

Modelación dinámica de la demanda y oferta de una micro-red eléctrica

Andrés E. Cabrera¹, Hugo X. Cueva¹, Rodrigo E. Sempértegui¹, Juan L. Espinoza¹, Diego R. Ochoa¹, Andrea P. Guevara², Danny V. Ochoa¹

¹ Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad de Cuenca, Av. 12 de Abril y Agustín Cueva, Cuenca, Ecuador, Casilla Postal: 01.01.168.

² Dirección de Investigación de la Universidad de Cuenca, Universidad de Cuenca, Av. 12 de Abril y Agustín Cueva, Cuenca, Ecuador, Casilla Postal: 01.01.168l.

Autor para correspondencia: rodrigo.sempertegui@ucuenca.edu.ec

Fecha de recepción: 21 de septiembre de 2014 - Fecha de aceptación: 17 de octubre de 2014

RESUMEN

En el presente trabajo se propone un modelo dinámico de simulación, con el fin de pronosticar la oferta y demanda de energía que tendría una micro-red eléctrica, compuesta por una vivienda con generación propia a través de paneles fotovoltaicos, teniendo como carga la demandada por la vivienda a lo largo del día. El pronóstico de la oferta se determina considerando los parámetros tanto físicos como climáticos que determinan la capacidad de generación; para la determinación de la demanda se considera el equipamiento de la vivienda, tanto de aparatos que estén relacionados con la actividad de sus residentes, así como los aparatos que tienen un consumo no relacionado con la actividad de ellos. Todo esto permitirá integrar las curvas de carga y generación diaria que tendría la micro-red.

Palabras clave: Modelación dinámica, demanda, oferta, micro-red eléctrica, smart grids, generación distribuida, energías renovables.

ABSTRACT

In this paper a dynamic simulation model is proposed to forecast both energy supply and demand throughout the day of an electrical micro-grid, of a home equipped with photovoltaic panels. The supply forecast considers both physical and climatic parameters, while the demand forecast is based on the different devices that are connected and the activity of the residents. The system enables the elaboration of the daily load and generation curves of the micro-grid.

Keywords: Dynamic modeling, demand, supply, electric micro-red, smart grids, generation distributed renewable energy.

1. INTRODUCCIÓN

La situación energética mundial se encuentra actualmente dominada por la explotación de fuentes de combustible fósil. Si se mantuviese este sistema de consumo de energía, el planeta tal y como lo conocemos caería en una crisis aguda debido a la actual tasa de consumo, la ineficiencia energética y a la futura escasez de recursos e incremento de los precios de los combustibles. Frente a ello, en todo el mundo se están buscando nuevas alternativas energéticas que sean capaces de mantener nuestro nivel de desarrollo, en forma equitativa y cuidando el ambiente.

En la última década, en el Ecuador se ha incentivado el uso de energías renovables como una medida de solución al crecimiento de la demanda de energía eléctrica. Actualmente el gobierno tiene la política de promover un cambio en la Matriz Energética, como base de una nueva matriz

productiva, donde fuentes renovables como la hidroelectricidad juegan un papel preponderante. En el lado de la distribución, el crecimiento inminente de las redes hacia sectores más alejados, con los consabidos problemas técnicos y económicos, obliga a pensar en otros caminos para el abastecimiento de energía eléctrica a nivel residencial, como son las micro-redes.

La incorporación de energías renovables en los hogares, cambia la participación del sector residencial en el sistema eléctrico de distribución, pasando de ser consumidores a ser también potenciales generadores de energía eléctrica, lo que conlleva una compleja operación del sistema y demanda la incorporación de inteligencia en la red para que ésta sea segura y eficiente al menor costo posible.

El presente trabajo pretende contribuir al entendimiento y futura implementación de las denominadas redes eléctricas inteligentes (“Smart Grids”) en el Ecuador. Para esto, como paso inicial es fundamental disponer de una herramienta que permita pronosticar la oferta y la demanda que tiene una vivienda, para cuantificar los posibles impactos y beneficios que tendría la integración de generación eléctrica doméstica y el consumo de los electrodomésticos existentes en el hogar.

Luego de una revisión de los modelos que han sido aplicados en diferentes lugares con objetivos similares, para entender el comportamiento de la oferta y la demanda (Grandjean *et al.*, 2012; Swan & Ugursal, 2009), se recogen los aspectos más importantes que permitirán la modelación de una vivienda con la mayor precisión posible; todo esto es aplicado en un ejemplo de simulación en el cual se integran ambos modelos (demanda y oferta), usando como parámetros de entrada los resultados de estudios realizados para la ciudad de Cuenca.

2. LA DEMANDA (CARGA)

En una red de distribución eléctrica, la determinación de la demanda es fundamental para asegurar el suministro de energía, así como para tener una buena aproximación de cuándo se da el pico de demanda. Además, permite tener un mejor control de la red, por lo que es primordial contar con un modelo que ayude a caracterizar la demanda de energía según los parámetros más apropiados, para poder simular un consumo real de electricidad en una vivienda.

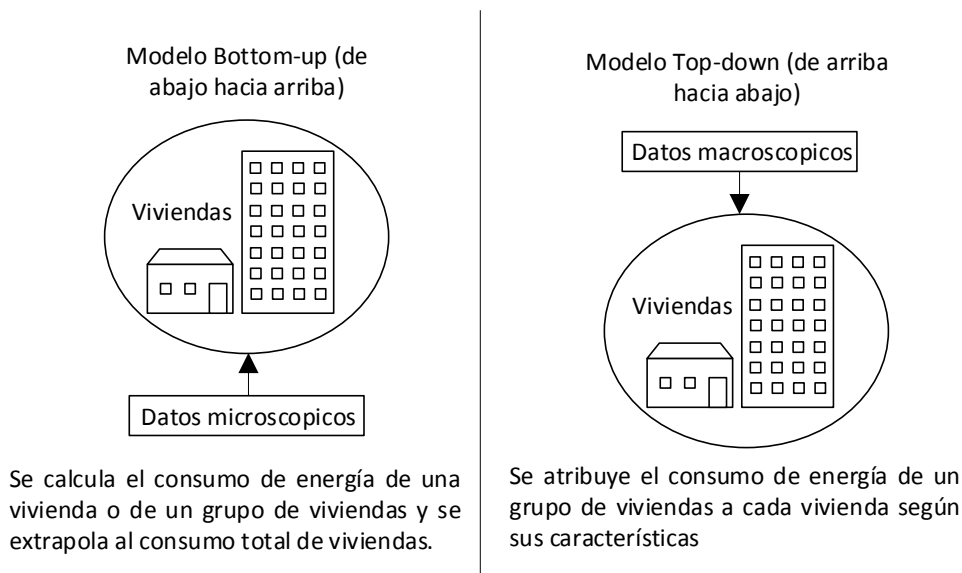


Figura 1. Modelo Bottom-up y Top-down (Grandjean *et al.*, 2012).

La modelación de la demanda de energía eléctrica de una vivienda no es una investigación reciente, según (Grandjean *et al.*, 2012) la determinación de la demanda en una residencia puede ser muy extendida según los parámetros que se quieran considerar; es por eso que se ha tomado la solución

más apropiada para determinar el método que permita obtener la curva de demanda diaria según nuestro entorno.

Los métodos de determinación de la curva de demanda están divididos en dos categorías descritas por Swan & Ugursal (2009): bottom-up y top-down, cada una tiene su rango de aplicación determinado por los parámetros de entrada (ver Fig. 1). Sin embargo, además de estos dos métodos se han venido desarrollando modelos que pueden ser descritos como una mezcla de ambos.

