

**OPTIMIZACIÓN DE RECURSOS ENERGÉTICOS A PARTIR DE LA  
UTILIZACIÓN DE UN DER Y DE LA INTEGRACIÓN DE EQUIPOS DE  
AUTOMATIZACIÓN**

**DANILO HERNANDO RUIZ AMAYA**

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA  
BOGOTÁ D.C  
2014**

**OPTIMIZACIÓN DE RECURSOS ENERGÉTICOS A PARTIR DE LA  
UTILIZACIÓN DE UN DER Y DE LA INTEGRACIÓN DE EQUIPOS DE  
AUTOMATIZACIÓN**

**DANILO HERNANDO RUIZ AMAYA**

**Trabajo de Grado para Optar al Título de  
Magister en Ingeniería Electrónica**

**Director**

**Ing. Diego Patiño**

**Ph.D**

**Co-Director**

**Ing. Andres Ladino**

**M.Sc**

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA  
BOGOTÁ D.C  
2014**

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
MAESTRÍA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**



<b>RECTOR MAGNÍFICO</b>	<b>P. JORGE H. PELÁEZ S.J</b>
<b>DECANO ACADÉMICO</b>	<b>ING. JORGE LUIS SÁNCHEZ</b>
<b>DECANO DEL MEDIO UNIVERSITARIO</b>	<b>P. ANTONIO J. SARMIENTO S.J</b>
<b>DIRECTOR DE POSGRADO</b>	<b>ING. CESAR NIÑO</b>
<b>DIRECTOR DEL PROYECTO</b>	<b>ING. DIEGO PATIÑO</b>
<b>CODIRECTOR</b>	<b>ING. ANDRES LADINO</b>

## **NOTA DE ADVERTENCIA**

“La universidad no se hace responsable de los conceptos emitidos por sus alumnos en su proyecto de grado, sólo velará porque no se publique nada contrario al dogma y la moral católica y porque los trabajos no contengan ataques o polémicas puramente personales. Antes bien, que se vea en ellos el anhelo de buscar la verdad y la justicia”

Artículo 23 de la Resolución No. 13, del 6 de Julio de 1946, por la cual se reglamenta lo concerniente a Tesis y Exámenes de Grado en la Pontificia Universidad Javeriana.

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi madre y mi hermana, por su incondicional apoyo.

A mi esposa, que nunca me dejó desfallecer acompañando cada uno de mis pasos.

A mi hijo, eterna fuente de motivación.

A mi director Diego Patiño quien me acompañó y apoyó en este proceso definitivo.

A Dios, mi guía espiritual.

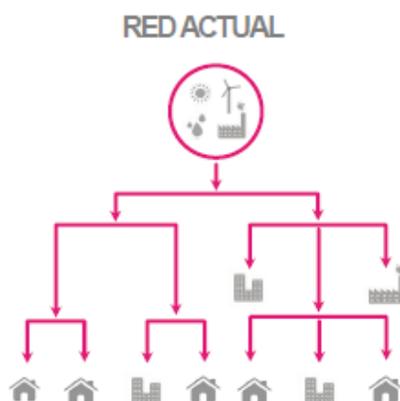
## CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
2.	OBJETIVOS.....	5
2.1	General.....	5
2.2	Específicos.....	5
3.	CONCEPTOS BÁSICOS.....	6
3.1	Smart Grids.....	6
3.2	Recursos Distribuidos de Energía / Distributed Energy Resources (DER):.....	7
3.3	Equipos Lutron:.....	8
3.4	Costo del kWh en Colombia.....	9
3.5	Herramienta de Optimización.....	10
3.6	Sistema Fotovoltaico.....	11
3.7.	Aproximación Numérica del Modelo.....	12
3.7.1.	Optimización del DER para el Suministro de Servicios de Energía.....	12
3.7.2.	Modelamiento de los Servicios de Energía.....	16
4.	ESPECIFICACIONES.....	18
4.1	Entrada del Sistema.....	18
4.2	Sistema.....	18
4.3	Salidas del Sistema.....	19
4.4	Diagramas.....	19
4.4.1.	Diagrama de Flujo.....	19
4.4.2.	Diagrama de Bloques.....	21
5.	FORMULACIÓN DEL PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN.....	24
5.1.	Definición del Problema de Optimización.....	24
5.2.	Aplicación del Problema de Optimización.....	25
6.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	31
6.1.	Programación del DER usando PSO.....	31
6.2.	Escenarios.....	31
6.2.1.	Escenario 0.....	31
6.2.2.	Escenario 1.....	36

6.2.3	Escenario 2 .....	40
6.2.4	Escenario 3 .....	44
6.2.4	Escenario 4 .....	48
7.	IMPLEMENTACION E INTEGRACION .....	53
8.	CONCLUSIONES.....	56
9.	BIBLIOGRAFÍA.....	58
10.	ANEXOS.....	60
10.1	Equipo de control Lutron Main Repeater .....	60

## 1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha observado el constante uso inadecuado de los recursos naturales y en especial de los recursos energéticos. Es por esto que se ha generado la necesidad de buscar nuevas fuentes de energía y disponer de ellas de manera conjunta e integrada, con el ánimo de obtener las mejores prestaciones del servicio energético de manera óptima y más económica, y con más beneficios para nuestro entorno y nuestra sociedad. El método tradicional de suministro de energía (*Véase figura 1*) está diseñado para asegurar el abastecimiento del servicio sin importar el recurso como tal y los recursos utilizados para generarla causando su encarecimiento y escasez y, ocasionando efectos negativos al medio ambiente como lo son el aumento de emisiones y el efecto invernadero.



*Figura 1 Método tradicional de suministro de energía*

Con estos problemas generados por la mala utilización del recurso se empieza a generar el interés e incremento por otro tipo fuentes de energía como lo son los recursos energéticos distribuidos y las fuentes alternativas, tales como: parques eólicos, sistemas de cogeneración, plantas fotovoltaicas, centrales térmicas de biomasa, etc. Es una realidad que cada vez se hace más importante gestionar, de forma óptima, dichos recursos y por tanto, conseguir una mejor utilización de los mismos es por esto que nace el concepto de Smart Grids donde se pretende reducir el consumo a través de la eficiencia energética y a la respuesta en la demanda produciendo así una mezcla de fuentes de energía convencionales con energías alternativas e iniciativas de eficiencia energética. Pero esto no solo ha sido de interés científico, o gubernamental sino los usuarios también empiezan a ser parte fundamental dentro del proceso en donde, como actores dentro de este nuevo reto, toman la iniciativa para reducir su demanda energética lo puedan hacer a través de la adquisición de electrodomésticos de consumo eficiente, sistemas de control de iluminación o instalando controladores para hogares inteligentes entre otras (1), adicionalmente se le permitirá al usuario tomar decisiones de acuerdo con sus gustos y preferencias. En este nuevo espacio, y como

beneficios, los consumidores podrán influir en el precio y cantidad de energía generada (en el que los consumidores tendrán una participación activa pues son ellos los que venderán energía, no generándola, sino dejando de consumirla, habrá mayor confiabilidad del servicio de energía eléctrica, el usuario podrá seleccionar el tipo de abastecimiento más conveniente, mejor control y administración de las fuentes de energía y las cargas, mayor velocidad de respuesta frente a aumentos en la demanda del servicio energético, menor contaminación ambiental, entre otros (2).

Para el desarrollo del presente proyecto, se toma como referencia el Costo kWh suministrado por la empresa de energía de Bogotá, Codensa, para utilizarlo como parámetro de entrada de la función de optimización que se ejecutará en la CPU. En la CPU se propone ejecutar una técnica de modelamiento del suministro de energía eléctrica basado en el algoritmo utilizado en la bibliografía del autor MICHAEL ANGELO A. PEDRASA la cual esta referenciada en el presente documento (3) (2) pero el cual está modificado de acuerdo con los equipos que se van a utilizar (se modifica el modelo matemático para una optimización de tipo binario restringido que opera sobre electrodomésticos y dispositivos de iluminación y para optimizar su encendido o apagado. Se excluyen los equipos de calefacción y bomba de piscina los cuales son los que utiliza el autor). El resultado de la función de optimización servirá como dato para operar los DER (Distributed Energy Resources (DER)) (4). Los DER son equipos y métodos que usualmente están ubicados cerca del consumidor (para el presente proyecto será el conjunto de equipos conformados por la CPU y por los equipos de automatización (5) (6)). Después de haber ejecutado la función de optimización y de obtener un resultado, se transformará este resultado en un código ASCII que será enviado como dato serial al equipo de automatización que operará los electrodomésticos y/o dispositivos de acuerdo con el resultado de la función de optimización. La comunicación entre la CPU y el equipo de automatización se hará por medio de la interfaz de RS232 y la comunicación entre el equipo de automatización y los electrodomésticos y/o sistema de iluminación se hará, para casi todos los casos, de manera inalámbrica. Estos equipos de automatización (5) (6), que permiten una interfaz para la regulación y control de dispositivos físicos dentro de una red de energía (7) o para que operen entre ciertos rangos de acuerdo a determinados criterios que podrían ser preestablecidos o podrían variar de acuerdo a los resultados arrojados por el DER. Remitirse al diagrama de esta conexión (*Véase Figura 1*).

En definitiva debido a que los Recursos Energéticos Distribuidos pueden estar comprendidos en cuatro áreas: Generación, almacenamiento, control y administración se genera un nuevo espacio de información para la mejora de la eficiencia energética permitiendo medir el consumo de una instalación, almacenar y tratar los datos, gestionar dicho consumo y vigilar que no exceda de unos determinados valores; se facilita también la presentación de informes o resultados, gestionar horarios para distintos consumos, establecer una previsión de consumos entre otros.

El documento está perfilado de la siguiente manera: En el primer parte se obtiene el Costo kWh como parámetro de entrada al sistema, este modelamiento se hace a partir de los parámetros de la facturación de Codensa y de la página de internet de XM. El costo del Kilowatt hora es el resultado de varias variables que son inherentes al proceso del suministro de energía. El valor de dichas variables no están al alcance del usuario final pero si definen el valor del Costo kWh de un mes. El

valor del Costo kWh de un mes determinado se tomara como parámetro de entrada al sistema escalando el problema a valores reales cuando se hable de la demanda de la energía equivalente y el costo de la misma.

En la segunda parte se propone el modelamiento matemático del servicio de energía. El autor Michael Angelo A. Pedrasa, et al: “Coordinated Scheduling of Residential Distributed Energy Resources to Optimize Smart Home Energy Services, modela el suministro de energía para una casa inteligente combinando dispositivos convencionales en el hogar con equipos de almacenamiento de energía. Para el modelamiento matemático, el autor utiliza las tendencias de uso y las preferencias en el consumo energético mezclado con cifras y datos de un proceso de consumo energético convencional. Este mismo principio utilizado en el artículo, es utilizado para modelar el escenario propuesto para el presente trabajo de grado donde se incluyen equipos de iluminación y equipos de estados ON/OFF y excluyendo los equipos almacenadores de energía.

En la tercera parte se hace uso de la plataforma de simulación de la librería de optimización de Matlab. El software de Matlab cuenta con una librería de Optimización que incluye funciones ya creadas que permitirán validar y verificar el modelo matemático creado y mencionado con anterioridad. Adicionalmente Matlab permite crear las funciones y scripts necesarios para ejecutar las funciones matemáticas que definen el problema entero de optimización

En la cuarta parte se utiliza la integración y comunicación entre la CPU y el modelo a escala. Se crea un modelo a escala con equipos del fabricante Lutron que permiten una integración por conexión del puerto serial DB9 y con instrucciones enviadas a través de comandos de RS232. Lutron ha diseñado sus propios comandos para que sus equipos sean integrables por medio de una estructura en dichos comandos. El propósito es que por medio del PC, se envíen los comandos correctos del resultado del problema de optimización, y generen un cambio sobre el modelo a escala de acuerdo a las condiciones definidas para el problema.

El diagrama completo del sistema utilizado se puede ver en la *figura 2*.

Y para finalizar se tienen los análisis de resultados y conclusiones.

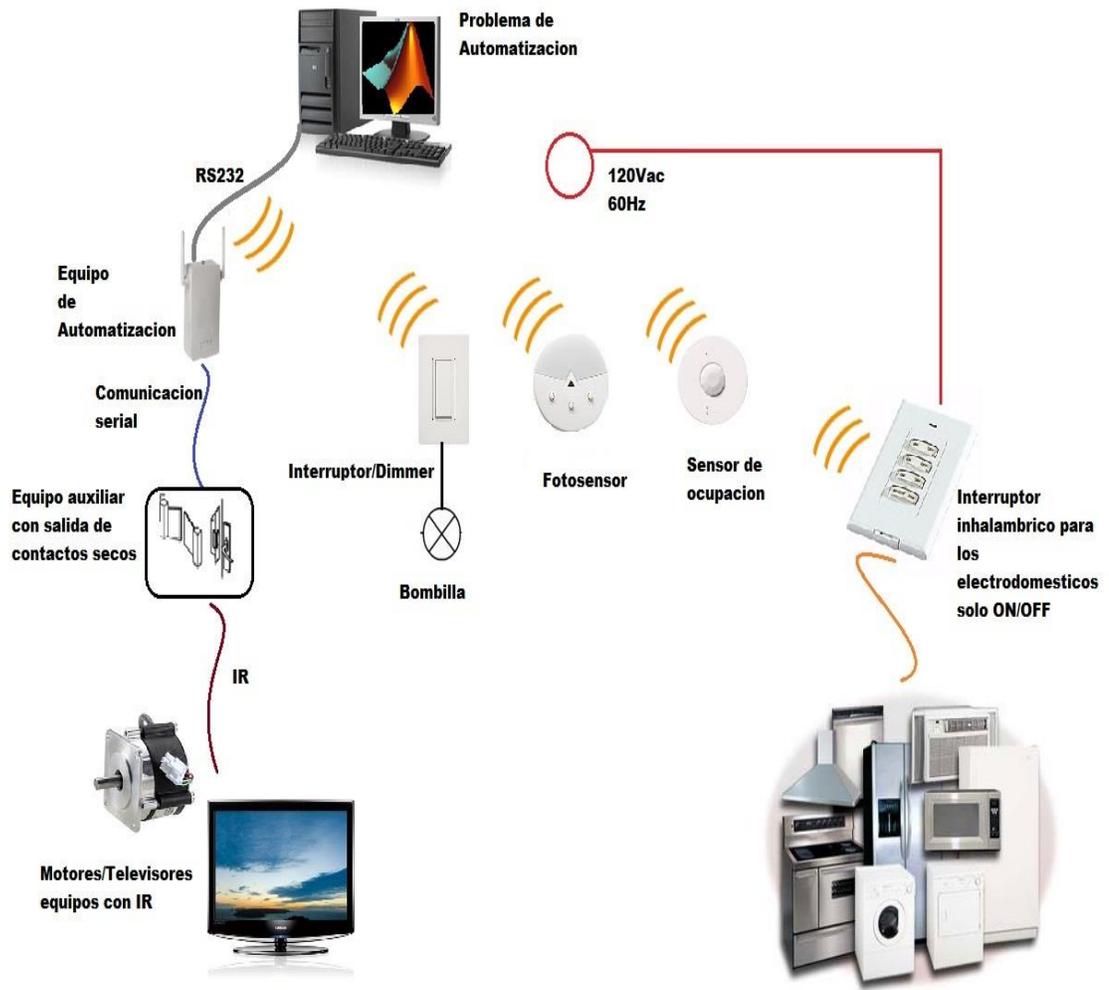


Figura 2 Diagrama de funcionamiento y conectividad.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 General

IMPLEMENTAR UN ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN EN LÍNEA PARA LA GESTIÓN DE LA ENERGÍA EN EQUIPOS Y DISPOSITIVOS HABITUALES EN EL HOGAR

### 2.2 Específicos

- Emular datos de la empresa de energía CODENSA tales como el costo kilovatio/hora de acuerdo a la hora del día, consumo promedio y costo de racionamiento para ser utilizados como parámetros de entrada dentro del algoritmo de optimización.
- Implementar, en el planificador DER, el algoritmo de optimización de recursos de energía utilizado en el artículo de Michael Angelo A. Pedrasa, student member, ieee, ted d. spooner, and Iain f. macgill, “Coordinated Scheduling of Residential Distributed Energy Resources to Optimize Smart Home Energy Services, modificado para equipos y dispositivos habituales en el hogar, por medio de Matlab y su herramienta de optimización.
- Realizar la comunicación entre la CPU (la cual contiene en el planificador el algoritmo de optimización), y los equipos de automatización de marca Lutron medio del protocolo de comunicación de RS232.
- Diseñar modelo a escala donde se integra la CPU con el planificador, y los equipos de automatización.

