

Modelo sistémico para el análisis de escenarios de consumo energético residencial

Dante Andrés Barbero

Posdoctorado (UNC). Doctor en Ciencias Informáticas (UNLP). Magíster en Paisaje, Medio Ambiente y Ciudad (UNLP). Licenciado en Informática (UNLP). Analista de computación (UNLP). Investigador adjunto del CONICET. IIPAC, FAU, CONICET-UNLP. dantebarbero@yahoo.com.ar

Pedro Joaquín Chévez

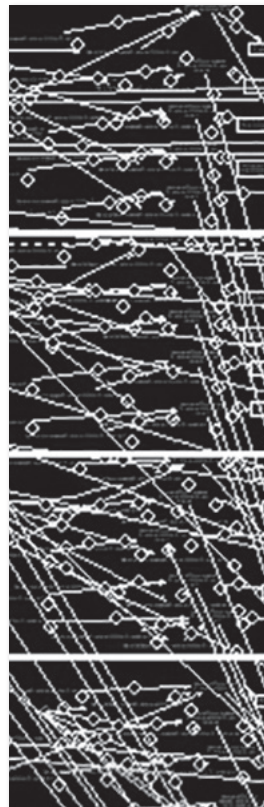
Doctor en Ciencias (área: Energías Renovables) (UNSa). Especialista en Energías Renovables (UNSa). Arquitecto (UNLP). Investigador asistente del CONICET. Docente FAU, UNLP. IIPAC, FAU, CONICET-UNLP. che.pedro@hotmail.com

Carlos Alberto Discoli

Doctor en Ciencias (área: Energías Renovables) (UNSa). Magíster en Ambiente y Patología Ambiental (UNLP/Universidad de Siena). Especialista en Ambiente y Patología Ambiental (UNLP/Universidad de Siena). Ingeniero Mecánico (UNLP). Investigador principal del CONICET. IIPAC, FAU, CONICET-UNLP. discoli@rocketmail.com

Irene Martini

Doctora en Ciencias (área: Energías Renovables) (UNSa). Magíster en Políticas Ambientales y Territoriales (UBA). Arquitecta (UNLP). Investigadora independiente del CONICET. Docente FAU, UNLP. IIPAC, FAU, CONICET-UNLP. irene_martini@yahoo.com.ar



<https://doi.org/10.30972/crn.32325958>

Modelo sistémico para el análisis de escenarios de consumo energético residencial

Resumen

Este trabajo presenta el desarrollo de un modelo sistémico, construido utilizando la metodología de dinámica de sistemas, para el análisis de escenarios de consumo energético por climatización en el sector residencial. El modelo permite analizar el consumo de energía total de las viviendas y desagregado por equipamiento, aplicando medidas de eficiencia. Para la modelización del consumo para refrigeración y calefacción se tuvieron en cuenta diferentes equipos considerando para cada uno la cantidad, potencias nominales, niveles de etiquetado acordes con normas vigentes y las horas de uso promedio. Asimismo, se incluyó en el modelo la posibilidad de analizar diferentes medidas de eficiencia energética. El modelo desarrollado permite analizar la evolución temporal de la demanda energética desagregada y total del equipamiento edilicio y posibilita comparar, mediante análisis de sensibilidad, distintos escenarios, a partir de la adopción de diversas medidas tecnológicas y de eficiencia energética.

Palabras clave

Modelo sistémico; simulación; ahorro de energía; refrigeración y calefacción.

Systemic model for the analysis of residential energy consumption scenarios

Abstract

This paper presents the methodology and development of a systemic model, built using the systems dynamic methodology, for the analysis of energy consumption scenarios by air conditioning in the residential sector. The model allows to analyze the total energy consumption of homes and disaggregated by equipment applying efficiency measures. For the modeling of the consumption for cooling and heating, different equipment was taken into account considering for each one: the quantity, nominal powers, labeling levels according to current norms and the average hours of use. Likewise, the possibility of analyzing different energy efficiency measures was included in the model. The developed model allows analyzing the temporal evolution of the disaggregated and total energy demand of the building equipment, allowing to compare, through sensitivity analysis, different possible scenarios from the adoption of various technological and energy efficiency measures.

Keywords

Systemic model; simulation; energy saving; cooling and heating.

Modelo sistémico para análise de cenário de consumo de energia residencial

Resumo

Este artigo apresenta o desenvolvimento de um modelo sistémico, construído a partir da metodologia de dinâmica de sistemas, para a análise de cenários de consumo de energia por resfriamento e aquecimento no setor residencial. O modelo permite analisar o consumo total de energia das residências e discriminado por equipamentos, aplicando medidas de eficiência. Para a modelagem de consumo para refrigeração e aquecimento, foram considerados diferentes equipamentos, considerando para cada um: a quantidade, potências nominais, níveis de rotulagem de acordo com a regulamentação em vigor e as horas médias de uso. Da mesma forma, foi incluída no modelo a possibilidade de analisar diferentes medidas de eficiência energética. O modelo desenvolvido permite analisar a evolução temporal da procura energética desagregada e total dos equipamentos construtivos, permitindo a comparação, através de análise de sensibilidade, de diferentes cenários possíveis com base na adoção de várias medidas tecnológicas e de eficiência energética.

Palavras-chave

Modelo sistémico; simulação; economia de energia; resfriamento e aquecimento.

1. Introducción

El sector residencial es el segundo en cuanto a demanda de energía total en la República Argentina, solo superado por el sector transporte. Para el año 2017, el requerimiento energético del sector residencial tuvo una participación del 25,23 % en la matriz nacional (MINISTERIO DE HACIENDA, 2019, p. 1). Por lo tanto, mejorar la eficiencia energética del sector permitiría reducir la demanda nacional y las emisiones de GEI producidas por una matriz energética basada, principalmente, en fuentes no renovables.

Este trabajo se inscribe en el marco de proyectos vigentes en los que se busca identificar y cuantificar el consumo energético por sectores (ej.: residencial), a partir de atributos que describen el grupo de viviendas. Dentro de tales atributos se encuentran los relacionados con las características constructivas, los niveles de consolidación, el consumo energético y los aspectos demográficos y socio-económicos. A partir del análisis de estas variables y de su ubicación territorial, se construyeron áreas homogéneas. Para cada una se desagregaron los consumos relevados por fuente (electricidad, gas, combustibles a granel), tipos de usos (climatización, agua caliente sanitaria, cocción, refrigeración de alimentos, iluminación, lavado de ropa, informática, audio y video, otros) y artefactos (aire acondicionado, estufas, ventiladores, heladeras, TV, etc.), con el objeto de proponer medidas de eficiencia específicas para cada problemática identificada. En este sentido, este trabajo plantea construir un modelo sistémico, aplicado al caso de climatización, que relacione las variables relevantes para la construcción de escenarios energéticos urbanos. En todos los casos se busca optimizar la demanda energética manteniendo las condiciones de habitabilidad.

En cuanto a investigaciones orientadas a la construcción de escenarios, tanto tendenciales como de implementación de políticas de eficiencia energética e inserción de energías renovables, se pueden identificar diversos trabajos a nivel internacional. Cabe destacar que los abordajes de estos estudios suelen ser globales, es decir que consideran una ciudad como un único objeto, o que adoptan un sector particular (transporte, industria, comercio, vivienda, etc.) o utilizan una pequeña porción de un caso de estudio.

Focalizando en el sector edilicio, es posible mencionar los siguientes ejemplos: el trabajo de HOWARD *ET AL.* (2012), que construye un modelo para estimar la demanda energética por

metro cuadrado (kWh/año*m²) del caso base de edificios de oficinas, comercios y viviendas en Nueva York (Estados Unidos); sin embargo, no establece escenarios futuros. Recortando el análisis al sector edilicio residencial, podemos señalar el trabajo de OUYANG *ET AL.* (2015), en el cual se analizan posibles ahorros de energía del parque edilicio residencial de China de manera global. Por su parte, en SANDBERG *ET AL.* (2014) y SANDBERG *ET AL.* (2017) se utiliza un modelo dinámico del parque construido de viviendas, a partir de una segmentación de este y del análisis de escenarios de demanda energética futura en Noruega.

Siguiendo con estudios sobre escenarios en el sector residencial, se pueden destacar trabajos que indagan acerca del posible impacto del cambio climático sobre el consumo de energía en los edificios (ROUX *ET AL.*, 2016). Otros trabajos utilizan las tipologías de vivienda como unidades de análisis y evalúan posibles mejoramientos energéticos en el largo plazo. En este sentido, el trabajo de DROUILLES *ET AL.* (2017) estudia el parque de viviendas periurbanas en Suiza, el trabajo de GHIASSI *ET AL.* (2017) utiliza un barrio en el centro de Viena y el trabajo de GARRIDO-SORIANO *ET AL.* (2012) analiza edificios catalanes, en los tres casos para ensayar medidas de eficiencia energética por medio de escenarios.

Asimismo, existen estudios en los que se evaluaron posibles impactos de estrategias específicas. Tal es el caso del trabajo de GIRARDIN *ET AL.* (2010), en que se analiza la inserción de un sistema de calefacción urbana y de medidas de mejoramiento de la envolvente edilicia en un sector urbano de Génova (Suiza); el trabajo de ABDURAFIKOV *ET AL.* (2017), que construye escenarios para analizar el impacto de incluir un sistema de calefacción urbana en dos municipios de Finlandia; el artículo de KHATIB *ET AL.* (2014), que compara el consumo de energía en viviendas de Italia y Austria y modela la demanda para evaluar medidas de gestión de la energía, o el trabajo de KWON *ET AL.* (2014), en el cual se estudia la demanda residencial en un escenario energético futuro para Dinamarca.

Desde perspectivas más amplias en torno a la implementación de políticas públicas, es posible resaltar los trabajos de Energy Innovation LLC (2021), donde se desarrolló un simulador de políticas energéticas, en el cual se pueden analizar escenarios desagregados por sector, siendo el residencial uno de ellos. Asimismo, el Millennial Institute (2021) desarrolló un modelo denominado Integrated Sustainable Development Goals planning model (iSDG), el cual permite analizar la evolución temporal y las interrelaciones entre diferentes ODS (Objetivos de Desarrollo Sostenible), dentro de los cuales se encuentra

el correspondiente a energía asequible y no contaminante (ODS 7). Este modelo fue utilizado en Uganda para analizar los efectos de diferentes políticas con respecto a avances en términos de ODS (*NATIONAL PLANNING AUTHORITY, UGANDA, 2020*).