Desde el punto de vista de Grandjean *et al.* (2012), la potencia demandada es mucho más complicada de predecir que la energía demandada, esto se debe a la naturaleza aleatoria de las cargas así como las fluctuaciones que cada una de ellas tiene como consecuencia de la actividad de los ocupantes. Este aspecto es muy importante ya que dos viviendas con las mismas características pueden tener el mismo consumo de energía, sin embargo las curvas de carga diaria para cada una pueden ser muy diferentes.

2.1. Modelo bottom-up

Para obtener una mejor visión de la interacción de las energías renovables y la demanda de la micro-red, se considera importante que para el presente estudio se apliquen métodos que se encuentran en la categoría de bottom-up (de abajo hacia arriba), es decir buscando la mayor precisión posible.

Luego de analizar los principales modelos que se mencionan en Grandjean *et al.* (2012) se destacan los aspectos más importantes que se deben considerar en el presente estudio. Es así que para la modelación de la demanda de los aparatos que tienen interacción directa con el usuario (p.ej. TV, laptop, licuadora, microondas, etc.), el modelo propuesto de (Richardson *et al.*, 2010) brinda un enfoque apropiado pues se basa en la combinación de patrones de actividad de las personas que se encuentran en casa y los perfiles de actividad diaria que muestran la forma como la gente gasta su tiempo en realizar ciertas actividades. Para obtener la resolución de un minuto, los datos se crean a través de la simulación del uso del aparato, para ello se utilizan los equipos que se encuentran comúnmente en nuestras viviendas, tomando como base datos estadísticos del INEC (Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, 2010). Para los aparatos que no tengan interacción directa o permanente con el hombre (p.ej. refrigeradora) se utiliza la modelación descrita por (Moldes, 2013). Cada uno de estos modelos brinda una resolución de un minuto lo cual es apropiado para un mejor estudio de las micro-redes. Los conceptos utilizados en la construcción del modelo en estudio se describen a continuación.

3. MODELO DE LA DEMANDA

Este modelo, como se presenta en (Richardson *et al.*, 2010), utiliza el aparato como el componente básico, donde "aparato" se refiere a cualquier carga de electricidad doméstica individual. La característica importante del modelo está en su enfoque que representa el uso del aparato correlacionado con el tiempo.

Los aparatos del modelo se configuran mediante estadísticas que describen su demanda media anual de energía y las características de uso de energía asociados, basándose en datos descritos en (Martínez Mosquera, 2010), incluyendo el consumo de estado estacionario "stand by" o ciclos normales de utilización, según sea el caso. Además se considera cuándo los aparatos específicos son susceptibles de ser utilizados dependiendo del número de habitantes en el hogar.

3.1. Estructura del modelo

La estructura del modelo se presenta en la Fig. 2, donde se muestra, a la izquierda, un conjunto de perfiles de actividad diaria, que representan la probabilidad de que las personas realicen las diferentes actividades en diferentes momentos del día. Estos perfiles son los mismos para todas las viviendas. A la derecha del diagrama, las viviendas están representadas por un solo bloque. A cada vivienda se le asigna un perfil de ocupación activa (en función del número de habitantes y horas de actividad en el

hogar a lo largo del día) y una serie de aparatos instalados. Cada dispositivo se asigna a uno de los perfiles de actividad diaria. Cuando se produce un evento de encendido, las características de uso de energía del aparato se utilizan para determinar su demanda de electricidad. Adicionando la demanda de energía de todos los aparatos dentro de una vivienda, da como resultado la demanda total de la misma.

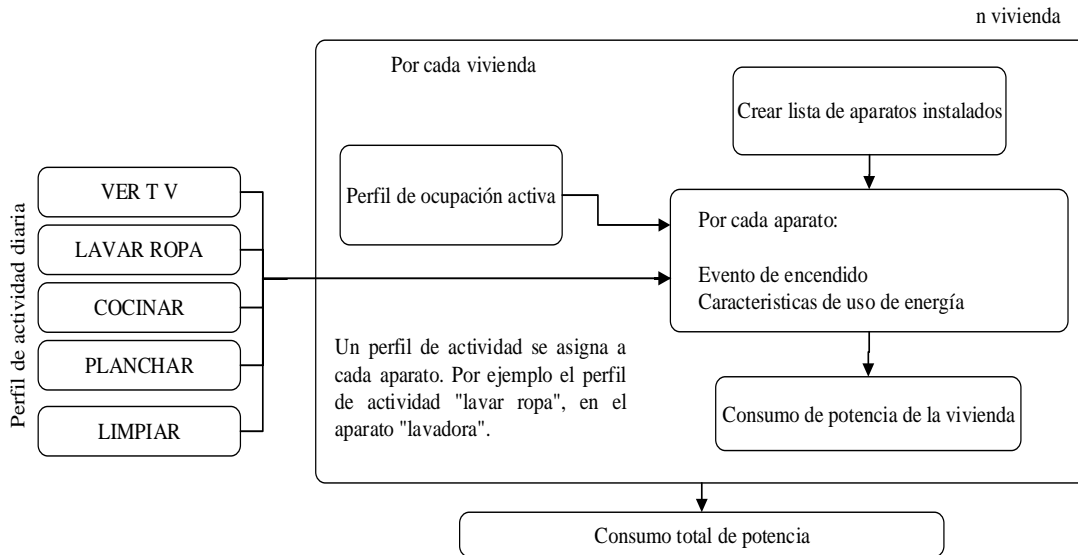


Figura 2. Estructura del modelo de la demanda (Richardson *et al.*, 2010).

3.2. Perfiles de actividad diaria

Cada perfil de actividad diaria (Fig. 2), cuantifica la probabilidad de que la actividad especificada se está llevando a cabo, en función del tiempo. El conjunto de perfiles incluye variantes para tener en cuenta: el número actual de ocupantes activos (de uno a cinco; CPV, 2010) y si se trata de un día de semana o un día de fin de semana.

Los perfiles de actividad diaria se construyen a partir de datos de las encuestas levantadas en Martínez Mosquera (2010), subdivididos en grupos de lunes a viernes y fin de semana. Los datos corresponden a 423 viviendas en Quito y Cuenca. Con esta información, el presente trabajo incorpora interpolaciones de Hermite para obtener datos cada 10 minutos, esto permite obtener el perfil de 6 actividades (entretenimiento, lavar ropa, cocinar, ducharse, limpieza y planchar).

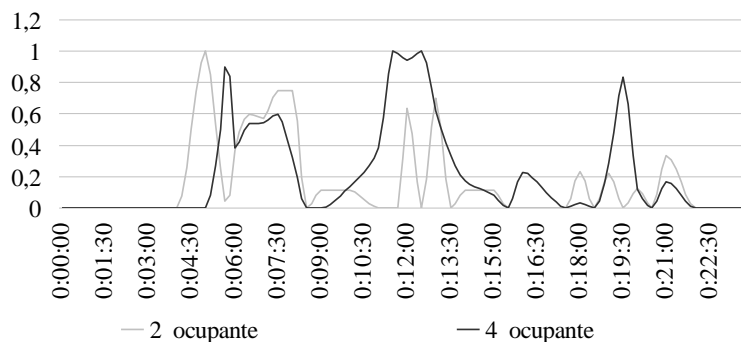


Figura 3. Perfil de actividad para “cocinar” para 2 y 4 ocupantes en un día laborable.

