

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA
MECANICA Y ELÉCTRICA**

**DISEÑO DE SISTEMA DE AHORRO ENERGETICO PARA CASA-
HABITACION CON SUPERCAPACITORES**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE INGENIERO
INGENIERÍA EN COMUNICACIONES Y ELECTRÓNICA**

PRESENTAN

**KEVIN LÓPEZ PRECIADO
ISMAEL MARTINEZ FLORES
ISRAEL PÉREZ ARENAS**

ASESORES

ING. ARTURO ALONSO HIT ESPINOSA



MÉXICO, D.F. NOVIEMBRE DE 2013

ÍNDICE

CAPITULO 1: Introducción	3
1.1. Resumen	5
1.2 Planteamiento del Problema	5
1.3 Justificación	6
1.4 Objetivo General	7
1.4.1 Objetivos Específicos	7
1.5 Alcance y Resultados Esperados	7
 CAPITULO 2: Marco Teórico	 8
2.1. Antecedentes	9
2.2. Baterías Electroquímicas	10
2.3. Baterías de Iones de Litio (Li-Ion)	12
2.4. Modelo Matemático y Comportamiento de la Batería	13
2.5. Relaciones Matemáticas	14
2.6. Modelo Matemático del Supercapacitor	17
2.7. Descarga del Supercapacitor	19
2.8. Sistema Fotovoltaico	20
2.9. Inversores	23
2.10. Cableado	23
 CAPITULO 3: Propuesta de Solución	 25
3.1. Características de Diseño	29
3.2. Dimensionamiento del Sistema de Almacenamiento	30
3.3. Sistema de Supercapacitores	31
3.4. Sistema de Baterías	33
3.5. Escenarios de funcionamiento	34
3.6. Escenarios de Simulación	35
3.7. Simulaciones de potencia	36

3.7.1. Escenario I. Potencia generada no nula y potencia demandada nula	41
3.7.2. Escenario II. Potencia generada nula y potencia demandada no nula	44
3.7.3. Escenario III. Potencia generada mayor que potencia demandada	47
3.7.4. Escenario IV. Potencia demandada mayor que potencia generada	49
3.8. Sistemas de control	51
3.8.1. Especificaciones de diseño	51
3.8.2. Esquema electrónico de control	52
3.8.3. Adquisición de parámetros eléctricos tensiones y corrientes	53
3.9. Simulaciones en PROTEUS	58
3.10. Acoplamiento de señales de disparo del PIC 16F877	68
3.11. Simulaciones del Sistema de ahorro de energía en SolidWorks	69
CAPITULO 4: Conclusiones y Trabajo Futuro	73
4.1. Conclusiones	73
4.2. Trabajo futuro	75
4.3. Bibliografía	76
4.4. Anexos	77

CAPITULO 1

Introducción

El aumento en la demanda de energía, la disminución de los recursos de combustibles fósiles, junto con los temas ambientales involucrados en la quema de estos, ha incrementado la necesidad de recursos energéticos alternativos. Los recursos renovables que no van a disminuir a partir de su utilización incluyen al sol, viento, tierra y agua.

En la actualidad se percibe un crecimiento en el nivel de investigación que se lleva a cabo en el desarrollo de tecnologías para obtener la máxima energía de salida de estos recursos.

Consumir energía es sinónimo de actividad, de transformación y de progreso, siempre que ese consumo esté ajustado a nuestras necesidades y se trate de aprovechar al máximo las posibilidades contenidas en la energía.

Desde las necesidades más básicas y primitivas (calentarse con una hoguera o cocinar los alimentos), a las más modernas y sofisticadas (conservar esos mismos alimentos durante varios meses o enviar mensajes por escrito a través de un fax), la mejora de las condiciones de vida de los hombres o de su nivel de bienestar han exigido siempre disponer de un excedente de energía que pudiese ser consumido. El consumo de energía, también en el hogar, es por tanto sinónimo de progreso, de aumento de la infraestructura, los bienes, servicios disponibles y de la satisfacción de las necesidades.

Un principio esencial para el ahorro de energía consiste en conocer cómo funcionan los equipos y aparatos en el hogar, así como los diferentes tipos de energía que consumen y el distinto aprovechamiento que podemos obtener de ellos.

Es muy importante tener en cuenta que la trascendencia y la complejidad que hoy en día supone el consumo de energía en el interior de los hogares, no están reñidas sino todo lo contrario, con la posibilidad de hacer un buen uso de esta energía y utilizarla

con la mayor eficiencia en el hogar, oficina, industria y todo aquel medio donde el hombre desarrolla sus actividades cotidianas.

La generación de energía eléctrica basada en energías renovables está tomando cada vez más importancia. En la actualidad, el aporte de energía de dichas fuentes a la generación global se encuentra en torno al 20%. Este aporte energético viene condicionado por la naturaleza intermitente de la fuente de energía en cuestión. En ocasiones se dispone de elevados índices de producción de energía, en otros casos tasas bajas o incluso nulas. Todo ello hace que un sistema de distribución no pueda depender en gran parte de sistemas de generación basados en energías renovables, o al menos de esta forma.

Dada la importancia que está adquiriendo el aprovechamiento de Fuentes de Energía Renovable (FER) en sistemas de generación distribuida (redes de distribución), es primordial el estudio de la integración de éstas de la manera más eficiente posible.

Debido al carácter intermitente, variable e impredecible de estas fuentes de energía, se hace interesante y a la vez necesario el uso de sistemas de almacenamiento, para poder integrar un sistema de generación de energía eléctrica más robusto, autónomo, fiable y competitivo.

Los sistemas de almacenamiento integrados en sistemas de generación con fuentes de energía renovable dotan de mayor autonomía y robustez a los mismos, absorbiendo la energía producida desde fuentes de energía renovable intermitentes, y liberándola en los momentos de mayor demanda o cuando no existe otra fuente de energía disponible.

Los acumuladores y los bancos de supercapacitores nos permiten disponer de una reserva de energía, proveniente en principio de la fuente renovable, de forma que siempre se disponga de un backup de energía, permitiendo abastecer una demanda de potencia mayor que la producida mediante los paneles fotovoltaicos.

Todas estas ventajas hacen que la integración de los sistemas de almacenamiento en estos sistemas de generación sean indispensables para una gestión adecuada y óptima de la energía en una red.

1.1. Resumen del proyecto

Como la producción de energía a partir de combustibles fósiles tiene peligrosas consecuencias ambientales, además de que la población mundial crece y se vuelve más dependiente de la tecnología y por consiguiente de la demanda de energía, en la actualidad uno de los objetivos primarios de las políticas públicas en todo el mundo son las de generar y usar energía limpia o renovable. La energía solar como una tecnología limpia puede ser empleada para satisfacer estos objetivos.

La combinación de baterías y supercapacitores junto con los paneles solares en un sistema híbrido de almacenamiento de energía, aumenta la densidad de potencia del sistema. La metodología utilizada para optimizar el sistema asegura que la demanda se puede satisfacer, mientras que el sistema de almacenamiento de energía optimiza y administra los recursos energéticos.

El proyecto tiene en cuenta la radiación solar en la ubicación del sistema y el perfil de la demanda en el transcurso de un mes en una casa o departamento promedio en la ciudad de México.

En la vida diaria nuestros electrodomésticos generan un alto consumo de energía, esto es debido a una excesiva demanda energética al momento de su arranque, por lo que con este sistema, se reducirá el incremento de consumo en esos instantes de tiempo, esto se va a realizar mediante la ayuda de bancos de supercapacitores, ya que estos dispositivos cuentan con la característica no solo de almacenar energía, sino que también tienen una descarga de energía rápida, lo que nos permitirá suministrar esa excesiva demanda energética sin tomarla de la línea de distribución comercial (CFE).

1.2. Planteamiento del Problema

Día a día en millones de hogares se cuenta con aparatos electrónicos que nos ayudan a hacer el trabajo más fácil y más rápido, este es un beneficio que la tecnología nos ha venido ofreciendo al paso de los años, pero el uso de estos, traen consigo altos costos por parte de la red eléctrica pública, tarifas que dependen del consumo de estos

aparatos. La sobreexplotación de los combustibles fósiles además de la contaminación que estos generan vislumbra un problema a futuro, sin embargo las nuevas tecnologías en cuanto a generación de energía renovable (paneles solares, energía eólica, SRE, etc.), permiten la implementación de sistemas híbridos para la sustitución de los combustibles fósiles.

1.3. Justificación

En la actualidad debido a la sobreexplotación de algunos recursos energéticos, el aumento en el precio de los combustibles fósiles y la contaminación ambiental causado por estos, existe un creciente interés por los sistemas de ahorro de energía. Por tales motivos en este proyecto se decide utilizar paneles fotovoltaicos (PV) los cuales representan grandes ventajas, ya que requieren mantenimiento mínimo, no generan ruido y se están desarrollando para ser integrados en diseños de construcción, además de que su costo ha venido disminuyendo dramáticamente.

Por otra parte se han usado las baterías como medio principal de almacenamiento de energía en vehículos con motor de combustión interna y en vehículos eléctricos. Si bien una batería posee gran densidad de energía, los picos de potencia causados por grandes corrientes hacen que disminuya la vida útil del dispositivo y se consume de manera ineficiente mayor cantidad de energía. Con el propósito de mejorar la eficiencia y tiempo de vida en una batería se han propuesto topologías híbridas con la ayuda de supercapacitores. Esto es debido a que tienen una rápida liberación de energía (alta potencia) que reduce las altas demandas de energía en la fuente principal.

Con lo mencionado anteriormente, el proyecto está enfocado a reducir el gasto energético en un hogar promedio de cuatro integrantes, generar tanto un beneficio económico en el consumo energético como en la administración de la energía necesaria para que funcionen los dispositivos de mayor consumo de energía en el hogar.

1.4. Objetivo General

Diseñar y simular un sistema eléctrico de ahorro y administración de energía mediante bancos de supercapacitores y baterías con captación de energía solar con paneles fotovoltaicos que permitan la disminución del consumo y ahorro de energía en una casa-habitación mediante un sistema de control basado en un pic 16f877; el cual ponderará los principales escenarios eléctricos a los que el sistema se podría someter.

1.4.1. Objetivos Específicos

- Diseñar un sistema híbrido de ahorro energético para casa-habitación con supercapacitores, el cual provea la energía necesaria para el consumo diario de la misma con opción de abastecimiento de la red comercial (CFE).
- Desarrollar un sistema de almacenamiento híbrido mediante supercapacitores y baterías, que permita almacenar energía y tenga respuesta rápida a los picos de alto consumo.

1.5. Alcance y Resultados Esperados

El proyecto pretende realizar el diseño y simulación de un sistema eléctrico de almacenamiento de energía mediante bancos de supercapacitores y baterías que permitan suprimir el gasto energético que genera una casa-habitación. Con lo cual, la implementación de este sistema tanto en lugares remotos como en las grandes ciudades dará una opción alternativa de generación, ahorro y uso de energía.

Puede ser beneficioso que esto se incluya en algún programa de optimización de la energía por parte del gobierno tanto estatal como federal para proporcionar al usuario las alternativas disponibles de consumo de energía. Con esto se pretende decir que este proyecto puede ser llevado a gran escala lo que produciría un sistema general de ahorro y administración de la energía que se consuma en cada vivienda y/o empresa donde se aproveche dicho sistema.

CAPITULO 2

Marco Teórico

En este capítulo se realiza una descripción del sistema de ahorro de energía que tiene como característica principal el uso de supercapacitores, este sistema de ahorro de energía es también llamado Instalaciones autónomas fotovoltaicas el cual está formado básicamente por módulos de baterías, supercapacitores, un sistema fotovoltaico y un sistema de control básico basado en un microcontrolador pic 16f877.

Para el almacenamiento indirecto de energía eléctrica se cuenta con dispositivos conocidos como las supercapacitores y para el almacenamiento directo se pueden mencionar las baterías. En la simulación del proyecto se utiliza principalmente bancos de supercapacitores y arreglos de baterías para el almacenamiento de la energía que se captará mediante los paneles fotovoltaicos. Por lo cual se menciona a continuación una descripción de estos componentes.

Los acumuladores de energía, como su propio nombre indica, permiten almacenar energía en alguna de sus formas, para poder ser utilizada posteriormente en alguna operación que la requiera. Asociados a un sistema eléctrico, estos dispositivos permiten mejorar su eficiencia, fiabilidad y costo, absorbiendo la energía desde fuentes de energía renovables intermitentes y liberándola en los momentos de mayor demanda o cuando no exista otra fuente de energía disponible.