Finalmente, centrándonos en estudios a nivel nacional, el Ministerio de Energía y Minería (2017) ha utilizado el *software* LEAP para la simulación de escenarios energéticos hasta el año 2030 (*MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINERÍA, 2017*) y, por su parte, existen otros trabajos (*BARBERO ET AL., 2015; BARBERO ET AL., 2018d; BARBERO ET AL., 2012*) que presentan desarrollos de *software* para la construcción de modelos sistémicos basados en índices e indicadores cuantitativos y que, por lo tanto, pueden emplearse también para la construcción de escenarios energéticos. En última instancia, se pueden destacar trabajos que construyen escenarios para la ciudad de La Plata, donde el sector residencial se aborda con desagregación territorial intra-urbana (*CHÉVEZ ET AL., 2021; CHÉVEZ ET AL., 2019a; CHÉVEZ ET AL., 2019b; MARTINI, 2019; MARTINI ET AL., 2018a; MARTINI ET AL., 2018b*).

Los modelos fueron y son muy utilizados en diferentes ciencias como un intento de aproximar la realidad. De hecho, un modelo es una simplificación de la realidad en la que se dejan de lado aspectos poco relevantes. Hay diferentes formas de clasificar los modelos; una de ellas es observando cómo se estudian las distintas partes de un problema. Así, en un modelo analítico (o analítico-sintético) el todo se divide en diferentes partes para luego estudiar cada una de ellas por separado. Luego, se espera que los resultados obtenidos al estudiar cada una de las partes puedan combinarse de alguna manera para dar respuesta al problema general. Desde luego, hay problemas en aquellas situaciones en que las diferentes partes que forman un todo no pueden separarse, y es precisamente allí donde se vuelve viable la utilización de modelos sistémicos. En tales modelos, el objeto de estudio es entendido como compuesto por un conjunto de variables interrelacionadas. Por lo tanto, es necesario para su estudio aplicar la metodología de la dinámica de sistemas, dado que el problema que se pretende resolver en este trabajo está compuesto por numerosas variables, y cuando alguna de ellas cambia su valor normalmente ocurren cambios también en otras variables relacionadas con la que sufrió el cambio. Por ello se deduce que un modelo sistémico es adecuado para este estudio y, por ende, la dinámica de sistemas sería la metodología apropiada para su análisis. Esta metodología permite no solo observar la relación entre las diferentes variables en un momento dado, sino también visualizar su comportamiento, en forma de trayectorias,

a lo largo del tiempo. Esta última característica hace que la dinámica de sistemas sea preferible a otras técnicas que tengan en cuenta el análisis entre las variables de un sistema, como el análisis correlacional o el análisis de componentes principales.

En consecuencia, este trabajo presenta el desarrollo de un modelo sistémico, construido utilizando la metodología de dinámica de sistemas, para el análisis de escenarios de consumo energético por climatización en el sector residencial, el cual permite ensayar numerosas estrategias de mejoramiento energético, tales como el recambio, incorporación y/o retiro de artefactos, la sustitución de fuentes de energía (incluidas las tecnologías solares), la inserción de nuevos artefactos que surjan en el mercado, los cambios en la eficiencia energética, entre muchos otros factores. El modelo desarrollado permite analizar y comparar la evolución temporal de la demanda energética desagregada y total del equipamiento edilicio mediante un análisis de sensibilidad, al generar distintos escenarios posibles a partir de la adopción de diversas medidas tecnológicas y de eficiencia energética. En efecto, este modelado detallado permite obtener resultados agregados con muy alta precisión, lo cual se convierte en un insumo clave para los tomadores de decisiones.

En el caso particular del presente trabajo, se modeló el parque de equipos de climatización para toda la ciudad de La Plata. Esto permitirá en futuras investigaciones ensayar diferentes estrategias de mejoramiento energético, con el objeto de identificar aquellas medidas que mayor incidencia presentan dentro de la demanda de energía residencial del caso de estudio.

Por su parte, este modelo puede ser replicado en un nivel de análisis inferior, como por ejemplo, en las diferentes áreas homogéneas que conforman la ciudad utilizada como caso de estudio. Esto permitiría direccionar medidas específicas para cada sector urbano, que se ajusten concretamente a la realidad del parque edilicio analizado. Asimismo, este modelo es posible de implementar en otros casos de estudio, lo cual habilita la réplica por parte de otros investigadores.

2. Metodología

El proceso de construcción de escenarios energéticos urbanos consta de tres etapas:

(i) En la primera se construye el “año base”, que releva y sistematiza variables energéticas,

sociodemográficas y el grado de consolidación urbana del sector residencial en el área de estudio. Luego, estas variables son utilizadas para encontrar sectores homogéneos utilizando un algoritmo de agrupamiento. Una vez identificados los sectores con características homogéneas, es posible tomar sus datos e ingresarlos al modelo sistémico. En el modelo sistémico se especifica, para cada variable, la fórmula para calcular su valor (y que suele depender del valor de otras variables) y los valores iniciales (de la situación base), los cuales permitirán, mediante la simulación, observar los valores de las diferentes variables a lo largo del tiempo.

(ii) Elaboración de escenarios alternativos. Esta etapa puede realizarse mediante la utilización de *software*, como LEAP¹, TRANUS² o Vensim³. En este trabajo se utilizó el *software* Vensim, que es de carácter más general (no es específico para escenarios energéticos), ya que permite estudiar modelos sistémicos y ensayar diferentes escenarios mediante análisis de sensibilidad. Así, se pueden simular escenarios “tendenciales” orientados a mejorar la situación del hábitat residencial, manteniendo las principales directrices observadas o incluyendo políticas que consideren estrategias y lineamientos de eficiencia energética, así como la implementación de energías no convencionales por vías de sustitución o complementación. Se pueden evaluar las mejoras y la reducción de demandas energéticas desagregadas y totales, minimizando sus consecuencias ambientales. Las diferentes medidas que aplicar se pueden analizar a corto, mediano y largo plazo.

(iii) Finalmente, se plantea la evaluación de los resultados y la comparación entre los distintos escenarios construidos, para luego obtener conclusiones a partir de la demanda y, en caso de ser necesario, reformular políticas existentes.

Se seleccionó la ciudad de La Plata como caso de estudio. Se utilizó información socio-demográfica (información censal)⁴ y energética (información de las distribuidoras y encuestas propias) para poder clasificar y agrupar radios censales con características homogéneas. La elección de la escala (fracción, radio censal, barrio, etc.) depende del grado de detalle de la información de base. Como se contaba con información de base a nivel de radio censal, esta fue la escala elegida para el caso de la ciudad de La Plata. Para realizar la clasificación se utilizó el método *K-Means*, donde cada radio censal estaba representado por las siguientes variables socio-demográficas y energéticas: promedio de personas por hogar [Personas/hogar], promedio de habitaciones por hogar [Habitaciones/

1. LEAP (planificación de alternativas energéticas). Stockholm Environment Institute. <https://www.energycommunity.org/default.asp?action=home>

2. TRANUS. Software desarrollado por Tomás de la Barra. <http://www.tranus.com/>

3. Vensim es un software de Ventana Systems. <https://vensim.com/>

4. INDEC. Censo Nacional 2010.

hogar], hogares con tipología de vivienda “casa” [%], densidad habitacional [hogares/ha.], consumo promedio de electricidad [kWh/año por usuario] y consumo promedio de gas natural [m³/año por usuario]. Una vez encontrados los radios censales con características similares, se obtuvieron las denominadas áreas homogéneas, a las cuales se les asoció información relacionada con el consumo energético desagregado obtenido de las encuestas individuales. Los valores que toman las variables del modelo sistémico son los totales según la escala geográfica elegida (ej.: área homogénea o la ciudad completa), y la interrelación entre las variables que describen los distintos tipos de fuentes, usos y artefactos es la que permite el desarrollo y la simulación del presente modelo sistémico.

La metodología utilizada para la construcción de escenarios es la dinámica de sistemas. Dicha metodología ha sido aplicada en numerosas disciplinas (ARACIL, 1983, p. 21; MARTÍNEZ *ET AL.*, 1986, p. 10; KHIAMI *ET AL.*, 2019, p. 1; PÓZNA *ET AL.*, 2019, p. 1; MOSHAGEN, 2019, p. 1; POURHASANZADE *ET AL.*, 2019, p. 1; KUANG *ET AL.*, 2018, p. 1; BIANCA *ET AL.*, 2018, p. 1; KIM *ET AL.*, 2019, p. 1; MA *ET AL.*, 2019, p. 1; ZHANG *ET AL.*, 2019, p. 1; IBRAHIM *ET AL.*, 2019, p. 1; BERNARDI *ET AL.*, 2019, p. 1; OSMAN *ET AL.*, 2017, p. 1; JELLOULI *ET AL.*, 2016, p. 1; KARDAN *ET AL.*, 2015, p. 1). La metodología de dinámica de sistemas señala que para desarrollar un modelo sistémico se debe seguir tres etapas (ARACIL *ET AL.*, 1997, p. 108):

- I. Etapa de conceptualización.
- II. Etapa de formulación del modelo.
- III. Etapa de evaluación del modelo.