### 3. CONCEPTOS BÁSICOS

En los conceptos básicos se encuentra el resultado obtenido del estado del arte para el desarrollo del sistema. Luego se muestra una breve introducción de: Smart Grids, importante para entender el sentido del proyecto. Recursos distribuidos de Energía en este se enfoca el proyecto. Equipos Lutron, siendo las herramientas que se utilizaron para el desarrollo del proyecto. El costo kWh en Colombia, dato fundamental para la implementación del proyecto. Herramienta de optimización, la técnica utilizada para resolver el problema matemático. Sistema Fotovoltaico, ya que hace parte del sistema general y finalmente la aproximación numérica del modelo, datos para la operación de los equipos DER (Recursos distribuidos de energía.)

#### 3.1 Smart Grids

Red Eléctrica inteligente. Es una forma de gestión eficiente de la electricidad que utiliza diferentes tecnologías, entre ellas la informática, para optimizar la distribución y el uso del recurso energético (8). Se requiere para ello una infraestructura moderna que maximiza la entrada y distribución de energía y a la vez sea económica de operar y mantener. La red inteligente se basa en las conexiones entre proveedores, distribuidores y consumidores. Véase figura 3

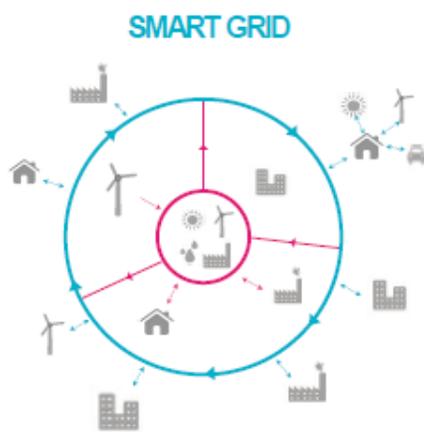


Figura 3 Smart Grid

Algunos de los beneficios de una red inteligente:

- Monitorización remota y control de la producción y consumo de energía-
- Medición precisa utilizando tecnología digital.
- Reducción de costes de electricidad debido a un consumo más preciso y sensible.
- Una mejora en la toma de decisiones del consumidor sobre su consumo de energía.
- La comunicación bidireccional entre la red y los usuarios finales.

- Gestión más eficaz de la red por parte de los proveedores.
- Implementación de la seguridad cibernética en todo el sistema de protección.
- Relación entre proveedores y consumidores de energía con más información y cooperación.

Adicionalmente con la arquitectura planeada para la red de proveedores de energía, dará lugar a mejoras como las siguientes:

- Seguimiento y control sobre todos los componentes de red.
- Mayor seguridad de los ciber-ataques.
- PC basado en la toma de decisiones, facilitando la rápida respuesta y resolución.
- Reducción de la frecuencia y la duración de los cortes de energía, reduciendo el número de apagones regionales y otros problemas dentro de la red.
- El ahorro de energía, tanto en cantidad de energía requerida y el precio que se paga por ella  
(9) véase figura 8

Debido a la condición del sistema tal y como lo conocemos, el precio pagado por la energía no es siempre el real. Al menos dos de los factores que causan esto son incontrolables: La capacidad de medir con precisión el consumo de energía y la variabilidad de la demanda.

### 3.2 Recursos Distribuidos de Energía / Distributed Energy Resources (DER):

La tecnología de la energía distribuida es hoy una realidad debido al desarrollo de equipos y programas de nueva generación, denominados Recursos Energéticos Distribuidos que ofrecen máxima confiabilidad y mínimo mantenimiento. Normalmente son equipos ubicados cerca de usuario y donde tienen como función hacer una gestión de la energía y distribuirla de manera eficiente. (Véase figura 4)



Figura 4 Comunicación entre dispositivos para su gestión

Figura tomada de <http://www.inti.gob.ar/e-renova/erTO/er49.php>

Los Recursos Energéticos distribuidos están comprendidos básicamente en tres áreas: Generación, Almacenamiento y Control y administración

Para el presente se trabaja sobre el área de CONTROL Y ADMINISTRACIÓN.

Funciones en el área de Control:

- Apagado o encendido sobre los dispositivos (equipos de iluminación y electrodomésticos)
- Distribución de los flujos de energía.

Funciones en el área de Administración:

- Gestión de los picos de demanda.
- Suministro de información de consumo, tiempo de utilización ahorro económico.
- Almacenar y tratar los datos.
- Vigilar que no exceda de unos determinados valores
- Presentación de informes o resultados

Beneficios para el usuario:

- Mayor confiabilidad del servicio de energía eléctrica
- El usuario selecciona su fuente de aprovisionamiento más conveniente, de menor costo y Mejor calidad.
- Permite obtener una mayor predicción del costo de la energía
- Mejor control y administración de la fuente de energía y de las cargas, incrementando El rendimiento.
- Permite la cogeneración en el lugar de consumo, optimizando la eficiencia energética.
- Menor contaminación ambiental

Beneficios para la red:

- Generación y almacenamiento cercanos al lugar de consumo (10): implica menores Pérdidas de energía en los sistemas de transmisión y distribución.
- Reduce las inversiones iniciales. La inversión se realiza a medida que crece la demanda de Energía; menor riesgo financiero.
- Reduce el congestionamiento de las líneas de transmisión.
- Reduce ampliaciones y actualizaciones técnicas en la infraestructura de las redes de Distribución de energía.
- Permite la óptima utilización de la red existente.
- Incrementa la confiabilidad de las redes.
- Mejora la estabilidad de la tensión de la red eléctrica.

### **3.3 Equipos Lutron:**

El control total del hogar es la capacidad de ajustar la cantidad de luz, la energía eléctrica, temperatura, encendido de dispositivos, entre otras, que usan los electrodomésticos en un hogar. Se presenta el equipo de control de Lutron con referencia RadioRa2, el cual usa una tecnología inalámbrica el cual permite una integración vía RS232; los ahorros de energía con RadioRA 2

llegan al usuario mediante una combinación de control de luces, switcheo On/Off de luces y electrodomésticos y temperatura. (11)

Aspectos básicos del ahorro de energía

- Control de la iluminación: Atenuar un foco de luz estándar; ahorra un 20% de energía de iluminación. Si atenúa más, ahorra aún más. Los sensores y un reloj astronómico también ayudan a ahorrar energía al apagar las luces cuando no se necesitan. Posibles ahorros de energía: 20%.
- Control de electrodomésticos: Muchos electrodomésticos (como los monitores de computadora) consumen energía las 24 horas del día, por lo que representan hasta el 10% del uso de electricidad de un hogar típico. Interrumpir esta energía inactiva en espera como parte de un sistema de control total del hogar ahorra energía. Posibles ahorros de energía: 10%.

Para un detalle mayor de los equipos remitirse a los ANEXOS

### 3.4 Costo del kWh en Colombia

Cómo se calcula la factura de energía?

En el mercado regulado, donde Codensa es el comercializador, el valor de la tarifa por cada Kwh se determina por la fórmula tarifaria establecida por la CREG (entidad encargada de regular el sector eléctrico) en la resolución 119 de diciembre de 2007. Esta fórmula establece los valores a trasladar al usuario generados por cada eslabón de la cadena (12).

$$CU_{v,n,m,i,j} = G_{m,i,j} + T_m + D_{n,m} + C_{vm,i,j} + PR_{n,m,i,j} + R_{m,i} \quad (1)$$

$CU_{v,n,m,i,j}$ : Componente variable del costo unitario (\$/kWh) para los usuarios conectados en nivel de tensión n, correspondiente al mes m, del comercializador i en el mercado j

$G_{m,i,j}$ : Costo de compra de energía (\$/kWh) para el mes m, del comercializador i, en el mercado j, determinado con base en los costos de compra de energía del mes inmediatamente anterior.

$T_m$ : Costo por el uso del sistema de transmisión nacional (\$/kWh) para el mes m.

$D_{n,m}$ : Costo por el uso del sistema de distribución (\$/kWh) correspondiente al nivel de tensión n para el mes m.

$C_{vm,i,j}$ : Margen de comercialización correspondiente al mes m (\$/kWh), del comercializador i, en el mercado j.

$PR_{n,m,i,j}$ : Costo de compra, transporte y reducción de pérdidas de energía (\$/kWh) hasta el nivel de tensión n, para el mes m, del comercializador i, en el mercado j.

$R_{m,i}$ : Costo de restricciones y servicios asociados (\$/kWh) con generación, asignados al comercializador i en el mes m.

### Convenciones:

- n: Nivel de tensión de conexión del usuario.
- m: mes para el cual se calcula el costo unitario
- i: comercializador
- j: mercado de comercialización

Adicionalmente, de acuerdo con la ley 142 de 1994, los predios clasificados con actividad comercial e industrial deberán pagar una contribución del 20% sobre el valor total de su consumo de energía, para subsidiar a los estratos 1, 2 y 3. Según la ley 675 de 2001 y la circular 18070 de 2005, pueden estar exentos de contribución áreas de consumo de propiedad horizontal, hospitales, centros educativos y asistenciales sin ánimo de lucro, entre otros, que cumplan con los requisitos y entreguen la documentación requerida.

## 3.5 Herramienta de Optimización

La optimización por enjambre de partículas (PSO) se inicializa con un grupo de partículas al azar (soluciones) y luego busca optima mediante la actualización de las generaciones. En cada iteración, cada partícula se actualiza siguiendo dos valores "mejores". La primera de ellas es la mejor solución (fitness) que ha logrado hasta el momento. (El valor de fitness también se almacena.) Este valor se llama pbest. Otro "mejor" valor que se rastreó por el optimizador de enjambre de partículas es el mejor valor, obtenido hasta el momento por cualquier partícula en la población. Este mejor valor es llamado un gbest mejor mundial. Cuando una partícula toma parte de la población como sus vecinos topológicos, el mejor valor es un mejor local y se llama lbest. (13)

Para comprobar la fiabilidad del algoritmo que se ha modificado, se realizara una optimización a través de la técnica llamada PSO u Optimización por enjambre de partículas. Esta biblioteca contiene la función permite minimizar sistemas con una función objetivo.

Optimización de enjambre de partículas (PSO) es una técnica de optimización estocástica de población desarrollado por el Dr. Eberhart y el Dr. Kennedy en 1995, inspirado en el comportamiento social de las aves y/o de los peces. PSO tiene muchas similitudes con las técnicas de computación evolutiva, como los algoritmos genéticos (GA).

El procedimiento PSO se resume de la siguiente manera:

1. Inicialización. La posición y la velocidad de todas las partículas se inicializan al azar, y los mejores puntos iniciales globales y personales se eligen mediante la evaluación de la función objetivo. Las posiciones iniciales pueden ser pre-procesadas para acelerar la convergencia o para mejorar la probabilidad de la localización de la solución.
2. movimiento de partículas. La velocidad y la posición de todas las partículas se actualizan
3. Evaluación de fitness. La condición física de todas las partículas son evaluados, y las mejores marcas globales y personales se actualizan si es necesario.
4. Iterar. Los pasos 2 y 3 se repiten hasta que se alcanza el número máximo de iteraciones o una detener criterio es satisfecha. La mejor de partícula global al final de la simulación se toma como la solución para el problema de optimización. En algunos casos, se registran los valores históricos de la mejor mundial, y la mejor se escoge.

### **3.6 Sistema Fotovoltaico**

#### *Sistemas interconectados (14)*

Se llaman así porque están interconectados a la red eléctrica. Es decir que toda la energía que genera los paneles solares se inyecta directamente a la red de distribución eléctrica de la Residencia, es decir, operan en paralelo con la red eléctrica.

Estos sistemas en ocasiones son más económicos ya que no necesitas de un banco de baterías, que en ocasiones son los dispositivos más costosos del sistema aislado y los que mayor mantenimiento requieren.

En la mayoría de los casos, para los sistemas interconectados, se tiene que realizar un contrato con tu compañía de electricidad local que verifica que todo tu sistema cumpla con las regulaciones, ya que la energía que generan, la envían a la red nacional y es fundamental garantizar su calidad.

Comparación de sistemas de energía solar fotovoltaicos: Aislado vs. Interconectado

	Interconectados	Aislados
<b>Costo Iniciales</b>	Económico	Costoso (baterías)
<b>Costos Mantenimiento</b>	Mínimos sólo limpieza	Limpieza más costos de baterías
<b>Flexibilidad</b>	No hay problema por sobre-uso	NO podemos gastar más de lo que calculamos
<b>Independencia</b>	Dependemos del sistema eléctrico nacional	Totalmente independientes
<b>Obligaciones Legales</b>	Necesitamos avisar y hacer contrato con CFE	No debemos avisar ni pedir permiso a nadie
<b>Implementación</b>	Fácil	Poco más complicado

Tabla 1. Comparación de sistemas de energía fotovoltaicos.

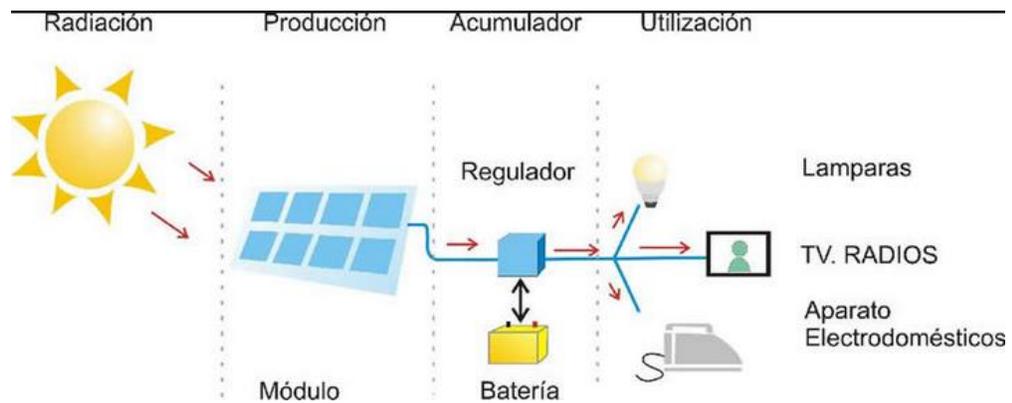


Figura 5. Sistema Fotovoltaico

### 3.7. Aproximación Numérica del Modelo

#### 3.7.1. Optimización del DER para el Suministro de Servicios de Energía

El beneficio neto es igual al total de los beneficios derivados de los servicios menos el costo del consumo de electricidad. El planificador DER crearía una estrategia de cómo el DER debe ser operado. Se maximiza el beneficio neto mediante el aprovechamiento de éstos punto:

- Desajuste temporal entre la demanda de servicios de energía y el consumo de electricidad. la presencia de alguna forma de almacenamiento podría disociar el período de la demanda de servicios a partir del período de la electricidad el consumo.
- Los servicios de energía flexibles. Algunos servicios pueden tener duraciones variables y tiempo de encendido variable, otros pueden ser interrumpidos o ejecutados en otro instante de tiempo.
- Elementos de almacenamiento de energía: es posible cargar dicho elemento en los momentos de baja demanda de energía sobre todo cuando su costo es más bajo. Adicionalmente es posible la entrega de energía en las horas pico de alta demanda y mayor costo, esto podría reducir el costo de la prestación del servicio tradicional.
- La variación temporal del costo de la electricidad. Para efectos del presente proyecto se simulan escenarios donde el costo de la energía varía durante las 24 horas del día, esto para tomar ventaja de los horarios más apropiados para suministro o demanda de energía. Como se mencionó es un caso hipotético, puesto que en Colombia no se tienen dichas variaciones. El planificador entonces contribuye a la minimización los picos de demanda.

Los beneficios derivados de los servicios se determinan a partir de la variación temporal de la demanda y valor de la "energía equivalente." La estrategia de operación DER será en forma de un horario, o un conjunto de acciones recomendadas en cada intervalo del horizonte de simulación. El planificador también cuantificar los ahorros efectuados por funcionamiento del DER utilizando la estrategia, y este resultado puede ser utilizado para la toma de decisiones de inversión.

La programación es esencialmente un problema de optimización que tiene como objetivo encontrar el horario de operación de DER  $x$  que minimiza el costo del consumo del servicio de energía. La formulación matemática general del problema de optimización es minimizar

$$\sum_{t=1}^T \lambda_{ES,i}(t) * U_{ES,i}(t) - \lambda_e(t) * P_e(t, x) \quad (1)$$

Se utiliza el modelo matemático del artículo de Michael Ángel A. Pedrasa (2) , pero modificado y modelado para electrodomésticos y luminarias habituales en los hogares.

Luego de evaluar modelo matemático planteado en el artículo, se ajustó para las condiciones propuestas en el Trabajo de Grado en mención, con el siguiente resultado:

$$\sum_{t=1}^T \lambda_{ES,must-run}(t) * U_{ES,must-run}(t) + \lambda_{ES,Bat}(t) * U_{ES,Bat}(t, x_{Bat}) + \lambda_{ES,Light}(t) * U_{ESLight}(t, x_{Light}) + \lambda_{ES,App}(t) * U_{ESApp}(t, x_{App}) - \lambda_e(t) * P_e(t, x) \quad (2)$$

El primer término hace referencia a los servicios que deben estar disponibles todo el tiempo. El segundo y tercer término hace referencia a los servicios que deben estar disponibles de manera intermitente y El tercer término hace referencia al consumo de electricidad.