El almacenamiento energético abarca diversas tecnologías más o menos desarrolladas hasta la fecha como son las baterías electroquímicas y los supercapacitores.

Los dispositivos de almacenamiento de energía se utilizan básicamente para cuatro propósitos:

- Aumentar la eficiencia de los sistemas eléctricos, al reducir la necesidad de generación de respaldo, suministrando los picos de potencia en la demanda diaria.

- Aumentar la fiabilidad del sistema, al reducir las posibilidades de corte de suministro.
- Aumentar la disponibilidad de fuentes renovables (energía solar, eólica...)
- Aumentar la eficiencia y el uso racional de la energía en procesos industriales.

2.1. Antecedentes

SY Kan [1] estudió la utilización de un supercapacitor para almacenamiento de energía desde un panel fotovoltaico (PV) a la batería y desde la batería a la carga. Cuando se carga desde un panel fotovoltaico la batería puede experimentar fluctuaciones de corriente e interrupciones de carga. El banco de supercapacitor se carga rápidamente desde el panel fotovoltaico, los supercapacitores cargarán la batería de iones de litio a un ritmo más lento. La reducción de la corriente de carga resulta en una temperatura más baja de batería, reduciendo la capacitancia de altas temperaturas cíclicas y el aumento de la duración de la batería.

D. Cericola [2] analizó un sistema de almacenamiento híbrido de iones de litio con supercapacitor. Dos sistemas híbridos fueron considerados, un sistema híbrido interno y otro externo. El sistema híbrido interno utiliza un electrodo de batería y un electrodo de condensador en una sola celda. De acuerdo con Cericola la energía del híbrido interno está limitada por el electrodo de condensador, con la potencia limitada por el electrodo de la batería. Por lo tanto, se encontró la configuración híbrida externa como la mejor opción.

Holland [3] realizó la caracterización experimental de la potencia y la densidad de energía de una batería de iones de litio, supercapacitor y una batería de iones de litio en paralelo al supercapacitor híbrido bajo cargas de corriente pulsante. Desde el sistema de análisis se encontró que por una masa base la energía y la densidad del sistema híbrido era más bajo que el sistema de la batería. Para el sistema de la batería a altas corrientes, la energía disponible aumenta con la disminución de los ciclos, mientras que a bajas corrientes la energía disponible era independiente de

dichos ciclos. El sistema híbrido logra una mayor potencia a un menor costo. Hubo un aumento en la capacidad del sistema para suministrar grandes corrientes y un pequeño aumento en la energía disponible. El análisis se realizó con un sistema pasivo, usando una configuración activa que permite una mejor utilización de la energía de los supercapacitores debe mejorar aún más los resultados.

De la literatura se puede observar que un sistema híbrido de supercapacitor y baterías han mejorado el rendimiento en comparación a un solo sistema de baterías para cargas que tienen un alto pico de demanda de potencia media.

2.2. Baterías Electroquímicas

Las baterías electroquímicas consisten en dispositivos acumuladores de energía eléctrica mediante procedimientos electroquímicos y que posteriormente la devuelve casi en su totalidad. Este ciclo puede repetirse por un determinado número de veces, dado por la vida útil del dispositivo. Se trata de un generador eléctrico secundario; es decir, un generador que no puede funcionar sin que se le haya suministrado electricidad previamente mediante lo que se denomina proceso de carga. Existen diversos tipos de baterías con distintas características, acumuladores de plomo, baterías alcalinas de manganeso, níquel-cadmio, níquel-hidruro metálico, de iones litio, polímero de litio, etc.; con densidades de energía entre 30 y 130 Wh/Kg.



Figura 2.1. Baterías Electroquímicas

La principal virtud de las baterías es la mayor densidad de energía que poseen frente a muchos otros almacenadores, pero tienen ciertas desventajas o restricciones. Una de ellas es la baja velocidad de carga y descarga permitida. Una batería tiene restricciones de tiempos y corrientes de carga y descarga. Por su naturaleza, no son dispositivos capaces de absorber grandes puntas de potencia en las cargas ni proporcionarlas en las descargas sin que ello no repercuta negativamente en su vida útil. Su rendimiento no es muy elevado, del orden del 80%, debido a su resistencia interna, la cual es notable en los procesos de carga y descarga del dispositivo. Otra característica desfavorable es la propia autodescarga con el tiempo debida a la resistencia de fuga.

Algunos tipos de baterías presentan el llamado “efecto memoria”, en el que en cada recarga se limita el voltaje o la capacidad de almacenamiento, debido a corrientes elevadas, altas temperaturas, al envejecimiento del dispositivo, imposibilitando el aprovechamiento de toda su energía. Un inconveniente no menos importante es la alta toxicidad de los metales pesados que forman parte de algunos tipos de baterías, que constituyen un problema ambiental grave. Se están intentando reducir esta toxicidad con la sustitución por nuevas sustancias menos contaminantes.

Tipo de batería	Capacidades máximas	η	Precio (€/kWh)	Nº ciclos carga y descarga	Auto-descarga	Observaciones
Plomo-Ácido	10MW 40MWh	≈75%	50-150	1500	2-5% Al mes	Pesadas, baja energía específica
Níquel Cadmio (NiCd)	30MW 10MWh	≈75%	200-600	3000	5-20% al mes	Alta descarga, baja energía específica
Sulfuro de sodio (NaS)	10MW 70MWh	≈89%	-	2500	0%	Incorporan calentadores: temperaturas de operación ≈ 325°C
Ión-Litio	En desarrollo	≈99%	700-1000	3000	1% al mes	Alta energía específica, alto coste

Figura 2.2. Cuadro comparativo de los principales tipos de baterías

Las características principales de estos dispositivos se indican a continuación:

- Densidad de energía: ~ 20-100 Wh/Kg
- Densidad de potencia: ~ 20-200 W/kg

- Rango de energía: para sistemas de hasta 100MWh
- Rango de potencia: ~ 1kW-30MW
- Tiempos de carga y descarga: ~ horas
- Número de ciclos de carga y descarga: 1000 - 3000
- Rendimiento: 75% – 99% según tecnologías
- Autodescarga: 0 – 20 % al mes según tecnologías
- Precios bajos para Pb-ácido, medios para Ni-Cd y caros para Li-ión
- Según tipo puede poseer elementos tóxicos

2.3. Baterías de iones de litio (Li-ion)

Las baterías de iones de litio (Li-ion) utilizan un ánodo de grafito y un cátodo de óxido de cobalto, trifilina (LiFePO_4) u óxido de manganeso. Su desarrollo es más reciente, y permite llegar a altas densidades de capacidad. No admiten descargas y sufren mucho cuando éstas suceden; por lo que suelen llevar acoplada circuitería adicional para conocer el estado de la batería, y evitar así tanto la carga excesiva como la descarga completa.

Ventajas:

- Apenas sufren el efecto memoria y pueden cargarse sin necesidad de estar descargadas completamente, sin reducción de su vida útil.
- Altas densidades de capacidad.

Desventajas:

- No admiten bien los cambios de temperatura.
- No admiten descargas completas y sufren mucho cuando éstas suceden.

Usos:

- Móviles, tabletas, libros electrónicos, etc.

2.4. Modelo Matemático y Comportamiento de la Batería

El rendimiento de las baterías depende de variables en casos fáciles de medir, como son su temperatura y voltaje, y en otros casos no tan fácilmente medibles como son su edad o la forma en que hayan sido tratadas en el pasado. Las tolerancias de fabricación y las variaciones entre celdas dentro de la batería también pueden tener un gran impacto en el rendimiento final.

Este modelo presenta un nivel de detalle que se aproxima al funcionamiento real porque permite tomar provecho de las medidas experimentales más relevantes disponibles en las hojas técnicas de los fabricantes o las obtenidas por métodos independientes. Estos datos suelen ser la caída de potencial en los terminales de la batería en función de la carga aplicada y la caída de potencial debido a las variaciones de temperatura.

Para ajustarse a estos datos, el modelo dispone de tres componentes:

- Un potencial de equilibrio E
- Una resistencia interna con dos componentes R_1 y R_2
- Un condensador C que caracteriza la respuesta transitoria, pues la caída de voltaje cuando se aplica una carga no cae instantáneamente sino que tarda un tiempo determinado en alcanzar el equilibrio.

El esquema eléctrico de estos componentes es el siguiente:

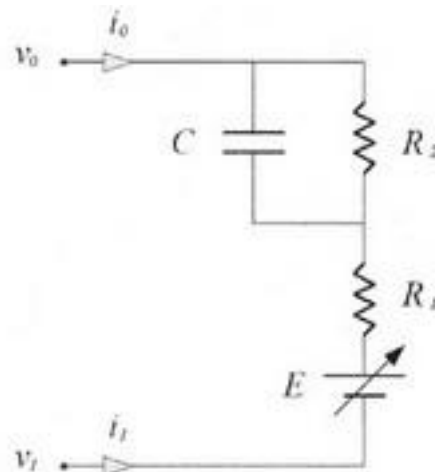


Figura 2.3. Circuito equivalente

El potencial de equilibrio (voltaje de circuito abierto) depende de la temperatura y de la cantidad de material activo disponible en los electrodos, el cual se puede especificar como estado de descarga SoD. La capacidad de descarga depende de la tasa de descarga y de la temperatura. De esta forma necesitamos encontrar una expresión para el potencial $E(i, T, t)$.

2.5. Relaciones matemáticas

Las expresiones para el potencial, el voltaje en los terminales y el estado de descarga, basados en las descripciones anteriores, vienen dados de la siguiente forma:

$$E[i(t), T(t), t] = v[i(t), T(t), t] - R_{int} * i(t)$$

$$v[i(t), T(t), t] = f(SOD^*[i(t), T(t), t]) + \Delta E(T)$$

$$SOD^*[i(t), T(t), t] = \frac{1}{Q_r} \int_0^t \alpha[i(t)] * \beta[T(t)] * i(t) dt$$

Donde f representa la curva de potencial de referencia obtenida y donde Q_r es la capacidad de la batería referida al voltaje de corte para la curva de referencia. El método para determinar el factor de descarga para la curva de descarga se muestra en la figura, en donde se emplean los datos de la batería de ValenceLiFePo U1-XP.

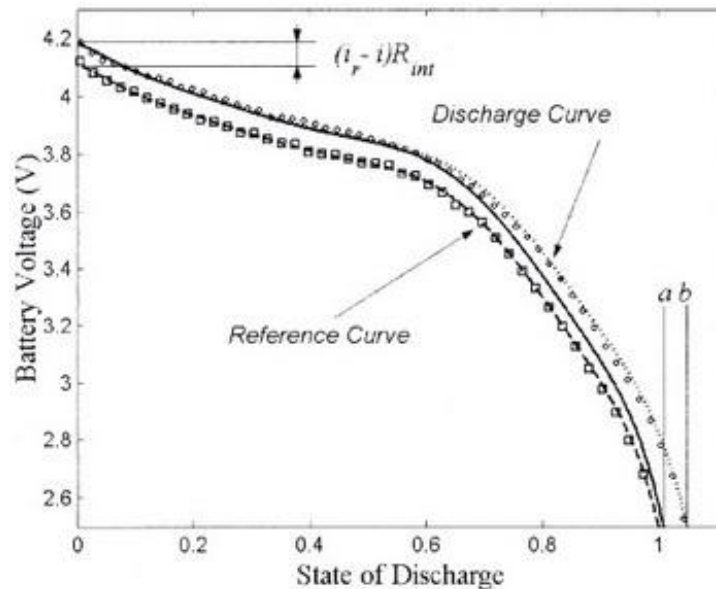


Figura 2.4. Determinación del factor de descarga $a(i)$

La curva de referencia indicada por cuadrados tiene un factor de descarga la unidad con respecto al voltaje de corte. La curva para la cual se calcula el factor de descarga se muestra con círculos. Esta curva tiene una capacidad de descarga mayor, igual a b . La curva representada por la línea sólida fue calculado excluyendo el exceso de pérdidas internas de la curva de referencia (desplazando la curva hacia arriba una distancia igual a $R_{int}(i_r - i)$, donde i_r es la corriente de descarga de la curva de referencia e i es la corriente de la curva para la que se busca el factor).

La profundidad de descarga para la curva de referencia es igual a α . El factor de descarga se define entonces como:

$$\alpha(i) = \frac{a}{b}$$

La línea obtenida considerando las pérdidas internas y el factor de descarga se ajustan a la curva real satisfactoriamente. Se calcula el factor de descarga para las diferentes curvas de descarga proporcionadas por el fabricante y se realiza una tabla.

