidad parte del 20% de la saturación y alcanza el 80% en el año horizonte.

Para que la densificación urbana tenga efectos positivos en la emisión de gases debe venir acompañada de la intervención en la composición de la flota de transporte (Banister, Lariviere, Creutzig), esto significa aumentar los viajes o traslados en transporte público y disminuir los privados en función de la cercanía de las distancias. "Mi ciudad" abarca un radio de 20Km<sup>2</sup> aproximadamente. Se podría considerar la relación de transporte público vs privado de 15:1 según la Asociación Nacional del Transporte en la Ciudad (NATCO, siglas en inglés); por lo que se considera en este escenario una recomposición de la flota de transporte, la cual disminuye en total en un 31%.

La segunda premisa, como acción integrada en transporte, se asume que la nueva flota de transporte público utiliza electricidad como combustible. La experiencia en la ciudad de Valladolid, España (Olmos, 2016) incorpora autobuses híbridos diesel-eléctrico alimentados con sistemas de carga rápida al principio y final de la ruta, mediante las empresas transportistas que tienen las concesiones de rutas determinadas. Así como también se sustituye el combustible fósil en el 50% de la flota transporte compartido. En ciudades como por ejemplo Madrid (Alcubilla 2015), existen varias empresas operadoras de vehículos eléctricos compartidos en modalidad de flota libre, es decir, se encuentran estacionados en la calle y se localizan y utilizan a través de aplicaciones móviles. También se puede implementar la opción de servicios basados en estaciones, donde los autos se buscan y devuelven a un lugar fijo.

Para la modelación, se utiliza como referencia que los vehículos a gasolina tienen un consumo eficiente de 6,5 lts cada 100km y los vehículos eléctricos 14kWh cada 100Km (IDAE).

### Incorporación de renovables en la matriz energética

Con una demanda de saturación de 1.534MW y una energía eléctrica requerida superior a 8.500 GWh por año, se hace necesaria la evaluación del potencial de energías renovables.

En Mi ciudad predomina el clima árido y semiárido con temperaturas comprendidas entre los 26° y 28°C y bajas precipitaciones

En el área de estudio por sus características geográficas, el recurso hídrico es muy escaso ya que no existen ríos sino cursos de agua durante épocas de lluvia, tampoco disponibilidad de energía geotérmica.

En cuanto a la biomasa no hay procesos agrícolas de gran envergadura que puedan ser aprovechados (Domínguez 2009) y el biogás proveniente de residuos sólidos que suele ser uno de los aspectos fundamentales a resolver en las ciudades, no se ha considerado, en primer lugar, por ser un proceso complejo que debe evaluarse integralmente incluyendo las acciones de reducción, reuso y reciclaje, en segundo lugar por no disponer de datos suficientes para evaluar su potencial y en tercer lugar porque requeriría el estudio sobre la emisión de otros gases como el metano, no incluidos en este alcance. El potencial de energía eólica costa adentro es bastante favorable en la entidad donde se encuentra el área de estudio, ya que se evidencian vientos con velocidad promedio de 6,12 m/seg -en torres de medición de 10 mts de altura- con un promedio de duración de 4.160 horas/año, según estudios realizados (Guerra, 2010). En dicho análisis se determina la ubicación ideal de la planta de generación eólica fuera de Mi Ciudad. Es por ello que no se ha modelado como parte de la matriz energética, ya que para efectos del balance de energía entraría como importación de las áreas vecinas.

El potencial de energía solar viene determinado por la irradiación solar total sobre una superficie horizontal, también muy favorable en el área de estudio, debido a su posición geográfica.

En la ubicación, latitud 11,03° Norte y longitud 63,58° Oeste, se obtiene un valor promedio de 2.031kWh/m2 anual de acuerdo con el portal Global Solar Atlas, lo que equivale a 5,564 kWh/m2 diario, que se clasifica como excelente en la escala de irradiación solar.

Adicionalmente, en estudio de estimación de potencial de energía solar en Venezuela (Posso, 2013), se confirma que, en la estación de medición ubicada en Mi Ciudad, los valores promedios diarios son superiores a 5,1kWh/m2, la variabilidad de los promedios mensuales y anuales poseen bajos índices de dispersión obtenidos a través de los valores de desviación estándar y coeficiente de variación.