Definiendo un poco mejor cada uno de los términos

- $U_{ES}(t)$  → es la demanda por la energía equivalente del servicio.  
 $U_{ESLight}$  Medido en Watt es la demanda por el servicio de Iluminación  
 $U_{ES,must-run}(t)$  Se considera un servicio de energía denominado MUST-RUN, el cual hace referencia a un servicio que debe estar disponible o conectado las 24 horas del día, con un consumo constante durante el día.  
 $U_{ESApp}$  Medido en Watt es la demanda por el servicio eléctrico para el electrodoméstico
- $X$  → operación del DER (para el presente proyecto es el equipo o main repeater de Lutron que ejecuta las acciones para el DER).  
 $x_{Light}$  → Variable de decisión para el sistema de iluminación. Vector de 24 elementos cuyas coordenadas son On/Off (1 ó 0).  
 $x_{App}$  → Variable de decisión para el electrodoméstico. Vector de 24 elementos cuyas coordenadas son On/Off (1 ó 0).  
 $x_{Bat}$  → Variable de decisión para la batería. Vector de 24 elementos cuyas coordenadas son On/Off (1 ó 0).
- $U_{ES}(t) = \eta * P_e(t)$  → Término que depende de los hábitos de consumo y donde  $\eta$  hace referencia a la eficiencia del electrodoméstico.
- $\lambda_{ES}(t)$  → Valor monetario percibido o computado por el usuario (kWh). Describe la variación horaria del valor del dinero que el propietario asigna a la energía equivalente del servicio (para el caso de iluminación, energía lumínica, para el caso de dispositivos o electrodomésticos energía eléctrica).  
 $\lambda_{ES,Bat}(t)$  → Describe la variación horaria del valor del dinero que el propietario asigna a la energía equivalente del servicio eléctrico para las baterías  
 $\lambda_{ES,App}(t)$  → Describe la variación horaria del valor del dinero que el propietario asigna a la energía equivalente del servicio eléctrico para los electrodomésticos.  
 $\lambda_{ES,Light}(t)$  → Describe la variación horaria del valor del dinero que el propietario asigna a la energía lumínica equivalente del servicio de iluminación.
- $\lambda_e$  → Costo de la electricidad (\$/kWh)
- $P_e$  → Consumo total de electricidad por hora (kWh).

Restricciones

- Restricciones del tipo  $A*x \leq B$  (desigualdades lineales)
  - Máximo consumo de potencia del electrodoméstico en el día:  $x_{App} < 800$  W (por hora)

- Máxima consumo de potencia del sistema de iluminación en el día:  $x_{\text{Light}} < 800 \text{ W}$  (por hora)
- Máxima consumo de potencia de la batería en el día:  $x_{\text{Bat}} < 1000 \text{ W}$  (por hora)
- $x_{\text{App}} > 0$
- $x_{\text{Light}} > 0$
- $x_{\text{Bat}} > 0$
- Lower Boundary (LB) = 1;
- Upper Boundary (UB) = 23;
- Las baterías deben estar disponibles a cualquier hora del día
- El electrodoméstico no debe funcionar en la madrugada.

Por la naturaleza del problema, se utiliza el PSO (Optimización por enjambre de partículas) como herramienta de optimización debido a que los algoritmos de inteligencia de enjambre tienen una enorme ventaja sobre otros tipos de métodos de optimización matemática y es que sólo requieren conocer los valores que toma la función objetivo para cada una de las soluciones candidatas para poder proponer nuevas y mejores soluciones. De acuerdo a lo mencionado con anterioridad, la función objetivo sugiere que es: Restringida, paramétrica, no convexa, binaria. De acuerdo a la definición del tipo de problema se determina que una manera apropiada de resolver este tipo de problemas de optimización es a través de una técnica de enjambre que ofrece gran ayuda para encontrar una solución óptima al problema gracias a que busca que el enjambre converja rápidamente hacia las mejores soluciones. El propósito de este modelo de optimización tipo enjambre es encontrar la solución de la función de costo por medio del comportamiento colectivo de un grupo de partículas  $q$  pueden tener un comportamiento complejo; cada una de estas partículas puede ser una solución candidata. El movimiento de una partícula alrededor de un espacio de solución se ve afectado por su momento empujando a la mejor solución ubicada por el enjambre (mejor Global) y empujando a la mejor ubicación que la partícula ha llegado (mejor Personal). El movimiento de la partícula está descrito por la velocidad y posición de cada partícula si el mejor Global y el mejor Personal son la mejor posición entonces las coordenadas de  $V$  y  $P$  está dada por:

$$v_i^{t+1} = w \cdot v_i^t + c_1 \cdot \mathbf{rand}() \cdot (P_{Gbest,i}^t - P_i^t) + c_2 \cdot \mathbf{rand}() \cdot (P_{Pbest,i}^t - P_i^t) \quad (3)$$

$$p_i^{t+1} = P_i^t + v_i^{t+1} \quad (4)$$

$c_1$  y  $c_2$  son los pesos,  $w$  es la contribución del momentum de la partícula a su velocidad y  $\mathbf{Rand}()$  es un número aleatorio entre 0 y 1.

EL procedimiento con el PSO se resume de la siguiente manera:

1. Inicialización: La posición y velocidad de las partículas son inicializadas de manera aleatoria y el mejor Global y mejor Personal son escogidos por la evaluación de la función objetivo.

2. Movimiento de la partícula: se actualiza velocidad y posición de cada partícula
3. Evaluación: el mejor Global y mejor Personal son actualizados de ser necesario.
4. Iterar: se repiten pasos 2 y 3 hasta q los criterios sean satisfecho o las iteraciones sean alcanzadas. La mejor de partícula global (Gbest) al final de la simulación se toma como la solución para el problema de optimización.

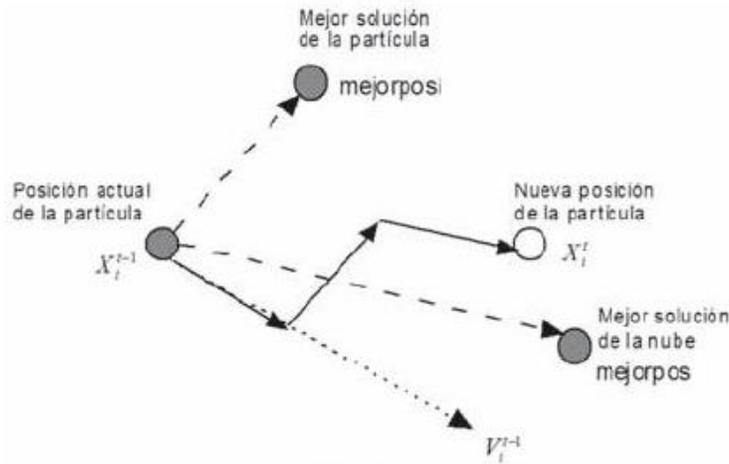


Figura 6 Representación gráfica del movimiento de una partícula

Figura tomada de [http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0123-921X2010000100003&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0123-921X2010000100003&script=sci_arttext)

En la figura 6. las flechas de línea discontinua representan la dirección de los componentes cognitivo y social. La flecha punteada discontinua representa la velocidad actual de la partícula. La flecha de línea continua representa la dirección que toma la partícula para moverse desde la posición actual hasta la nueva posición.

### 3.7.2. Modelamiento de los Servicios de Energía

Los servicios de energía son formas de energía y procesos de los cuales el usuario deriva o asumen el valor de la energía involucrada en el proceso, como por ejemplo la iluminación. La demanda y el valor de los servicios de energía, cambian con el tiempo. La demanda de un servicio es requerida en unas horas y por ende no será necesario dicho servicio más allá de dichas horas, además de la conveniencia de disponer del servicio en las horas pico seleccionadas por el usuario; se podría decir que es el valor que el usuario está dispuesto a pagar por un servicio de energía (es importante definir la clase de servicio para saber en qué unidades se trabaja). La demanda por un servicio de energía puede ser modelada como series de tiempo.

El valor de un servicio es una cantidad monetaria que un usuario está dispuesto a pagar para que el servicio sea suministrado. Dicho de otra manera, es la cantidad de dinero que un usuario estaría dispuesto a pagar por no recibir ese servicio.

En el presente proyecto, en la técnica de modelamiento, el valor del servicio es asignado a cada unidad de energía que realiza el servicio, permitiendo la distinción entre la energía y la energía eléctrica consumida por el equipo que entrega el servicio.

La energía que ejecuta el servicio, bien sea, eléctrica, lumínica, térmica o mecánica, puede ser referida como la “Energía Equivalente”, colocar valor a esta energía equivalente permitiría diferenciar un servicio de otro de la misma clase. Dentro del desarrollo del presente proyecto, y de acuerdo a la nomenclatura utilizada en el artículo de referencia, la “Energía Equivalente de cualquier servicio de denotará como  $U_{ES}(t)$  y en las unidades correspondientes al servicio de energía que se esté trabajando. La cantidad de  $U_{ES}(t)$  depende directamente de los hábitos de consumo del usuario. Por otro lado, la variación horaria del valor del dinero en el tiempo, denotado por  $\lambda_{ES}(t)$  corresponde al valor que asigna el usuario a dicha “Energía Equivalente” del servicio por unidad de energía. Su valor monetario,  $\lambda_{ES}(t)$ , es percibido o computado por el usuario.

La determinación de la “Energía Equivalente” está fuertemente ligada con el proceso involucrado en la conversión de energía hecha por el dispositivo. Si la conversión de la energía está relacionado con la eficiencia,  $\eta$ , del dispositivo entonces:

$$U_{ES}(t) = \eta * P_e(t) \quad (5)$$

La relación entre la “Energía Equivalente” de un servicio  $U_{ES}(t)$ , y la energía eléctrica consumida por el dispositivo es  $P_e(t)$ .

El presente modelo pretende permitir a los usuarios ajustar el beneficio hasta que el usuario este satisfecho con la eficiencia de la provisión del servicio. Vale la pena mencionar que el método convencional de suministro de un servicio es asignar un alto beneficio a todos los servicios y la provisión será optimizada por la minimización del costo de la provisión de electricidad a los consumidores.

## 4. ESPECIFICACIONES

La aplicación desarrollada en Matlab fue diseñada para realizar las siguientes acciones:

- Selección de inicio modo de trabajo
- Obtener un valor de referencia del Costo Kilo Watt hora de acuerdo al mes en curso (Datos reales obtenidos de facturas de Codensa para estrato 4)
- Ejecución y validación del modelo matemático del problema de optimización desarrollado y ajustado para el presente proyecto-
- Determinación y transmisión serial de comandos ASCII para la ejecución de funciones.

### 4.1 Entrada del Sistema

Los datos iniciales aportados al sistema provienen del levantamiento de información recolectada de las empresas XM y Codensa. Debido a que existe información propia del desarrollo de la actividad de Codensa, es imposible obtener valores de la negociación, generación, perdidas, comercialización, y transmisión que se utilizan para el cálculo del Kilowatt hora, así que para tener un valor referente y útil para el desarrollo del proyecto, se toman los valores de  $G_{m,i,j}$ ,  $T_m$ ,  $D_{n,m}$ ,  $C_{vm,i,j}$ ,  $PR_{n,m,i,j}$ ,  $R_{m,t}$  mes a mes, que aparecen en cualquier factura de Energía y que determinan el costo Kilowatt hora ( $CU_{v,n,m,i,j}$ ) por medio de las siguiente ecuación:

$$CU_{v,n,m,i,j} = G_{m,i,j} + T_m + D_{n,m} + C_{vm,i,j} + PR_{n,m,i,j} + R_{m,t} \quad (6)$$

Como se mencionó con anterioridad, estos valores son diferentes mes a mes así que para lograr más exactitud y parecido con la realidad, se recolecta información de un periodo de un año comenzando desde el mes de Marzo de 2013 a Abril de 2014. Dichas facturas pertenecen a la residencia de Danilo Ruiz Amaya con una estratificación Nivel 4.

### 4.2 Sistema

El sistema recibe como entrada el Costo Kilowatt hora que es cargado en el programa desde la importación de una tabla en Excel que contiene los Costos Kilowatt hora mes a mes. Adicionalmente en todo el desarrollo del Presente Proyecto, se utiliza el reloj del sistema para tener el referente astronómico del mes en curso. El programa realiza su inicialización cargando el valor mencionado con anterioridad luego, el sistema ejecuta el modelo matemático.

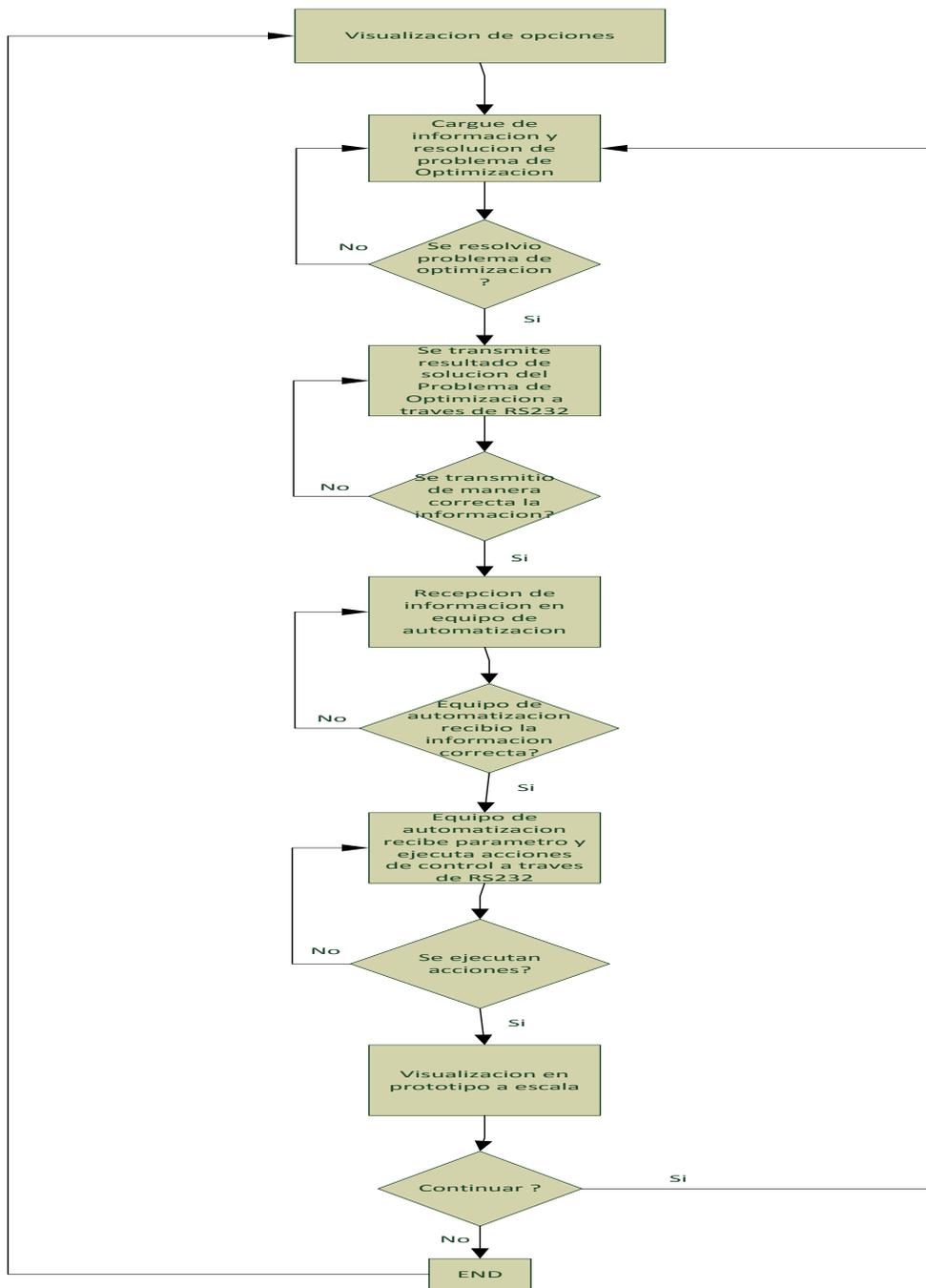
### **4.3 Salidas del Sistema**

Los resultados del Modelamiento del problema de optimización, se presentan de las siguientes maneras:

- Resultados sobre la variable de diseño en Matlab.
- Resultado de la sumatoria o Función de Costo.
- Ejecución de comandos seriales para el modelo a escala

### **4.4 Diagramas**

#### **4.4.1. Diagrama de Flujo**



#### 4.4.2. Diagrama de Bloques



Función Objetivo: Se traduce el problema de asignación energética en un problema matemático para una casa inteligente combinando dispositivos convencionales en el hogar con equipos de almacenamiento de energía. Para el modelamiento matemático, el autor utiliza las tendencias de uso y las preferencias en el consumo energético mezclado con cifras y datos de un proceso de consumo energético convencional. Este mismo principio utilizado en el artículo, es utilizado para modelar el escenario propuesto.