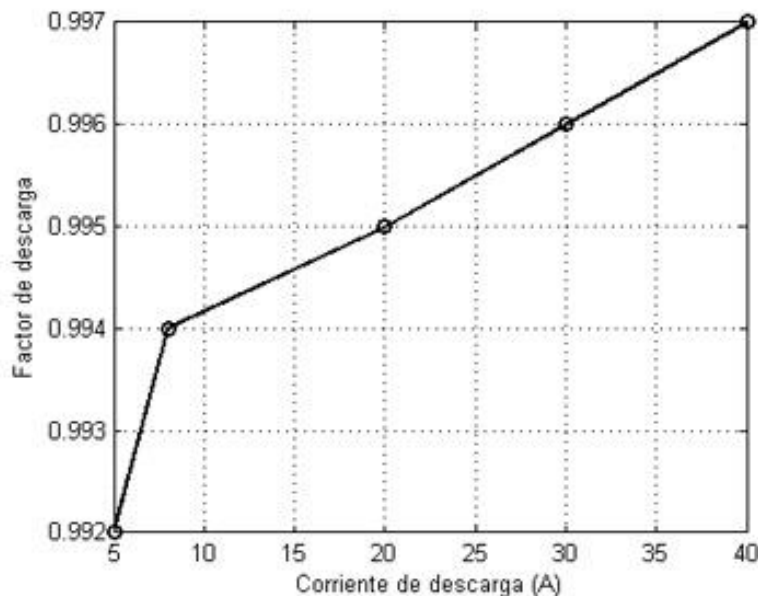


Figura 2.5. Factores de descarga para diferentes intensidades

Los factores de temperatura y el potencial de caída debido a la temperatura son calculados siguiendo el mismo procedimiento.

En este caso, los datos corresponden a una corriente de descarga determinada tomada a diferentes temperaturas. La curva de referencia (23°C) se dibuja con círculos y tiene un factor igual a 1. La curva para la cual se busca el nuevo factor de temperatura se representa con cuadrados (0°C).

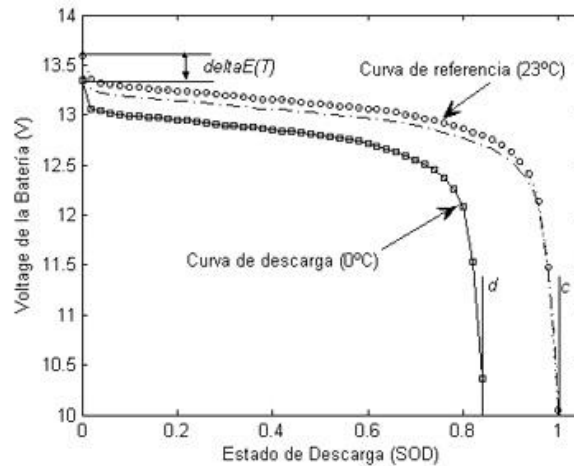


Figura 2.6. Determinación del factor de temperatura $b(T)$

El desplazamiento vertical es la variación de potencial $DE(T)$ que es función de la temperatura y se calcula para cada curva suministrada por el fabricante. La capacidad de descarga es c . El factor de temperatura se define como

$$\beta(T) = \frac{c}{d}$$

A continuación se muestran los factores de temperatura para las curvas de descarga a diferentes temperaturas suministradas por el fabricante:

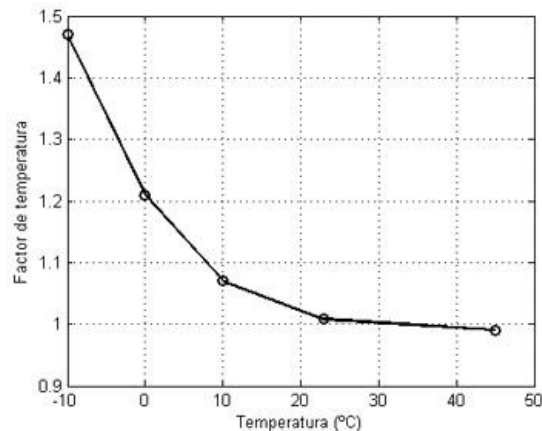


Figura 2.7. Factores de temperatura $b(T)$ para diferentes temperatura

Los factores de caída de potencial de la batería para las diferentes curvas de temperatura proporcionadas por el fabricante son los siguientes:

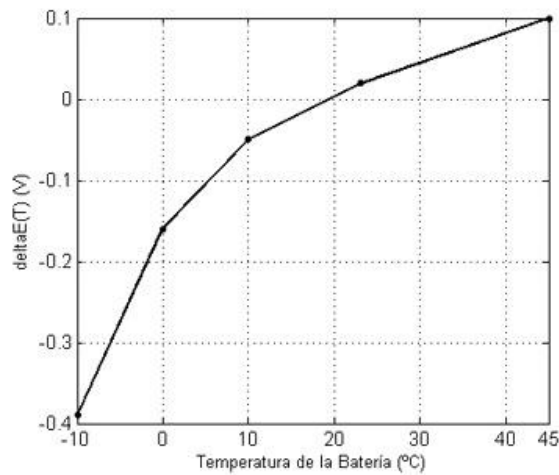


Figura 2.8. Factores $\Delta E(T)$ de caída de potencial a diferentes temperaturas

De nuevo se comprueba que el ajuste conseguido aplicando los factores de temperatura a la curva de referencia es satisfactorio.

2.6 Modelo Matemático del Supercapacitor

Los supercapacitores son dispositivos conocidos como condensadores electroquímicos de doble capa, supercapacitores, ultracondensadores, ultracapacitores o simplemente EDLC (Electro Chemical Double Layer Capacitor), por sus siglas en inglés. Estos supercapacitores están fabricados con electrodos de materiales porosos por ejemplo: el carbón y algunos óxidos metálicos, estos se encuentran inmersos en una sal electrolítica. Los carbones activados en cada lado de los electrodos (ánodo y cátodo) son separados por una membrana conductora, por lo que el funcionamiento del supercapacitor dependerá de la porosidad de los carbones activados y del tamaño molecular de los iones electrolíticos.

La cantidad de energía almacenada en este dispositivo viene dada por la siguiente expresión, en Joules, siendo V_1 y V_2 las tensiones que marcan la profundidad del almacenamiento:

$$\Delta E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot (V_1^2 - V_2^2)$$

Los materiales estudiados como electrodos para supercapacitores son principalmente de tres tipos: óxidos de metales de transición, polímeros conductores y materiales de carbono activados. Con óxidos metálicos se han conseguido valores de capacidad muy altos, pero estos supercapacitores tienen la desventaja de que son excesivamente caros y por lo tanto sólo se utilizan en aplicaciones militares y en la industria aeroespacial. El uso de polímeros conductores también puede dar lugar a capacidades relativamente altas, pero estos materiales presentan el inconveniente de que sufren hinchamiento y contracción, lo cual es indeseable puesto que pueden ocasionar la degradación de los electrodos durante los ciclos de carga y descarga. Finalmente, los materiales de carbono se presentan como los materiales activos del electrodo más atractivos, debido a su bajo costo relativo, elevado área superficial (pueden superar los 2500 m²·g⁻¹) y gran disponibilidad. Además, los materiales de carbono pueden presentar unas estructuras diferentes (materiales grafiticos o no grafitizables) y están disponibles en una gran variedad de formas (fibras, telas, aerogeles o nanotubos).



Figura 2.9. Supercondensadores de Doble Capa

Las características principales de estos dispositivos se indican a continuación:

- Altas Capacidades: ~ 1-5000 F

- Densidad de energía: $\sim 1-10 \text{ Wh/Kg}$
- Densidad de potencia: $\sim 1-10 \text{ kW/Kg}$
- Tiempos de carga y descarga: \sim minutos, segundos
- Número de ciclos de carga y descarga: $\sim 10^6$
- Tensión de trabajo Limitada: $\sim 1-500\text{V}$
- Rendimiento eléctrico: $\sim 95-99\%$
- Muy baja autodescarga
- Precio relativamente Alto
- No necesitan mantenimiento
- No poseen elementos tóxicos
- Resistencia a condiciones adversas de temperatura

2.7. Descarga del Supercapacitor

La descarga es usada para determinar parámetros del supercapacitor. Podemos observar en la imagen dos componentes para la descarga a corriente constante en el supercapacitor: una resistiva y una capacitiva.

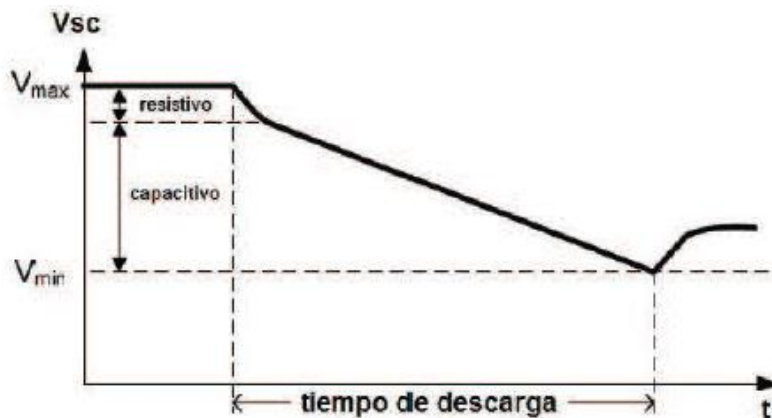


Figura 2.10. Descarga de un supercapacitor a corriente constante.

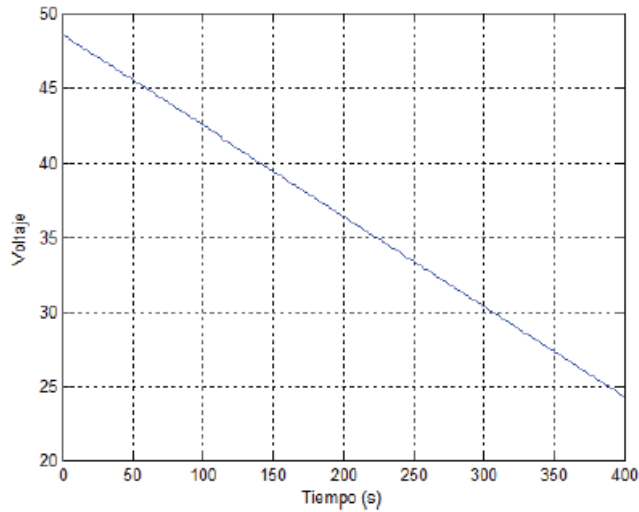


Figura 2.11. Voltaje del supercapacitor con descarga a corriente constante.

La imagen representa el perfil de descarga de un banco de supercapacitores con parámetros mostrados en la Figura 2.12. La descarga se realizó a corriente constante. Se observa que el supercapacitor se descarga al 50% de su voltaje máximo en un tiempo de 400 segundos. Los valores utilizados en la descarga a corrientes constantes se realizan y se muestran en la siguiente figura:

Tabla I. Parámetros de descarga a corriente constante

Variables	Corriente Constante
d	50%
i_{sc}	10 A
P_{dis}	Varía
$V_{sc,max}$	48.6 V
$V_{sc,min}$	24.3
R_{rse}	7.1 mΩ
C	165F

Figura 2.12. Parámetros de descarga

2.8. Sistema Fotovoltaico

Generalmente, un módulo o panel fotovoltaico consiste en una asociación de células, encapsulada en dos capas de EVA (etileno-vinilo-acetato), entre una lámina frontal de

vidrio y una capa posterior de un polímero termoplástico (frecuentemente se emplea el tedlar) u otra lámina de cristal cuando se desea obtener módulos con algún grado de transparencia. Muy frecuentemente este conjunto es enmarcado en una estructura de aluminio anodizado con el objetivo de aumentar la resistencia mecánica del conjunto y facilitar el anclaje del módulo a las estructuras de soporte.

Las células más comúnmente empleadas en los paneles fotovoltaicos son de silicio, y se puede dividir en tres subcategorías:

- Las células de silicio monocristalino están constituidas por un único cristal de silicio, normalmente manufacturado mediante el proceso Czochralski. Este tipo de células presenta un color azul oscuro uniforme.
- Las células de silicio policristalino (también llamado multicristalino) están constituidas por un conjunto de cristales de silicio, lo que explica que su rendimiento sea algo inferior al de las células monocristalinas. Se caracterizan por un color azul más intenso.
- Las células de silicio amorfo. Son menos eficientes que las células de silicio cristalino pero también menos costoso. Este tipo de células es, por ejemplo, el que se emplea en aplicaciones solares como relojes o calculadoras.