I. Etapa de conceptualización

En la etapa de conceptualización, se trata de comprender bien el problema previamente a la búsqueda de posibles soluciones. En ocasiones, esta etapa incluye la búsqueda de bibliografía o la consulta a expertos para interiorizarse acerca del problema a resolver. Una vez comprendido este, el paso siguiente consiste en desarrollar un diagrama de influencias, que muestra las variables relevantes del problema y cómo se relacionan entre sí (se denota a una relación entre una variable A y una variable B con una flecha desde A hasta B, donde A sería la variable de origen y B la variable destino). Se dice que dos variables se relacionan positivamente cuando ocurre que una variable de origen aumenta su valor y esto provoca también un aumento en el valor de la variable destino (sin importar en qué proporción lo hace), o si se decrementa el valor de la variable

de origen, esto produce un decremento también en el valor de la variable de destino. Cuando esto ocurre se coloca un signo + (cerca de la variable destino) sobre la relación entre A y B. De manera similar, cuando A aumenta y B disminuye o si A disminuye y B aumenta se dice que A y B se relacionan negativamente. En este caso se coloca un signo (-) sobre la relación entre A y B. Como tercera opción, puede ocurrir que el cambio en el valor de la primera variable A produzca en la segunda variable B a veces un aumento y otras veces un decremento, advirtiéndose en este caso que se está en presencia de una relación que no es unívoca, y se la denota con +/- (ARACIL ET AL., 1997, p. 111). Un ejemplo de esta situación se observa cuando se tiene un número de lámparas encendidas en un local en función del tiempo. Conforme este transcurre, el número de lámparas encendidas puede aumentar en algunos momentos, permanecer estable en otros y por momentos disminuir.

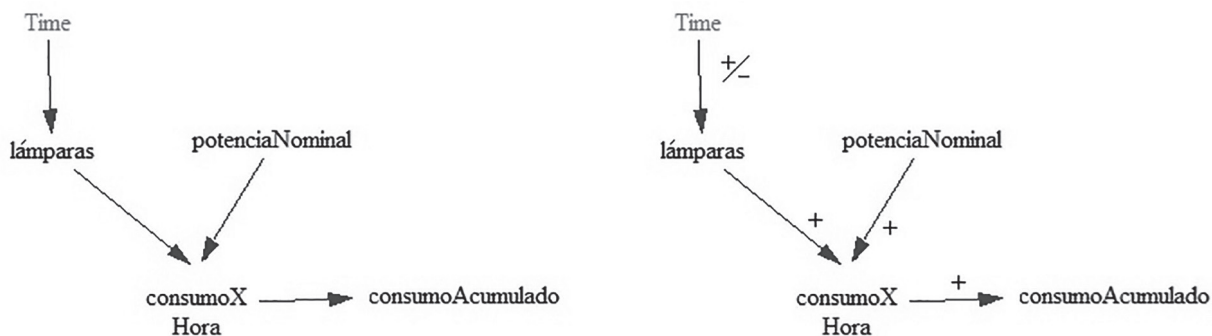


Figura 1. Modelo sistémico del consumo energético de un número de lámparas en un local (izquierda) y su diagrama de influencias (derecha)

II. Etapa de formulación del modelo

La etapa de formulación toma el diagrama de influencias generado en el paso anterior y lo convierte en un Diagrama de Forrester (o diagrama de stock y flujo), que incluye relaciones matemáticas entre variables.

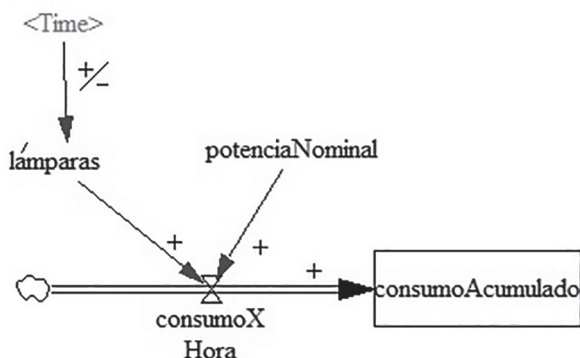


Figura 2. Diagrama de Forrester de lámparas en un local

No siempre es posible realizar la etapa de formulación, pues requiere especificar la relación matemática entre las distintas variables. Por consiguiente, no siempre se podrá llegar a la fase de evaluación, en la cual se simulan diferentes escenarios. No obstante, aun cuando solo se logre completar la primera fase, es posible observar la naturaleza fenomenológica que (según el modelo mental del autor) lleva a producir la situación planteada.

En el caso del ejemplo de las lámparas sí es factible establecer las fórmulas matemáticas que vinculan las distintas variables que forman parte del modelo. Una vez establecidas las fórmulas, es posible observar el comportamiento de cada variable en función del tiempo e identificar sobre cuál o cuáles variables se debería actuar (y cómo hacerlo) para obtener el máximo beneficio del sistema y/o reducir los perjuicios. En el ejemplo de las lámparas, las fórmulas matemáticas asociadas a cada variable son las siguientes:

Tiempo: es una variable exógena y asocia valores a los distintos instantes que se están simulando. Así, se puede configurar esta variable para que tome valores de 0 a 24, si se

desea estudiar el comportamiento de un sistema a lo largo de un día.

Lámparas: es una variable auxiliar (discreta) en función del tiempo; es decir, permite establecer el número de lámparas encendidas en cada hora del día.

Potencia nominal: es la potencia nominal de cada lámpara. Para este ejemplo se estableció un valor de 100 W para facilitar los cálculos, pero, en términos reales, deberían ser 12 W o valores próximos a esta cifra.

Consumo por hora: es una variable de flujo. Las variables de flujo expresan una magnitud en función del tiempo (ej.: mm/hora, kWh). El consumo por hora (en un instante t) resulta del producto entre el número de lámparas encendidas (en el instante t) y la potencia nominal de cada una. Su fórmula es la siguiente:

Consumo por hora $_t$ = Lámparas $_t$ x Potencial nominal $_t$

Consumo acumulado: es una variable de *stock*. Expresa, para cada instante, el valor acumulado de alguna variable (de la variable consumo por hora, en el caso del ejemplo).

III. Etapa de evaluación del modelo

En esta etapa se procede a probar a través de diversas corridas (simulaciones) las hipótesis y la consistencia entre ellas. Una herramienta muy útil en esta etapa es el análisis de sensibilidad, que permite verificar cómo responde el sistema ante cambios en alguna de las variables. Si se usa el *software* Vensim, se puede ver que la potencia nominal tiene una barra horizontal con un valor por defecto. Si se mueve esta barra hacia algún costado (disminuirá o aumentará el valor de la variable), se observa el efecto que produce dicho cambio sobre el resto de las variables del sistema (y a lo largo del tiempo). El análisis de sensibilidad se puede realizar, una vez llevada a cabo la simulación, sobre variables cuyos valores no son calculados de manera determinística (por ej.: la variable potencia nominal, que no depende del valor de otras variables); en cambio, la variable *consumo acumulado* depende de la variable *consumo por hora* y, por lo tanto, su valor es el resultado de los efectos sistémicos de otras variables que la anteceden.

Una vez que se revisó la consistencia de las hipótesis y se efectuó el análisis de sensibilidad, y considerando que ambos se ajusten bien a la realidad, se evalúa cómo responde el modelo ante distintos escenarios (políticas) posibles con el objeto de servir a

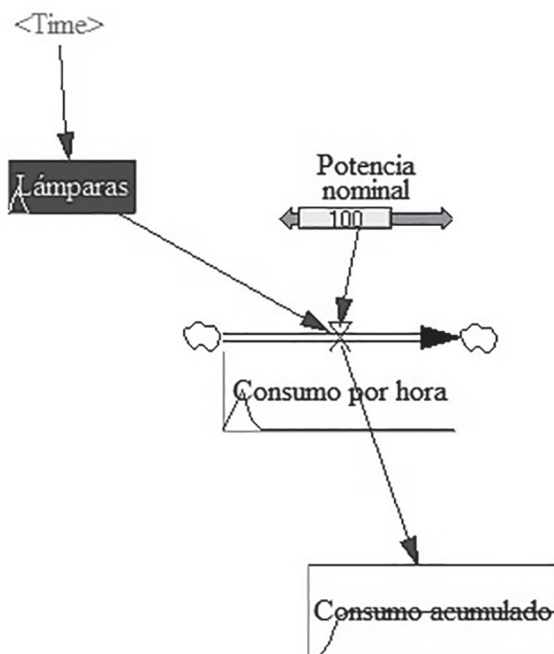


Figura 3. Simulación del modelo sistémico

la toma de decisiones sobre las acciones que tomar sobre el sistema real. La simulación del sistema permite observar el comportamiento de las variables en función del tiempo en forma gráfica y tabular. Se pueden observar en la figura 4 las salidas gráficas para cada variable del sistema, excepto la variable tiempo, que lo único que hace es tomar secuencialmente valores enteros en el intervalo [0, 24].

La figura 4 muestra que el número de lámparas encendidas por hora es un par (número de hora, cantidad de lámparas encendidas). Así, se observa que se encienden dos lámparas luego de transcurrida una hora; en la hora siguiente el número de lámparas encendidas

Modelo sistémico para el análisis de escenarios de consumo energético residencial

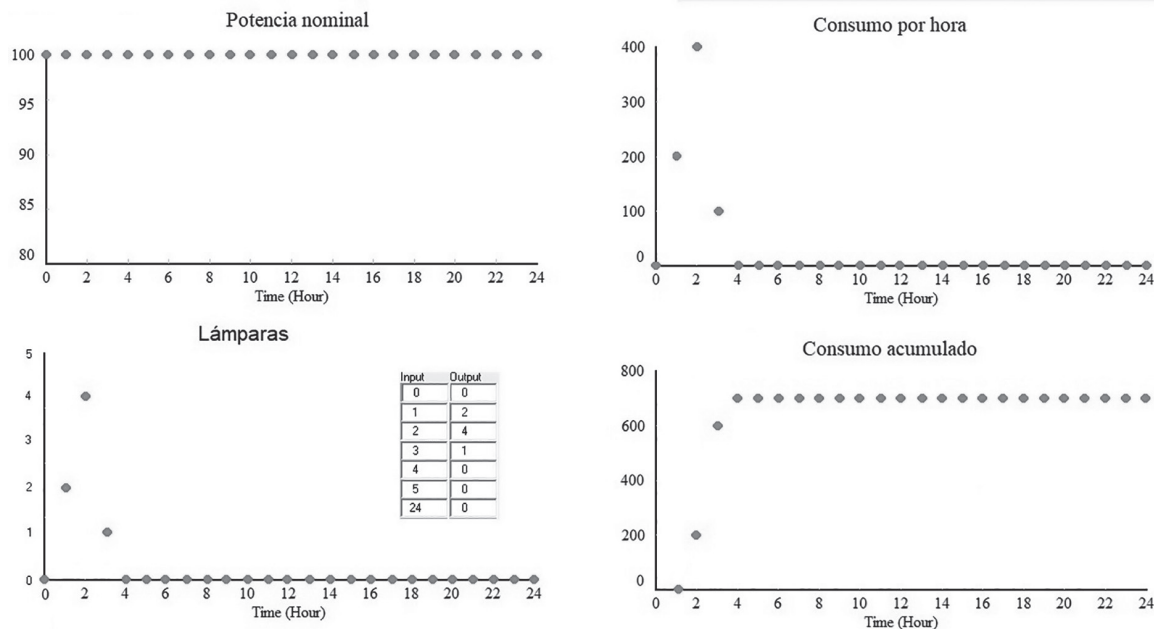


Figura 4. Evolución de las variables del sistema en función del tiempo

asciende a cuatro, para luego descender a una, en la hora siguiente. Asumiendo una potencia nominal de 100W, la variable “Consumo acumulado” permite observar cómo se va incrementando el consumo en función del tiempo hasta llegar a los 700 Wh.