Dos ejemplos de perfiles se muestran en la Fig. 3. Ambos son perfiles de la actividad “cocinar” para un día de semana. Las dos curvas representan probabilidades de actividad para diferentes números de ocupantes activos, en este caso, dos o cuatro. Por ejemplo, si una vivienda tiene dos ocupantes activos a las 12:00, entonces la probabilidad de que los ocupantes realicen una actividad relacionada

con “cocinar” es de 0,63. Sin embargo, si hay cuatro ocupantes activos, la probabilidad de que al menos uno de los ocupantes realice una actividad relacionada con “cocinar” se eleva a 0,94. Esto se obtiene usando la información de (6): del total de 423 viviendas, el número que tienen dos ocupantes activos a las 12:00 es 11. De ese grupo, el número de viviendas donde al menos un ocupante está realizando una actividad relacionada con cocinar es de 7. La proporción es $7/11 = 0,63$. Igualmente se procede para viviendas con 4 ocupantes donde, a las 12h00, el número total con esa tasa de ocupación es 17 viviendas y en 16 hay al menos alguien activo en la cocina, dando una probabilidad de 0,94 (ver Fig. 4).

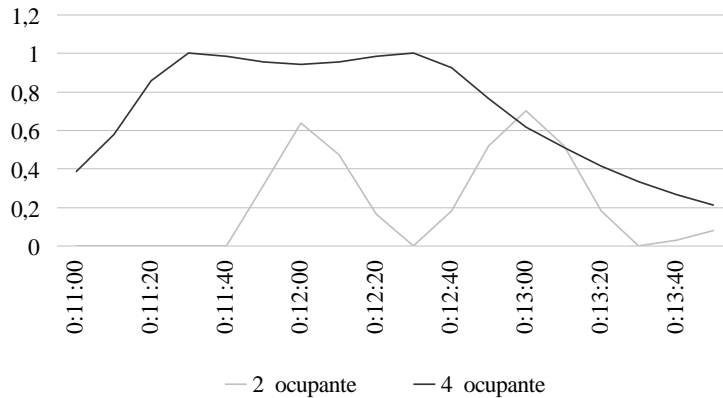


Figura 4. Perfil ampliado de actividad ”cocinar” para 2 y 4 ocupantes, día laborable, 11:00 a 14:00.

Se debe de tener en cuenta que los valores que representan dos ocupantes activos se vuelven, en ciertas horas, muy volátiles. Este es el resultado de la pequeña cantidad de muestras aplicables y el tiempo entre la toma de muestras (30 minutos) en el conjunto de datos de origen (Martínez Mosquera, 2010) reflejando el hecho de que hubo relativamente pocos casos con dos ocupantes activos en las primeras horas de la mañana.

3.3. Características de potencia

Cada dispositivo en el modelo de Richardson *et al.* (2010) tiene dos estados: puede estar encendido o apagado. El estado de apagado incluye la potencia de “stand by”, en el cual el aparato electrónico se encuentra conectado pero en reposo a la espera de recibir órdenes.

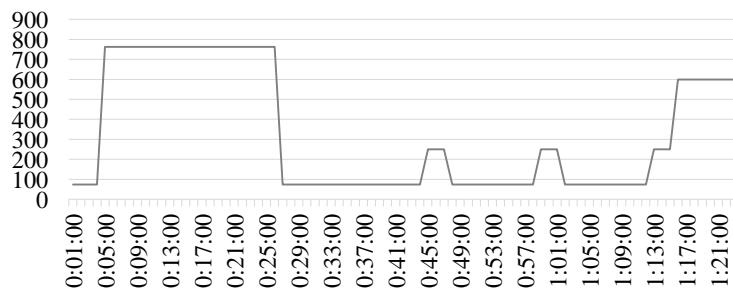


Figura 5. Ciclo de funcionamiento de la lavadora (Moldes, 2013).

Para muchos electrodomésticos, tales como un computador o un televisor, se supone una demanda de potencia constante cuando se encuentran en funcionamiento. Sin embargo, algunos aparatos están representados por las demandas variables en el tiempo. Por ejemplo, una lavadora de ropa, cuyo funcionamiento se ejecuta en varias etapas: llenado, lavado y centrifugado, varía significativamente su

demanda a lo largo de un ciclo. En este caso, el perfil de la demanda se basa en el modelo (Moldes, 2013), donde la carga varía como se indica en la Fig. 5.

3.4. *Aparatos instalados*

Para la asignación de los aparatos a utilizar, al inicio, el modelo “puebla” cada vivienda con electrodomésticos. Esto se hace de forma aleatoria a partir de datos estadísticos de (Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, 2010).

Sobre esta base, el modelo está configurado para incluir hasta 22 aparatos dentro de cada vivienda. Para tener en cuenta la propiedad múltiple, algunos aparatos están listados explícitamente: por ejemplo, 3 de los 22 aparatos son televisores. En el modelo, una sola vivienda puede tener de cero a tres televisores.

Cada dispositivo se le asigna una demanda anual en kWh año⁻¹. Estos datos están basados en los resultados de Martínez Mosquera (2010), junto con otros datos obtenidos de la distribuidora que da servicio a Cuenca, la Empresa Eléctrica Regional Centrosur S.A., y se ajusta para representar a las viviendas de la ciudad, que tienen un consumo promedio de 1588 kWh año⁻¹ para abonados con tarifa residencial.

3.5. *Asignación de actividad a cada equipo*

Los electrodomésticos cuyo uso depende de una actividad en particular son asignados a su perfil correspondiente. Puede haber varios dispositivos asignados a una sola actividad. Por ejemplo, microondas, licuadora y ollas arroceras están asignados a la actividad de cocinar. Esto no implica que todos estos aparatos se utilicen necesariamente cada vez que la cocción se lleva a cabo; simplemente se considera en el modelo la posibilidad de que se utilicen, incluso de forma simultánea.

Los electrodomésticos que no están asociados con ninguna actividad en particular se asignan al "otro" perfil de actividad, que abarca dos casos específicos:

- Para algunos tipos de aparatos, no hay perfil de actividad que describa cuándo es probable que se los utilice. Un equipo Wi-Fi es un ejemplo. En este caso, se toma el uso del aparato que sólo depende de la ocupación activa dentro de una vivienda.
- Los aparatos eléctricos de refrigeración y calefacción de espacios no encajan en el modelo de perfil de actividad ya que su uso varía con relación a las condiciones climáticas, construcción del equipo y características de llenado y vaciado. En este modelo, se ha considerado que el ciclo de los aparatos de refrigeración, no depende de la gente que es activa dentro de una vivienda. Para ello se ha usado el modelo descrito en (Moldes, 2013), cuyos factores son ajustados con el fin de obtener un perfil de uso con relación a las condiciones climáticas y de consumo de la ciudad de Cuenca.

3.6. *Encendido de cada aparato*

El procedimiento para determinar si se produce el encendido de un aparato en cada lapso de tiempo de una simulación se presenta en la Fig. 6. Se dan los siguientes pasos:

- a) El perfil de actividad se selecciona de acuerdo con la actividad del dispositivo, el número de ocupantes activos y si se trata de un fin de semana o no.
- b) La probabilidad de que alguno de los ocupantes activos se dedique a la actividad en este momento se lee en el perfil de actividad.
- c) La actividad de probabilidad se multiplica por el valor escalar de calibración.
- d) El resultado de la etapa anterior se compara con un número aleatorio entre cero y uno. Si la probabilidad es más que el número aleatorio, a continuación, el encendido se produce.

3.7. *Escala de calibración*

Cada aparato tiene una "escala de calibración" (Richardson *et al.*, 2010), que es un factor en la probabilidad de encendido como se muestra en la Fig. 6, y por lo tanto determina el número promedio

de veces que el aparato se utiliza en un año. La escala de calibración se ajusta de modo que, en un número muy grande de iteraciones, el consumo promedio de un equipo que simule el modelo será similar al consumo medio anual del aparato según se obtuvo en Martínez Mosquera (2010). Es decir que va a coincidir con los datos de entrada de energía anual consumida por cada aparato.