Se utiliza la técnica de PSO y NBPSO para validar y verificar y así obtener un resultado a dicho modelo. Habiendo resuelto el problema de optimización, dicha función arrojará un valor que será el referente para la acción que debe tomar el equipo controlador de los equipos de automatización ejecutando una escena en donde se decide que electrodoméstico deberá encender o apagar, que escena de iluminación se debe ejecutar

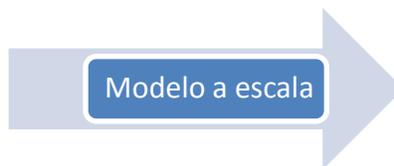


La integracion se hace por medio de la interface de comunicaicon de RS232 a través de un puerto serial DB9 conectando asi la CPU donde se corre la funcion objetivo y el equipo de control de Lutron.

Para el sistema de Control y la visualizacion del estado de los dispositivos, solo se tomará de referencia estos estados de encendido y apagado. Hora a hora se le enviarán los comandos al

equipo de control para que ejecute una función de acuerdo a su estado. El equipo de control enviará los comandos de la siguiente manera:

1. Si el dato binario para una determinada hora es 1 el comando enviado por el equipo de control será que encienda el dispositivo
2. Si el dato binario para una determinada hora es 0 el comando enviado por el equipo de control será que apague el dispositivo
3. No se tienen contemplado dimerización. Este escenario se puede contemplar para futuros proyectos generando un ahorro adicional de casi un 20% adicional al que ya se logró.
4. Integración: a través del protocolo de RS232, se configura Matlab o una herramienta de Hiperterminal para el envío de los comandos hacia el equipo de control y allí se ejecuten los comandos



Modelo a Escala. Se utiliza para la visualización de comandos enviados de acuerdo al resultado arrojado por el modelo matemático

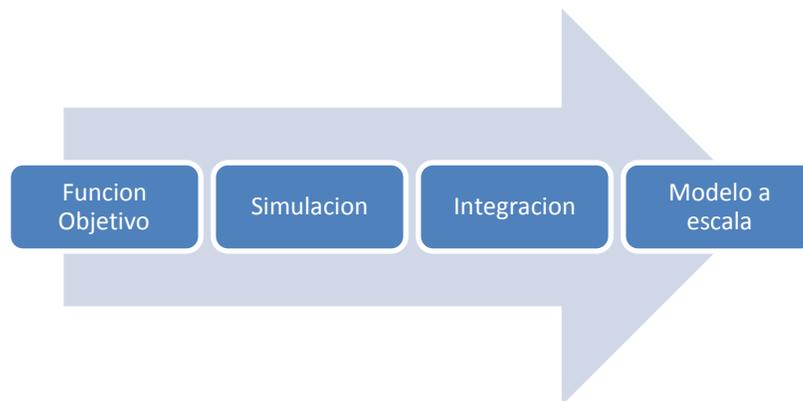




Figura 7. Esquema de conectividad

## 5. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN

La implementación general del presente proyecto se hizo en Matlab. Es importante aclarar que lo que se va a implementar es un prototipo computacional que busca demostrar que el uso de los algoritmos expuestos en el presente documento conlleva al cumplimiento exitoso de los objetivos planteados en la propuesta y no una aplicación comercial.

### 5.1. Definición del Problema de Optimización

El problema de optimización se traduce en un problema de distribución de energía en donde se pretende minimizar los costos utilizando dispositivos de la mejor manera.

Es una herramienta de decisión que le permite al usuario evaluar o decidir si el uso de dispositivos de almacenamiento y de fuentes alternas genera beneficios a los usuarios con una reducción de costos.

Función de Costo:

$$\sum_{t=1}^T \lambda_{ES,must-run}(t) * U_{ES,must-run}(t) + \lambda_{ES,Bat}(t) * U_{ES,Bat}(t, x_{Bat}) + \lambda_{ES,Light}(t) * U_{ESLight}(t, x_{Light}) + \lambda_{ES,App}(t) * U_{ESApp}(t, x_{App}) - \lambda_e(t) * P_e(t, x) \quad (7)$$

Las variables a optimizar o variables de diseño son:  $x_{App}$ ,  $x_{Light}$  y  $x_{Bat}$ . Cada variable de diseño está compuesta por un vector de 24 posiciones (correspondiente a las 24 horas del día)

Parámetros del sistema:

$\lambda_{ES}(t) \rightarrow$  Valor monetario percibido o computado por el usuario (kWh). Describe la variación horaria del valor del dinero que el propietario asigna a la energía equivalente del servicio (para el caso de iluminación, energía lumínica, para el caso de dispositivos o electrodomésticos energía eléctrica)

$\lambda_e \rightarrow$  Costo de la electricidad (\$/kWh) (Codensa)

Variables:

$U_{ES}(t, X) \rightarrow$  Es la demanda por la energía equivalente del servicio

- $X \rightarrow$  horarios de operación del DER (variable binaria de diseño).

Las variables a optimizar o variables de diseño son:  $x_{App}$ ,  $x_{Light}$  y  $x_{Bat}$ . Cada variable de diseño está compuesta por un vector de 24 posiciones (correspondiente a las 24 horas del día) y cada posición o coordenada de cada uno de estos vectores, tendrá un valor de 1 ó 0 dependiendo a la solución del problema de optimización

Restricciones:

- Restricciones del tipo  $A*x \leq B$  (desigualdades lineales)
  - Máxima consumo de potencia del electrodoméstico en el día:  $x_{App} < 800 \text{ W}$
  - Máxima consumo de potencia del sistema de iluminación en el día:  $x_{Light} < 800 \text{ W}$
  - Máxima consumo de potencia de la batería en el día:  $x_{Bat} < 1000 \text{ W}$
- $x_{App} > 0$
- $x_{Light} > 0$
- $x_{Bat} > 0$
- Límite inferior de las 3 variables de decisión (LB) = 1;
- Límite superior de las 3 variables de decisión (UB) = 24;
- Las baterías deben estar disponibles a cualquier hora del día
- El electrodoméstico no debe funcionar en la madrugada  $> 5:00 \text{ am}$ .

## 5.2. Aplicación del Problema de Optimización

Primero se modelan los servicios requeridos en una casa "inteligente". Por otra parte el planificador DER tendrá como función, determinar cómo se pueden controlar los servicios para optimizar el suministro de los mismos.

El DER en la casa "inteligente" operará sobre los siguientes servicios:

- Sistema Must-Run 80W
- Sistema de iluminación: 100 W
- 1 Electrodoméstico de consumo máximo de potencia: 100W
- Se simula con un sistema fotovoltaico de: 100Wp
- Se simula con banco de baterías con capacidad de almacenamiento de 200 W diseñada para un hogar NO tan robusto.

Los residentes dan mayor valor que el sistema de iluminación esté disponible en horas de la madrugada y en horas de la noche (después de las 5pm). Durante el periodo u horario laboral comprendido entre las 8am y 5pm a los residentes dan importancia a este servicio.

Para el electrodoméstico, los residentes le dan valor durante el día, desde las 6am, es decir en horas de la madrugada los residentes no le dan valor.

Los residentes pueden o no utilizar el banco de baterías. Si utilizan las baterías se descargarán a una tasa aproximada del 20% de la capacidad y se cargan a la misma proporción. Utilizando las baterías, el DER podría utilizarlas como un equipo de suministro de energía, por lo tanto, se considera como otro DER controlable. Los residentes tienen el siguiente punto de vista sobre los servicios que requieren: (a) el banco de baterías debe estar completamente cargado antes del 9 de la mañana, (b) el servicio de iluminación es muy importante cuando están en casa en la mañana y en

horas de la noche, pero que no se preocupan por la iluminación de la casa mientras están fuera, (c) el electrodoméstico es muy importante para gran parte del día porque tiene que estar disponible pero pierde importancia en horas de la madrugada, (d) Se contempla que el sistema fotovoltaico funcione bajo el escenario de un día soleado permitiendo funcionar a plena carga .y tener en cuenta que es un sistema fotovoltaico interconectados a la red eléctrica. Es decir que toda la energía que genera los paneles solares se inyecta directamente a la red de distribución eléctrica operando en paralelo con la red eléctrica.

El horizonte de simulación es de 1 día, dividido en 24 períodos de 1 hora. La simulación comienza y termina en medianoche. En cada hora, el planificador determinaría.

1. Encendido o apagado para el sistema de iluminación,
2. Encendido o apagado para el electrodoméstico,
3. Potencia y encendido o apagado del sistema de baterías.

El beneficio  $\lambda_{ES}(t)$  debe ser asignada a los servicios de energía y debe ser determinando la relación entre la variación temporal de la demanda  $U_{ES}(t)$  para la energía equivalente y el consumo actual de electricidad y depende de los hábitos de uso del usuario; se asume un panorama con condiciones hipotéticas para evaluar dicho modelo matemático; las condiciones son las siguientes:

El  $U_{ES,must-run}(t)$  se considera un servicio de energía denominado MUST-RUN, el cual hace referencia a un servicio que debe estar disponible o conectado las 24 horas del día, con un consumo continuo o constante durante las 24 horas del día.



Figura 8. Servicios Must-Run

$U_{ESLight}$  Medido en Watt es la demanda por el servicio de Iluminación

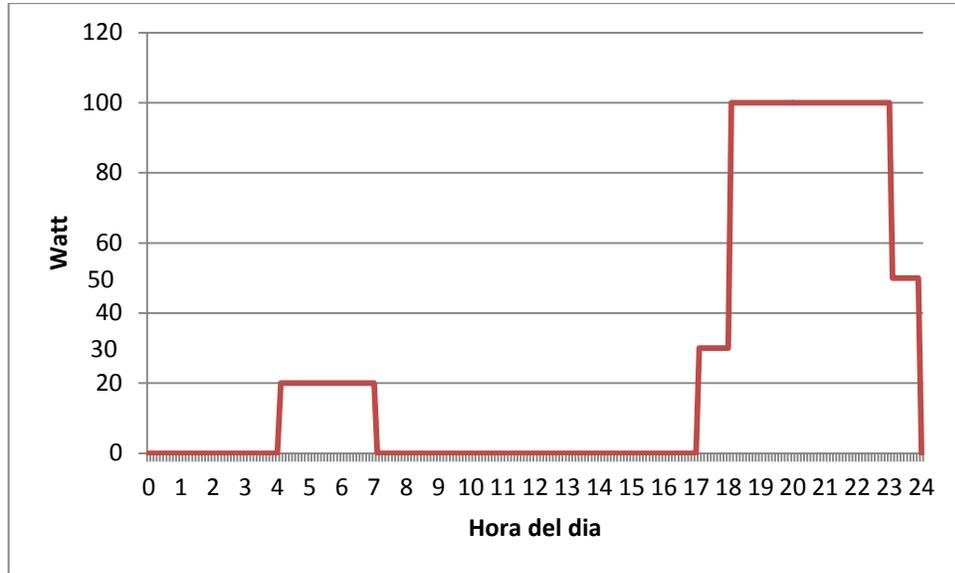


Figura 9 Demanda Servicio de Iluminación

$U_{ESApp}$  Medido en Watt es la demanda por el servicio eléctrico para el electrodoméstico



Figura 10. Demanda Servicio Eléctrico

Se definen los equivalentes del **valor monetario percibido** del servicio  $\lambda_{ES}(t)$ .

Valor percibido del servicio	Valor Monetario (\$/kWh)
High	718
Medium	359
Low	0.5
NoVal	0

Tabla 2. Valores monetarios percibidos

$\lambda_{ES, Must-run}(t)$  Valor percibido para el servicio Must-run, dicho servicio debe estar disponible o conectado las 24 horas del día, con un consumo constante durante el día.

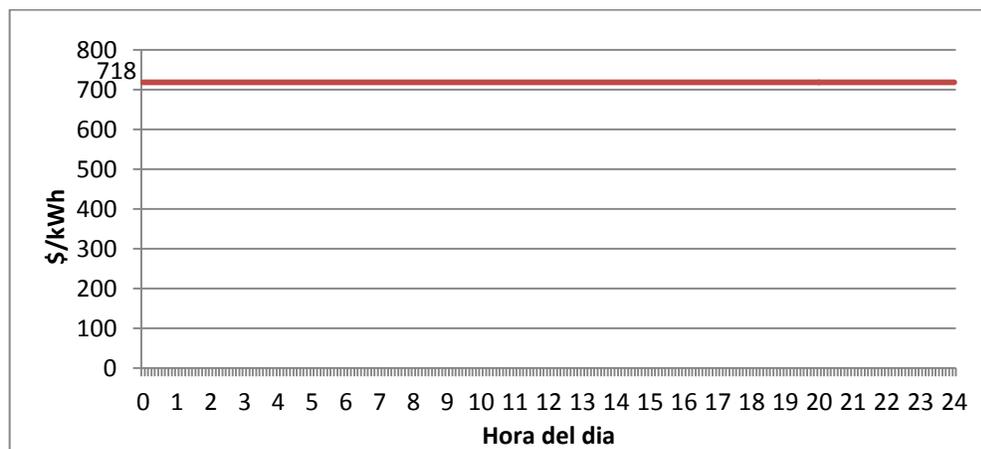


Figura 11. Energía Equivalente Must-run

$\lambda_{ES,illum}(t)$  Valor percibido para el servicio de iluminación

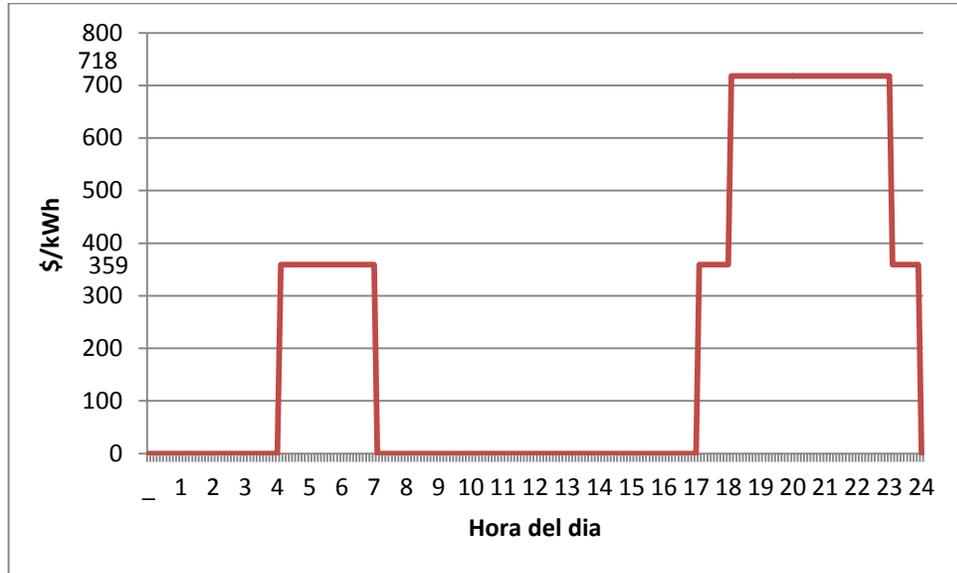


Figura 12. Energía Equivalente a Iluminación

$\lambda_{ES,app}(t)$  Valor percibido para el servicio del electrodoméstico



Figura 13. Energía Equivalente del Electrodoméstico

Tarifas de electricidad  $\lambda_e$

<b>TIPO DE TARIFA</b>	<b>COSTO , <math>\lambda_e</math>(\$ / kWh)</b>	<b>HORARIO</b>
Peak	Costo kWh de codensa	14:00 – 20:00
Shoulder	(Costo kWh)/2 de codensa	7:00 – 14:00 y 20:00 – 22:00
Off Peak	(Costo kWh)/10 de codensa	0:00 – 7:00

*Tabla 3. Tarifas de electricidad*

Para efectos de simulación, se asumen los valores para el tipo de tarifa que se refiere a “Shoulder” y a “Off Peak”. La razón por la cual se asumen estos valores, como se mencionó anteriormente, es porque ni Codensa (Endesa) ni XM proveen información propia del ejercicio, es decir, no proveen información de los costos de transmisión, ni de los comercializadores, ni de los generadores entre otros. Lo que si se provee es el costo del kWh en un mes determinado, calculado por la determinación de cada una de las variables involucradas en el cálculo de éste. Adicionalmente se toma de referencia el artículo para definir estas tarifas de energía.