3. Aplicación de la metodología de dinámica de sistemas al estudio de escenarios energéticos urbanos

En este trabajo se creó un modelo sistémico para el análisis y simulación de escenarios energéticos urbanos relacionados con el consumo de energía por climatización. La metodología utilizada fue la dinámica de sistemas. Para el estudio de los consumos

en climatización, las variables involucradas (1186 variables interrelacionadas) están agrupadas en cinco bloques, los cuales se muestran de manera figurativa para poder observar su complejidad (figura 5). Con el fin de comprender las diferentes partes del modelo sistémico, se adoptará una estrategia *top-down*, comenzando por explicar cada uno de los diferentes bloques para luego brindar una explicación más detallada de cada uno. Luego, se utilizará una estrategia *bottom-up* para describir cómo la interacción entre los distintos bloques es la que permite el funcionamiento del sistema completo.

El **bloque A** agrupa las variables relacionadas con los aires acondicionados frío/calor. Las variables relevantes de este bloque son: potencia nominal (ej.: 2200, 3000, 4500, 6000 Fg./h), etiquetado para calor (A+, A, B o C), etiquetado para frío, consumo por día, consumo acumulado (diario o anual), promedio de equipos por hogar, número de hogares. El promedio de artefactos, al igual que el número de hogares, se considera por cada tipo de aire acondicionado (2200, 3000, 4500 o 6000 Fg./h).

El **bloque B** agrupa las variables relacionadas con los aires acondicionados (solo frío). Se diferencia del bloque anterior en que sus variables hacen referencia a parámetros de refrigeración solamente (no a calefacción), y por ello se reduce el número de variables significativamente.

El **bloque D** agrupa otros equipos de climatización (refrigeración + calefacción), entre los que se encuentran ventiladores, estufas eléctricas, estufas a kerosene, entre otros. Algunos de ellos utilizan fuentes de energía distintas del gas natural y la electricidad (ej.: leña, kerosene, GLP, etc.).

El **bloque E** modeliza las posibles medidas de ahorro de energía (ahorro en términos de refrigeración y calefacción): mejora de la eficiencia energética de la envolvente, calefacción por invernaderos, por muros acumuladores de calor, por ganancia solar directa o por colectores solares de aire.

El **bloque C** reúne variables relacionadas con la energía requerida tanto para refrigeración como para calefacción y el potencial de ahorro aplicando medidas (según la unidad de tiempo especificada: hora o día). Asimismo, en este bloque están presentes variables relacionadas con los consumos acumulados (diarios o anuales) por calefacción, refrigeración y por la aplicación de medidas.

Modelo sistémico para el análisis de escenarios de consumo energético residencial

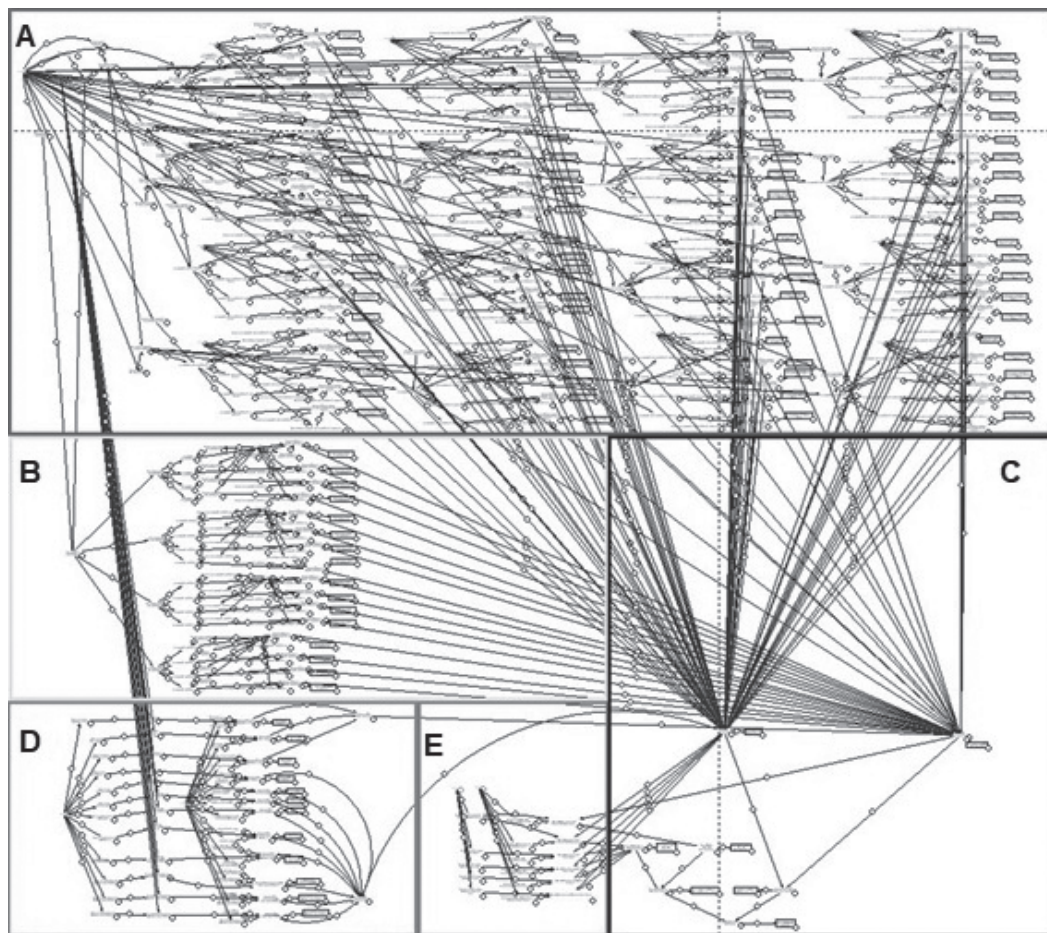


Figura 5. Modelo sistémico figurativo que muestra la complejidad de la estructura del consumo energético residencial

A Calefacción/refrigeración por aire acond. frío-calor **B** Refrigeración por aire acond. frío **C** Totales de consumo por refrigeración, por calefacción y por medidas de ahorro.
D Climatización por otros equipos **E** Medidas de ahorro

Siguiendo una estrategia *top-down* se analizará, a continuación, cada uno de los bloques con más detalle.

El **bloque A** está compuesto por dieciséis partes similares, como se observa en la figura 6. En dicha figura se modeliza el consumo energético de los aires acondicionados frío-calor de 2200 frigorías (y sus correspondientes calorías) con nivel de etiquetado A+ para frío y sus cuatro variantes para calor: A+, A, B y C. Si bien existen otros etiquetados, en este modelo se trabajó con los más significativos, según el trabajo de CHÉVEZ *ET AL.* (2017). Las dieciséis combinaciones se forman porque son cuatro las variantes analizadas en cuanto a frigorías: 2200, 3000, 4500 y 6000, y, por cada una de ellas, el etiquetado para frío puede ser: A+, A, B y C.

Para calcular el resultado del consumo diario, cuando se utilizan los equipos en modo refrigeración, los consumos de cada equipo se conectan con la variable que totaliza los

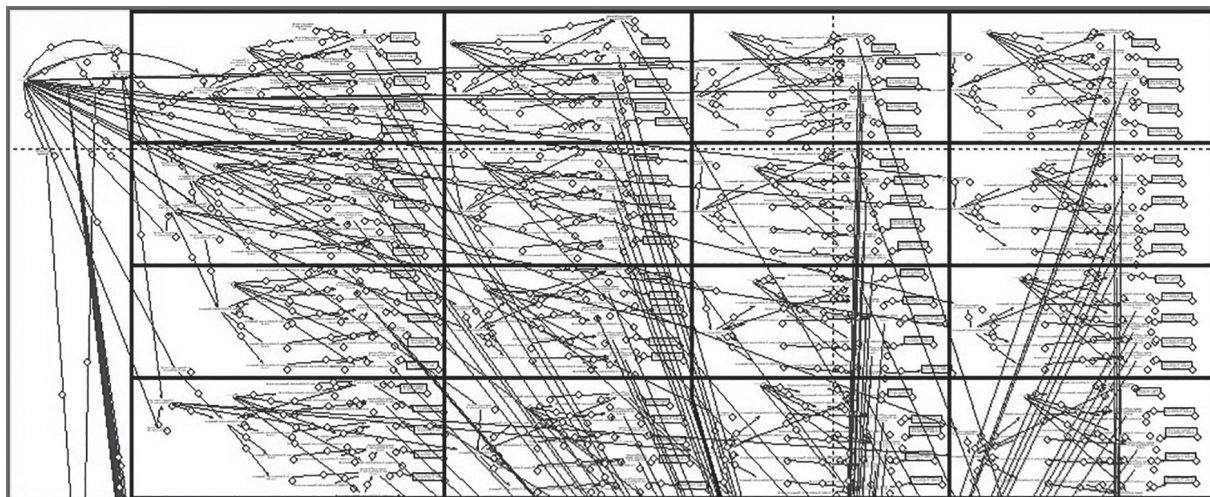


Figura 6. Las dieciséis partes remarcadas en negro que componen el bloque A describen los aires acondicionados de 2200, 3000, 4500 y 6000 frigorías, cada una, con sus posibles etiquetados para frío: A+, A, B o C

Modelo sistémico para el análisis de escenarios de consumo energético residencial

consumos de todos los equipos de refrigeración y le “pasan” su contribución, a los efectos de que esta última variable pueda registrar la suma de todos ellos. De manera similar, cuando se usan equipos en modo calefacción, los consumos diarios (correspondientes a las cuatro categorías de etiquetado para calefacción) se conectan (e informan su consumo por unidad de tiempo) a la variable que totaliza los consumos de todos los equipos que se usan para calefaccionar. Adicionalmente, para cada tipo de equipamiento los consumos diarios, tanto para calefacción como para refrigeración, se acumulan desagregadamente en variables de *stock* para poder observar su evolución al cabo del período simulado (día o año).