Figura 2.13. Sistema Fotovoltaico en Casa

El funcionamiento de un Sistema Fotovoltaico se logra mediante el siguiente proceso:

La luz solar entra sobre la superficie del arreglo fotovoltaico, donde es convertida en energía eléctrica de corriente directa por las celdas solares, después esta energía es

recogida y conducida hasta un controlador de carga con la función de enviar a toda o parte de esta energía hasta el banco de baterías en donde es almacenada, cuidando que no se excedan los límites de sobrecarga y sobredescarga. En sistemas FV conectados a la red, no se usan bancos de baterías.

La energía almacenada o enviada a la red se utiliza para abastecer las cargas durante la noche o en días de baja insolación o cuando el arreglo fotovoltaico es incapaz de satisfacer la demanda por sí solo. Si las cargas a alimentar son de corriente directa, estas pueden hacerse a través del arreglo fotovoltaico o desde la batería. Cuando las cargas son de corriente alterna, la energía proveniente del arreglo y de las baterías, limitadas por el controlador, es enviada a un inversor de corriente, en donde es convertida a corriente alterna.

Consta principalmente de los siguientes elementos:

- 1) Arreglos de módulos de celdas solares.
- 2) Reguladores de voltaje y otros controles, típicamente un controlador de carga de batería, un inversor de corriente CD/CA o un rectificador CA/CD.
- 3) Cables e interruptores.
- 4) Red eléctrica circundante.
- 5) Cercado de seguridad, sin incluir las cargas eléctricas.

Un Sistema Solar Fotovoltaico no siempre consta de la totalidad de los elementos aquí mencionados. Puede prescindir de uno o más de éstos, dependiendo del tipo y tamaño de las cargas a alimentar, el tiempo, hora y época de operación y la naturaleza de los recursos energéticos disponibles en el lugar de la instalación.

Existen dos tipos de Sistemas Solares los cuales son:

- Sistemas Solares Autónomos.
- Sistemas Solares Interconectados.

Componentes de una planta solar fotovoltaica

Una planta solar fotovoltaica cuenta con distintos elementos que permiten su funcionamiento, como son los paneles fotovoltaicos para la captación de la radiación solar, y los inversores para la transformación de la corriente continua en corriente alterna.

2.9. Inversores

La eléctrica continua que proporcionan los módulos fotovoltaicos se puede transformar en corriente alterna mediante un aparato electrónico llamado inversor e inyectar en la red eléctrica (para venta de energía) o bien en la red interior (para autoconsumo).

El proceso, simplificado, sería el siguiente:

- Se genera la energía a bajas tensiones (380-800 V) y en corriente continua.
- Se transforma con un inversor en corriente alterna.
- En plantas de potencia inferior a 100 kW se inyecta la energía directamente a la red de distribución en baja tensión (230V).
- Y para potencias superiores a los 100 kW se utiliza un transformador para elevar la energía a media tensión (15 ó 25 kV) y se inyecta en las redes de transporte para su posterior suministro.

2.10. Cableado

Es el elemento que transporta la energía eléctrica desde su generación, para su posterior distribución y transporte. Su dimensionamiento viene determinado por el criterio más restrictivo entre la máxima caída de tensión admisible y la intensidad máxima admisible. Aumentar las secciones de conductor que se obtienen como resultado de los cálculos teóricos aporta ventajas añadidas como:

- Líneas más descargadas, lo que prolonga la vida útil de los cables.
- Posibilidad de aumento de potencia de la planta sin cambiar el conductor.
- Mejor respuesta a posibles cortocircuitos.
- Mejora del performance ratio (PR) de la instalación.

- Autoconsumo y Balance neto

El autoconsumo fotovoltaico consiste en la producción individual a pequeña escala de electricidad para el propio consumo, a través de paneles solares fotovoltaicos. Ello se puede complementar con el balance neto. Este esquema de producción, que permite compensar el consumo eléctrico mediante lo generado por una instalación fotovoltaica en momentos de menor consumo, ya ha sido implantado con éxito en muchos países. Entre las ventajas del autoconsumo respecto al consumo de la red se encuentran las siguientes:

- Con el abaratamiento de los sistemas de autoconsumo y el encarecimiento de las tarifas eléctricas, cada vez es más rentable que uno mismo produzca su propia electricidad.
- Se reduce la dependencia de las compañías eléctricas.
- Los sistemas de autoconsumo fotovoltaicos utilizan la energía solar, una fuente gratuita, inagotable, limpia y respetuosa con el medioambiente.
- Se genera un sistema distribuido de generación eléctrica que reduce la necesidad de invertir en nuevas redes y reduce las pérdidas de energía por el transporte de la electricidad a través de la red.
- Se reduce la dependencia energética del país con el exterior.
- Se evitan problemas para abastecer toda la demanda en hora punta, conocidos por los cortes de electricidad y subidas de tensión.
- Se minimiza el impacto de las instalaciones eléctricas en su entorno.

CAPITULO 3

Propuesta de Solución

Este proyecto se basa en una red eléctrica domestica con abastecimiento mediante paneles solares, además de conexión a la red de abastecimiento comercial (CFE).

A continuación se describe mediante un esquema el sistema mencionado. Se parte de una red doméstica con su respectiva demanda de carga, cuyo abastecimiento está dado por la generación de energía eléctrica mediante paneles solares en conjunto con un sistema de almacenamiento compuesto por baterías y supercapacitores, también cuenta con la posibilidad de conexión a la red de abastecimiento comercial (CFE).

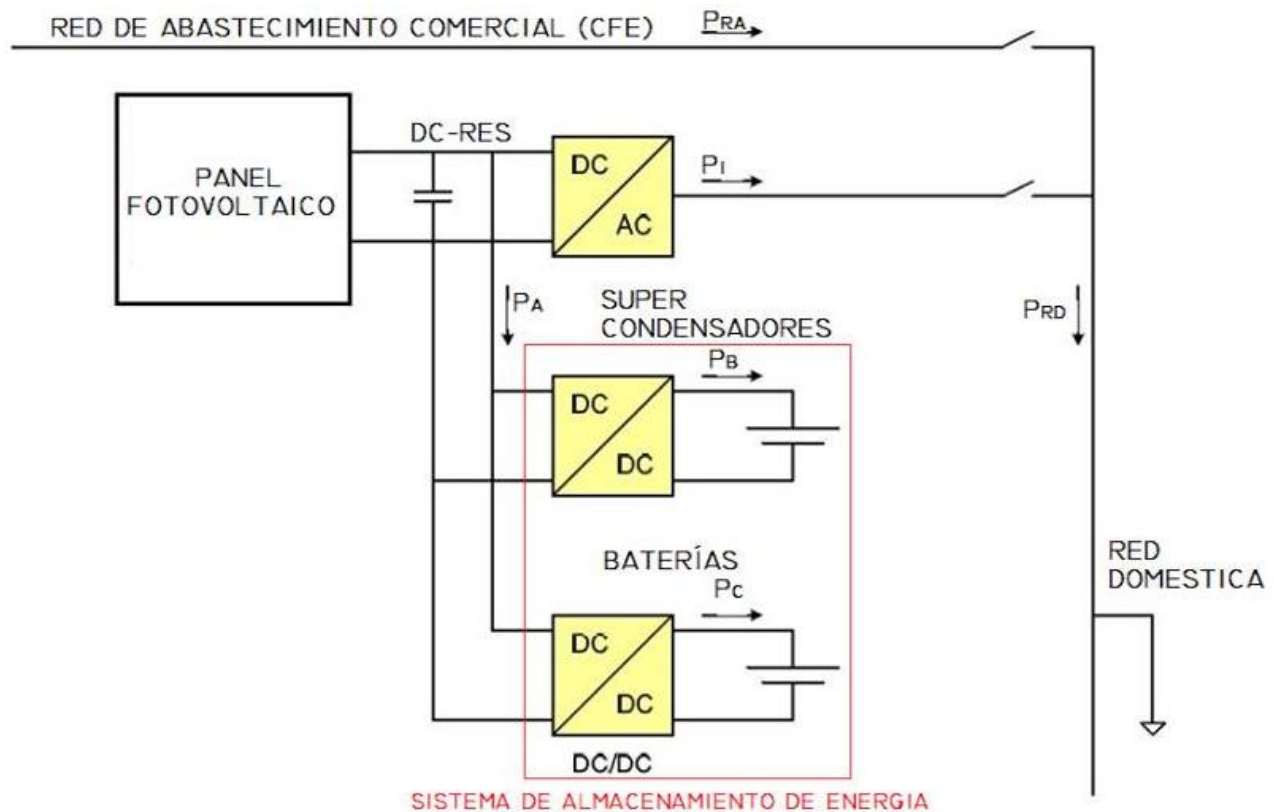


Figura 3.1. Diagrama eléctrico del sistema.

Como se aprecia en el diagrama anterior la energía aprovechada mediante los paneles solares es almacenada temporalmente en DC-RES, para su posterior almacenamiento o suministro a la red doméstica. El control global del sistema es el encargado de

gestionar el flujo de energía, mediante el gobierno sobre los controles locales de cada convertidor de potencia.

En un modo de funcionamiento idóneo, el panel solar suministraría su máxima cantidad de energía, aportándola al DC-RES. Por otro lado, el controlador del equipo “DC/AC” se encarga de la inyección de la energía almacenada temporalmente en el DC-RES a la red doméstica, según la potencia de referencia comandada por el controlador global de la planta. Finalmente, el control del convertidor del sistema de almacenamiento gestiona el almacenamiento o suministro por parte de este último subsistema, según situaciones de funcionamiento. Si la potencia generada por el panel solar es mayor a la demandada por la red doméstica, el exceso es almacenado en los acumuladores de energía. En el caso contrario, demanda mayor que la generación, el sistema de almacenamiento se encarga de suministrar a la carga la potencia restante.

Los convertidores “DC/DC” gestionan la potencia de almacenamiento (PA) en cada uno de los acumuladores de energía asociados, baterías (PB) y supercondensadores (PC).

El caso planteado se basa en la sustentación de la red doméstica mediante la generación de energía por parte de los paneles solares y el apoyo del sistema de almacenamiento, denominándose ello como funcionamiento en circuito cerrado. En el caso de la insuficiencia de éstas (panel y almacenamiento), se llevaría a la conexión con la red de abastecimiento comercial para el consiguiente aporte necesario, llamándose funcionamiento dependiente de la red de abastecimiento comercial. El cometido del proyecto es el cálculo de los almacenadores de energía necesarios para cubrir las especificaciones de diseño y el control implementado para su funcionamiento óptimo.

En el modo de funcionamiento en circuito cerrado, el inversor “DC/AC” se comporta como fuente de tensión, siendo el responsable del mantenimiento de la tensión y frecuencia suministradas a la red doméstica, y con ello, de la entrega de la potencia a la carga, también llamada como potencia de red doméstica (PRD).

Por otro lado, el balance de la potencia generada a partir de panel fotovoltaico y la potencia suministrada a la carga hará que la tensión en el DC-RES varíe. Si la energía generada es mayor que la inyectada, dicha tensión subirá; si ocurre lo contrario, la tensión bajará. Si se añade un control sobre esta tensión, se obtiene la consigna de potencia para el convertidor del sistema de almacenamiento.

$$P_A^{REF} = f[V_{DC-RES}]$$

Esto lleva consigo el almacenamiento de energía en el caso de que la producción sea mayor que la demanda, o al aporte de potencia en el caso de que la producción mediante el panel fotovoltaico sea insuficiente para el abastecimiento de la demanda.

Lo explicado anteriormente es aplicable si cuando se tiene un exceso de producción, el sistema de almacenamiento posee capacidad para almacenarlo; o por el contrario, cuando existe un exceso de demanda, dicho sistema es capaz de entregar la potencia extra necesaria para abastecer la carga. Si ello no ocurre se pueden definir dos escenarios de funcionamiento excepcionales a los cuales el control de sistema global debe responder.

Si existe un exceso de producción y el sistema de almacenamiento se encuentra en su límite de capacidad, el control global desconectará el panel solar.

Si por el contrario, el conjunto formado por el panel fotovoltaico y el sistema de almacenamiento son insuficientes para el abastecimiento de la carga, el control del sistema comandará la conexión de la red doméstica con la red de abastecimiento comercial (CFE) para dejar de funcionar en circuito cerrado y pasar al modo de funcionamiento dependiente de la red de abastecimiento comercial. De esta manera, el bus quedaría impuesto en tensión y frecuencia por la red de distribución, siendo el comportamiento del inversor “DC/AC” de fuente de corriente, en este caso. La desconexión con la red de distribución se efectuaría cuando la demanda pueda satisfacerse con el conjunto de panel fotovoltaico y sistema de almacenamiento.