## 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 6.1. Programación del DER usando PSO

Los enjambres optimizan la operación DER; cada uno tiene 50 partículas, y la simulación tiene aproximadamente entre 50 a 100 iteraciones. En cada iteración los 3 enjambres están asignados de la siguiente manera: El primer enjambre al Sistema de Iluminación el segundo al electrodoméstico y el tercero a las baterías. El valor de cada una de las coordenadas del vector de 24 posiciones asignado para cada una de las variables, es el mejor global que se obtiene de 50 iteraciones

Usando Matlab R2010a y con un procesador Core i3, el tiempo total de la simulación es de 20 minutos aproximadamente.

### 6.2. Escenarios

El planificador DER formularía una estrategia de operación bajo diferentes situaciones. El valor de la programación se determina mediante la comparación de la simulación de un caso base en el que los DER se controlan manualmente a los casos en que el DER se ha programado.

Es importante tener en cuenta que, para la mayor parte de escenarios, se manejan escenarios híbridos con datos reales como: el dato de Codensa, Watts de consumo de varias luminarias, Watts de consumo del electrodoméstico y Watts de consumo del dispositivo denominado Must-Run, con datos hipotéticos que se asumen para efectos de simulación, todo esto debido a que, como son dispositivos con pequeños consumos que no sobrepasan el Kilowatt la hora, se pretende evidenciar los resultados. **Se contempla como dato hipotético un sistema fotovoltaico de 100 Wp a unas tasas de carga y de descarga del 20%**, es decir, si la batería se encuentra en modo de suministro, la batería se descargará a una tasa aproximada de 20 Watts por hora. De manera similar, si la batería está descargada y se encuentra conectada a la red en modo de almacenamiento, se carga a una razón de 20 Watts por hora

#### 6.2.1. Escenario 0

En el caso de línea de base, los residentes utilizan todos los servicios de manera manual. Para este caso se contempla que no haya uso del banco de baterías y sistema fotovoltaico esto con el fin de

tener un punto de comparación al momento de utilizar dichos dispositivos, es decir, como habitualmente se usa frente a unos posibles escenarios donde se implementan DER

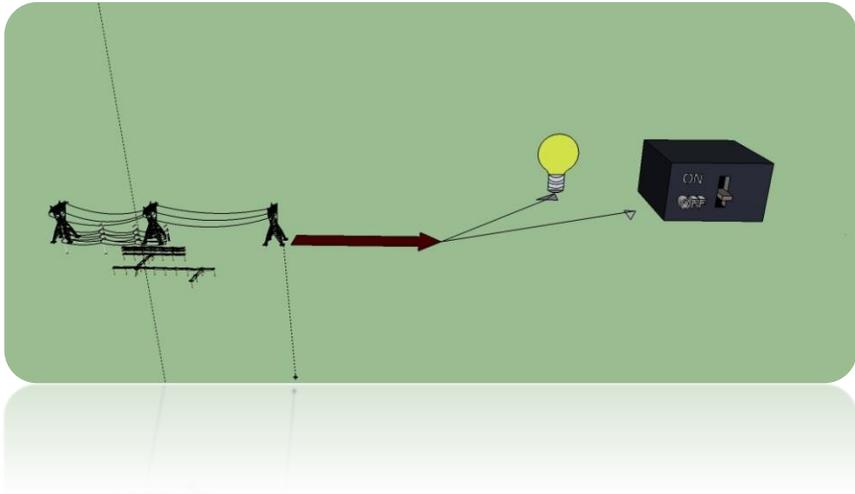


Figura 14. Diagrama Escenario 0

Servicio Must-Run: MUST-RUN, hace referencia a un servicio que debe estar disponible o conectado las 24 horas del día. Para el ejercicio se utiliza un dispositivo que consume 80 W por hora.

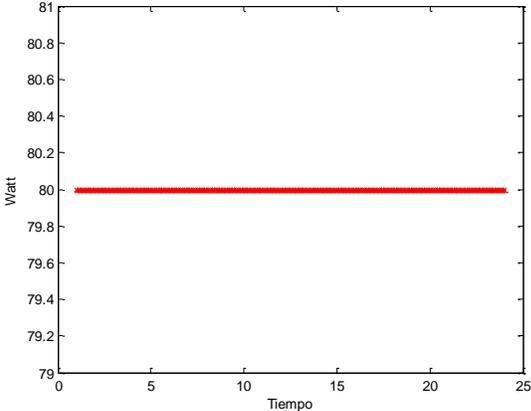


Figura 15. Servicio Must-Run que consume 80 W

Servicio de Iluminación: hace referencia al consumo de energía durante las 24 horas del día contemplando los horarios de mayor demanda. Para el ejercicio se utiliza un dispositivos que consumen todos juntos 100 W.

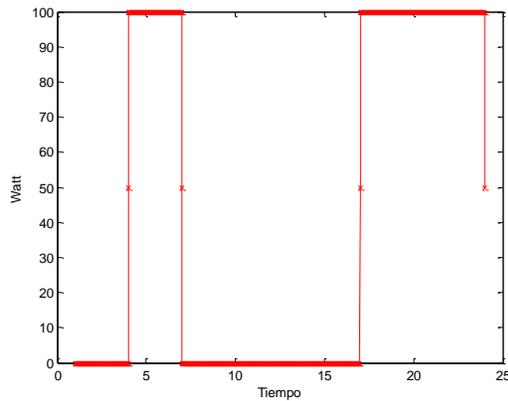


Figura 16. Servicio de iluminación que consume 80 W

Servicio para el electrodoméstico: Servicio para el electrodoméstico hace referencia al servicio que debe estar disponible a las horas referidas en la Figura 17. Para el ejercicio se utiliza un dispositivo que consume 100 W.

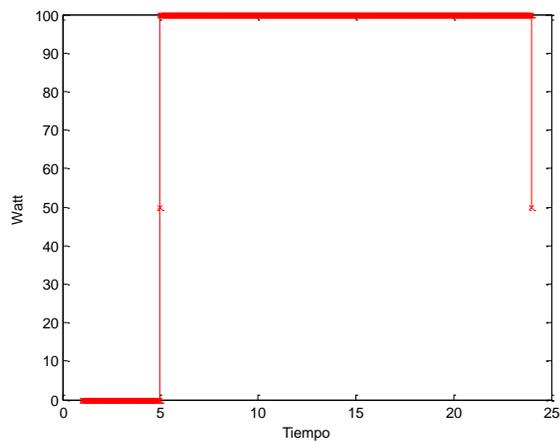


Figura 17. Servicio del electrodoméstico que consume 100 W

De acuerdo a lo anteriormente mencionado, este es un caso hipotético en que el usuario tiene los mismos hábitos de consumo día tras día, es decir, que a la misma hora opere los dispositivos de acuerdo a su demanda.

En la tabla a continuación se hace un análisis hora a hora para ver el comportamiento de consumo, utilizando el dato real del costo kWh de Codensa con datos de consumo por equipos de iluminación, electrodomésticos y el equipo denominado Must-Run que debe operar durante todo el día.

SERVICIO	Servicio Must-Run (kWh)	Servicio de Iluminación (kWh)	Servicio de Electrodoméstico (kWh)	Valor de la energía por Hora (Noviembre)	Costo de la energía por Hora (Noviembre)
1	0,08	0	0	37,018	2,96144
2	0,08	0	0	37,018	2,96144
3	0,08	0	0	37,018	2,96144
4	0,08	0,1	0	37,018	6,66324
5	0,08	0,1	0,1	37,018	10,36504
6	0,08	0,1	0,1	37,018	10,36504
7	0,08	0,1	0,1	123,4	34,552
8	0,08	0	0,1	123,4	22,212
9	0,08	0	0,1	123,4	22,212
10	0,08	0	0,1	123,4	22,212
11	0,08	0	0,1	123,4	22,212
12	0,08	0	0,1	123,4	22,212
13	0,08	0	0,1	123,4	22,212
14	0,08	0,1	0,1	370,18	103,6504
15	0,08	0,1	0,1	370,18	103,6504
16	0,08	0,1	0,1	370,18	103,6504
17	0,08	0,1	0,1	370,18	103,6504
18	0,08	0,1	0,1	370,18	103,6504
19	0,08	0,1	0,1	370,18	103,6504
20	0,08	0,1	0,1	123,4	34,552
21	0,08	0,1	0,1	123,4	34,552
22	0,08	0,1	0,1	37,018	10,36504
23	0,08	0,1	0,1	37,018	10,36504
24	0,08	0,1	0,1	37,018	10,36504

Total de Watts por dispositivo	1,92	1,5	2		926,20
--------------------------------	------	-----	---	--	--------

Tabla 4. Resultados escenario Caso Base

	Escenario Base
Aporte de banco de baterías	0 W
Costo por día (COP)	\$ 926,2
Energía Importada de la red	5,42 kW
Energía Importada por el sistema fotovoltaico	0 kW

Tabla 5. Resultado general de escenario Caso Base

### ANÁLISIS DE RESULTADOS:

Como primera instancia para el escenario base no contempla baterías ni un sistema fotovoltaico, pero se toma de referencia para comparar y lograr cuantificar la diferencia al agregar equipos pasivos a un sistema de suministro de red eléctrica.

Como se mencionó con anterioridad en este escenario el usuario manipula los dispositivos de manera manual y los pone en uso de acuerdo su demanda y a sus hábitos de consumo. Como se puede observar en los resultados se tiene un costo de aproximadamente 926 pesos por día (las unidades son pesos COP). El sistema de red eléctrica suministra toda la demanda requerida de energía y por ende no existirá un ahorro económico y sencillamente se tendrá que cancelar, al momento de la facturación, el valor de lo consumido.

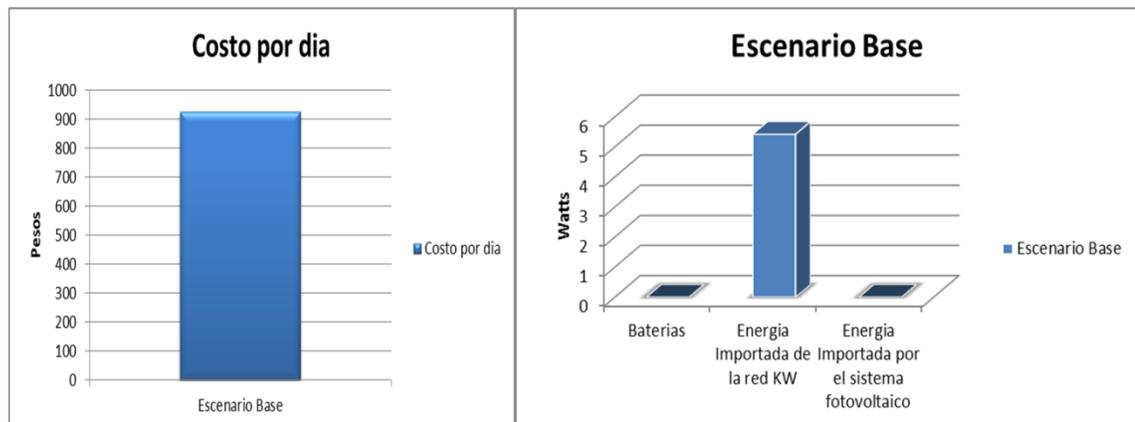
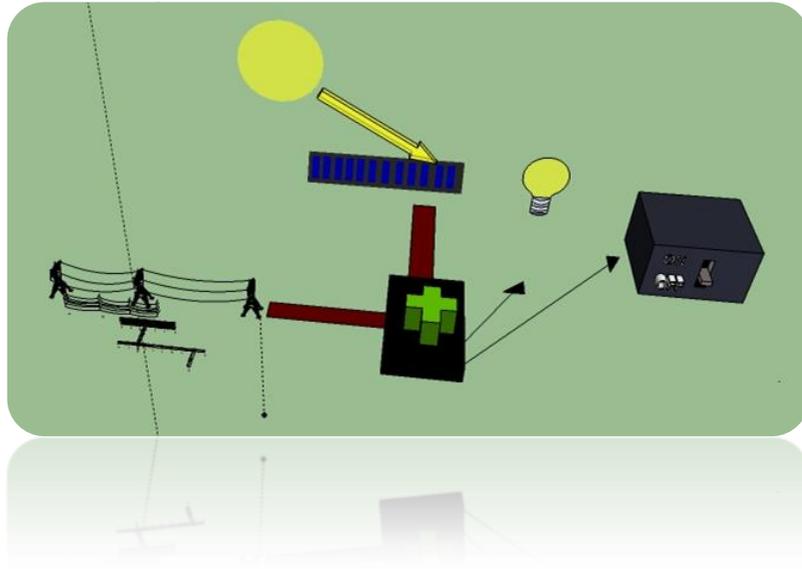


Figura 18. Diagramas de costo y consumo en el escenario 0

### 6.2.2. Escenario 1

En el caso de línea de base, los residentes utilizan todos los servicios de manera manual exceptuando el sistema fotovoltaico puesto que este trabaja de manera autónoma. Para este caso se contempla que no haya uso del banco de baterías esto con el fin de tener un referente. Para el presente escenario se toma de referencia los mismos Watts de consumo de los sistemas, el denominado Must-Run, el de Iluminación y el electrodoméstico del Caso base referenciados por las Figuras 15, Figuras 16 y Figuras 17 respectivamente.



*Figura 19. Diagrama Escenario 1*

Como se mencionó con anterioridad, se contempla como dato hipotético un sistema fotovoltaico de 100 Wp. a unas tasas de carga y de descarga del 20% y donde la energía que generan los paneles solares se inyecta directamente a la red de distribución eléctrica de la Residencia.

### Sistema Fotovoltaico interconectado:

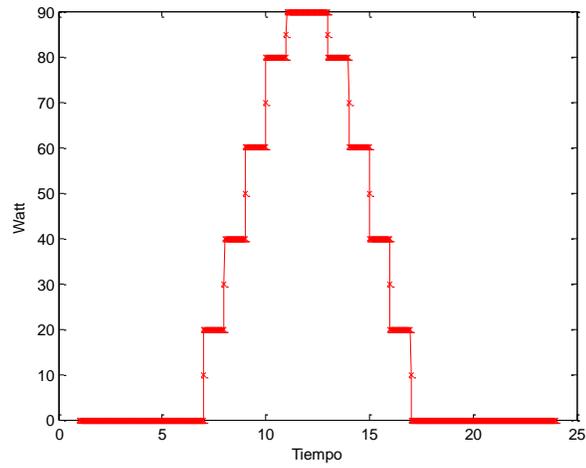


Figura 20. Generación del sistema Fotovoltaico

En la tabla a continuación se hace un análisis hora a hora para ver el comportamiento de consumo, utilizando el dato real del costo kWh de Codensa con datos de consumo por equipos de iluminación, electrodomésticos y el equipo denominado Must-Run que debe operar durante todo el día. Adicionalmente se incluyeron la columna de consumo total hora, el aporte fotovoltaico, la columna de resultado donde se determina la cantidad de Watts utilizados y la última columna determina el valor en pesos Colombianos de ese consumo.

SERVICIO	Servicio Must-Run (KWh)	Servicio de Iluminacion (KWh)	Servicio de Electrodomestico (KWh)	Sumatoria de consumo por hora	Aporte sistema fotovoltaico (KW)	Resultado = (Total consumido - Aporte de PV)	Valor de la energia por Hora (Noviembre)	Costo de la energia por Hora (Noviembre)
HORA DEL DIA								
1	0,08	0	0	0,08	0	0,08	37,018	2,96144
2	0,08	0	0	0,08	0	0,08	37,018	2,96144
3	0,08	0	0	0,08	0	0,08	37,018	2,96144
4	0,08	0,1	0	0,18	0	0,18	37,018	6,66324
5	0,08	0,1	0,1	0,28	0	0,28	37,018	10,36504
6	0,08	0,1	0,1	0,28	0	0,28	37,018	10,36504
7	0,08	0,1	0,1	0,28	0,02	0,26	123,4	32,084
8	0,08	0	0,1	0,18	0,04	0,14	123,4	17,276
9	0,08	0	0,1	0,18	0,06	0,12	123,4	14,808
10	0,08	0	0,1	0,18	0,08	0,1	123,4	12,34
11	0,08	0	0,1	0,18	1	-0,82	123,4	-101,188
12	0,08	0	0,1	0,18	1	-0,82	123,4	-101,188
13	0,08	0	0,1	0,18	1	-0,82	123,4	-101,188
14	0,08	0,1	0,1	0,28	0,08	0,2	370,18	74,036
15	0,08	0,1	0,1	0,28	0,06	0,22	370,18	81,4396
16	0,08	0,1	0,1	0,28	0,04	0,24	370,18	88,8432
17	0,08	0,1	0,1	0,28	0,02	0,26	370,18	96,2468
18	0,08	0,1	0,1	0,28	0	0,28	370,18	103,6504
19	0,08	0,1	0,1	0,28	0	0,28	370,18	103,6504
20	0,08	0,1	0,1	0,28	0	0,28	123,4	34,552
21	0,08	0,1	0,1	0,28	0	0,28	123,4	34,552
22	0,08	0,1	0,1	0,28	0	0,28	37,018	10,36504
23	0,08	0,1	0,1	0,28	0	0,28	37,018	10,36504
24	0,08	0,1	0,1	0,28	0	0,28	37,018	10,36504

Tabla 6. Resultados Escenario 1

	Escenario 1
Aporte de banco de baterías	0 W
Costo por día (COP)	\$ 457,28
Energía Importada de la red	2,02 kW
Energía Importada por el sistema fotovoltaico	3,4 kW

*Tabla 7. Resultado general Escenario 1*

### ***ANÁLISIS DE RESULTADOS:***

En este escenario no se contemplaron las baterías pero si un sistema fotovoltaico. El usuario manipula los dispositivos de manera manual y los pone en uso de acuerdo su demanda pero durante el día, y tomando de referencia un día soleado, hay una inyección de energía a la red eléctrica a través del sistema fotovoltaico encontrando como beneficio una reducción o ahorro en el consumo evitando así que todo el suministro de energía provenga del Proveedor.