El consumo de un determinado artefacto viene dado por el número de hogares que cuentan con él, el número de ellos promedio por hogar, las horas promedio de uso y la potencia nominal. Se muestra en la figura 7, a modo de ejemplo, el consumo de los aires acondicionados frío/calor de 2200 frigorías con etiquetado A+ para modo frío. A la derecha de esta parte del modelo se observan tres sectores con características similares que representan los equipos con igual consumo en cuanto a frigorías (2200), pero con diferentes niveles de etiquetado A, B y C para frío. Análogamente, hacia abajo se extiende el modelo que representa el consumo de aires acondicionados frío/calor de 3000, 4500 y 6000 frigorías (cada uno con sus cuatro posibles etiquetados para frío). De allí que, en la figura 6, aparezcan dieciséis partes que se calculan de forma similar y forman parte del

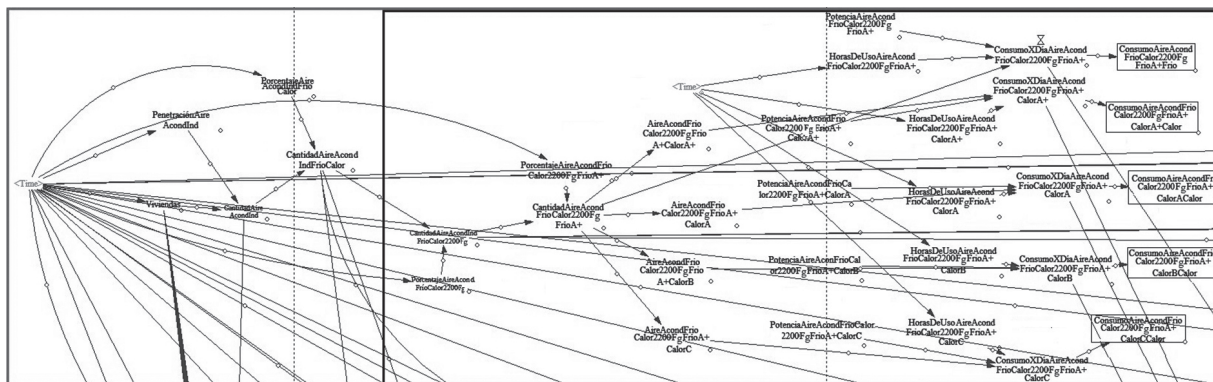


Figura 7. Una de las dieciséis partes que componen el bloque A: correspondiente al cálculo del consumo de los aires acondicionados frío calor de 2200 fg./h por tipo de etiquetado (A+, A, B o C) para calefacción y etiquetado A+ para frío (recuadro interior negro)

bloque A. Es decir, en las filas se agrupan los equipos según frigorías. La fila superior corresponde a equipos de 2200 frigorías; la siguiente hacia abajo representa los de 3000; la que le sigue, los de 4500 y la fila inferior, los de 6000 frigorías. Considerando una fila cualquiera, de izquierda a derecha, se representan los distintos niveles de etiquetado comenzando con A+, luego A, después B y por último el C.

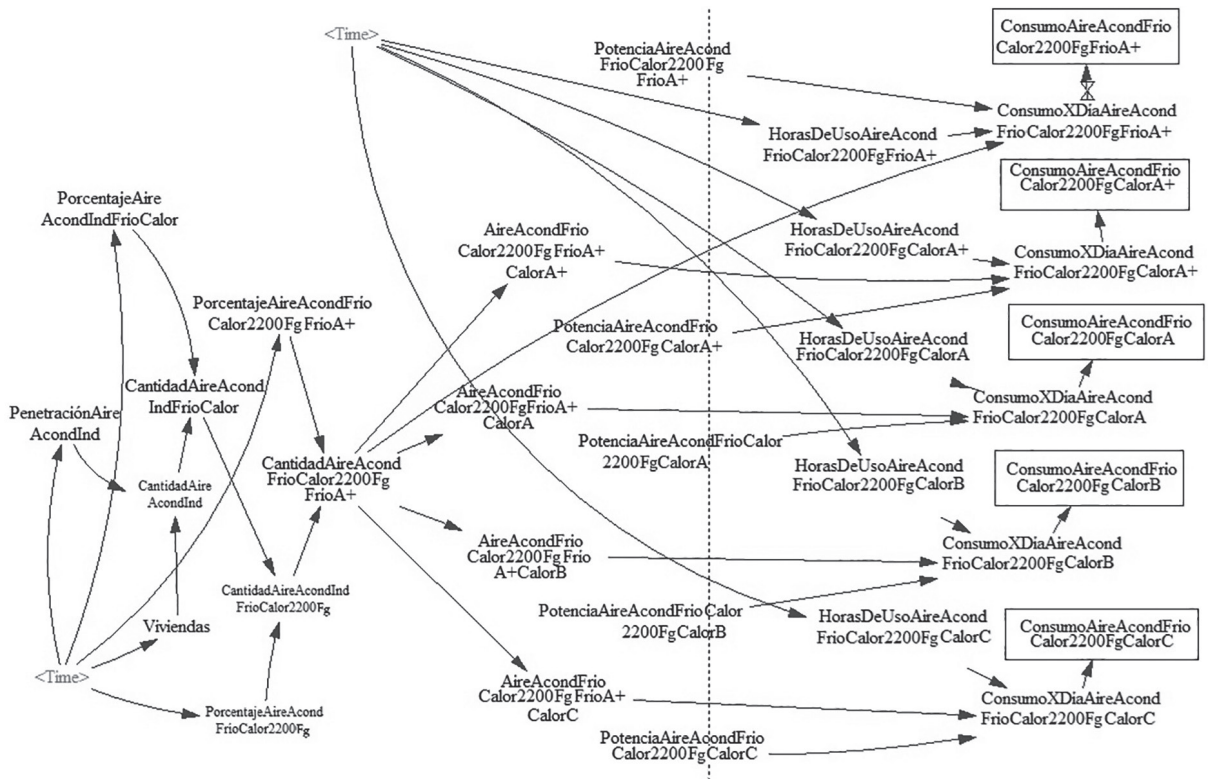
En la figura 7, el sector izquierdo que se encuentra afuera del recuadro es común a cada una de las dieciséis partes (recuadros de la figura 6) que componen el bloque A. Se puede apreciar con mayor nivel de detalle, en la figura 8, el consumo energético de los aires acondicionados frío-calor de 2200 frigorías con etiquetado A+ para frío y sus cuatro posibles etiquetados para calor: A+, A, B y C.

El sector del modelo correspondiente al **bloque B** es similar al anterior, y considera los equipos de aire acondicionado solo en modo frío. Por lo tanto, en este caso, los cálculos correspondientes al consumo de los equipos se calculan en función de la cantidad de equipos, sus potencias nominales (según la categoría de etiquetado) y las horas de uso.

El sector del modelo señalado como **bloque D** modeliza el consumo de energía por otros equipos de climatización (figura 9). El consumo de cada uno de ellos se calcula de forma similar. Por ejemplo, en el caso del consumo de las estufas a kerosene, el cálculo se inicia con el número de hogares que cuentan con estos equipos y el grado de penetración (o promedio de equipos por hogar). Luego, se evalúa el consumo a través del producto entre el número de hogares que cuentan con estos equipos y la cantidad de litros promedio (por unidad de tiempo) que utilizan.

La variable que señala el consumo de todos los equipos de un mismo tipo (ej.: consumo de todas las estufas a kerosene) usados para calefaccionar se calcula por cada unidad de tiempo transcurrida, y sus valores se pasan a una variable de *stock* asociada para que vaya acumulando los consumos a lo largo del período observado y se pasan también, simultáneamente, a una variable que totaliza los consumos producidos por todos los equipamientos para calefaccionar. Esta última variable pertenece al bloque C, pues es allí donde están las variables que calculan los consumos totales por unidad de tiempo y sus correspondientes consumos acumulados. Para el caso de los equipos utilizados para refrigeración, se sigue la misma lógica que la explicada para los equipos utilizados para calefacción.

Modelo sistémico para el análisis de escenarios de consumo energético residencial



A los efectos de unificar las unidades de energía de los distintos artefactos, se realizaron las conversiones necesarias para calcular, en kWh, los subtotales de consumo por calefacción y por refrigeración.