La elección del almacenamiento híbrido de supercapacitores y baterías tiene su razón en la naturaleza de estos almacenadores. Los supercapacitores tienen una respuesta rápida ante variaciones en las condiciones de carga y descarga pero no son grandes almacenadores de energía. Por el contrario, las baterías poseen mucha mayor capacidad de almacenamiento pero sus tiempos de respuesta son limitados. En conjunto, el sistema de almacenamiento con su debida gestión de la potencia, posee una rápida respuesta dada por los primeros dispositivos y una alta capacidad de energía, proporcionada por las baterías en régimen permanente.

Si la potencia de almacenamiento comandada por el control del sistema es P_A , las potencias seguidas por los convertidores para baterías y supercapacitores, P_B y P_C respectivamente, se obtienen de la siguiente manera:

$$P_B^{REF} = LPF[P_A^{REF}]$$

$$P_C^{REF} = P_A^{REF} - P_B^{REF}$$

La potencia total de almacenamiento es adaptada mediante un filtro paso bajo (LPF) para obtener la consigna de entrega de potencia para el convertidor asociado a las baterías. Con ello se obtiene una referencia sin cambios bruscos, adaptándose a la naturaleza de estos dispositivos.

La potencia a entregar por el sistema de supercapacitores sería, por tanto, la diferencia entre la potencia total de almacenamiento y la encargada al sistema de baterías.

En conclusión, se puede decir que la ventaja de poseer un sistema de almacenamiento integrado al sistema original es triple.

- ✓ La posibilidad de seguir trabajando en el punto de máxima potencia del panel fotovoltaico aunque la carga demandada sea menor.
- ✓ La posibilidad de abastecer una carga de mayor demanda de energía que la extraída del panel fotovoltaico mediante el aporte del sistema de almacenamiento.

- ✓ La posibilidad del funcionamiento en circuito cerrado de la red doméstica, reduciéndose tanto la dependencia hacia la red de abastecimiento comercial (CFE), como el consumo de potencia sobre ésta.

3.1 Características de Diseño

Basándose en el estudio sobre consumo eléctrico domestico [4] realizado en el DF y considerando una vivienda típica de nivel socioeconómico tipo c, que considera una vivienda con sala, comedor, 2 dormitorios, un baño, cocina y patio interior o bien a departamento con sala, comedor, 2 dormitorios, un baño y cocina; Se sabe que el consumo promedio mensual es de 277.87 KW/h por mes.

Considerando un margen de consumo de $\pm 10\%$ tenemos:

Consumo de Referencia (P_{REF}) = Consumo promedio + Consumo de tolerancia.

$$P_{REF} = 277.87 \text{ KW} + 27.78 \text{ KW}$$

$$P_{REF} = 305.65 \text{ KWh por mes}$$

Considerando que el panel solar obtiene energía diariamente se utiliza para los fines de diseño el consumo promedio diario:

$$P_{PD} = 10.18 \text{ KWh por día considerando un mes promedio de 30 días.}$$

La cantidad mínima de los paneles fotovoltaicos necesarios para satisfacer los requisitos de carga diaria se calculan mediante la siguiente ecuación.

$$N_{PV} = \frac{\int_1^{24} P_{PD}}{\int_1^{24} P_{PVMAX}}$$

Dónde:

P_{PD} es el consumo promedio diario

P_{PVMAX} es la potencia máxima generada por el panel fotovoltaico.

Considerando un panel con capacidad efectiva de 400wh /día descrito por el grupo de análisis “oportunidades energético” [5], perteneciente a la Secretaria de Desarrollo Social (SEDESOL) y Secretaria de Energía (SENER) se realizan los cálculos correspondientes.

Calculando:

$$N_{PV} = \frac{\int_1^{24} 10180 \text{ w}}{\int_1^{24} 400 \text{ w}}$$

$$N_{PV} = 25.45 \approx 26.$$

Calculo de la corriente máxima de PV:

$$I_{maxPV} = I_{pv} \cdot N_{pv} = 7.615A \cdot 26 = 197.99 \approx 198A$$

Basado en el análisis anterior y considerando el reporte de la secretaria de energía [2] en donde establece que “El potencial de energía en México es uno de los más altos del mundo: Aproximadamente tres cuartas partes del territorio nacional son zonas con una insolación media de 5KWh / m^2 al día”, entre ellas el Distrito Federal, considerando que en días de poca radiación solar este dato tiene una reducción promedio del 20%, se usara para fines de cálculo una radiación solar de 4 KW h / m^2 , por lo que para suministrar el consumo promedio diario necesitaremos cubrir una superficie de 23.4 m^2 de paneles solares del techo de la casa-habitación o departamento.

3.2 Dimensionamiento del Sistema de Almacenamiento

En este apartado se dimensionarán los dispositivos acumuladores de energía para cubrir las especificaciones e integración en la planta estudiada. El citado dimensionamiento se realizará para la situación más desfavorable: demanda máxima de la carga en condiciones de panel fotovoltaico nulo. Se necesitará, por tanto, un backup de energía capaz de suministrar la potencia nominal durante al menos un día

de funcionamiento en circuito cerrado, como se han marcado en las especificaciones de diseño.

El sistema de almacenamiento, por tanto, deberá ser capaz de suministrar una potencia de 10.18kW a la carga en estas condiciones. Estimando un rendimiento aproximado del convertidor del 90%, la potencia nominal de dicho sistema sería:

$$P = \frac{P_N}{\eta} = \frac{10.188kW}{0.90} = 11.32kW$$

A la vista del cálculo, cada convertidor de potencia se dimensionará para 12kW como potencia nominal.

En este sistema híbrido de almacenamiento, el banco de supercapacitores debe almacenar la energía necesaria para responder ante los picos de potencia (variaciones en la red doméstica, panel fotovoltaico, transitorios, etcétera); y las baterías deben almacenar la energía necesaria para mantener la potencia en régimen permanente. Por ello, se dimensionarán ambos subsistemas por separado.

3.3 Sistema de Supercapacitores

El cálculo de capacidad de energía en un supercapacitores responde a la siguiente expresión:

$$\Delta E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot (V_1^2 - V_2^2)$$

Siendo V_1 y V_2 las tensiones que marcan la profundidad del almacenamiento. Para el diseño de la energía total almacenada, V_1 sería la tensión nominal del supercapacitores y V_2 la tensión mínima de diseño admisible del mismo.

Se diseñará el almacenamiento de supercapacitores para abastecer la carga durante varias puestas en funcionamiento del sistema de baterías. Según especificaciones de

las mismas, las baterías tienen un tiempo de respuesta de 3 segundos para dar la potencia nominal desde reposo, es decir, entregarían una rampa ascendente de potencia desde cero hasta la potencia nominal en el tiempo indicado.

La especificación de diseño para el banco de supercapacitores será la capacidad de energía para suministrar la potencia restante en al menos 10 puestas en funcionamiento.

Ello supone una entrega de 10 veces la potencia de una rampa descendente desde condiciones nominales hasta reposo en 3 segundos.

La energía de almacenamiento necesaria responde al siguiente cálculo:

$$E = 10 \cdot \frac{1}{2} \cdot P_N \cdot t = 10 \cdot \frac{1}{2} \cdot 12kW \cdot 3 = 180kJ$$

Se ha tomado un módulo supercapacitor [7]. Del cual las características más relevantes son:

- Capacidad = 63 F
- Tensión nominal = 125 V
- Corriente nominal = 150 A
- Rendimiento a corriente nominal = 98 %

Según potencia y topología del convertidor, para obtener tensiones y corrientes de funcionamiento, y capacidad de almacenamiento, se colocará 1 módulo. La tensión máxima es de 125V.

Se ha tomado como tensión nominal de diseño 112V, y como tensión mínima de funcionamiento, 75V. Por lo tanto, la energía almacenada en este rango sigue la siguiente expresión:

$$E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot (V_1^2 - V_2^2) = \frac{1}{2} \cdot 63 \cdot (112^2 - 75^2) = 217.94kJ > \frac{180kJ}{0.98} = 182.67kJ$$

Como se puede comprobar, se tiene el almacenamiento requerido teniéndose en cuenta el rendimiento de los dispositivos ($\eta C=98\%$). No obstante, debe verificarse que el dispositivo es capaz de entregar la potencia requerida para la mínima tensión de funcionamiento. En la siguiente expresión se comprueba.

$$P_{Vmin} = V_{min} \cdot I_{Nom} = 75 \cdot 190 = 14.25kW > 12kW$$

3.4 Sistema de Baterías

Por otro lado, procediendo con el diseño del almacenamiento en las baterías, se necesitaría la siguiente capacidad de energía:

$$E = P_N \cdot t = 12kW \cdot 3600s = 43.2MJ$$

Se necesita un banco de baterías con dicha capacidad, capaz de entregar la potencia de 12kW. El banco será una asociación serie de baterías individuales para conseguir tensiones de funcionamiento, potencia y capacidad de diseño.

Se tomaron baterías de litio industriales [8] con las siguientes características las más importantes:

- Capacidad = 90 Ah
- Tensión nominal = 12.5 V
- Corriente nominal de carga = 200 A
- Corriente nominal de descarga = 300 A
- Rendimiento a corriente nominal = 95 %

Si $\overline{V_C} = 12V$ es la tensión media de la batería en su carga o descarga; y $CC = 90Ah$, su capacidad, la energía almacenada en la misma sigue la siguiente expresión:

$$E_c = \overline{V}_c \cdot C_c = 12V \cdot 90Ah = 1080Wh$$

Para una asociación de 15 baterías, se tendría la energía requerida. Ello se hace mediante la asociación de un grupo de 15 baterías en serie. La energía total del almacenamiento sería, por tanto:

$$E = n \cdot E_c = 15 \cdot 1080Wh = 16.2kWh = 58.32MJ > \frac{43.2MJ}{\eta_B} = 45.4736MJ$$

A la vista del resultado se verifica la capacidad de almacenamiento para la especificación de diseño, suponiendo un sobredimensionamiento del 10% aproximadamente.

Para esta asociación de baterías se ha tenido en cuenta el compromiso con las tensiones y corrientes de funcionamiento, la potencia y topología del convertidor. Según la caracterización proporcionada por el fabricante de estos dispositivos, la tensión nominal de la bancada (15 baterías en serie) en carga completa sería de 180V. En descarga total, esta tensión bajaría hasta los 100V.

En la siguiente expresión se comprueba que el dispositivo es capaz de recibir o entregar la potencia requerida para la mínima tensión de funcionamiento. El funcionamiento en carga supone el peor caso, para el cual se realiza el cálculo.

$$P_{Vmin} = V_{min} \cdot I_{Nom} = 100V \cdot 200A = 20kW > 12kW$$

3.5 Escenarios de funcionamiento

A continuación se describe cómo actúan los principales modos de funcionamiento de estos sistemas:

- 1) Potencia generada por el panel fotovoltaico mayor que la potencia requerida por la carga:

- a) Posibilidad de almacenamiento: El sistema de almacenamiento se carga con la potencia en exceso generada. El sistema de generación funcionará en su punto de máxima potencia.
 - b) Imposibilidad de almacenamiento: El sistema de almacenamiento se encuentra al límite de su capacidad de almacenamiento. El sistema global de control desconectará la fuente de generación y suministrará la potencia requerida por la carga mediante el sistema de almacenamiento.
- 2) Potencia requerida por la red mayor que la potencia generada por el panel fotovoltaico:
- a) Posibilidad de suministro: El sistema de generación funcionará en su punto de máxima potencia y el sistema de almacenamiento se encargará de suministrar la potencia restante para abastecer la demanda de la carga.
 - b) Imposibilidad de suministro: El sistema de almacenamiento se encuentra sin capacidad suficiente para el suministro de potencia, por lo que el conjunto panel fotovoltaico y almacenamiento no es capaz de abastecer la demanda de la carga. Ante ello se procederá a la conexión del sistema con la red de abastecimiento comercial, hasta que se vuelva a poseer capacidad de suministro ante la potencia demandada.