Por ejemplo, el microondas en el modelo usa $11,73 \text{ kWh año}^{-1}$. En cada encendida se asigna 1250 W durante 5 minutos en cada ciclo de funcionamiento y 2 W en modo de espera. Por lo tanto, debe apagar y prender aproximadamente 111 veces por año. Esto deja aproximadamente 240503 minutos del año en que se puede producir un evento de encendido. Así, el tiempo medio entre eventos de inicio, con exclusión del tiempo cuando el aparato está en un ciclo, es $240503/111 = 2166$ minutos. Dado que el aparato depende de la ocupación activa, la probabilidad de actividad del microondas es 0,243 debido a que, de las 423 muestras, solo 103 viviendas registraron una actividad de este equipo, y por lo tanto, en referencia a la Fig. 6, el escalar de calibración es $1/(2166 \times 0,243) = 0,0019 \text{ min}^{-1}$.

Todos los valores se determinan por el mismo método que se ha descrito anteriormente, de tal manera que el número requerido de ciclos por año ocurren según se requiera para dar el correcto uso de energía global. Por supuesto, los aparatos que dependen de los perfiles de actividad diaria solo pueden comenzar si hay ocupación activa dentro de la vivienda.

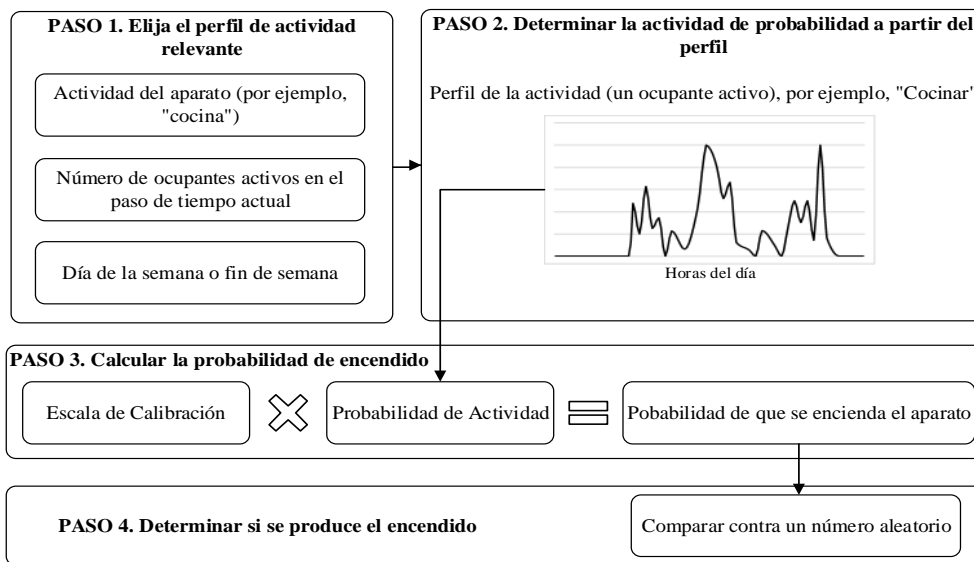


Figura 6. Estructura del Modelo del Encendido de cada aparato (Richardson *et al.*, 2010).

COCINA

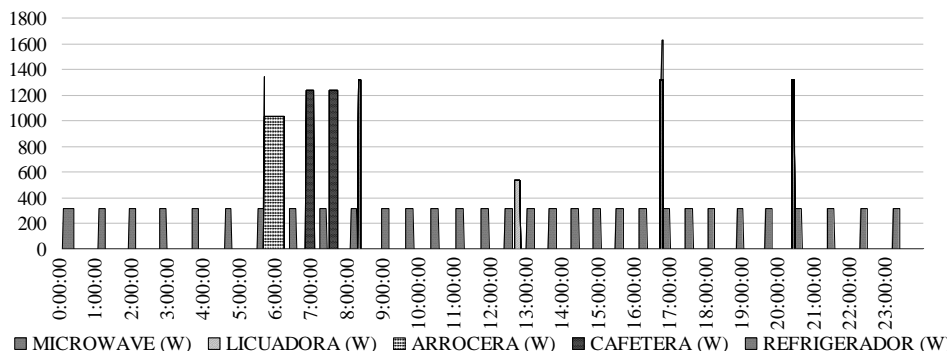


Figura 7. Demanda diaria para cocción de alimentos.

ENTRETENIMIENTO

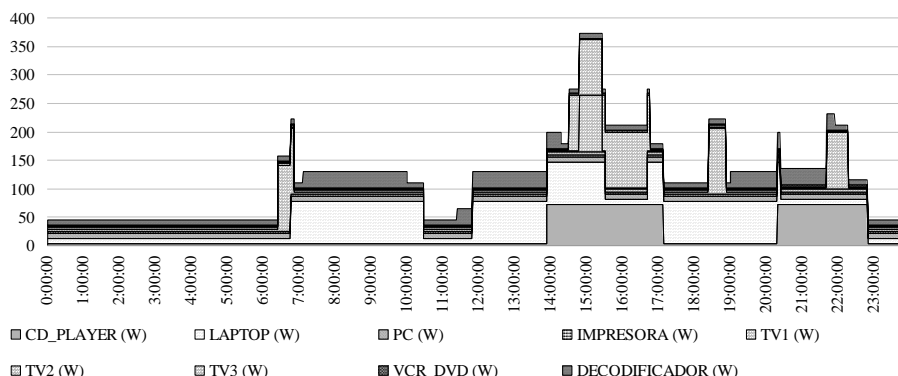


Figura 8. Demanda diaria para entretenimiento.

ILUMINACIÓN

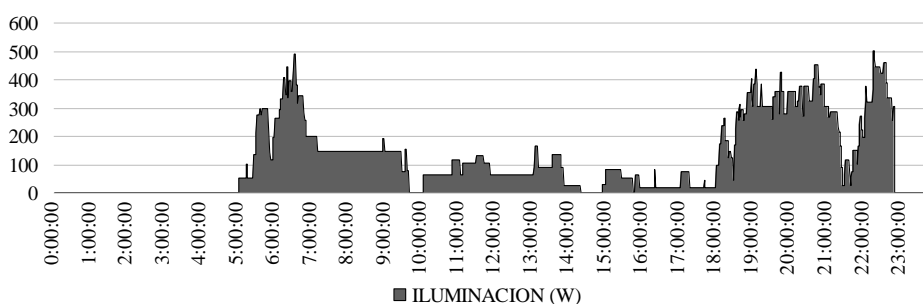


Figura 9. Demanda diaria para iluminación.

3.8. Simulación del modelo

Como resultado del análisis descrito anteriormente, una simulación para la determinación de la demanda de una vivienda a lo largo de un día se muestra a continuación, separada por actividades y con los respectivos equipos (Figs. 7, 8 y 9):

Al sumar los consumos de potencia de cada una de las actividades consideradas en este estudio (Figs. 7, 8 y 9), se obtiene el perfil de carga diaria de la vivienda, como se muestra en la Fig. 18.

4. MODELO DE LA OFERTA (GENERACIÓN) DE LA MICRO-RED

La micro-red en estudio tiene como fuente de generación propia la energía renovable proveniente del sol, a través de su conversión mediante paneles fotovoltaicos. La vivienda estará conectada también a la red de distribución para abastecerse de ahí cuando no se logre satisfacer la demanda con la generación propia, es decir, se trata de un sistema híbrido. En la actualidad existe una variedad de métodos para el dimensionamiento de sistemas híbridos (p.ej. solar-eólica, solar-diesel, etc.), pero en esta sección se presenta una metodología sencilla para el dimensionamiento de una parte del sistema fotovoltaico, cuyos resultados contribuyan al diseño de una determinada micro-red.