El sector del modelo identificado como **bloque E** modeliza las mejoras que pueden aplicarse a las viviendas para lograr reducir el consumo energético a partir de las diferentes medidas de eficiencia a implementar, cualquiera sea su nivel de intervención en el universo de viviendas. El ahorro se calcula teniendo en cuenta el número de viviendas, el porcentaje de viviendas que implementarían la medida y el porcentaje del

Figura 8. Parte del modelo que simula el consumo energético de los aires acondicionados frío-calor de 2200 frigorías, con etiquetado A+ para frío y sus cuatro posibles variantes para calor: A+, A, B y C

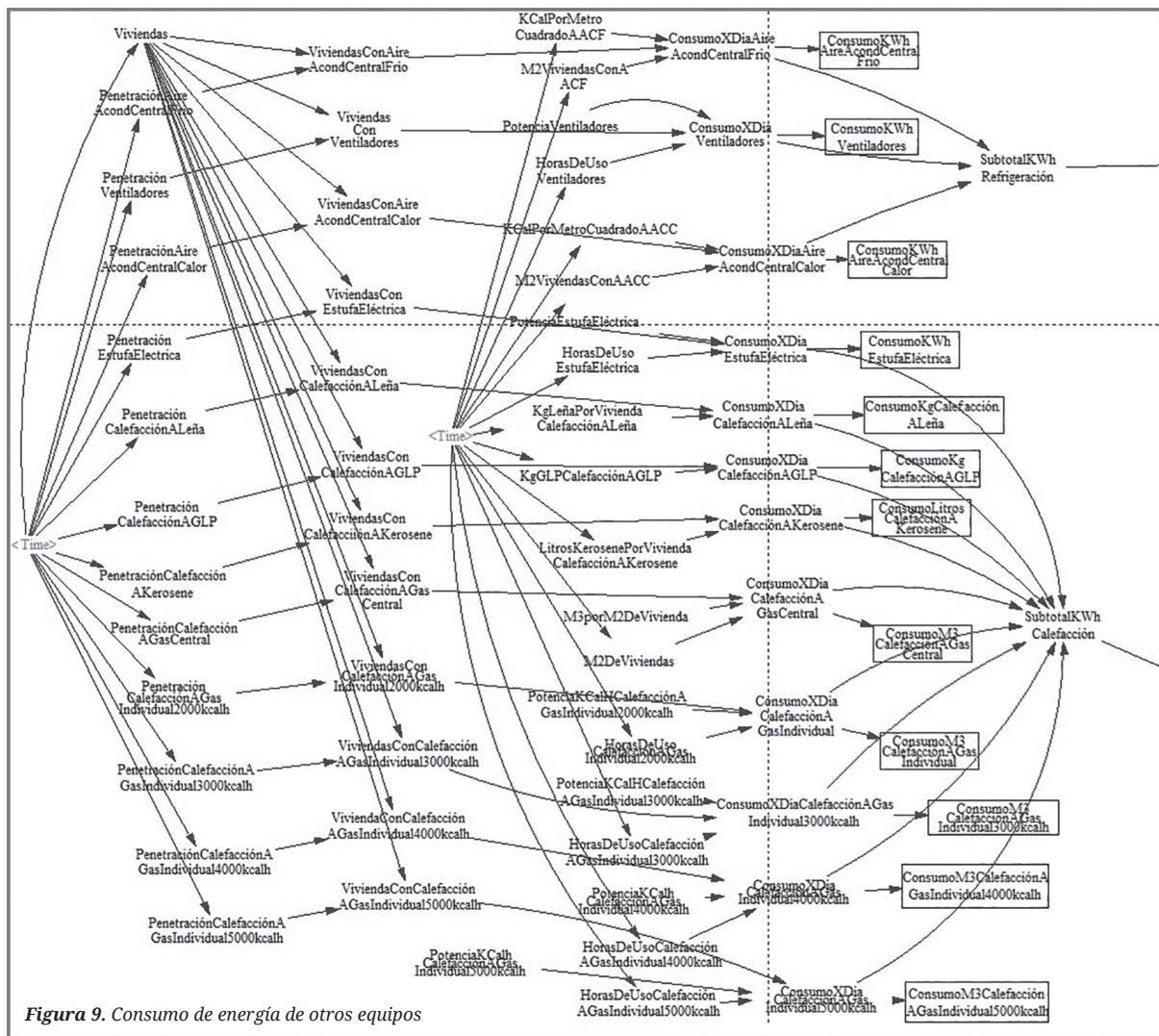


Figura 9. Consumo de energía de otros equipos

Modelo sistémico para el análisis de escenarios de consumo energético residencial

ahorro que produce tal medida. Así, por ejemplo, si el número de viviendas fuese 1000 y solo el 5 % de ellas adoptaran una medida que ahorra un 4 % de energía consumida, el ahorro sería $1000 \times 5/100 \times 4/100 = 2$ unidades de energía. Estas dos unidades se sumarán, junto con los resultados obtenidos con las otras medidas de ahorro, para formar el total de ahorro por calefacción o refrigeración, según corresponda. Como se puede apreciar en la figura 10, todas las medidas de mejoramiento producen ahorros en términos de calefacción, pero solo las mejoras de la envolvente producen también ahorros en refrigeración.

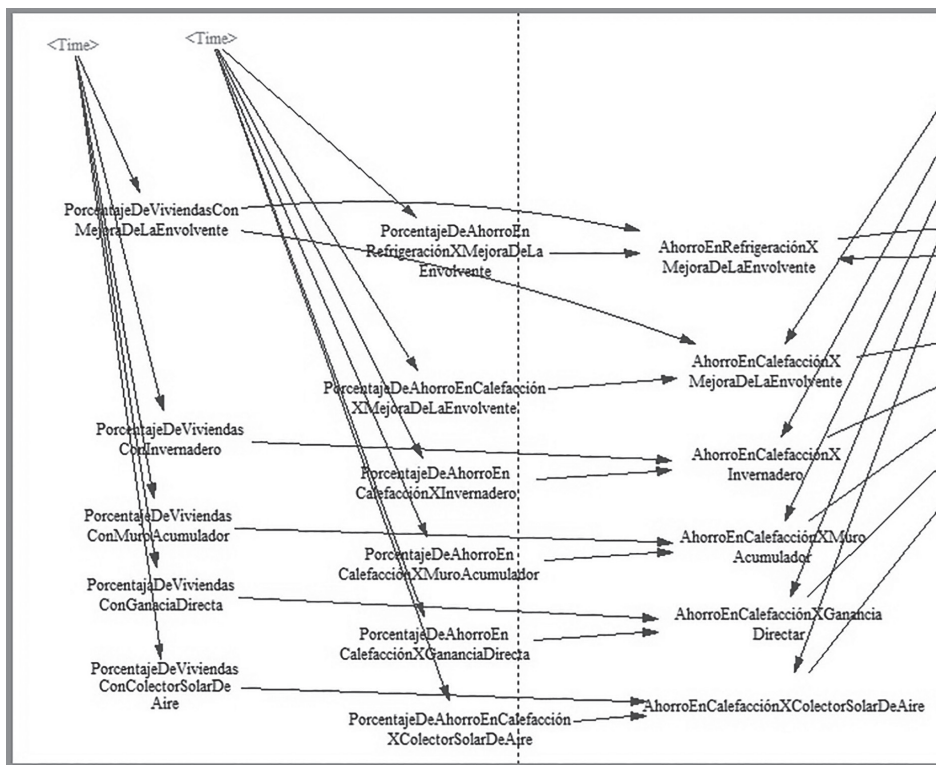


Figura 10. El bloque E muestra las posibles medidas para ahorrar energía en climatización

El sector identificado como **bloque C** modeliza los totales de consumo para las diferentes intervenciones. Por ejemplo, el total de consumo por climatización incluye la sumatoria de los consumos por refrigeración y por calefacción. Todas las variables que totalizan los consumos, sean tendenciales o por medidas de ahorro, se expresan en kWh y son variables en función del tiempo. Cada una de ellas tiene asociada su correspondiente variable de *stock* que acumula los valores de consumo a lo largo de todo el período simulado (ej.: día o año). Se puede observar también, a partir del gráfico de la figura 11, que el total de kWh de ahorro en climatización incluye los ahorros en términos de refrigeración y de calefacción (pues es la suma de ambos) y que, a su vez, estos dependen de las medidas que los afectan. Así, el total de ahorro en calefacción se produce por el ahorro a partir de las medidas de mejora de la envolvente y por la sustitución de fuentes tradicionales por renovables (calefacción por invernaderos, muros acumuladores, ganancia directa y colectores solares de aire). El consumo desagregado de las fuentes principales de energía de los distintos equipos (gas y electricidad) depende de la eficiencia de estos, que está reflejada en los niveles de etiquetado de eficiencia energética para cada tipo de combustible que utilizar. En el caso de aquellos equipos que requieren otras fuentes de energía distintas de las mencionadas (ej.: kg, en el caso de leña), el modelo considera desagregadamente sus unidades de consumo energético convertidas a kWh. Por otra parte, el ahorro en refrigeración es afectado solo por el ahorro por mejora de la envolvente y la eficiencia del equipamiento (etiquetado energético). En cuanto a la mejora de las envolventes, estas se consideran como insumos y se deben calcular previamente (transmitancia térmica de muros, techos y ventanas). Los niveles de mejora observados forman parte de la entrada del modelo. Con respecto a estos fenómenos, si bien no se relacionan en forma lineal, las evaluaciones previas permiten considerarlos de manera desagregada o integral (balances térmicos dinámicos y estacionarios), a los efectos de ser incorporados al modelo según la dimensión temporal que se esté evaluando.

En la figura 12 se puede apreciar cómo se interrelacionan los bloques E y C.

En síntesis, el modelo consta de cinco bloques:

- El bloque A, que agrupa las variables relacionadas con los aires acondicionados frío/calor. En cuanto a medidas vinculadas con los modos de uso, estas se representan en el bloque A, puesto que es allí donde se especifican, por ejemplo, las horas en que se encuentran encendidos los equipos y la cantidad de estos.