- Frente al escenario denominado Caso Base, se determinó una reducción de un 50,627% del suministro de energía entregada por el Proveedor. Se tiene un costo de aproximadamente 457 pesos (se mantienen las unidades de pesos COP)
- La reducción en kWh del 62,73%, así que gran parte de la energía suministrada a la residencia provino del sistema fotovoltaico (Se contemplan condiciones ideales de un día totalmente soleado).
- El gran aporte del sistema fotovoltaico provino en el llamado horario laboral o dicho de otra manera entre las 8 am y 5 pm, es decir, que el principal aporte de dicho sistema fue, para reducir el consumo del equipo denominado Must-Run que opera durante todo el día.

El sistema de red eléctrica ya no es el único elemento que suministra toda la demanda de energía requerida, sino que hay un sistema adicional que aporta energía favoreciendo a una reducción en el consumo y por ende a una reducción económica en la facturación.

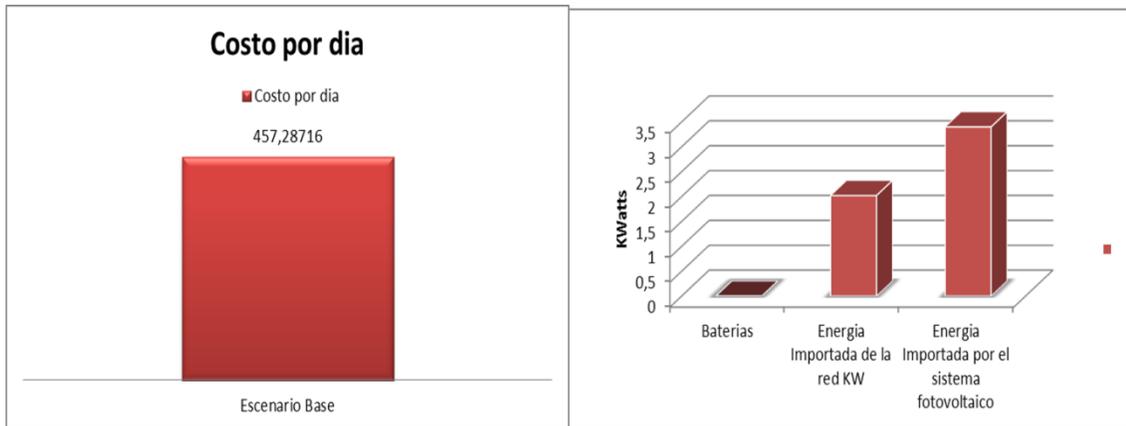


Figura 21. Diagramas de costo y consumo en el escenario 1

### 6.2.3 Escenario 2

En el tercer escenario se contempla con el uso de los DER excluyendo el banco de baterías y sin el sistema fotovoltaico esto para evaluar el comportamiento con estos dispositivos; se pretende comparar con el sistema todo integrado

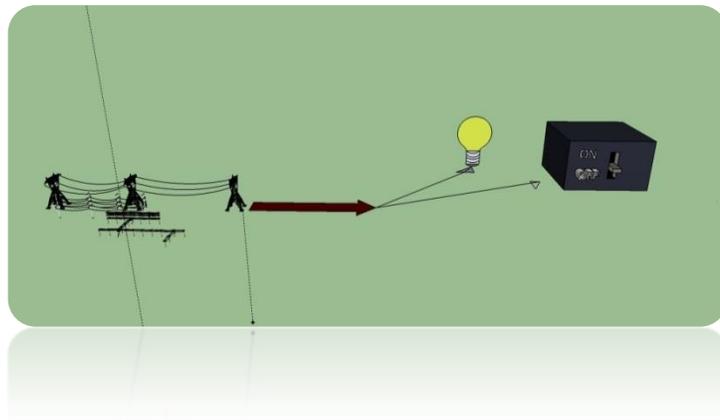


Figura 22. Diagrama Escenario 2

Como en los anteriores escenarios se toma de referencia los mismo Watts de consumo de los sistemas, el denominado Must-Run, el de Iluminación y el electrodoméstico del Caso base referenciados por las Figuras 15, Figuras 16 y Figuras 17 respectivamente.

## ***ANÁLISIS DE RESULTADOS:***

### Resultado de la simulación

En la tabla a continuación se hace un análisis hora a hora para ver el comportamiento de consumo, utilizando el dato real del costo kWh de Codensa con datos de consumo por equipos de iluminación, electrodomésticos y el equipo denominado Must-Run que debe operar durante todo el día además incluyendo un par de columnas en donde se observa si el equipo esta encendido o está apagado. Adicionalmente se incluyeron la columna de consumo total hora, el aporte fotovoltaico, la columna de resultado donde se determina la cantidad de Watts utilizados y la última columna determina el valor en pesos Colombianos de ese consumo.

SERVICIO	Servicio Must-Run (KWh)	Servicio de Iluminacion (KWh)	Global Best Iluminacion	Servicio de Electrodomestico (KWh)	Global Best Electrodomestico	Sumatoria de consumo por hora	Aporte sistema fotovoltaico (KW)	Resultado = (Total consumido - Aporte de PV)	Valor de la energia por Hora (Noviembre)	Costo de la energia por Hora (Noviembre)
HORA DEL DIA										
1	0,08	0	1	0	1	0,08	0	0,08	37,018	2,96144
2	0,08	0	0	0	1	0,08	0	0,08	37,018	2,96144
3	0,08	0	1	0	1	0,08	0	0,08	37,018	2,96144
4	0,08	0,1	0	0	0	0,08	0	0,08	37,018	2,96144
5	0,08	0,1	0	0,1	0	0,08	0	0,08	37,018	2,96144
6	0,08	0,1	0	0,1	1	0,18	0	0,18	37,018	6,66324
7	0,08	0,1	0	0,1	0	0,08	0	0,08	123,4	9,872
8	0,08	0	1	0,1	1	0,18	0	0,18	123,4	22,212
9	0,08	0	0	0,1	0	0,08	0	0,08	123,4	9,872
10	0,08	0	1	0,1	1	0,18	0	0,18	123,4	22,212
11	0,08	0	1	0,1	0	0,08	0	0,08	123,4	9,872
12	0,08	0	0	0,1	1	0,18	0	0,18	123,4	22,212
13	0,08	0	0	0,1	1	0,18	0	0,18	123,4	22,212
14	0,08	0,1	1	0,1	0	0,18	0	0,18	370,18	66,6324
15	0,08	0,1	0	0,1	1	0,18	0	0,18	370,18	66,6324
16	0,08	0,1	0	0,1	1	0,18	0	0,18	370,18	66,6324
17	0,08	0,1	1	0,1	0	0,18	0	0,18	370,18	66,6324
18	0,08	0,1	0	0,1	1	0,18	0	0,18	370,18	66,6324
19	0,08	0,1	0	0,1	1	0,18	0	0,18	370,18	66,6324
20	0,08	0,1	1	0,1	1	0,28	0	0,28	123,4	34,552
21	0,08	0,1	1	0,1	0	0,18	0	0,18	123,4	22,212
22	0,08	0,1	0	0,1	0	0,08	0	0,08	37,018	2,96144
23	0,08	0,1	0	0,1	0	0,08	0	0,08	37,018	2,96144
24	0,08	0,1	1	0,1	1	0,28	0	0,28	37,018	10,36504

Tabla 8. Resultados Escenario 2

	Escenario 2
Aporte de banco de baterías	0 W
Costo por día	\$ 612,78
Energía Importada de la red	3,52 kW
Energía Importada por el sistema fotovoltaico	0 kW

Tabla 9. Resultado general Escenario 2

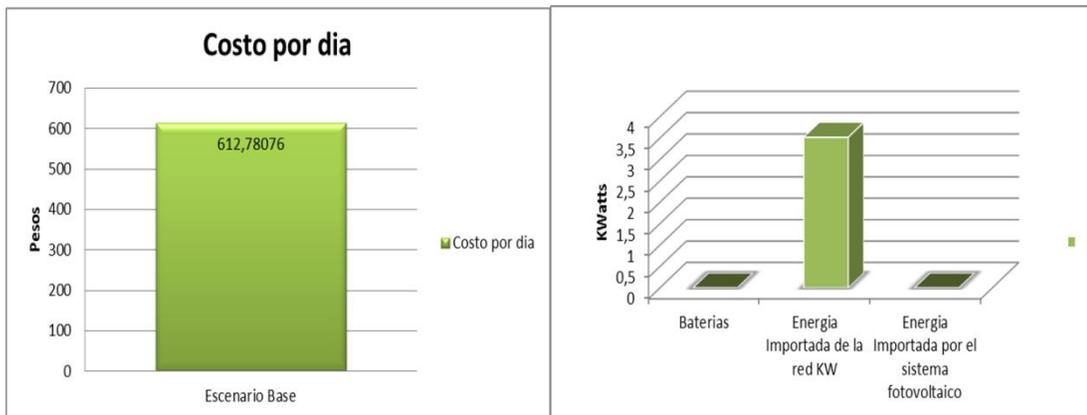


Figura 23. Diagramas de costo y consumo en el escenario 2

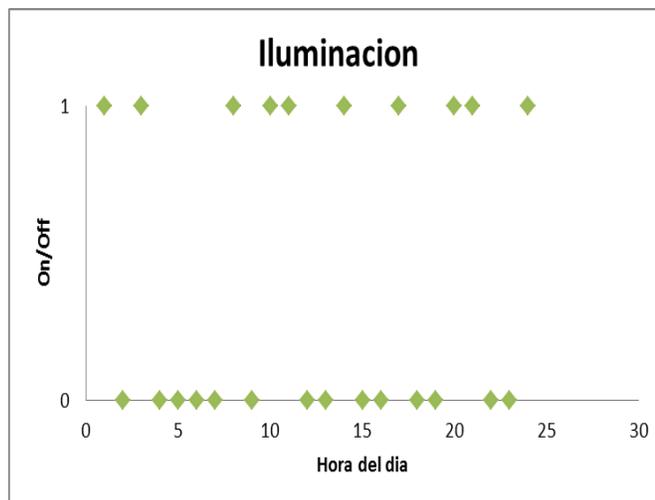


Figura 24. Diagramas de activación y desactivación para el sistema de iluminación

Para el presente escenario no se contempló las baterías ni un sistema fotovoltaico, se pretendió generar una referencia de cómo trabajarían los equipos DER con activación y desactivación de la iluminación y electrodomésticos y si existía un ahorro considerable. Los resultados muestran que a pesar que hay un ahorro de energía frente al escenario 0 o escenario base, no es mejor que frente al escenario uno donde se incluyen elementos que inyectan energía. Esto evidencia que el aporte de los sistemas fotovoltaicos y los bancos de baterías generan gran valor o gran aporte a los sistemas convencionales de suministro de energía.

- Frente al escenario denominado Caso Base, se determinó una reducción de un 33,84 % del suministro de energía entregada por el Proveedor. Se tiene un costo de aproximadamente 457 pesos (se mantienen las unidades de pesos COP)
- Frente al escenario 1, se determinó un incremento del 25,37% del suministro de energía, es decir es necesario seguir tomando esa energía del Proveedor.)
- Un incremento del suministro de energía por parte del proveedor en kWh del 42,61%.
- En este escenario no se logra una optimización correcta para los dispositivos de iluminación y el electrodoméstico por dos razones: la primera de ellas es porque el sistema determina que el mejor momento para activarse es horas en las cuales el costo es más bajo; y la segunda razón es que al no tener contemplado el sistema de baterías, con tal de abastecer el servicio, el suministro lo provisiona directamente de la fuente convencional de energía.

A pesar que se opera sobre algunos DER y que se genera un ahorro, se observó que solo con equipos de suministro alternativo de energía las condiciones de ahorro mejoran bastante, es decir, no es suficiente con operar los DER para obtener un gran ahorro sino que es necesaria una solución integral donde se involucre operación de los DER más elementos alternativos que le inyecten energía a la red eléctrica de la residencia.

#### **6.2.4 Escenario 3**

Escenario en que el programador funciona contemplando todo el sistema incluido el banco de baterías con su operación. Se contempla también q la batería en sus condiciones iniciales está cargada al 100%. Adicionalmente como en los anteriores escenarios se toma de referencia los mismos Watts de consumo de los sistemas, el denominado Must-Run, el de Iluminación, el electrodoméstico del Caso base referenciados por las Figuras 15, Figuras 16 y Figuras 17 respectivamente y del sistema fotovoltaico del escenario 1

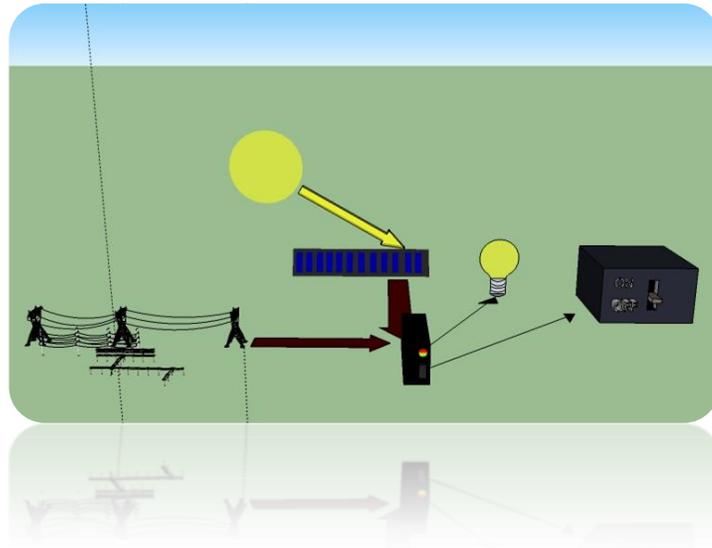


Figura 25. Diagrama Escenario 3

### ***ANÁLISIS DE RESULTADOS:***

En la tabla a continuación se hace un compendio de información hora a hora para ver el comportamiento de consumo, utilizando el dato real del costo kWh de Codensa con datos de consumo por equipos de iluminación, electrodomésticos y el equipo denominado Must-Run que debe operar durante todo el día además incluyendo un par de columnas en donde se observa si el equipo esta encendido o está apagado. Se contempla en la tabla 10 todas las operaciones necesarias para determinar si existe una reducción en los costos como en la importación de energía.

Adicionalmente se incluyeron la columna de consumo total hora, el aporte fotovoltaico, la columna de resultado donde se determina la cantidad de Watts utilizados y la última columna determina el valor en pesos Colombianos de ese consumo.