Los pasos a seguir en el dimensionamiento del sistema fotovoltaico son los siguientes:

- Estimación de radiación incidente.
- Dimensionamiento del subsistema generador: paneles fotovoltaicos.
- Dimensionamiento del sistema de acumulación.
- Dimensionamiento del regulador.
- Dimensionamiento del inversor.

Dado el alcance del presente trabajo, se describirán únicamente los aspectos relacionados a la radiación solar y al subcomponente generación (paneles) del sistema fotovoltaico, asumiendo que la generación con energía solar será utilizada instantáneamente ya sea en la carga de la vivienda o para inyección a la red, es decir no se considera almacenamiento de energía. Vale destacar, sin embargo, que el resto de componentes del sistema (acumulación, regulación, inversores, etc.) deben ser dimensionados previos a acometer con una instalación real.

4.1. Estimación de la radiación solar sobre una superficie inclinada

Para el desarrollo del modelo de oferta con paneles fotovoltaicos se toman en consideración varios aspectos que son importantes como la radiación, la posición del Sol, la inclinación de la Tierra, inclinación de la superficie captadora, día del año, nubosidad, hora local, latitud, entre otros.

La generación de energía solar fotovoltaica está estrechamente relacionada con la cantidad de radiación solar que llega a un punto o zona (en este caso a la ciudad de Cuenca) en cualquier instante dado. Por ende, para poder saber cuánto vamos a generar a través de los paneles fotovoltaicos debemos tener un conocimiento amplio de la interacción entre el Sol y la Tierra. En la Figura 10 se indica la posición del Sol respecto a un punto de observación, donde:

El ángulo horario (ω) es la distancia angular entre el meridiano del observador y el meridiano que contiene al Sol.

Radiación directa $B_d(0)$

Radiación difusa $D_d(0)$

Radiación global $G_d(0)$

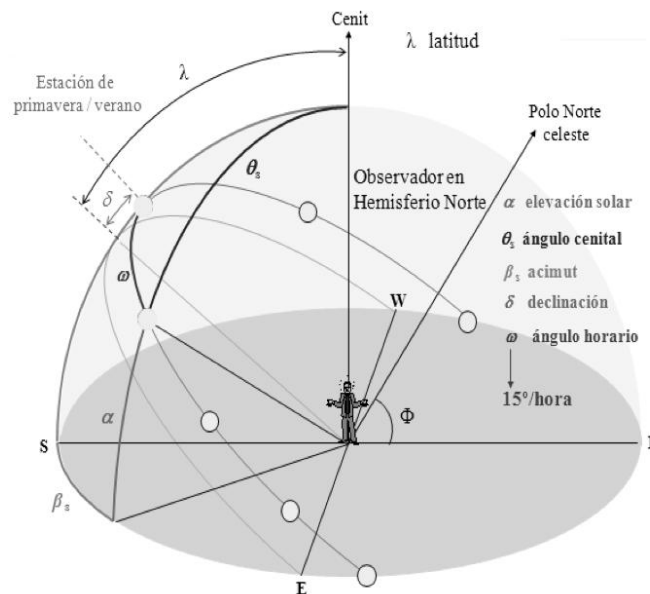


Figura 10. Posición del sol (Universidad de Jaén, 2006).

La metodología que se sigue parte del modelo ya establecido de la radiación (Duffie & Beckman, 2013), y se construye con los datos previamente obtenidos del modelo y de los datos de placa del panel fotovoltaico que se seleccione, con estos datos se construye la curva de oferta que va a representar el modelo de generación de la micro-red. Con ello se busca obtener la curva de la energía que proviene de los paneles fotovoltaicos para poder emplearla como la curva final de la oferta.

La literatura indica que la interacción entre el Sol y la Tierra es un proceso completamente determinista y que ha sido muy bien estudiado (Fernandez Diaz, 1993), es por ello que, para el desarrollo de este trabajo se utiliza un modelo ya establecido en Duffie & Beckman (2013).

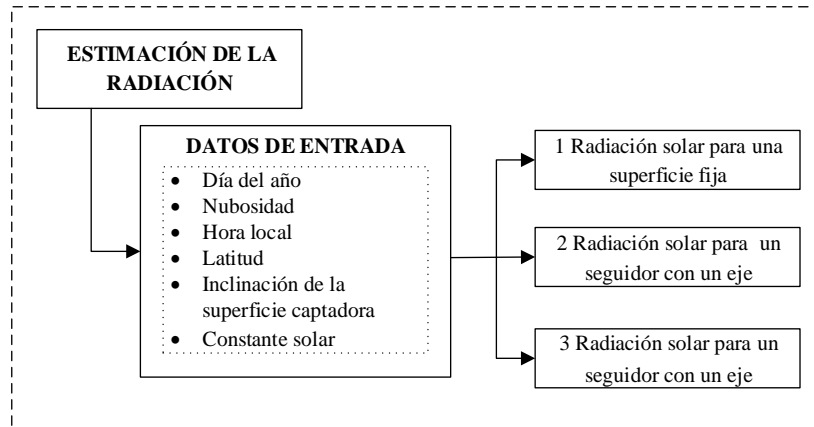


Figura 11. Modelo de estimación de la radiación.

Con el fin de lograr captar la mayor energía proveniente del Sol en el sistema de generación fotovoltaica, se plantean tres métodos (Fig. 11): radiación solar para una superficie fija, radiación solar para una seguidor con un eje, radiación solar para una superficie que es rastreada con dos ejes; los mismos que nos indican qué cantidad de radiación se puede obtener en una superficie captadora, cada uno presenta diferentes eficiencias y cualquiera de los tres se puede aplicar en una micro-red. El uso de uno de los tres sistemas descritos dependerá de la capacidad económica que el usuario disponga, ya que a mayor eficiencia se requiere mayor inversión. Sin embargo, en el caso de Cuenca, al estar prácticamente en la línea equinoccial, se recomienda la instalación de paneles fotovoltaicos en una superficie fija, con una ligera inclinación (max. 15 grados) hacia el norte.

La ecuación que estima el valor de la radiación sobre una superficie inclinada es:

$$G(\varphi) = B_d(0) \times R_b + D_d(0) \times \left(\frac{1 + \cos \varphi}{2} \right) + \zeta \times G_d(0) \times \left(\frac{1 - \cos \varphi}{2} \right)$$

donde:

$$G(\varphi) = \text{Radiación sobre una superficie inclinada} \left[\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \text{ día}} \right]$$

$$B_d(0) = \text{Radiación directa} \left[\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \text{ día}} \right]$$

$$D_d(0) = \text{Radiación difusa} \left[\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \text{ día}} \right]$$

$$G_d(0) = \text{Radiación global} \left[\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \text{ día}} \right]$$

φ = Inclinación de la superficie [grados]

R_b = Relación de la Radiación directa solar de una superficie inclinada para una superficie horizontal.

$\zeta = 0.5$ coeficiente de reflectividad.

En la Fig. 12 se muestra un ejemplo de cómo sería la radiación sobre una superficie horizontal en la ciudad de Cuenca con el cielo despejado así como la radiación sobre un panel solar (superficie inclinada); sin embargo, dado que esta situación climática no es muy común, a esta curva se le ha aplicado una variación que simula el efecto de nubosidad pudiendo tener como mínimo valor el 20% de la radiación máxima.