Modelo sistémico para el análisis de escenarios de consumo energético residencial

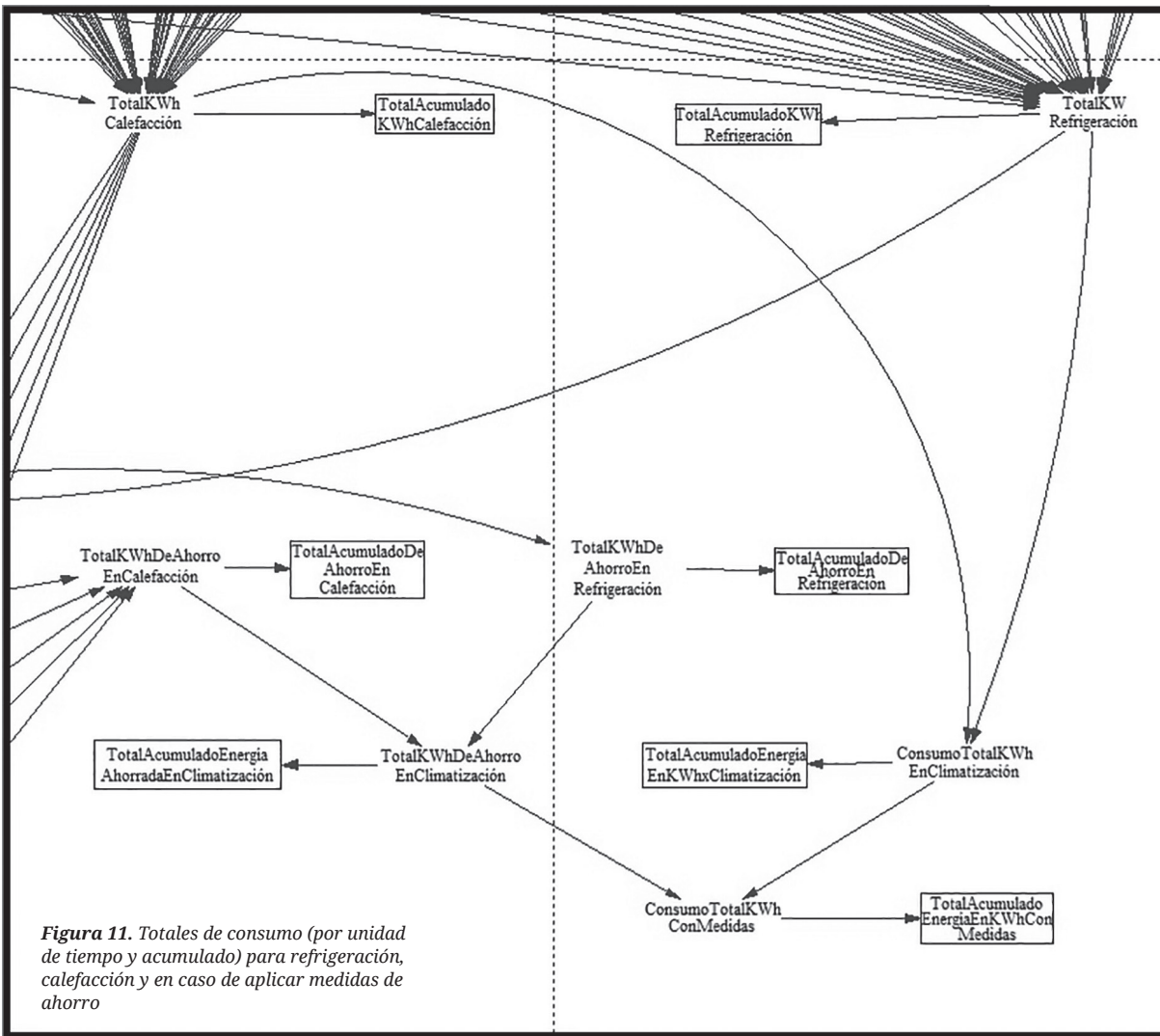


Figura 11. Totales de consumo (por unidad de tiempo y acumulado) para refrigeración, calefacción y en caso de aplicar medidas de ahorro

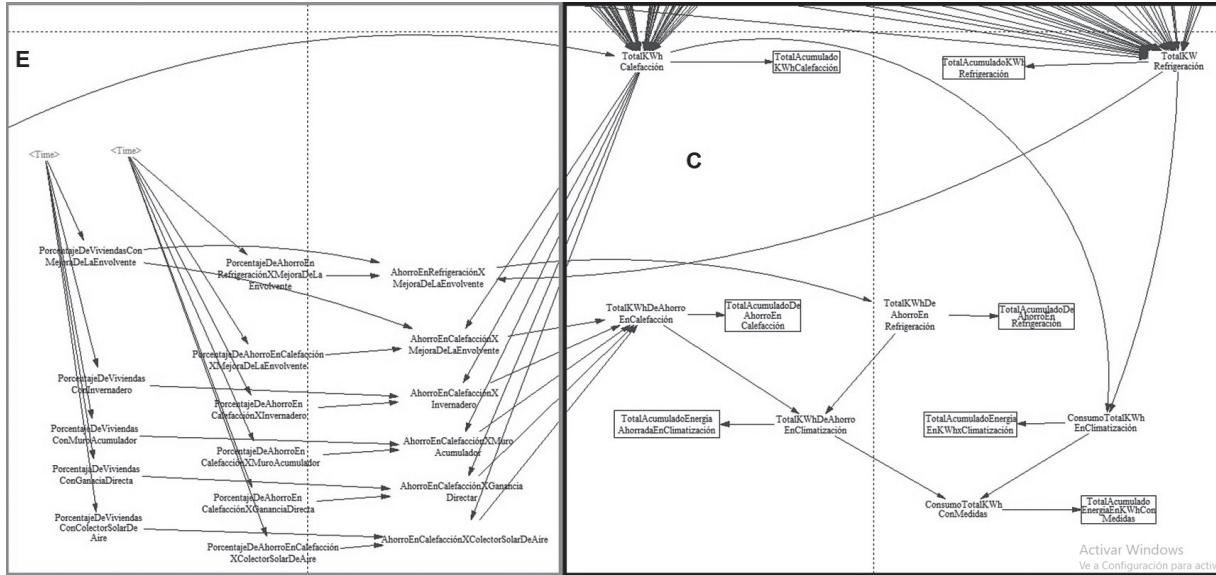


Figura 12. El bloque E modeliza las posibles medidas para ahorrar energía y el bloque C calcula los totales de consumo (diario y acumulado): por refrigeración, por calefacción y aplicando medidas de ahorro

- El bloque B, que agrupa las variables relacionadas con los aires acondicionados (solo frío).
 - El bloque D, que agrupa otros equipos de climatización (refrigeración + calefacción), entre los que se encuentran ventiladores, estufas eléctricas, estufas a kerosene, entre otros.
- Estos tres bloques (A, B y D) representan los consumos de energía para refrigeración o calefacción de los distintos equipamientos en el sector residencial.
- El bloque E, por su parte, modeliza las posibles medidas de ahorro de energía (ya sea en términos de refrigeración como en calefacción) que pueden aplicarse al consumo de energía que producen los tres bloques anteriores.
 - El bloque C integra las variables desagregadas relacionadas con la energía requerida tanto para refrigeración como para calefacción y el potencial de ahorro aplicando medidas (según la unidad de tiempo especificada: hora o día). También en este bloque están presentes variables relacionadas con los consumos acumulados (diarios o anuales) por calefacción, refrigeración y por la aplicación de medidas de eficiencia.

4. Resultados y conclusiones

El principal aporte de la investigación realizada y aquí expuesta es la aplicación de la metodología de dinámica de sistemas y el *software* utilizado a tal efecto, que permiten resolver problemas que se presentan en diversas disciplinas y que, en este caso, se aplicaron al estudio del consumo energético del hábitat construido. El *software* utilizado para desarrollar el modelo no es específico para la temática, a diferencia de otros programas como LEAP, pero su potencial se aprecia en el caso de requerir estudios detallados y desagregados. Si bien es posible resolver problemas de diferente tipo, presenta desventajas con respecto a programas específicos de simulación de escenarios energéticos a gran escala. Las principales desventajas que se observan tienen que ver con la exhaustiva carga de datos para cada una de las variables (no es posible copiar valores a otras variables con el método arrastrar y soltar). Además, el modelo tiene que tener cargadas todas las fórmulas matemáticas que relacionan las distintas variables para poder funcionar. Es decir, no es posible simular un subsistema. Cuando se desea probar una parte del sistema se requiere “poner en cero” las variables cuyo comportamiento no interesa, para luego observar los resultados de las variables restantes. En síntesis, el modelo desarrollado requiere una instrumentación minuciosa, pero en definitiva presenta una propuesta superadora en cuanto a que permite establecer hipótesis desagregadas de trabajo y tener una alta sensibilidad en sus salidas parciales y totales.

En cuanto a los aspectos positivos del modelo desarrollado, se puede afirmar que permite evaluar diferentes escenarios de consumo energético, observar demandas desagregadas y totales y realizar un análisis de sensibilidad. Por lo tanto, es posible, por ejemplo, analizar los impactos sobre el hábitat a partir de evaluar medidas como la sustitución de fuentes energéticas y/o equipos por otros más eficientes, cambios en los modos de uso, aplicación de medidas de ahorro, e incluso cambios de hábitos, dado que cada variable se encuentra explícitamente expresada y con posibilidades de ser modificada.

Considerando que los escenarios surgen a partir de hipótesis sobre posibles cambios en la trayectoria seguida por alguna de las variables, el modelo es una herramienta valiosa que puede ser utilizada para la simulación de diferentes escenarios energéticos que requieran un nivel importante de desagregación y sensibilidad en su estructura de cálculo. Además, permite trabajar con diferentes escalas temporales (ej.: día, año) y datos pertenecientes a diferentes escalas geográficas (ej.: vivienda, barrio, ciudad).

El desarrollo y aplicación de herramientas como la explicada en este trabajo resultan esenciales para la planificación de políticas de eficiencia energética de ciudades que estén en condiciones de provocar un cambio en materia de consumo energético, a los efectos de evaluar estrategias energéticas alternativas de eficiencia, así como sus consecuencias en la calidad de vida de los habitantes.

Agradecimientos

La presente investigación viene siendo desarrollada y financiada en el marco de los siguientes proyectos:

- PICT 2017-1295: “El consumo energético residencial y del transporte: un análisis integrado a escala urbano-territorial” (proyectos de investigación científica y tecnológica con fondos provenientes del FONCYT (Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica)).

- CONICET PIP 11220170100185CO: “Construcción de escenarios energéticos alternativos de desarrollo urbano: implementación de un modelo de simulación integral orientado al uso eficiente de la energía y sustitución de fuentes por renovables” (proyecto de investigación con fondos provenientes del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. CONICET).

- UNLP 11/U170: “Modelo de simulación integral del consumo energético residencial en el marco de escenarios de desarrollo urbano” (proyecto de investigación con fondos provenientes de la Universidad Nacional de La Plata).

Referencias bibliográficas

Abdurafikov, R.; Grahn, E.; Kannari, L.; Ypyä, J.; Kaukonen, S.; Heimonen, I. & Paiho, S. (2017). An analysis of heating energy scenarios of a Finnish case district. *Sustainable Cities and Society*. Vol. 32, 56-66.

Aracil, J. (1983). *Introducción a la dinámica de sistemas*. Alianza.

Aracil, J. y Gordillo, F. (1997). *Dinámica de sistemas*. Alianza.