3.6 Escenarios de Simulación

Los escenarios de simulación propuestos, en función de los estados de la generación de energía a través de la fuente de energía renovable (Potencia Generada), y de la potencia demandada por la red (Potencia Demandada), son los siguientes:

- 1) Potencia generada no nula y potencia demandada nula:

- El sistema de almacenamiento absorbe la totalidad de la potencia entregada por la fuente de energía renovable.
- 2) Potencia generada nula y potencia demandada no nula:
- El sistema de almacenamiento es el encargado de suministrar la totalidad de la potencia a la carga.
- 3) Potencia generada mayor que potencia demandada:
- El sistema de almacenamiento se carga con la potencia en exceso generada por la fuente de energía renovable.
- 4) Potencia demandada mayor que potencia generada:
- El sistema de almacenamiento es el encargado de suministrar la potencia restante para abastecer la demanda de la carga.

3.7 Simulaciones de potencia.

El esquema bajo simulación se presentó en la Figura 3.1. del apartado anterior. Como puede observarse, el sistema global está compuesto por distintos bloques funcionales. Todos ellos son gobernados por el control global de la planta.

En la Figura 3.2 se muestra el bloque de control mencionado, en el cual se aprecian las variables de entrada al mismo y los comandos de salida, detalladas en la Ilustración Figura Variables del control global del sistema. Es el encargado de la monitorización de las variables eléctricas, de la gestión de los modos de funcionamiento y de la energía mediante el gobierno sobre el controlador local de cada uno de los convertidores, comandando la potencia de referencia a seguir por el mismo, y con ello, el control sobre la tensión del bus de dc.



Figura 3.2 Control Global del Sistema

Nombre	Descripción
$V_{DC_RES}^*$	Referencia de tensión DC_RES
V_{DC_RES}	Medida de tensión DC_RES
V_c	Medida de tensión de supercapacitores
I_{LC}	Medida de corriente de supercapacitores
V_b	Medida de tensión de baterías
I_{Lb}	Medida de corriente de baterías
P_g^*	Referencia de potencia de generación
P_i^*	Referencia de potencia del inversor
P_c^*	Referencia de potencia de supercapacitores
P_b^*	Referencia de potencia de baterías

Figura 3.3 Variables del control global del sistema

El bloque designado como “Panel Fotovoltaico” emula la fuente de energía renovable como una fuente de tensión cuyo perfil de entrega de potencia es variable. Estas variaciones se han modelado como rampas ascendentes o descendientes de potencia. Las pendientes de éstas se han calculado de tal manera que si el sistema es capaz de realizar el seguimiento a dicha dinámica, también sería capaz de hacerlo para un perfil de fuente de energía renovable real.

Por otro lado, el convertidor “DC/AC” es el encargado de mantener el bus monofásico de la red doméstica, y con ello, el abastecimiento de la carga se muestra en la ilustración, este se trata de un inversor monofásico de modulación PWM, que fue el único que encontramos para la simulación en el software PSCAD.

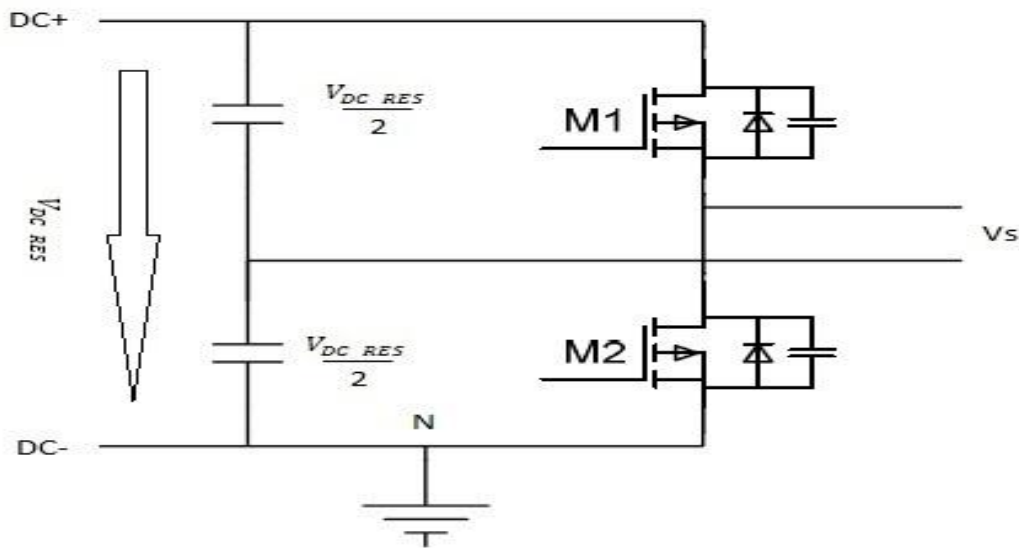


Figura 3.4 Inversor DC/AC de la red domestica

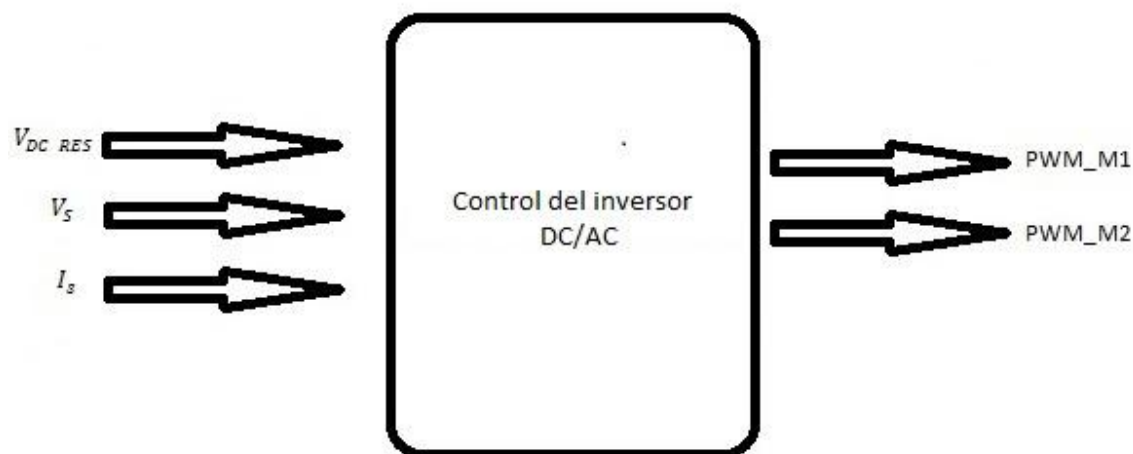


Figura 3.5 Control del inversor DC/AC de red domestica

En la Figura 3.5 se observa el bloque de control del convertidor en cuestión, cuyas entradas corresponden a medidas de tensiones y corrientes, y cuyas salidas son los disparos asociados a la modulación PWM de los semiconductores de potencia. Estas variables son explicadas en la Figura 3.6.

Nombre	Descripción
V_{DC_RES}	Referencia de tensión DC_RES
V_S	Medida de tensión de la línea Vs
I_s	Medida de corriente de la línea Is
PWM_M1	Modulación PWM de transistor M1
PWM_M2	Modulación PWM de transistor M2

Figura 3.6 Variables del control del inversor DC/AC de la red domestica

En cuanto al sistema de almacenamiento, indicar que los dos convertidores de potencia asociados al mismo son formalmente idénticos. Por tanto, a continuación se explicará el equipo de manera genérica, sin especificar si corresponde a los supercapacitores o a

las baterías. El equipo consiste un convertidor DC/DC “interleaving” de modulación PWM, mostrado en la Figura 3.7.

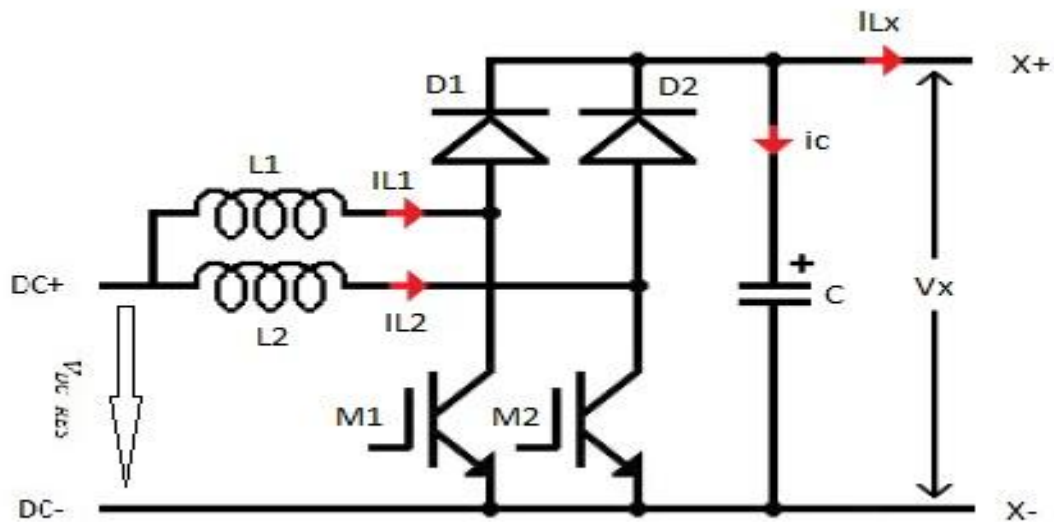


Figura 3.7 Convertidor dc/dc de almacenamiento

En la ilustración se observa el bloque de control asociado al convertidor, cuyas entradas corresponden a medidas eléctricas de tensiones y corrientes, y cuyas salidas son los disparos asociados a la modulación PWM de los semiconductores. En la figura 3.9 se presentan las variables asociadas al mismo.



Figura 3.8 Control del convertidor dc/dc de almacenamiento

Nombre	Descripción
V_{DC_RES}	Referencia de tensión DC_RES
V_x	Medida de tensión de almacenamiento
I_{Lx}	Medida de corriente de almacenamiento
I_{L1}	Medida de corriente rama 1
I_{L2}	Medida de corriente rama 2
PWM_M1	Modulación PWM de transistor M1
PWM_M2	Modulación PWM de transistor M2

Figura 3.9 Variables del control del convertidor dc/dc de almacenamiento

Se realizarán cuatro simulaciones, como muestra de la respuesta en funcionamiento del sistema. El perfil del Panel fotovoltaico se va a emular mediante constantes y rampas suaves de potencias; y la situación de demanda de la red, mediante escalones de potencias, y mantenimiento de las mismas.

El tiempo de simulación en cada uno de los escenarios será de 20 segundos.

3.7.1 Escenario I. Potencia generada no nula y potencia demandada nula

En base a lo anteriormente expuesto:

- El sistema de almacenamiento absorbe la totalidad de la potencia entregada por la fuente de energía renovable.

Los resultados arrojados por las simulaciones se muestran a continuación. En la Figura 3.10., se puede visualizar el reparto de potencias; y en la Figura 3.11., y Figura 3.12., los estados de las tensiones y corrientes respectivamente.

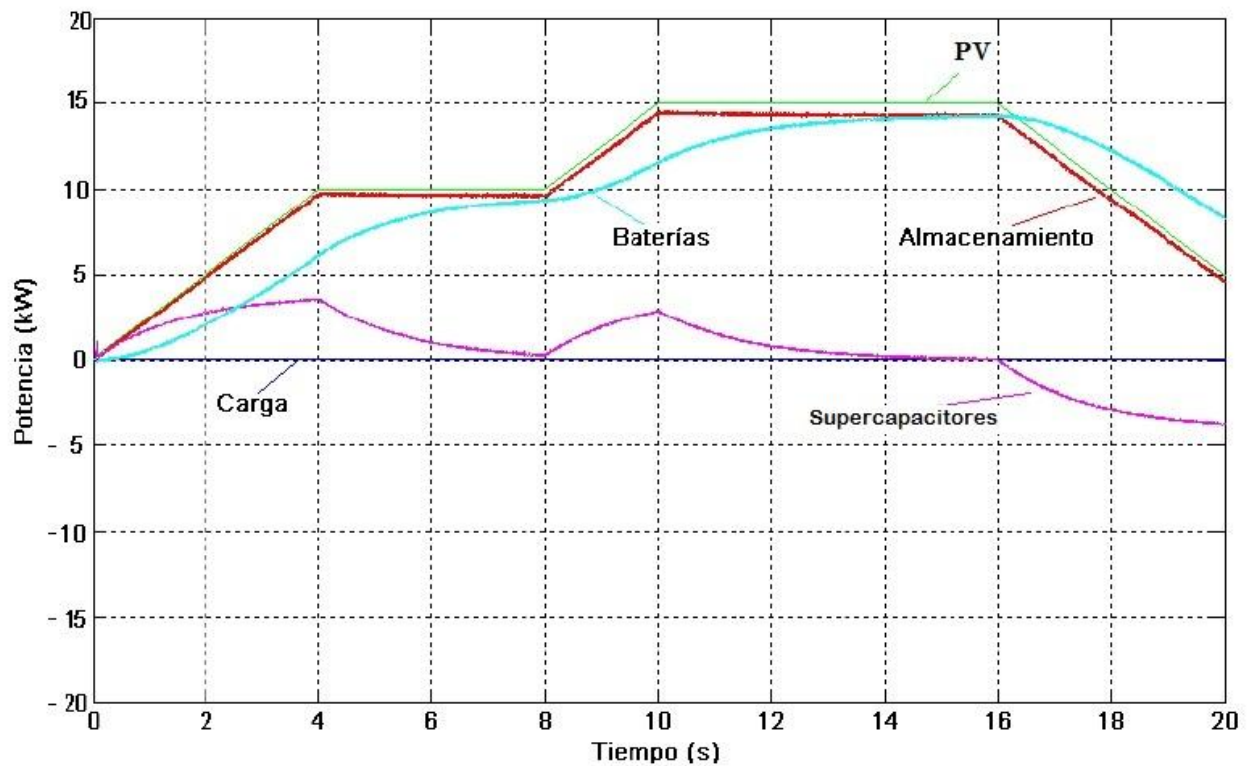


Figura 3.10. Potencias Escenario I

Como puede observarse en la Figura 3.10., el sistema de almacenamiento híbrido absorbe la potencia que es entregada por el panel fotovoltaico menos las pérdidas. Nótese que la dinámica de captación de potencia por parte del sistema basado en baterías es suave, mientras que los supercapacitores se encargan de la captación de los picos de potencia.