En este análisis se modeló la energía solar dentro de la matriz energética, ya que se dispone de fuentes de información internacional de los valores de radiación. Para calcular las horas pico solar (HSP), se define como el número de horas equivalente cuando se alcanza la

irradiación promedio de 1.000 W/m2, lo que equivaldría a 5,56 HSP

En investigaciones revisadas (Berghi, 2014), la penetración de renovables variaba en cada ciudad según su potencial y el espacio requerido para su aprovechamiento entre un 4% y 24%.

Entonces, se analizó la incorporación de un 10% de renovable en la matriz de energía a través de granjas solares de paneles fotovoltaicos, lo que corresponde a 851 GWh anual y 2,3 GWh diario.

Se calcula la capacidad de la planta solar mediante la siguiente ecuación:

$$e = cap \times HSP$$

*e*: energía requerida

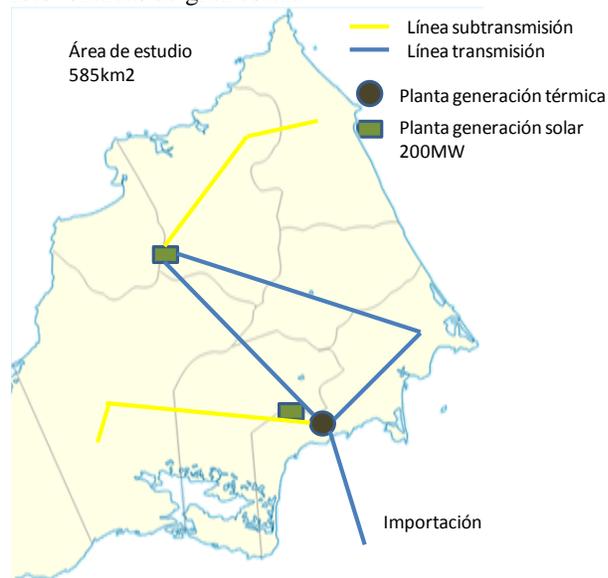
*cap*: capacidad de la planta

*HSP*: horas solar pico

En base a las 5,56 HSP diarias y a 2,3 GWh de energía diarios, se requiere una capacidad aproximada de 419MWp de potencia. Suponiendo la utilización de módulos fotovoltaicos (paneles solares) estándar de 300Wp c/u, equivaldría a 1,3 millones de paneles ocupando un área de 2,8km, lo que corresponde a 0,48% del área de estudio.

Por la dificultad de conseguir un terreno de tales dimensiones se recomienda ubicar 2 plantas de 200W cada una, lo que adicionalmente apoya la calidad de servicio del área.

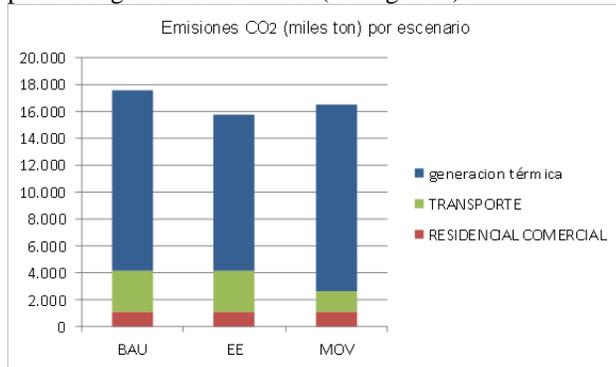
En la figura 3 se muestra un esquemático de las líneas de transmisión y subtransmisión del área de estudio, así como la ubicación de la planta de generación térmica y las posibles ubicaciones de las plantas solares fotovoltaicas de gran escala.