SERVICIO	Servicio Must-Run (KWh)	Servicio de Iluminacion (KWh)	Global Best Iluminacion	Servicio de Electrodomestico (KWh)	Global Best Electrodomestico	Servicio de las baterias	Global best Bateria	Manejo de la Bateria	Sumatoria de consumo	Aporte sistema fotovoltaico	Resultado = (Total consumido - Aporte de PV)	Valor de la energia por Hora	Costo de la energia por Hora/dia (Noviembre)
1	0,08	0	0	0	1	0,2	0	0,2	0,28	0	0,28	37,018	10,36504
2	0,08	0	1	0	1	0,2	1	-0,2	0,08	0	0,08	37,018	2,96144
3	0,08	0	0	0	0	0,2	1	-0,2	0,08	0	0,08	37,018	2,96144
4	0,08	0,1	1	0	1	0,2	0	0,2	0,18	0	0,18	37,018	6,66324
5	0,08	0,1	0	0,1	0	0,2	0	0,2	0,08	0	0,08	37,018	2,96144
6	0,08	0,1	0	0,1	0	0,2	0	0,2	0,08	0	0,08	37,018	2,96144
7	0,08	0,1	1	0,1	1	0,2	1	-0,2	0,28	0,02	0,26	123,4	32,084
8	0,08	0	1	0,1	0	0,2	0	0,2	0,08	0,04	0,04	123,4	4,936
9	0,08	0	0	0,1	1	0	0	0	0,18	0,06	0,12	123,4	14,808
10	0,08	0	1	0,1	0	0	0	0	0,08	0,08	0	123,4	0
11	0,08	0	0	0,1	1	0	1	0	0,18	1	-0,82	123,4	-101,188
12	0,08	0	1	0,1	0	0	1	0	0,08	1	-0,92	123,4	-113,528
13	0,08	0	1	0,1	0	0	1	0	0,08	1	-0,92	123,4	-113,528
14	0,08	0,1	1	0,1	0	0	1	0	0,18	0,08	0,1	370,18	37,018
15	0,08	0,1	0	0,1	1	0	1	0	0,18	0,06	0,12	370,18	44,4216
16	0,08	0,1	1	0,1	1	0	0	0	0,28	0,04	0,24	370,18	88,8432
17	0,08	0,1	0	0,1	1	0	1	0	0,18	0,02	0,16	370,18	59,2288
18	0,08	0,1	1	0,1	0	0,2	1	-0,2	0,18	0	0,18	370,18	66,6324
19	0,08	0,1	0	0,1	0	0,2	0	0,2	0,08	0	0,08	370,18	29,6144
20	0,08	0,1	1	0,1	0	0,2	1	-0,2	0,18	0	0,18	123,4	22,212
21	0,08	0,1	1	0,1	1	0,2	1	-0,2	0,28	0	0,28	123,4	34,552
22	0,08	0,1	0	0,1	0	0,2	0	0,2	0,08	0	0,08	37,018	2,96144
23	0,08	0,1	0	0,1	0	0,2	1	-0,2	0,08	0	0,08	37,018	2,96144
24	0,08	0,1	1	0,1	1	0,2	1	-0,2	0,28	0	0,28	37,018	10,36504

Tabla 10. Resultados Escenario 3

	Escenario 3
Banco de Baterías	100 W
Costo por día (COP)	\$ 151,26836
Energía Importada de la red	0,32 kW
Energía Importada por el sistema fotovoltaico	3,4kW

Tabla 11. Resultado general de Escenario 3

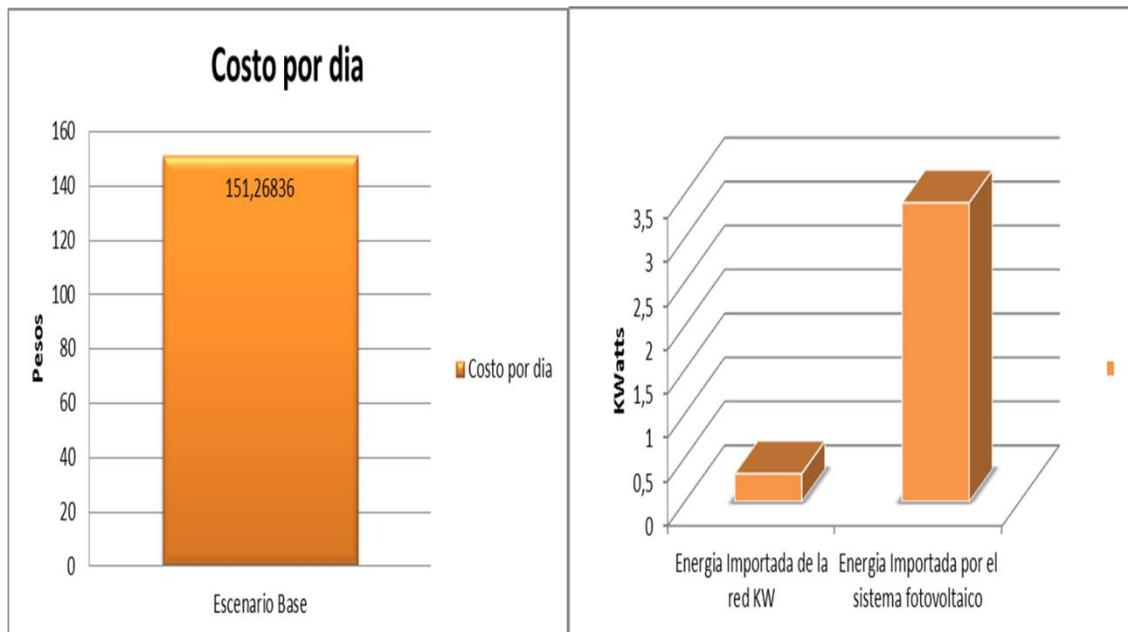


Figura 26. Diagramas de costo y consumo en el escenario 3

Para el presente escenario se contemplan las baterías y un sistema fotovoltaico, además se trabaja con la programación de los horarios de los equipos DER. Los resultados evidencian que en este escenario, con todos los dispositivos funcionando de manera integral, se obtiene un ahorro notable frente a cualquier de los casos anteriores.

- Frente al escenario denominado Caso Base, se determinó una reducción de un 83,66 % del suministro de energía entregada por el Proveedor y una reducción de la energía importada por la red en un 94,1%.
- En comparación al escenario 1, se determinó una reducción de un 66,92 % del suministro de energía entregada por el Proveedor con una reducción de la energía importada por la red en un 84,15%

- En comparación al escenario 2, se determinó una reducción de un 75,315% del suministro de energía entregada por el Proveedor con una reducción de la energía importada por la red en un 90,9%

Como se pudo observar en los resultados relacionados anteriormente, la inclusión de horarios de operación de los equipos DER más sistemas de suministro de energía como lo son los sistemas fotovoltaicos, funcionando de manera integral, generan una reducción significativa tanto en costo, representado en dinero ahorrado, como en la cantidad de Watts importados por a la red.

Estos resultados sirven como evidencia que integrar diferentes opciones para optimizar los recursos, es una buena herramienta de decisión y los beneficios serán tanto económicos como para el medio ambiente.

#### 6.2.4 Escenario 4

Por último también es el escenario en que el programador funciona contemplando todo el sistema incluido el banco de baterías con su operación. Se contempla también q la batería en sus condiciones iniciales está cargada al 100%. Adicionalmente como en los anteriores escenarios se toma de referencia los mismos Watts de consumo de los sistemas, el denominado Must-Run, el de Iluminación, el electrodoméstico del Caso base referenciados por las Figuras 15, Figuras 16 y Figuras 17 respectivamente y del sistema fotovoltaico del escenario 1. A diferencia del escenario anterior se cambian parámetros como las inercias para determinar si hay o no mejoras

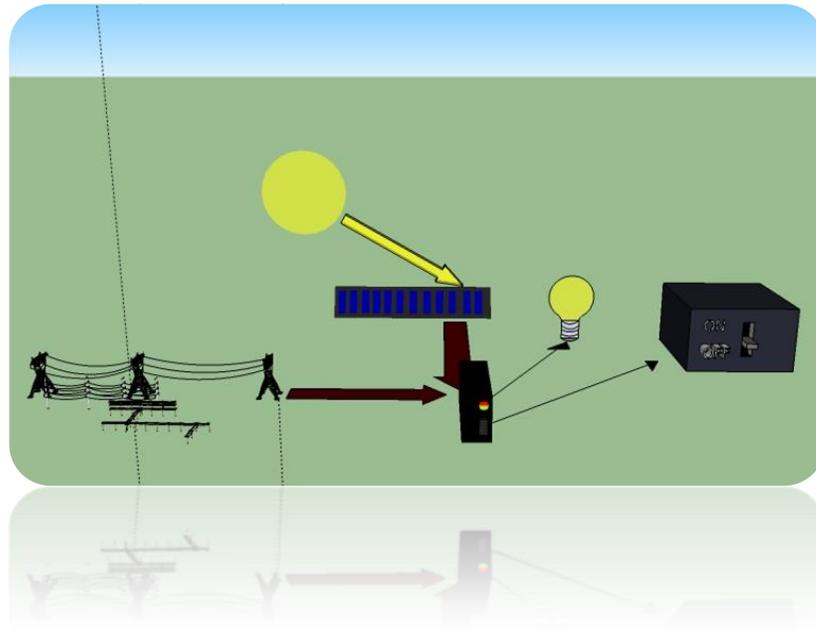
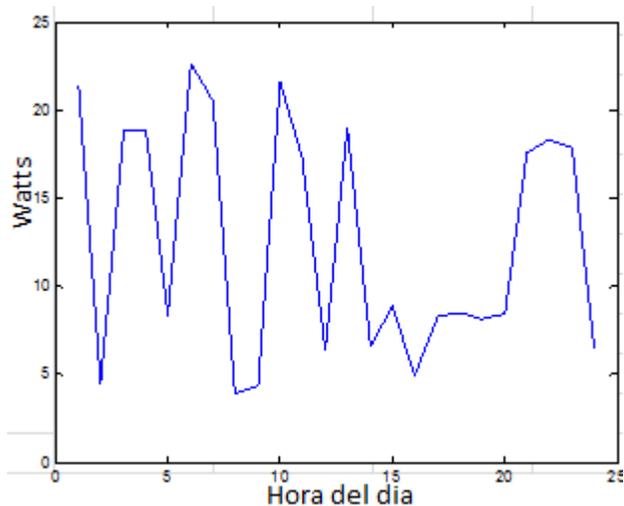


Figura 27. Diagrama Escenario 4

## ***ANÁLISIS DE RESULTADOS:***

Es evidente que la función tiende a encontrar su mejor desempeño de una manera más rápida que el caso anterior donde es más lento. Varias pruebas realizadas determinaron, que bajo las mismas condiciones pero modificando las inercias las partículas tienden a encontrar más rápido el óptimo global.

La imagen representada en la Figura 28 se observa las tasas de carga y descarga de la batería que se utilizó para el proyecto cambian respecto al escenario anterior mostrando mayor fluctuación en horas de la mañana y menos variación en horas de la tarde, con un pico de carga para el finaliza la tarde y con un cambio mayor para las horas de mayor consumo.



*Figura 28. Tasa de carga/descarga de la Batería*

En la tabla a continuación se hace un compendio de información hora a hora para ver el comportamiento de consumo, utilizando el dato real del costo kWh de Codensa con datos de consumo por equipos de iluminación, electrodomésticos y el equipo denominado Must-Run que debe operar durante todo el día además incluyendo un par de columnas en donde se observa si el equipo esta encendido o está apagado. Se contempla en la tabla 10 todas las operaciones necesarias para determinar si existe una reducción en los costos como en la importación de energía.

Adicionalmente se incluyeron la columna de consumo total hora, el aporte fotovoltaico, la columna de resultado donde se determina la cantidad de Watts utilizados y la última columna determina el valor en pesos Colombianos de ese consumo

SERVICIO	Servicio	Servicio de	Global Best	Servicio de	Global Best	Servicio	Global	Manejo	Sumatoria	Aporte	Resultado = (Total	Valor de la	Costo de la energía
HORA DEL	Must-Run	Iluminacion	Iluminacion	Electrodomestico	Electrodomestico	de las	best	de la	de	sistema	consumido -	energía por	por Hora/día
DIA	(KWh)	(KWh)	(KWh)	(KWh)	(KWh)	baterías	Bateria	Bateria	consumo	fotovoltaico	Aporte de PV)	Hora	(Noviembre)
1	0,08	0	1	0	0	0,2	1	-0,2	-0,12	0	-0,12	37,018	-4,44216
2	0,08	0	0	0	0	0,2	0	0,2	0,08	0	0,08	37,018	2,96144
3	0,08	0	1	0	0	0,2	0	0,2	0,08	0	0,08	37,018	2,96144
4	0,08	0,1	1	0	0	0,2	0	0,2	0,18	0	0,18	37,018	6,66324
5	0,08	0,1	1	0,1	1	0,2	1	-0,2	0,28	0	0,28	37,018	10,36504
6	0,08	0,1	1	0,1	0	0,2	1	-0,2	0,18	0	0,18	37,018	6,66324
7	0,08	0,1	0	0,1	0	0,2	0	0,2	0,08	0,02	0,06	123,4	7,404
8	0,08	0	0	0,1	1	0,2	0	0,2	0,18	0,04	0,14	123,4	17,276
9	0,08	0	0	0,1	0	0	1	0	0,08	0,06	0,02	123,4	2,468
10	0,08	0	1	0,1	0	0	1	0	0,08	0,08	0	123,4	0
11	0,08	0	1	0,1	1	0	0	0	0,18	1	-0,82	123,4	-101,188
12	0,08	0	0	0,1	0	0	0	0	0,08	1	-0,92	123,4	-113,528
13	0,08	0	1	0,1	1	0	0	0	0,18	1	-0,82	123,4	-101,188
14	0,08	0,1	0	0,1	1	0	0	0	0,18	0,08	0,1	370,18	37,018
15	0,08	0,1	0	0,1	0	0	1	0	0,08	0,06	0,02	370,18	7,4036
16	0,08	0,1	0	0,1	0	0	0	0	0,08	0,04	0,04	370,18	14,8072
17	0,08	0,1	1	0,1	1	0	1	0	0,28	0,02	0,26	370,18	96,2468
18	0,08	0,1	0	0,1	0	0,2	0	0,2	0,08	0	0,08	370,18	29,6144
19	0,08	0,1	0	0,1	0	0,2	1	-0,2	0,08	0	0,08	370,18	29,6144
20	0,08	0,1	1	0,1	0	0,2	1	-0,2	0,18	0	0,18	123,4	22,212
21	0,08	0,1	1	0,1	1	0,2	1	-0,2	0,28	0	0,28	123,4	34,552
22	0,08	0,1	0	0,1	1	0,2	0	0,2	0,18	0	0,18	37,018	6,66324
23	0,08	0,1	1	0,1	1	0,2	1	-0,2	0,28	0	0,28	37,018	10,36504
24	0,08	0,1	1	0,1	0	0,2	1	-0,2	0,18	0	0,18	37,018	6,66324

Tabla 12. Resultados Escenario 4

	Escenario 4
Banco de Baterías	0 W
Costo por día (COP)	\$ 31,57616
Energía Importada de la red	0,02 kW
Energía Importada por el sistema fotovoltaico	3,4 kW

Tabla 13. Resultado general de Escenario 4

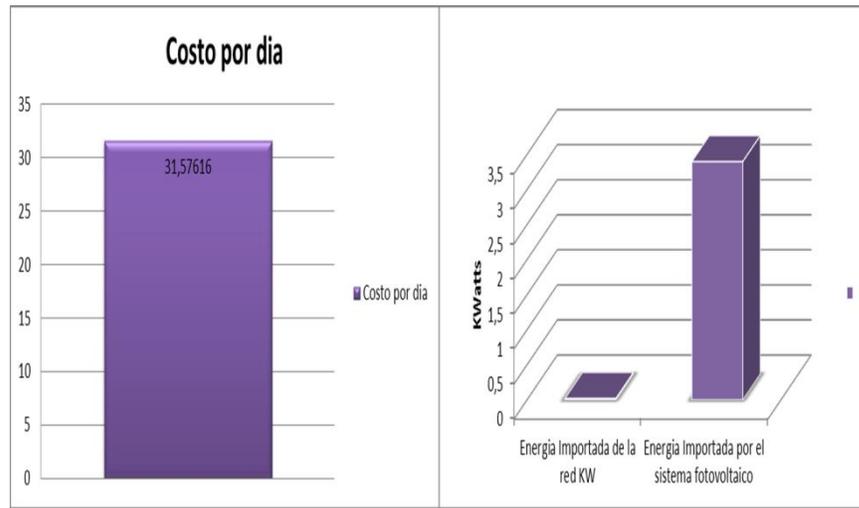


Figura 29. Diagramas de costo y consumo en el escenario 4

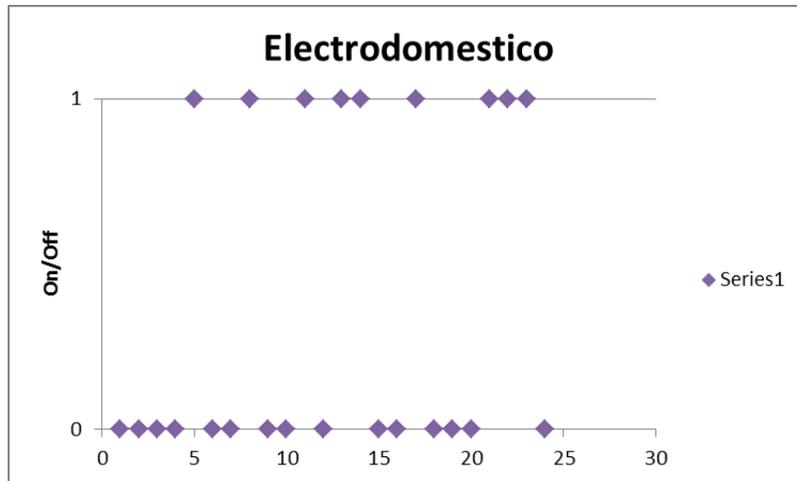


Figura 30. Diagramas de activación y desactivación para el electrodoméstico

Para el presente escenario se contemplan las baterías y un sistema fotovoltaico, además se trabaja con la programación de los horarios de los equipos DER. Los resultados evidencian que en este escenario, con todos los dispositivos funcionando de manera integral, se obtiene un ahorro notable frente a cualquier de los casos anteriores.