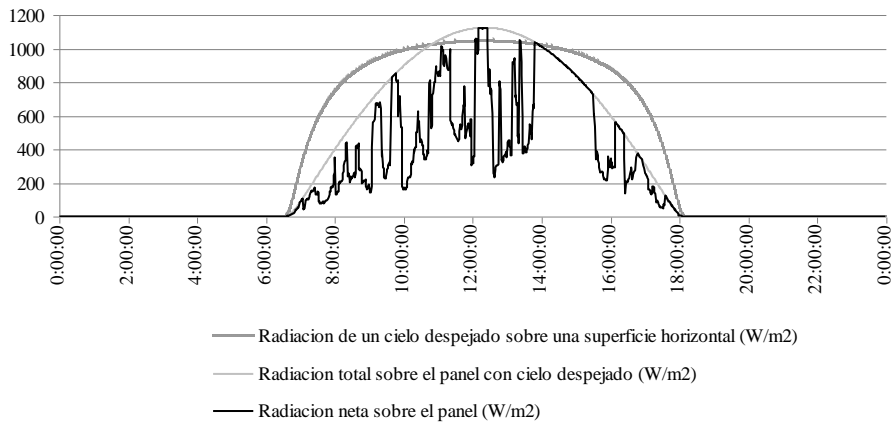


Figura 12. Simulación de la radiación (Richardson & Murray, 2011).

5. DIMENSIONAMIENTO DEL SUBSISTEMA GENERADOR

5.1. Elección del tipo y número de módulos fotovoltaicos

Si bien existen procedimientos para determinar el tipo y tamaño del módulo fotovoltaico, utilizando valores de la demanda y el porcentaje de ésta a ser cubierto por la generación renovable, para el presente análisis se parte con la selección de un módulo fotovoltaico dado, en este caso con una capacidad de 150 Wp de potencia, a 12 Vcc.

Con la información del módulo fotovoltaico, se podrá estimar la energía generada por dicho módulo durante un día cualquiera. Para efectos de diseño se recomienda utilizar los promedios del peor mes de radiación que se tenga.

La energía que un panel fotovoltaico va a generar en el día es en función de la potencia pico del panel ($P_{\text{módulo}}$) por las horas pico solar de irradiación que se tiene en ese instante t y por un factor de pérdidas por puntos calientes η , es decir:

$$E = P_{\text{módulo}} \times t \times \eta$$

Se denomina puntos calientes a las pérdidas consideradas cuando en una parte del panel se tiene sombra y por ende la celda no genera sino que se da el efecto contrario ya que tiende a emitir energía en forma de calor, también se consideran las pérdidas por efecto Joule que presentan los conductores. En este caso, t es la hora pico solar, es decir, que en este tiempo se asume que se tiene una irradiación constante de 1000 kW m⁻² donde el panel logra generar la potencia nominal, sin embargo sabemos que la radiación a lo largo del día varía y no es constante, es por ello que se consideran las horas solar pico igual a la irradiación. A continuación se demuestra este hecho.

El número de módulos $N_{\text{módulos}}$ necesarios para cubrir las necesidades diarias de la carga (en función del mes más desfavorable) viene dado por:

$$N_{\text{módulos}} = 1,1 \left[\frac{E_{\text{carga}}}{E_{\text{panel}}} \right]$$

donde:

$N_{\text{módulos}}$ = Número de módulos

E_{carga} = Energía eléctrica de la carga (kWh día⁻¹)

E_{panel} = Energía diaria producida por un módulo (kWh día⁻¹)

El coeficiente 1,1 es un factor de seguridad para hacer frente a imprevistos y a la depreciación de prestaciones de los diferentes componentes del sistema por diferentes causas.

Una vez hallado el número inicial, se debe determinar la conexión de los módulos fotovoltaicos, es decir, se calcula el número de módulos que estarán conectados en paralelo, serie y el número final de módulos fotovoltaicos, a fin de satisfacer una demanda determinada.

6. INTEGRACIÓN DE LOS MODELOS

Una vez estudiada la oferta y la demanda, se muestra un ejemplo de la integración de estos dos modelos que pueden ser aplicados para pronosticar la operación de una micro-red compuesta por un equipamiento asignado de forma manual (refrigeradores, lavadora equipo de sonido, Wi-Fi, plancha, computadora, impresora, TV, arrocera, microondas, ducha eléctrica, iluminación), utilizando datos climáticos de la ciudad de Cuenca y mostrando el efecto de nubosidad mediante asignación aleatoria.

En las Figs. 13, 14 y 15 se presentan la integración de oferta y demanda considerando una vivienda con 5 ocupantes y que inician y finalizan sus actividades a las 5:00 y 23:30, respectivamente. Al modelo de la demanda se lo ha contrastado con un modelo de la oferta realizando iteraciones con 1, 3 y 5 paneles solares fotovoltaicos de 150 Wp potencia y una eficiencia de 15%, con lo cual se obtuvieron los siguientes resultados (Tabla 1):

Tabla 1. Energía diaria generada según número de paneles fotovoltaicos.

Numero de paneles (150 Wp c u ⁻¹)	1	3	5
Total generado por día (kWh)	0,94	2,83	4,72
Total demando por día (kWh)	6,88	6,88	6,88
Total exportado (kWh)	0,14	1,14	2,70

Como se observa en las Figs. 13, 14 y 15, el consumo total de energía de los equipos asignados tiene una clara tendencia a incrementarse en la noche, aunque los picos se producen con mayor frecuencia en las mañanas y noches debido al uso de las duchas eléctricas y de microondas ya que son equipos que tienen un alto consumo durante un corto tiempo.

En la Figs. 13 a 15, la curva sobre el eje horizontal muestra la energía que se demanda a la red, considerando que la energía que se capta con los paneles no es almacenada y la forma de evacuarla es usándola en los equipos que tengan una demanda en ese mismo instante o en su defecto exportando esta energía a la red que, como se muestra en las gráficas, está bajo el eje horizontal (gris más claro) y tiene una tendencia creciente logrando el máximo valor en las horas del mediodía justo cuando existe la mayor radiación y una demanda menor (siendo predominante el consumo de la refrigeración y cocción de alimentos).

Finalmente, como resultado de la modelación de la oferta y demanda se obtuvieron los usos finales de energía eléctrica promedio en la ciudad de Cuenca (Fig. 16) los cuales se comparan con los obtenidos en Martínez Mosquera (2010) (Fig. 17), teniendo en cuenta que en el presente modelo se ha considerado la energía consumida por el equipo en “Stand by” además de las condiciones climáticas. En las Figs 16 y 17 se destaca el alto consumo de energía para refrigeración, iluminación y calentamiento de agua (ducha eléctrica).

Adicionalmente, el promedio de consumo en el sector residencial para un día laborable en la ciudad de Cuenca, que se obtuvo de la modelación es comparado con la que se muestra en Martínez Mosquera (2010) y con el consumo en el sector residencial, a nivel de alimentador, de la empresa de distribución eléctrica de Cuenca (Empresa Eléctrica Regional Centro Sur S.A., 2014) pudiéndose observar que, todas siguen un patrón similar, siendo esta última la más comparable con el modelo (Fig. 18).

En la primera hora de la mañana el consumo que muestra el modelo es menor en relación a los mostrados por la E.E.R.C.S y por Martínez Mosquera (2010). Esto es debido a que, en el modelo se considera que la refrigeradora se encuentra apagada y en la temperatura más baja.