**Figura 3.** Esquemático sistema eléctrico Mi Ciudad  
Fuente: elaboración propia.

**5. Resultados**

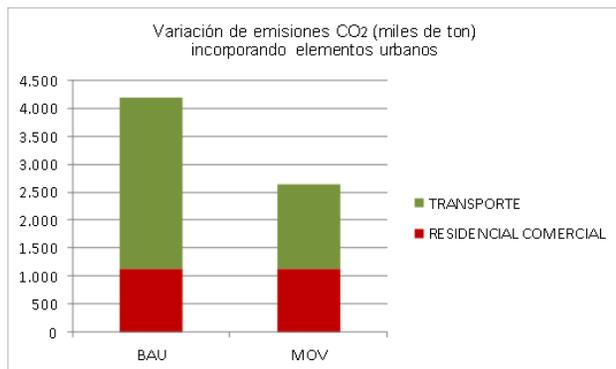
Al revisar los resultados de los 3 Escenarios pareciera insignificante lo que se puede lograr con el resto de las acciones al lado de lo que representa las emisiones de la planta de generación térmica (ver figura 4).



**Figura 4.** Emisiones CO2 para cada Escenario  
Fuente: propia

Sin embargo, observando las variaciones sin incluir la generación de electricidad, se puede observar que habría una reducción de 1,5 millones de ton CO2, lo que no es nada despreciable, considerar la estrategia integral de transporte (ver figura 5) Inicialmente se consideraron por separadas las evaluaciones de la ciudad compacta incrementando el parque automotor de uso público y la movilidad eléctrica, pero la contribución por separado era menor a la contribución integrada.

El escenario de Uso eficiente de energía es el que presenta la mayor reducción de emisiones de 1,7 millones de ton CO2, ocasionando una disminución del 5% solamente por el cambio de GLP a gas natural y un 13% en la generación de electricidad debido a la disminución de la demanda de los sectores residencial y comercial. Cabe destacar que la reducción en la demanda además disminuye las pérdidas en los sistemas de transmisión y distribución de energía, los cuales no fueron consideradas en esta modelación por simplificación del análisis.

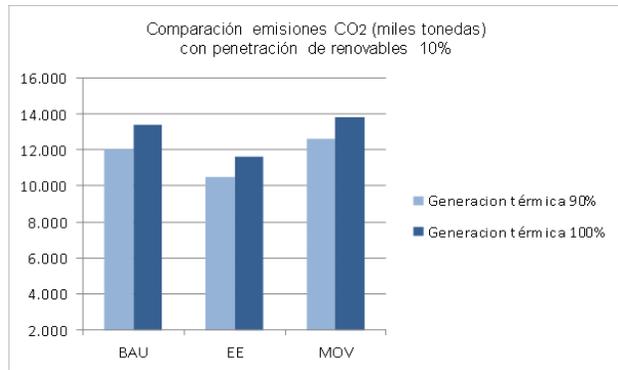


**Figura 5.** Emisiones CO2 Escenario BAU vs MOV  
Fuente: propia

La generación de electricidad requiere de una capacidad instalada de 1.500 MW en el año horizonte para

satisfacer la máxima expansión de la ciudad.

Como se observa en la figura n° 6, la generación de energía eléctrica es la que más contribuye en la emisión de CO2, mayor al 70% en cualquiera de los escenarios. Probablemente, parte de la energía requerida será suplida desde fuera de Mi Ciudad, lo cual dependerá del Plan de expansión a largo plazo que establezca la autoridad competente.

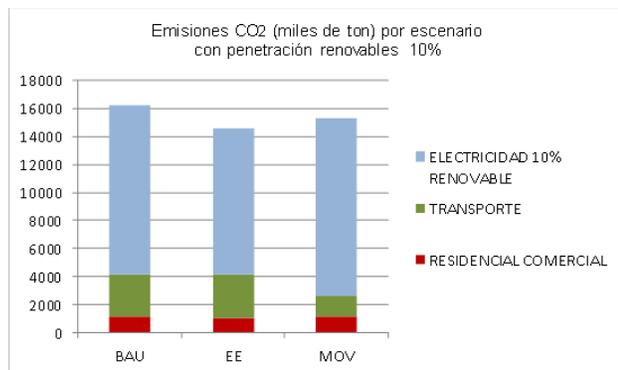


**Figura 6.** Comparación emisiones CO2 por generación electricidad  
Fuente: propia

De igual forma, se estableció una opción de un 10% de penetración de energía solar a través de plantas solares fotovoltaicas de gran escala, que reduce entre 1,2 y 1,34 millones de toneladas de CO2 con la combinación de los diferentes escenarios de demanda planteados.