En el gráfico de la Figura 3.11., se muestra la tensión asociada al bus DC-Res, la tensión de línea del servicio de la Red Doméstica, la tensión de almacenamiento en supercapacitores, y la correspondiente a las baterías.

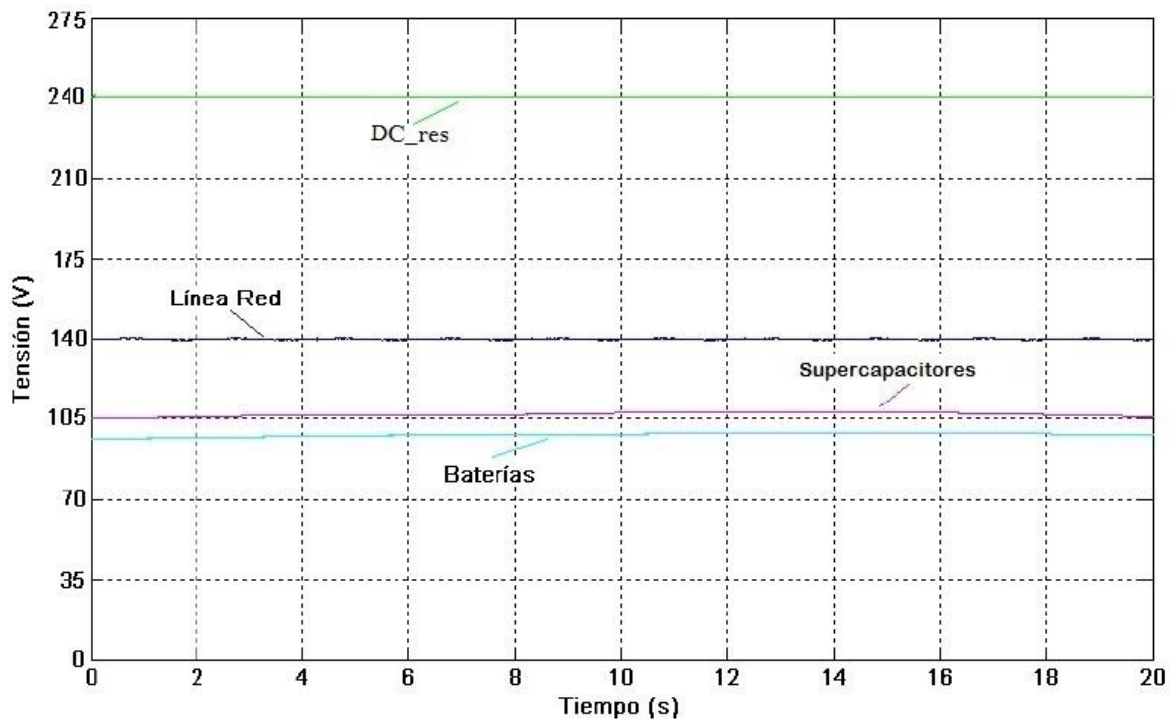


Figura 3.11. Escenario de Tensiones I

Como indica la figura, las tensiones de DC_Res y red se encuentran en sus valores nominales en todo momento.

Puede verse la elevación de la tensión en baterías en consecuencia de la carga de los mismos. Se aprecia también como la tensión en supercapacitores se eleva en procesos de carga y disminuye en los de descarga.

Concluyendo, en la Figura 3.12., se muestran las gráficas asociadas a las corrientes del sistema. Entre ellas, la corriente aportada por la fuente de energía renovable, la demandada por la carga, y las absorbidas por los sistemas de almacenamiento, supercapacitores y baterías.

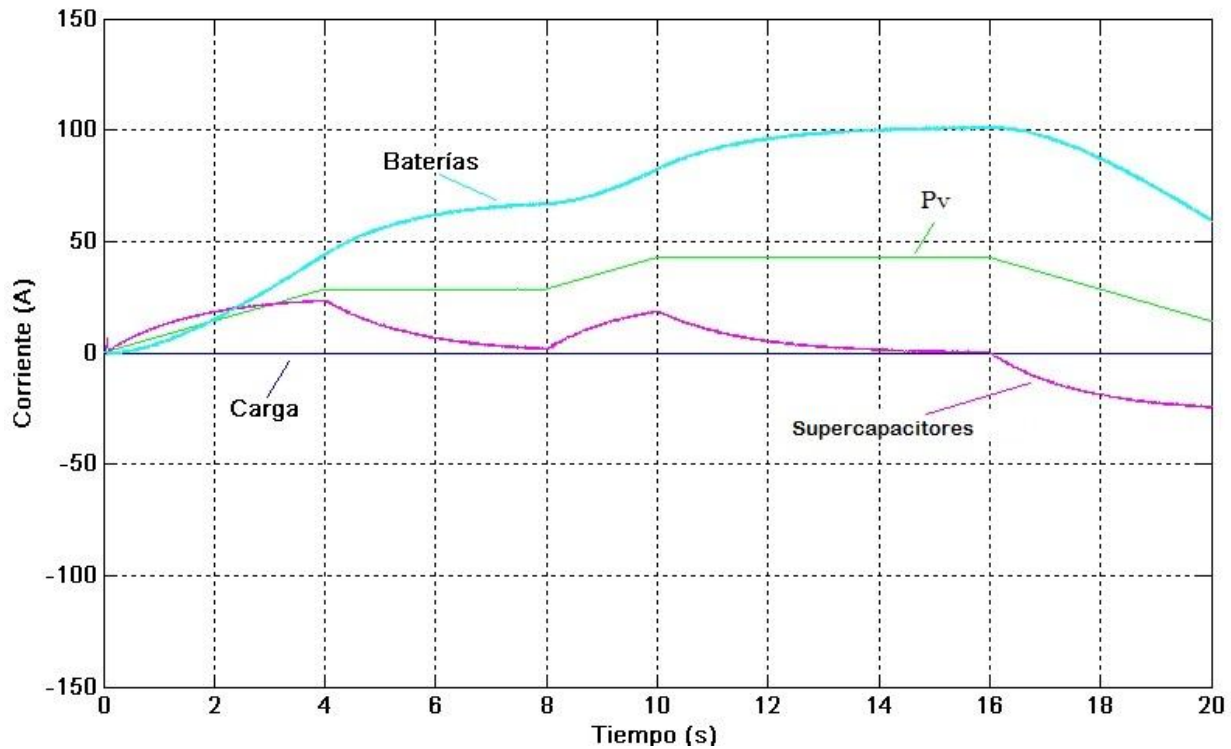


Figura 3.12. Corrientes Escenario I

Como se puede observar, la corriente de baterías es siempre positiva por estar almacenando energía, según el criterio de signo seguido, y cuya dinámica es suave.

En cuanto a la corriente de supercapacitores, es positiva en momentos de carga negativa en situaciones de descarga, con una dinámica más rápida que la de los dispositivos anteriores.

3.7.2. Escenario II. Potencia generada nula y potencia demandada no nula

En base a lo anteriormente expuesto:

- El sistema de almacenamiento es el encargado de suministrar la totalidad de la potencia a la carga.

Los resultados arrojados por las simulaciones se muestran a continuación. En la Figura 3.13., se puede visualizar el reparto de potencias; y en la Figura 3.14. Y Figura 3.15., los estados de las tensiones y corrientes respectivamente.

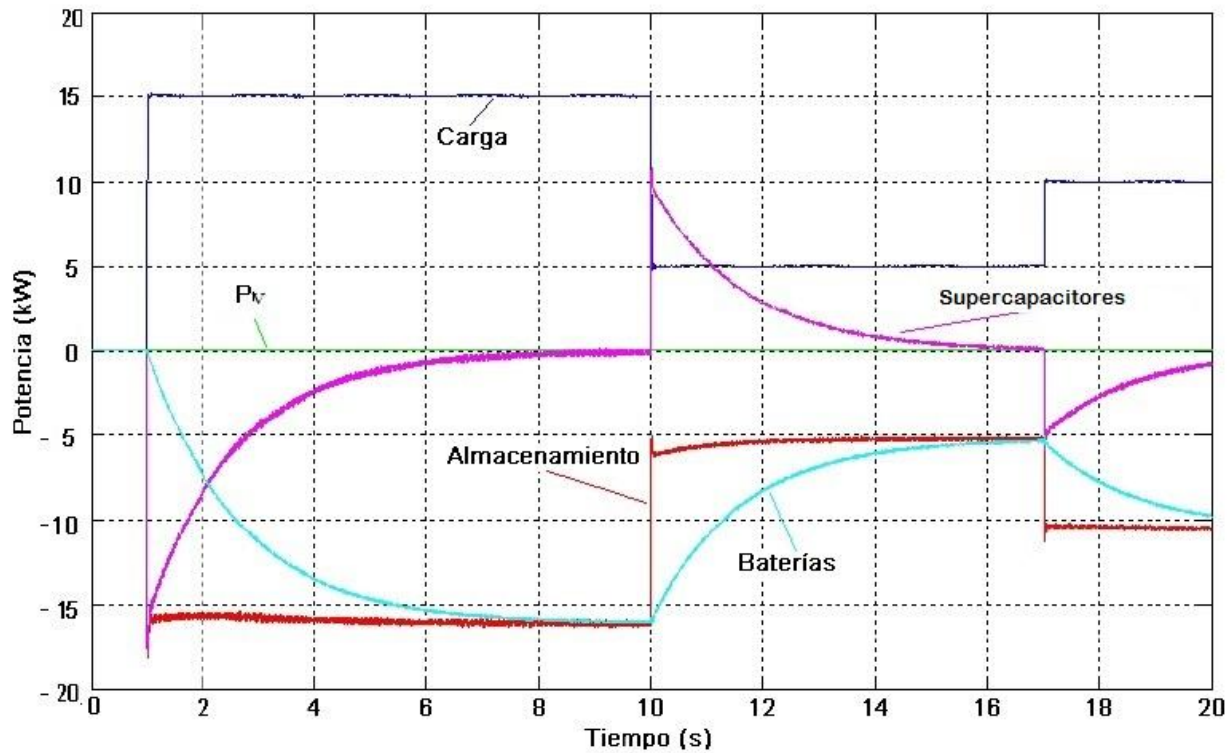


Figura 3.13. Potencias Escenario II

Como se aprecia en la Figura 3.13., el sistema de almacenamiento híbrido suministra la totalidad de la potencia demandada por la carga. Nótese las dinámicas de actuación de los supercapacitores, de las baterías y la correspondiente al conjunto de ambas.

En la Figura 3.14., las tensiones del sistema y en la Figura 3.15., las corrientes. Se aprecian las fluctuaciones de la tensión del DC_Res y de la red en las entradas y salidas de la carga.