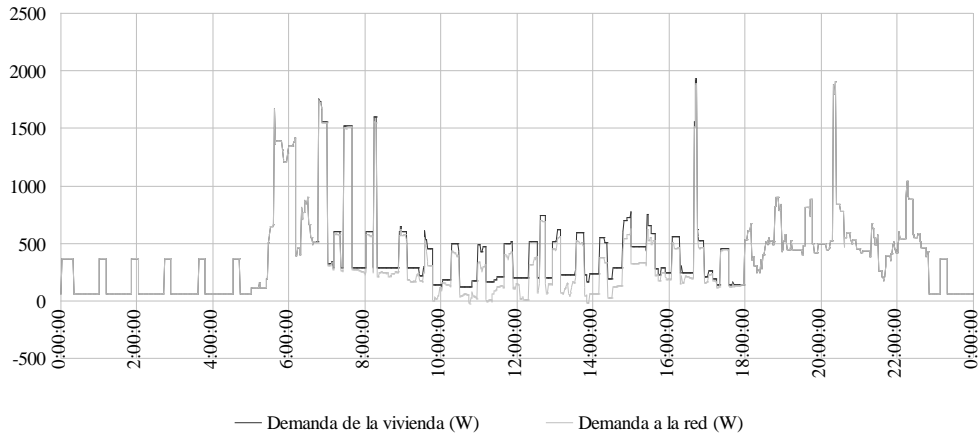


Figura 13. Integración oferta-demanda con 1 panel fotovoltaico.

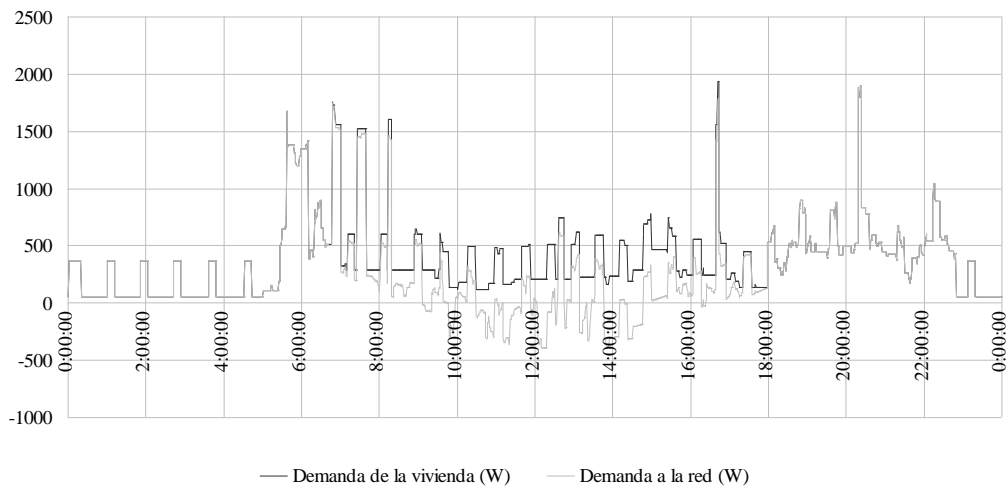


Figura 14. Integración oferta-demanda con 3 paneles fotovoltaicos.

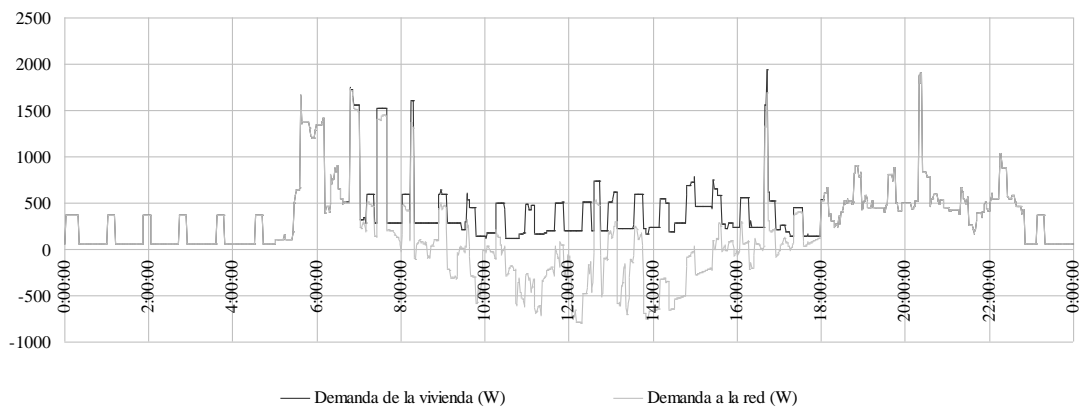


Figura 15. Integración oferta-demanda con 5 paneles fotovoltaicos.

Los datos de la E.E.R.C.S muestran una menor demanda durante la mañana y tarde, lo cual podría estar asociado a que durante este tiempo el número de personas que se encuentran en la vivienda disminuye, ya que muchas de éstas salen a realizar actividades fuera de la vivienda, sin embargo en las horas que se produce el pico de mayor consumo, los resultados del modelo predicen con mucha precisión cuándo se produce. Al terminar la noche los datos de E.E.R.C.S y Martínez Mosquera (2010)

muestran un mayor consumo. Esto se debe en parte a que el modelado de la iluminación no tiene en consideración que, en ocasiones, los ocupantes podrían dejar algunas luces encendidas mientras duermen.

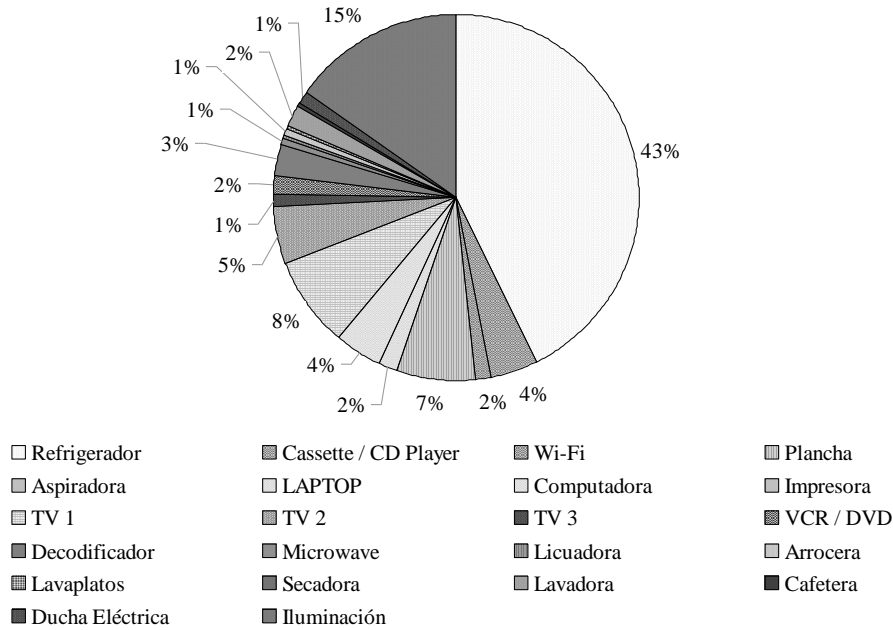


Figura 16. Usos finales de la energía usado en la ciudad de Cuenca según el modelo.

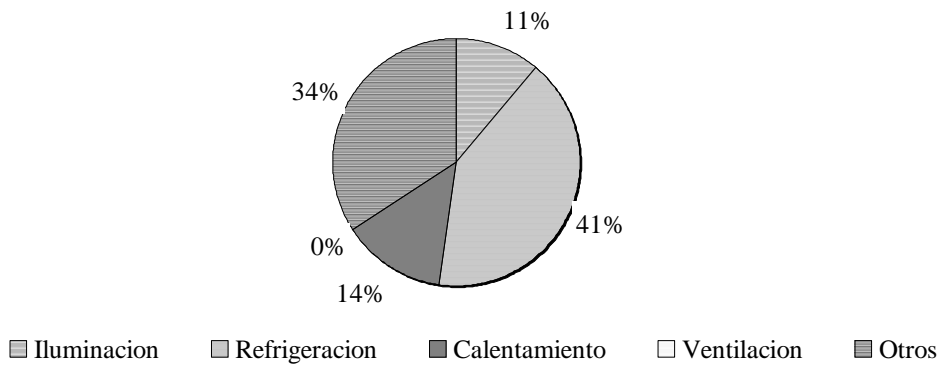


Figura 17. Usos finales de la energía en la ciudad de Cuenca según Martínez Mosquera (2010).