Combinando las estrategias de demanda con la penetración del 10% en energías renovables, sigue siendo el escenario de eficiencia energética el que más contribuye a la disminución de emisiones 17% para el año horizonte planteado.

Adicionalmente si combinamos las 3 estrategias, las 2 relacionadas con la demanda a saber uso eficiente de energía y transporte integral con la penetración del 10% de renovables, se alcanzaría una disminución del 25% de las emisiones previstas en el escenario BAU (Ver figura n°7).



**Figura 7.** Emisiones CO2 para cada Escenario con penetración renovables  
Fuente: propia

## 5. Conclusiones

Se comprueba que los niveles de actividad tanto residencial como comercial impactan directamente en la emisión de CO<sub>2</sub>, sin embargo, el impacto es menor si las intensidades de uso de energía disminuyen. Al aumentar la población y el empleo en una ciudad, aumenta el consumo de energía en la misma proporción como se observa en los resultados, lo que se podría reducir con acciones que impacten directamente los indicadores de consumo per cápita de energía, mediante un uso eficiente de la misma. Esas iniciativas, como por ejemplo promover junto con los prestadores de servicio y empresas privadas la sustitución de equipos más eficientes, así como apoyar las campañas de concientización para un mejor uso, no generan costos adicionales a las autoridades locales. Por otra parte, algunas campañas en otros países están respaldadas por tarifas que reflejan el costo del servicio y que permiten mostrar a los ciudadanos los beneficios económicos provenientes del ahorro de energía. Por eso es importante que cada usuario conozca el costo real de cada servicio y que los subsidios –de ser requeridos- se realicen externamente.

Se demuestra la importancia del proceso de calibración antes de realizar las simulaciones en el largo plazo; comparando los resultados obtenidos a partir de la herramienta LEAP con la única referencia documentada que es el Inventario de emisiones Nacional del año 2010 (MINEA, 2017), ya que no se tienen mediciones locales. Se obtuvieron diferencias de 3% y 5% para los sectores residencial y transporte respectivamente, lo que se considera aceptable dentro de lo esperado. La variación mayor fue en la diferencia de emisiones de la generación térmica, debido al combustible simulado en la generación local -solo diésel en el año base- que se diferenciaba del conjunto de combustibles –gas, diésel y fuel oil- utilizado en el parque térmico nacional.

El año horizonte permite evaluar los escenarios en máxima expansión, sin embargo, se podrían realizar simulaciones en el mediano plazo para ir evaluando las acciones en el tiempo. En la modelación realizada, se pretendía evaluar el impacto de no hacer nada vs implementar diferentes iniciativas en un futuro determinado; se estableció el año horizonte como la saturación de la ciudad según las reglamentaciones actuales principalmente porque se disponían los niveles de actividades requeridos para estimar la demanda y oferta de la energía de otras investigaciones (Gonzales, 2009). En posteriores estudios se pueden incluir estimaciones de mediano plazo, de manera de ir calculando el acumulado de emisiones en el tiempo.

Con el apoyo de la planificación energética local se puede disminuir las emisiones de CO<sub>2</sub> en la ciudad ya que los escenarios planteados están basados en estrategias que pueden incluirse dentro de los planes

urbanos -ser llevadas a cabo por las autoridades municipales-. Las ordenanzas de zonificación vigentes se saturaron en un 80%, aumentando drásticamente la densidad de población actual. Aunque a mayor población aumenta el consumo de energía del sector residencial, si esa población está concentrada en un área, se reducen en mayor proporción las emisiones del sector transporte por la cantidad y la forma de viaje. Se complementa la estrategia con un aumento en la flota de transporte público que se puede lograr a través de asociaciones públicas privadas, y se introduce la electro-movilidad tanto de buses como vehículos de alquiler y taxis, así como también movilidad compartida, lo que se puede lograr en la negociación de las concesiones con los diferentes agentes. También se pueden considerar Ordenanzas de Movilidad Sostenible (Ayuntamiento Madrid), donde se límite la circulación de vehículos en función de una etiqueta medioambiental en base a las emisiones del vehículo.