Barbero, D. A. & Discoli, C. A. (2012). Framework for monitoring indices and indicators in architecture and urban planning. *12th International Conference on Design & Decision Support Systems in Architecture and Urban Planning*. Eindhoven, Países Bajos.

- Barbero, D. A.; Discoli, C. A.; Martini, I. & Ferreyro, C.** (2018d). Sistema de soporte para la toma de decisiones en el ámbito urbano y regional. *Estudios del Hábitat*. Vol. 16. Nro. 1.
- Barbero, D. A.; Martini, I. & Discoli, C. A.** (2015). Monitoreo de sistemas urbanos a través de índices e indicadores orientados a la planificación. *Avances en energías renovables y medio ambiente*. Vol. 35. 1-6.
- Bernardi, S.; Mahulea, C. & Albareda, J.** (2019). Toward a decision support system for the clinical pathways assessment. *Discrete Event Dynamic Systems: Theory and applications*. Vol 29, 91-125.
- Carlo, B. & Mogno, C.** (2018). Modelling pedestrian dynamics into a metro station by thermostatted kinetic theory methods. *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems*. 24: 2, 207-235.
- Chévez, P. J.; Barbero, D. A.; Martini, I. & Discoli, C. A.** (2017). Application of the k-means clustering method for the detection and analysis of areas of homogeneous residential electricity consumption at the Great La Plata region, Buenos Aires, Argentina. *Sustainable Cities and Society*. Montreal: Elsevier. Vol. 32, 115-129.
- Chévez, P. J.; Martini, I. & Discoli, C. A.** (2019a). Methodology developed for the construction of an urban-energy diagnosis aimed to assess alternative scenarios: An intra-urban approach to foster cities' sustainability. *Applied Energy*. Vol. 237, 751-778.
- Chévez, P. J.; Martini, I. & Discoli, C. A.** (2019b). Desarrollo metodológico para la construcción de escenarios urbano-energéticos de largo plazo. *Cuaderno Urbano*. Vol. 26, 69- 107.
- Chévez, P. J.; Martini, I. & Discoli, C. A.** (2021). Construcción de escenarios urbano-energéticos “tendenciales” en ciudades intermedias. La ciudad de la Plata como caso de estudio - Buenos Aires, Argentina - (2015-2040). *Lurralde: Investigación y espacio*. Vol. 44. pág. 123-162.
- Drouilles, J.; Lufkin, S. & Rey, E.** (2017). Energy transition potential in peri-urban dwellings: Assessment of theoretical scenarios in the Swiss context. *Energy and Buildings*. Vol. 148, 379-390.
- Energy Innovation LLC** (2021). Energy Policy Simulator Documentation. <https://us.energypolicy.solutions/docs/>
- Garrido-Soriano, N.; Rosas-Casals, M.; Ivancic, A. & Álvarez-Del Castillo, M. D.** (2012).

- Potential energy savings and economic impact of residential buildings under national and regional efficiency scenarios. A Catalan case study. *Energy and Buildings*. Vol. 49, 119-125.
- Ghiassi, N. & Mahdavi, A.** (2017). Reductive bottom-up urban energy computing supported by multivariate cluster analysis. *Energy and Building*. Vol. 144, 372-386.
- Girardin, L.; Marechal, F.; Dubuis, M.; Calame-Darbellay, M. & Favrat, D.** (2012). EnerGis: A geographical information based system for the evaluation of integrated energy conversion systems in urban areas. *Energy*. Vol. 35, Issue 2, 830-840.
- Howard, B.; Parshall, L.; Thompson, J.; Hammer, S.; Dickinson, J. & Modi, V.** (2012). Spatial distribution of urban building energy consumption by end use. *Energy and Buildings*. Vol. 45, 141-151.
- Ibrahim, M. & Reveliotis, S.** (2019). Throughput maximization of complex resource allocation systems through timed-continuous-Petri-net modeling. *Discrete Event Dynamic Systems: Theory and applications*. Vol. 29. Issue 3, 393-409.
- Jellouli, O.; Bernoussi, A.; Mâatouk, M. & Amharref, M.** (2016). Forest fire modelling using cellular automata: application to the watershed Oued Laou (Morocco). *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems*. Volume 22. Issue 5, 493-507.
- Kardan, A. A. & Sadeghi, H.** (2015). An efficacious dynamic mathematical modelling approach for creation of best collaborative groups. *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems*. Volume 22. Issue 1, 39-53.
- Khatib, T.; Monacchi, A.; Elmenreich, W.; Egarter, D.; D'alessandro, S. & Tonello, A.** (2014). European end-user's level of energy consumption and attitude toward smart homes: a case study of residential sectors in Austria and Italy. *Energy Technology & Policy*. Vol. 1, Issue 1, 97-105.
- Khiavi, S. A.; Khaloozadeh, H. & Soltanian, F.** (2019). Nonlinear modeling and performance analysis of a closed-loop supply chain in the presence of stochastic noise. *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems*. 25: 5, 499-521.
- Kim, H. & Kim, G.** (2019). Premium and benefit levels in the public pension system: A martingale approach. *Dynamic Systems and Applications*. 28, No. 3, 561-572.
- Kuang, Y.; Ben-Arieh, D.; Chih-Hang, W. & Zhao, S.** (2018) Using spatial games to model

- dynamic evolutionary systems. *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems*. 24: 3, 296-313.
- Kwon, P. S. & Østergaard, P.** (2014). Assessment and evaluation of flexible demand in a Danish future energy scenario. *Applied Energy*. Vol. 134, 309-320.
- Liu, X.; Ma, S.; Tian, J.; Jia, N. & Li, G.** (2015). A system dynamics approach to scenario analysis for urban passenger transport energy consumption and CO₂ emissions: A case study of Beijing. *Energy Policy*. Vol. 85. 253-270.
- Liu, X.; Ma, S.; Tian, J.; Jia, N. & Li, G.** (2015). A system dynamics approach to scenario analysis for urban passenger transport energy consumption and CO₂ emissions: A case study of Beijing. *Energy policy*. Vol. 85, 253-270.
- Ma, J. & Xia, L. & Li, Q.** (2019). Optimal energy-efficient policies for data centers through sensitivity-based optimization. *Discrete Event Dynamic System: Theory and applications*. Vol. 29. Issue 4. pp. 567–606.
- Martínez, S. y Requena, A.** (1986). *Dinámica de sistemas*. Vol. 2: Modelos. Alianza.
- Martini, I.** (Dir.). (2019). Proyecto PICT 2017-1295. Escenarios energéticos urbanos, modelo de simulación integral, sectores residencial y transporte. Período: 2019-2022.
- Martini, I. & Discoli, C. A.** (Dir.). (2018a). Proyecto PIP 11220170100185CO. Construcción de escenarios energéticos alternativos de desarrollo urbano: implementación de un modelo de simulación integral orientado al uso eficiente de la energía y sustitución de fuentes por renovables. Período: 2018-2020.
- Martini, I. & Discoli, C. A.** (Dir.). (2018b). Proyecto UNLP: Modelo de simulación integral del consumo energético residencial en el marco de escenarios de desarrollo urbano. Período: 2018-20221.
- Menezes, E.; Maia, A. G. & Silva de Carvalho, C.** (2017). Effectiveness of low-carbon development strategies: Evaluation of policy scenarios for the urban transport sector in a Brazilian megacity. *Technological Forecasting and Social Change*. Vol. 114, 226-241.
- Ministerio de Hacienda** (2017). *Balance energético nacional de la República Argentina. Año 2017*.
- Moshagen, T.** (2019). On Meeting Energy Balance Errors in Co-Simulations. *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems*. 25: 2, 139-166.
- National Planning Authority, Uganda** (2020). Dynamic analysis of sustainable development goals: Achieving the SDGs with Uganda's Third National Development Plan. National Planning Authority, Uganda.

- Osman, M. S. & Ram, B.** (2017). Distributed scheduling approach for dynamic evacuation networks. *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems*. Volume 23. Issue 6, 554-569.
- Ouyang, X. & Lin, B.** (2015). Analyzing energy savings potential of the Chinese building materials industry under different economic growth scenarios. *Energy and Buildings*. Vol. 109, 316-327.
- Pourhasanzade, F. & Sabzpushan, S. H.** (2019). A cellular automata model of chemotherapy effects on tumour growth: targeting cancer and immune cells. *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems*. 25: 1, 63-89.
- Pózna, A.; Fodor, A. & Hangos, K.** (2019). Model-based fault detection and isolation of non-technical losses in electrical networks, *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems*. 25: 4, 397-428.
- Roux, C.; Schalbart, P.; Assoumou, E. & Peupartier, B.** (2016). Integrating climate change and energy mix scenarios in LCA of buildings and districts. *Applied Energy*. Vol. 184, 619-629.
- Sandberg, N. H.; Sartori, I. & BrattebØ, H.** (2014). Sensitivity analysis in long-term dynamic building stock modeling. Exploring the importance of uncertainty of input parameters in Norwegian segmented dwelling stock model. *Energy and Buildings*. Vol. 85, 136-144.
- Sandberg, N. H.; Sartori, I.; Vestrum, M. I. & BrattebØ, H.** (2017). Sensitivity analysis in long-term dynamic using a segmented dynamic dwelling stock model for scenario analysis of future energy demand: the dwelling stock of Norway 2016–2050. *Energy and Buildings*. Vol. 146, 220-232.
- Secretaría de Energía y Minería** (2017). Escenarios energéticos 2030. *Dirección Nacional de Escenarios y Evaluación de Proyectos*.
- Thomson, A. & Cook, S.** (2016). Report: Innovating urban energy. Perspective input into the World Energy Council Scenarios. Londres: *World Energy Council*. <https://www.buildup.eu/en/practices/publications/innovating-urban-energy-0>
- Zhang, Y.; Cassandras, C. G.; Li, W. & Mosterman, P. J.** (2019). A discrete-event and hybrid traffic simulation model based on SimEvents for intelligent transportation system analysis in Mcity. *Discrete Event Dynamic Systems: Theory and applications*. 29, 265–295.

CUADERNO
URBANO
ESPACIO, CULTURA, SOCIEDAD

ARTÍCULOS DE FONDO