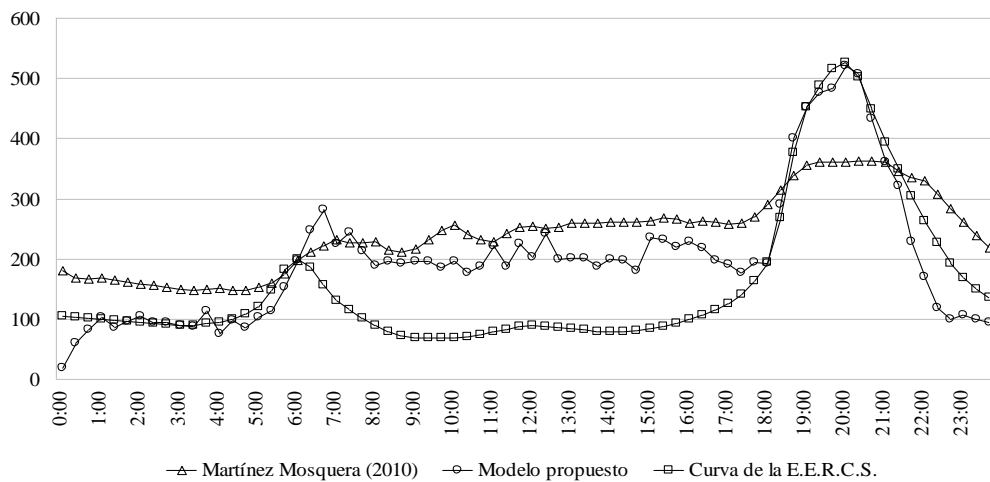


Figura 18. Curvas promedio del sector residencial en la ciudad de Cuenca para un día laborable.

7. CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS

Debido a los problemas que se presentan al utilizar combustibles fósiles para la generación de la energía eléctrica, en el mundo se vienen desarrollando otras fuentes alternativas, las cuales sin embargo acarrear sus propios problemas técnicos durante su aplicación.

La creciente demanda de energía limpia en nuestro planeta hace que se recurra más a las energías renovables no convencionales, esto significa un reto en los análisis de confiabilidad del suministro, para lo cual se crean nuevos métodos y herramientas que faciliten el estudio de estas fuentes y su aplicación a los sistemas de potencia que los requieran. Este es el caso de los sistemas solares fotovoltaicos aplicados a nivel residencial.

Como se puede observar en los ejemplos mencionados en este documento, a medida que se incrementa el número de paneles solares se incrementa la cantidad de energía que puede ser exportada a la red ya que el consumo de energía no es el más alto a la hora de mayor radiación. Dado que el mayor consumo de energía se da en horas en las cuales no se dispone de suficiente energía solar, es importante la incorporación de unidades de almacenamiento (baterías) acorde a las necesidades, para de esta manera, optimizar el sistema autónomo y depender menos de la red pública. Vale indicar que el costo de inversión de un sistema solar fotovoltaico (con y sin almacenamiento) no se ha considerado en este trabajo, aunque se recomienda en próximos estudios realizar una evaluación de dicha inversión y compararla con la alternativa de red pública.

Complementariamente, la incorporación de medidas “demand side management (DSM)” (Grandjean *et al.*, 2012) puede tener un gran impacto en el aprovechamiento del sistema fotovoltaico, esto incluye el desplazamiento de carga de las horas pico a las horas de menor demanda y mayor oferta. Esto se puede lograr incorporando a las viviendas sistemas de control automatizado o simplemente cambiando el hábito de la personas al utilizar ciertos equipos.

En el lado de la demanda, se tienen modelos avanzados para determinar la misma con precisión. Uno de estos modelos ha sido desarrollado en el presente trabajo, dando resultados que se asemejan a los obtenidos en estudios previos. Además, para efectos de comparación, se pueden hacer uso de softwares libres para estos fines, desarrollados por grupos especializados, como el de la Universidad de Waterloo, denominado “Smart residential load simulator” (SRLS, 2011).

El presente trabajo es parte de un proyecto de investigación que cubre otros aspectos importantes relacionados con las micro-redes eléctricos. Por ejemplo, al modelo estudiado se pretende incorporar, en el lado de la auto-generación, un generador eólico, almacenamiento de energía y mecanismos de control inteligente. En resumen, se plantea a partir de este modelo desarrollar algoritmos para el control de redes eléctricas inteligentes (Smart Grids) en el Ecuador. Un análisis más profundo de este tipo de redes va a permitir el dimensionamiento de sistemas híbridos para hogares y aportar al análisis del denominado “nuevo paradigma energético”, donde las energías renovables a pequeña escala y las tecnologías de la información juegan un papel preponderante.

Finalmente, con este modelo se puede determinar con exactitud las variables que tienen relación con la demanda residencial, incluido el consumo de equipos en “stand by” cuyo valor puede ser significativo, datos que son de mucha importancia para la planificación en las empresas distribuidoras. Este es un aspecto clave para el Ecuador pues partiendo de este análisis se puede estudiar también el impacto de incorporar nuevas cargas residenciales como las cocinas de inducción y duchas eléctricas.

AGRADECIMIENTO

Este trabajo es parte del proyecto de investigación “Control óptimo de la demanda y la generación de una micro-red eléctrica mediante sistema de control de red”, financiado por la Dirección de Investigación de la Universidad de Cuenca (DIUC).

BIBLIOGRAFÍA

- CPV, 2010. Promedio de personas por hogar, Cantón Cuenca. Disponible en <http://anda.inec.gob.ec/anda/index.php/catalog/270>.
- Duffie, J.A., W.A. Beckman, 2013. *Solar engineering of thermal processes* (4th ed.). Wiley, 130 pp.
- Empresa Eléctrica Regional Centro Sur S.A. CENTROSUR S.A., 2014. Website: <http://www.centrosur.com.ec/>.
- Fernandez Diaz, P. 1993. Energía solar. España.
- Grandjean, A., J. Adnot, G. Binet, 2012. A review and an analysis of the residential electric load curve models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 6539-6565.
- Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC), 2010. *Hogares según nivel socioeconómico por equipamiento en Cuenca (010150)*, Cuenca, Ecuador.
- Martínez Mosquera, P., 2010. *Usos finales de energía eléctrica y GLP en el Cantón Cuenca. Escenarios al año 2015*. Tesis de Maestría, 139 pp. Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador.
- Moldes, E.R., 2013. Flexible load management in Smart-grids. Student report, 56 pp. Aalborg Universitet. Disponible en http://projekter.aau.dk/projekter/files/76902940/Flexible_load_management_in_Smart_Grids.pdf.
- Richardson, I., T. Murray, 2011. Integrated domestic electricity demand and PV micro-generation model. Loughborough University, UK. Disponible en <https://dspace.lboro.ac.uk/2134/7773>.
- Richardson, I., M. Thomson, D. Infield, 2010. Domestic electricity use: A high-resolution energy demand model. *Energy and Building*, 10(42), 1878-87.
- Smart Residential Load Simulator (SRLS), 2011. University of Waterloo, Power and Energy Systems Group. Disponible en <https://uwaterloo.ca/power-energy-systems-group/>.
- Swan, L.G., V.I. Ugursal, 2009. Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 1819-1835.
- Universidad de Jaén, 2006. Disponible en http://www.ujaen.es/investiga/solar/07cursosolar/home_main_frame/02_radiacion/01_basico/images/posi_sol.gif.