Si bien la estrategia que tiene mayor impacto es el aprovechamiento del potencial renovable, también es la que tiene mayor dificultad de implementación en los actuales momentos en Venezuela, ya que la Ley Orgánica del Servicio Eléctrico vigente (LOSSE, 2010) no permite la participación de empresas privadas en la generación de energía eléctrica. En ese sentido, la presión de la autoridad local es hacia la Corporación Eléctrica Nacional y el Ministerio de Energía eléctrica, quien debe incluirla en sus planes de expansión del sistema eléctrico. Los datos de consumo de electricidad, aunque no se encontraban actualizados, se miden a nivel municipal, como también se expresó en el marco teórico que ha sido utilizado en otras investigaciones (Lariviere, 1999). A diferencia de los datos de consumo de combustible líquido y gas que se encuentran a nivel de los estados por lo que se requiere medir la información a nivel municipal. Esta información debe ser solicitada a los organismos proveedores de servicio

La herramienta LEAP permite visualizar de una manera integral las diferentes acciones en la ciudad y su impacto en las emisiones, además cuenta con una base de emisiones para diferentes tecnologías a nivel internacional en caso de que no se tenga la información específica de la ciudad, es bastante flexible en la definición de los sectores y subsectores de demanda que se quieren analizar, así como la modelación en energía total o intensidad de uso. También permite simular los diferentes tipos de tecnología en la oferta tanto renovable y no renovable.

## Referencias

- Alcubilla Ana, 2015, *Soluciones hacia una movilidad inteligente, sostenible y conectada*. I Congreso de Ciudades Inteligentes, Madrid, Mayo 2015  
Ayuntamiento de Madrid, *Ordenanza de Movilidad*

*Sostenible*, 24 octubre 2018

Banister D, 1997, Sustainable cities: transport, energy , and urban form *Enviroment and planning*, 24, pp 125-143

Berghi S, 2016, Energy planning for metropolitan context: potential and perspective of sustainable energy action plans (SEAPs) of three Italian big cities, *Energy Procedia*, 101, pp1072-1078

BID (2011) Sostenibilidad Urbana en América Latina y el Caribe. Oficina de relaciones externas del BID

Brune F, 2015, ¿Cuál es el aporte de la eficiencia energética al desarrollo urbano sostenible?. Una mirada al instrumento Plan local definido en la Ley No.18.308 Tesis Maestría en Ordenamiento Territorial y Desarrollo Urbano. Universidad de la Republica, Uruguay

CORPOELEC, Indicadores 2010,2011,2012

Creutzig F, 2015, Global typology of urban energy use and potentials for an urbanization mitigation wedge. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 112, pp 6283-6288

Domínguez P, 2009, Energía de la biomasa, UNEXPO, Maestría Ing. Eléctrica

Farhad D, 2011, On sustainability in Local Energy planning. Doctoral Dissertation. Faculty of Engineering at Lund University, may 2011

González , 2009, Estudio de la demanda de saturación de energía eléctrica de la Isla de Margarita Trabajo de grado Ingeniero electricista Universidad de Oriente

Guerra, Victoria (2010) Estudio de la factibilidad de uso de energías eléctricas alternativas en el suroeste de la Isla de Margarita Trabajo de grado Ingeniero Electricista Universidad de Oriente

Gobernación Estado Nueva Esparta (2018), Plan de Desarrollo Estatal 2018-2021

Hui S, 2001, Low energy building design in high density urban cities. *Renewable energy*, 24, pp 627-640

IAEA (2005) Energy Indicators for sustainable development. Agencia Internacional de Energía Atómica, abril 2005

IPCC, 2006, Guidelines for National Greenhouse gas inventories. Volume 2 Energy Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático

INE (2014) XIV Censo Nacional de Población y Vivienda. Resultados por entidad Federal y Municipio. Gerencia General de Estadísticas Demográficas. Diciembre 2014

Kammen DM, 2016, City Integrated renewable energy for urban sustainability, *American Association for the Advancement of Science* , 352, pp. 922-8

Kullman M, Campillo J, Dahlquist E, 2016, Planning for energy efficient cities *Journal of Settlements & Spatial Planning*, 5, pp 89-92 The European research project PLEEC

Lariviere I,1999, Modelling the electricity consumption of cities: effect of urban density. *Energy Economics*,21, pp 53-66

LOSSE 2010, Ley Orgánica del Sistema y Servicio Eléctrico, Gaceta Oficial República Bolivariana de Venezuela N° 39.573 Diciembre 2010

MINEA, 2017, Segunda Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Ministerio del Poder Popular para Ecosocialismo y Aguas. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. Venezuela, 2017

MPPEE,2012, Plan de desarrollo del Sistema eléctrico Nacional PDSN 2013-2019. Ministerio del Poder Popular de Energía Eléctrica. Venezuela, 2012

MPPPM 2009, Petróleo y otros datos estadísticos

MPPPM 2010, Petróleo y otros datos estadísticos

MPPPM 2012, Petróleo y otros datos estadísticos

MPPPM 2014, Petróleo y otros datos estadísticos

OLADE 2017, Manual de Planificación energética. OLADE 2017

OLADE2 018, Panorama energético de América Latina y el Caribe. OLADE,,Diciembre 2018

Olmos Francisco, 201, Remourban: hacia el desarrollo de la movilidad urbana sostenible en las Smart Cities. II Congreso Ciudades Inteligentes, Madrid, Mayo 2016

Páez Pumar E, 2018, Estadísticas de transporte y vialidad Academia Nacional de Ingeniería y Hábitat 2018

Posso F, 2013, Estimación del potencial de energía solar en Venezuela utilizando sistemas de información geográfica, *Revista Geográfica Venezolana* Vol. 55(1) , pp 27-43

PDVSA GAS, Indicadores 2014

Quijano R, 2012, Diseño e implementación de una plataforma integrada de modelación para la planificación energética sostenible MODERGIS. Estudio Caso Colombia. Tesis para optar el título de Doctor en Ingeniería Sistemas Energéticos. Universidad Nacional de Colombia

Sanmarti M, 2018, Distritos de bajo consumo energético: Lecciones aprendidas del proyecto Growsmarter. Publicación IV Congreso Ciudades Inteligentes Madrid 30-31 Mayo 2018

Van Beck,2003, A New Decision support method for local energy planning in developing countries. Tilburg Center, Center for Economic Research

WEC (2017) Energy Trilemma Index 2017. World Energy Council

Willis H, 2002, Spatial Electric Load Forecasting, Marcel Dekker Inc., second edition 2002

**Recibido:** 05 de enero de 2020

**Aceptado:** 25 de mayo de 2020

**Serrano Ariadne:** Ingeniero electricista con 30 años de experiencia en Planificación de sistemas eléctricos a corto y largo plazo, diseño y modelación de sistemas de

distribución de energía eléctrica, gerencia de activos y priorización de inversiones en el sector eléctrico, evaluación de generación distribuida e impulso a las energías renovables. Cursando maestría en Desarrollo y Ambiente en la USB. Asesora Asociación Venezolana Energía Eólica. Correo electrónico: riadneserrano@gmail.com

**Méndez Yarú:** es docente y lector en las áreas de energías renovables y sistemas eléctricos de potencia en la Universidad Simón Bolívar (USB). En cuanto a su desempeño académico, cuenta con estudios de ingeniería eléctrica y de especialización en la Universidad Simón Bolívar (USB); doctorado y postdoctorado en la Universidad de Kassel (UNIK) en Alemania y una Maestría en Negocios (MBA) de Universidad de Ciencias Aplicadas de Múnich (HM) en Alemania. A la fecha, él cuenta con la autoría de 17 patentes internacionales, 54 publicaciones científicas y un capítulo en un libro a nivel internacional.