- Frente al escenario denominado Caso Base, se determinó una reducción de un 96,59 % del suministro de energía entregada por el Proveedor
- En comparación al escenario 1, se determinó una reducción de un 93,09 % del suministro de energía entregada por el Proveedor
- En comparación al escenario 2, se determinó una reducción de un 94,841% del suministro de energía entregada por el Proveedor
- En comparación al escenario 3, se determinó una reducción de un 79,12 del suministro de energía entregada por el Proveedor

Como se puede seguir observando en los resultados relacionados anteriormente y bajo varios cambios, modificar parámetros tanto en las condiciones iniciales como en los parámetros del PSO, permite encontrar nuevos escenarios con mejores condiciones. Este escenario fue uno de los mejores encontrados aunque se considera que se pueden hallar cientos de opciones que pueden tener resultados igualmente satisfactorios.

## 7. IMPLEMENTACION E INTEGRACION

### Comandos de integración:

1. Comando para la activación de un dispositivo

#OUTPUT,Id,1,100



2. Comando para la desactivación de un dispositivo

#OUTPUT,Id,1,0



**Integración con modelo a escala**



*Figura 31. Diagramas de integración*

Cuadro comparativo entre el artículo utilizado de referencia y el desarrollado en el presente trabajo de grado

ARTÍCULO	
Artículo Referencia	Artículo Propuesto
"Coordinated Scheduling of Residential Distributed Energy Resources to Optimize Smart Home Energy Services"	<b>OPTIMIZACIÓN DE RECURSOS ENERGÉTICOS A PARTIR DE LA UTILIZACIÓN DE UN DER Y DE LA INTEGRACIÓN DE EQUIPOS DE AUTOMATIZACIÓN</b>
Modelo matemático	Ajuste de modelo matemático a condiciones propuestas
Modelo hipotético y simulado	Modelo hipotético, simulado e implementado a un modelo a escala
Sin Tx de datos y visualización	Elaboración de código para transmitir datos seriales y visualizar los resultados en el modelo a escala
	Construcción de modelo a escala para visualización del resultado

*Tabla 14. Tabla comparativa.*

Como se menciona en el cuadro comparativo, se ajustó el modelo matemático propuesto por el autor con el fin de poder ser utilizado bajo las condiciones que se propusieron en el presente trabajo de grado, así mismo, con los equipos que se utilizaron para el modelo a escala (Sistema de iluminación, electrodoméstico, pequeña UPS y un sistema fotovoltaico hipotético).

Se investigaron diferentes artículos relacionados con Smart Grids, microgeneración y optimización de recursos y demás, pero se escogió éste debido a que el autor trabajó sobre equipos domésticos lo cual facilitaba su modificación y permitiendo la evaluación desde el punto de vista del usuario. Adicionalmente gracias a que el autor, en el desarrollo de su trabajo utilizaba equipos en un hogar, era viable integrar equipos reales de automatización para la demostración sobre un modelo a escala.

## 8. CONCLUSIONES

- El método convencional de suministro de energía puede ser mejorado por la priorización que el usuario asigna a los diferentes servicios de energía, es decir, se le da mayor importancia a aquellos servicios que el usuario considera más importantes en algún periodo del día y limitando o cancelando los servicios a los cuales el usuario le da menor valor o son menos importantes para él.
- Se demostró que adaptando la técnica de optimización de PSO para la resolución del modelo matemático se encuentra los datos de interés (Se encuentra el valor de las variables de diseño), de esta forma se trabaja con esos puntos de interés para poder tener la interacción sobre los equipos del prototipo.
- Para el caso en mención, se demostró que la utilización del modelo matemático mejora el suministro de energía y sus tiempos de operación.
- Se demostró una reducción en el consumo de energía importada a la red de la residencia y una reducción en los costos de facturación por el consumo efectuado.
- Se proponen unas estrategias para la mejor utilización del recurso energético en donde se evidencia que la utilización de equipos de una manera integrada, genera el mayor beneficio a bajo costo. Se considera también que no es un escenario limitado sino por el contrario se pueden agregar tanto técnicas como equipos se quiera para obtener un mayor beneficio.
- Se contemplan algunos escenarios hipotéticos para efectos de simulación que permiten evidenciar la posibilidad de cancelar, activar o posponer un servicio dependiendo del valor de importancia que se le haya dado.
- Se observó que el desempeño del algoritmo satisface los requerimientos del problema, sin embargo el tiempo de ejecución del sistema no es óptimo, ya que puede llegar a tardar más de 20 minutos. Su funcionamiento es óptimo pero bajo esas consideraciones.
- La definición del problema de distribución de energía es subjetivo limitado a las definiciones y condiciones del usuario final.
- A través de la herramienta de hyperterminal se pudo verificar el envío del código ASCII para operar el equipo de control de los DER, todo bajo la estructura del fabricante Lutron y estructurado con los datos obtenidos como respuesta del problema de optimización.
- Es de interés general el dedicar esfuerzos para el mejoramiento de la adquisición de los recursos energéticos para el bienestar de la comunidad y del medio ambiente, así que es importante

seguir dedicando esfuerzos para la investigación de técnicas y estrategias para la óptima distribución de energía.

- El planificador permite optimizar la provisión de los servicios controlando su operación.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

1. Enedis. [En línea] [Citado el: 9 de Septiembre de 2012.]  
[http://www.enedis.com.ar/GenDisNuesEmp/Detail/0,2378,ai\\_IdnAssoc\\_10950\\_ai\\_IdnLanguage\\_202,00.html](http://www.enedis.com.ar/GenDisNuesEmp/Detail/0,2378,ai_IdnAssoc_10950_ai_IdnLanguage_202,00.html).
2. **M. A. Pedrasa, e. d. Spooner, and i. f. Macgill.**, *Improved Energy Services Provision through the Intelligent Control of Distributed Energy Resources*. Bucharest : IEEE Bucharest Power Tech Conference, June 28th – July 2nd 2009. .
3. **Michael Angelo A. Pedrasa, ted d. spooner, and iain f. macgill.** *Coordinated Scheduling of Residential Distributed Energy Resources to Optimize Smart Home Energy Services*. s.l. : IEEE Transactions on Smart Grid Vol 1 No. 2, 2010.
4. **Roncero, Javier Rodriguez.** *Integration is key to smart grid management*. Frankfurt : CIRED Seminar, 2008. Paper 9.
5. Control 4. *Control 4*. [En línea] [Citado el: 9 de Septiembre de 2012.]  
<http://www.control4.com/residential/products/>.
6. **Yamazak, Rui Teng and Tatsuya.** *Bit-Watt Home System with Hybrid Power Supply*. s.l. : IEEE, 2010 Vol 5.
7. **Michael Angelo Pedrasa, Ped Spooner, Dr Iain Macgill,** “**An Energy Service Decision-Support Tool for Optimal Energy Services Acquisition**.” *An Energy Service Decision-Support Tool for Optimal Energy Services Acquisition*. s.l. : IEEE, April 2010.
8. Wikipedia. [En línea] [Citado el: 9 de Septiembre de 2013.]  
[http://es.wikipedia.org/wiki/Red\\_el%C3%A9ctrica\\_inteligente](http://es.wikipedia.org/wiki/Red_el%C3%A9ctrica_inteligente).
9. Smart-Energy. [En línea] [Citado el: 9 de Septiembre de 2013.] <http://vse-smartenergy.com/wp/?portfolio=%C2%BFque-es-smart-grid>.
10. Enedis. [En línea] [Citado el: 9 de Septiembre de 2013.]  
[http://www.enedis.com.ar/GenDisNuesEmp/Detail/0,2378,ai\\_IdnAssoc\\_10950\\_ai\\_IdnLanguage\\_202,00.html](http://www.enedis.com.ar/GenDisNuesEmp/Detail/0,2378,ai_IdnAssoc_10950_ai_IdnLanguage_202,00.html)..
11. Lutron. [En línea] [Citado el: 9 de Septiembre de 2012.]  
<http://www.lutron.com/Pages/Default.aspx>.
12. Taringa. [En línea] [Citado el: 9 de Septiembre de 2012.]  
<http://www.taringa.net/posts/info/2063312/Como-calculo-el-consumo-de-kwh.html>.

13. **Changming Ji, Fang Liu, Xinming Zhang.** *Particle Swarm Optimization Based on Catfish Effect for Flood Optimal Operation of Reservoir.* s.l. : Seventh International Conference on Natural Computation, 2011 .
14. Cemaer. [En línea] [Citado el: 1 de Noviembre de 2014.] <http://www.cemaer.org/tipos-de-sistemas-de-energia-solar-fotovoltaica/>.
15. Wikipedia. [En línea] [Citado el: 9 de Septiembre de 2013.] <http://es.wikipedia.org/wiki/RS-232> .
16. **Albert Molderink, Vincent Bakker, Maurice G.C. Bosman, Johann L. Hurink, Gerard J.M. Smit.** *A three-step methodology to improve domestic energy efficiency.* s.l. : IEEE, 2010 .
17. **Albert Molderink, Student Member, Maurice G.C. Bosman, Johann L. Hurink, Gerard J.M. Smit.** *Domestic energy management methodology for optimizing efficiency in Smart Grids.* Bucharest Power Tech Conference Bucharest, Romania : IEEE , 2009 , June 28th – July 2nd.
18. **Albert Molderink, Vincent Bakker, Maurice G.C. Bosman, Johann L. Hurink, Gerard J.M. Smit.,** *Management and Control of Domestic Smart Grid Technology.* s.l. : IEEE Transactions on Smart Grid, Vol 1 No.2, , September 2010.
19. **M. Hashmi, Member, S. Hänninen, and K. Mäki.,** *Survey of smart grid concepts, architectures, and technological demonstrations worldwide.* s.l. : IEEE , 2011.
20. **Yamazaki, Rui Teng and Tatsuya.** *Bit-Watt Home System with Hybrid Power Supply.* s.l. : IEEE, 2010 .
21. **Wang Zhenxing, Wei Shutao, Shi Linxiang, Liu Zhongyuan.,** *The Analysis & Implementation of Smart Home Control System.* s.l. : IEEE International Conference on Information Management and Engineering., 2009 .
22. Homotech. [En línea] [Citado el: 9 de Septiembre de 2012.] <http://www.homotechcolombia.com/productos/control4/252.html>.
23. Global Cache. [En línea] [Citado el: 9 de Septiembre de 2012.] <http://www.globalcache.com/> .
24. Codensa. [En línea] [Citado el: 9 de Septiembre de 2013.] [http://empresas.micodensa.com/BancoConocimiento/E/el\\_mercado\\_de\\_la\\_energia\\_-\\_tarifas/el\\_mercado\\_de\\_la\\_energia\\_-\\_tarifas.asp](http://empresas.micodensa.com/BancoConocimiento/E/el_mercado_de_la_energia_-_tarifas/el_mercado_de_la_energia_-_tarifas.asp) .

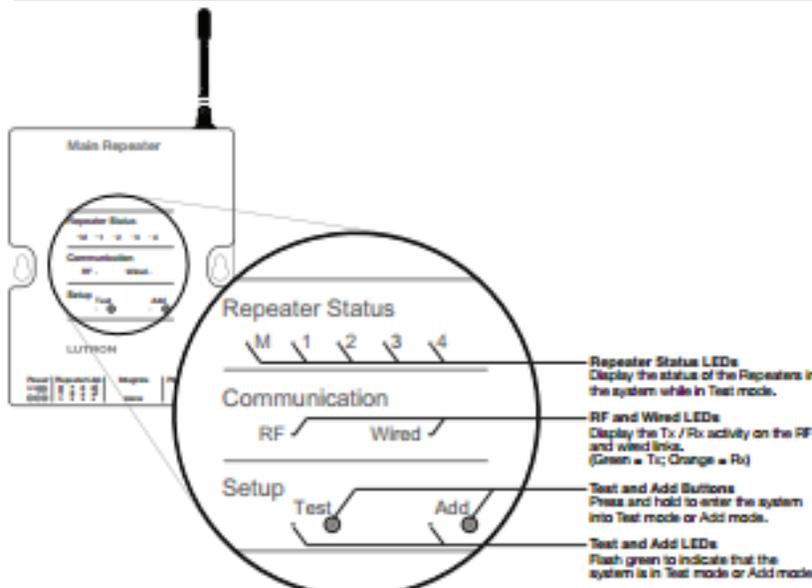
## 10. ANEXOS

### 10.1 Equipo de control Lutron Main Repeater

RadioRA<sub>2</sub> product specifications
3692271
02.19.14

### RadioRA<sub>2</sub> Repeaters

#### Operation



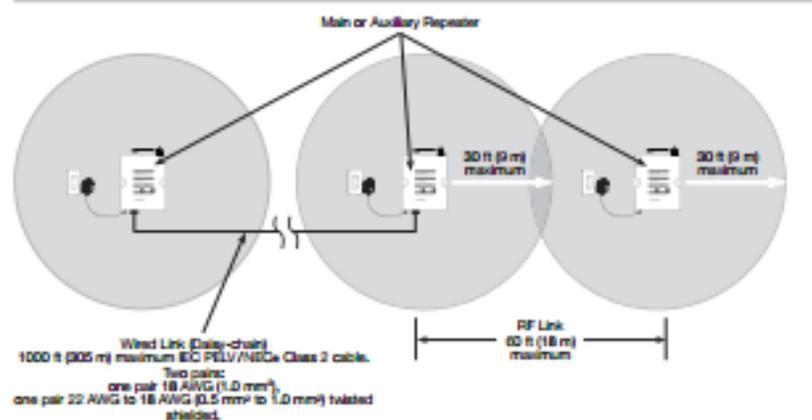
**Repeater Status LEDs**  
Display the status of the Repeaters in the system while in Test mode.

**RF and Wired LEDs**  
Display the Tx/Rx activity on the RF and wired links.  
(Green = Tx; Orange = Rx)

**Test and Add Buttons**  
Press and hold to enter the system into Test mode or Add mode.

**Test and Add LEDs**  
Flash green to indicate that the system is in Test mode or Add mode.

#### Wired and RF Configuration



**Wired Link (Daisy-chain)**  
1000 ft (305 m) maximum IEC PELV/NEC Class 2 cable.  
Two pairs:  
one pair 18 AWG (1.0 mm<sup>2</sup>)  
one pair 22 AWG to 18 AWG (0.5 mm<sup>2</sup> to 1.0 mm<sup>2</sup>) twisted shielded.

**RF Link**  
30 ft (9 m) maximum

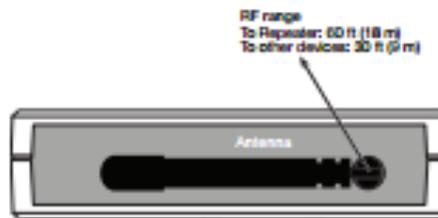
www.lutron.com
4
Technical Support: 800.523.9466 (USA)  
+44.(0)20.7702.0657 (Europe)

## RadioRA<sub>2</sub> Repeater

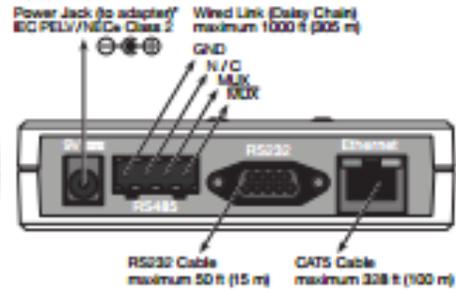
### Connections

#### Main Repeater

Top View



Bottom View



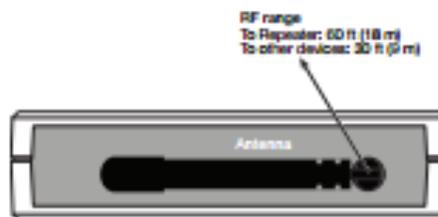
RS232 and Ethernet Pin Numbering



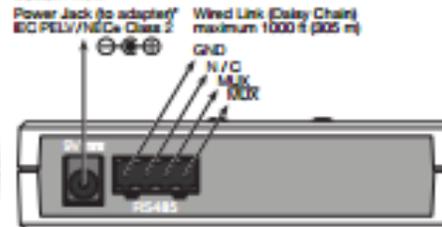
RS232	Pin #	Ethernet	Pin #
TxD	2	T+V <sub>e</sub>	1
RxD	3	T-V <sub>e</sub>	2
GND	5	R+V <sub>e</sub>	3
		R-V <sub>e</sub>	6

#### Auxiliary Repeater

Top View



Bottom View



\* See Low-Voltage Transformer spec (Lutron P/N 369561)