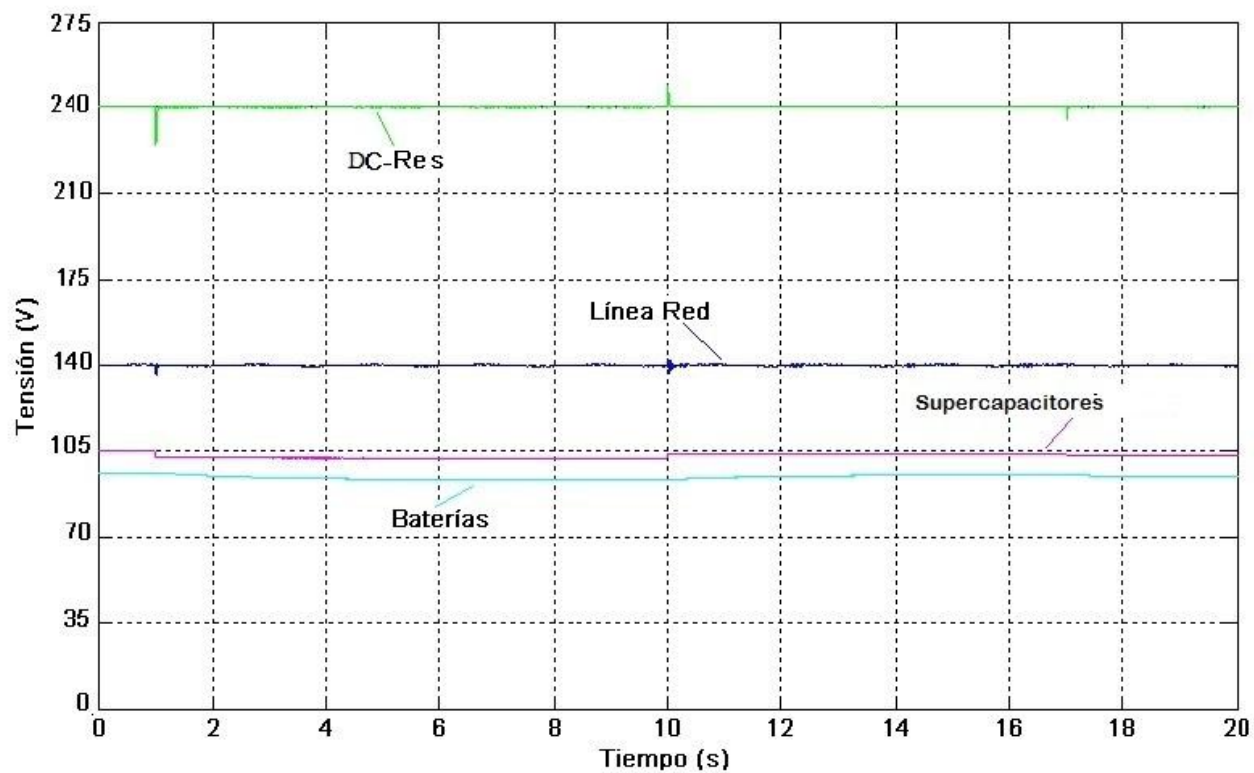


Figura 3.14. Tensiones Escenario II

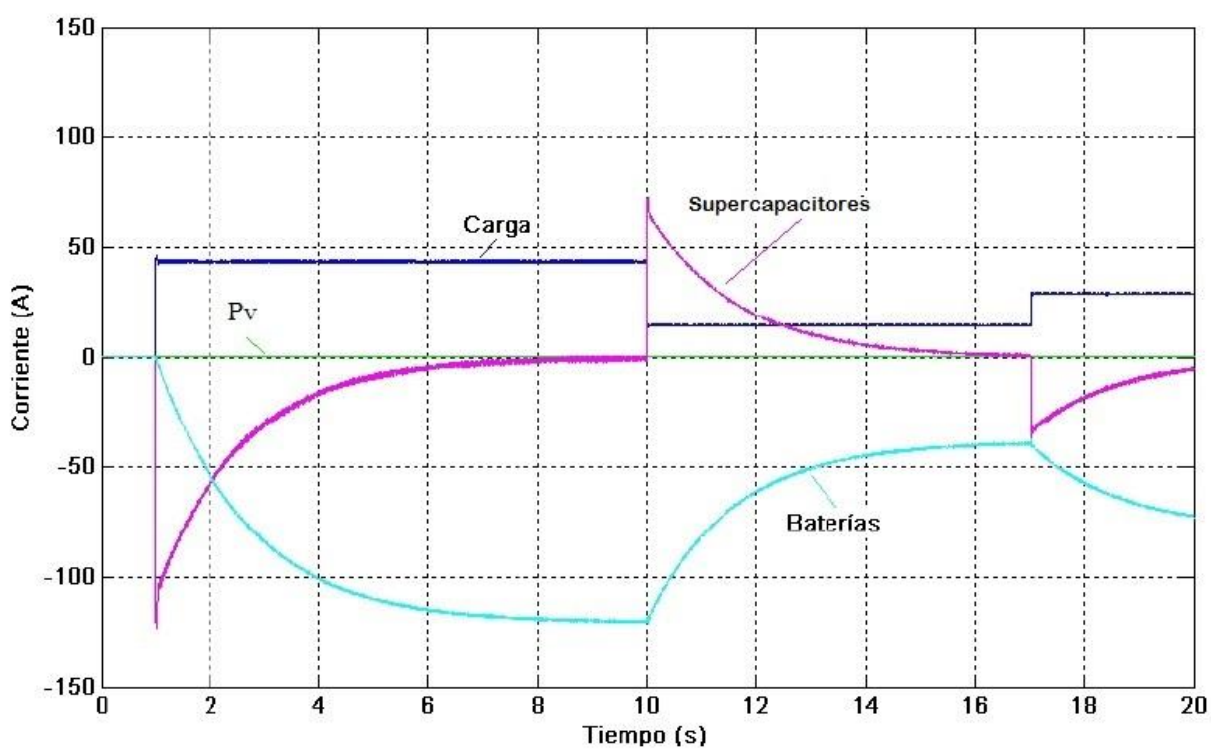


Figura 3.15. Corrientes Escenario II

3.7.3 Escenario III. Potencia generada mayor que potencia demandada

En base a lo anteriormente expuesto:

- El sistema de almacenamiento se carga con la potencia en exceso generada por la fuente de energía renovable.

Los resultados arrojados por las simulaciones se muestran a continuación. En la Figura 3.16. se puede visualizar el reparto de potencias; y en la Figura 3.17., y Figura 3.18., los estados de las tensiones y corrientes respectivamente.

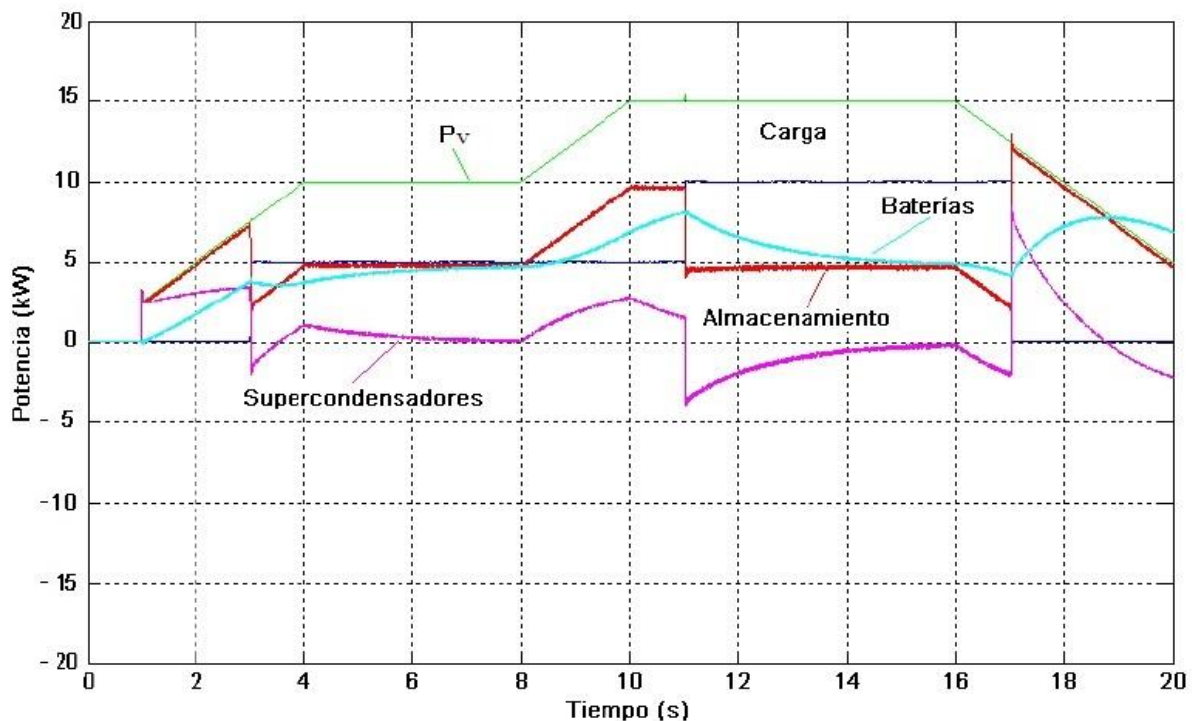


Figura 3.16. Potencias Escenario III

El flujo de potencia del sistema se muestra en la Figura 3.16., Como se observa, dada una producción mayor que la demandada, el sistema de almacenamiento absorbe el exceso de potencia generada. Se aprecian las dinámicas de actuación de los supercapacitores, de las baterías, y la correspondiente al conjunto de ambas.

En la Figura 3.17., y en la Figura 3.18., se presentan las tensiones y corrientes del sistema respectivamente, con la misma interpretación que en simulaciones anteriores.

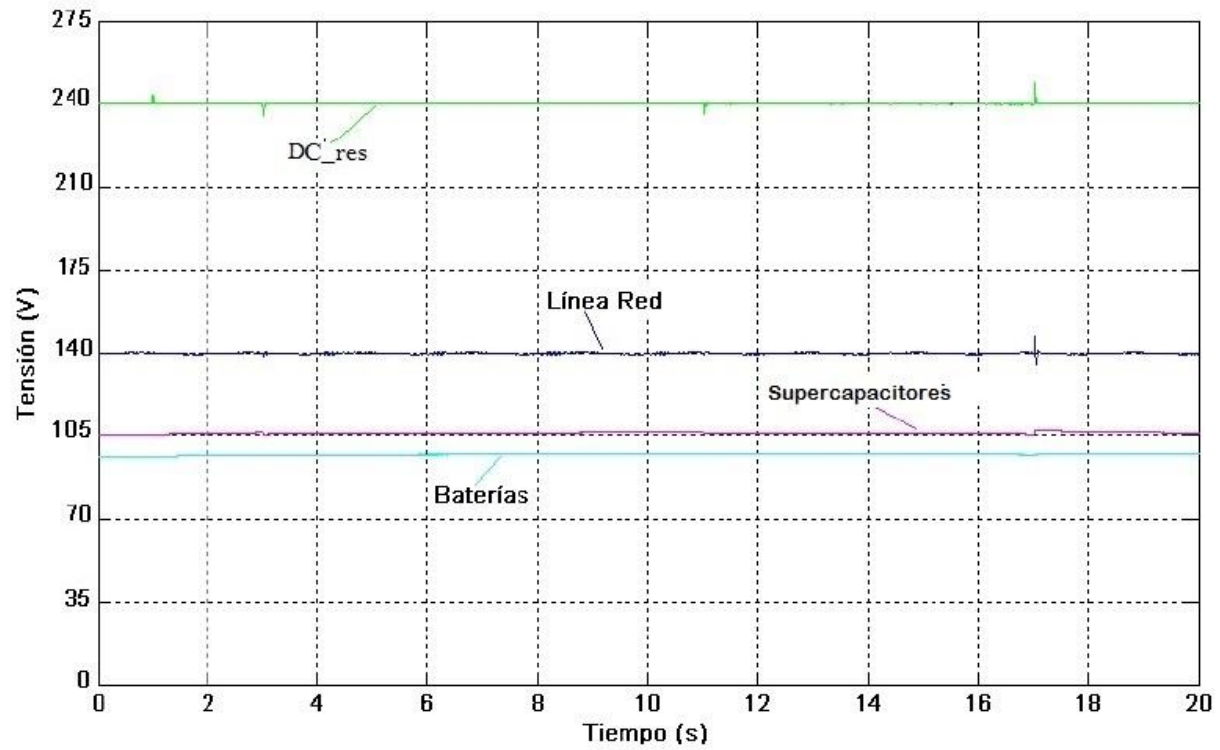


Figura 3.17. Escenario de Tensiones III

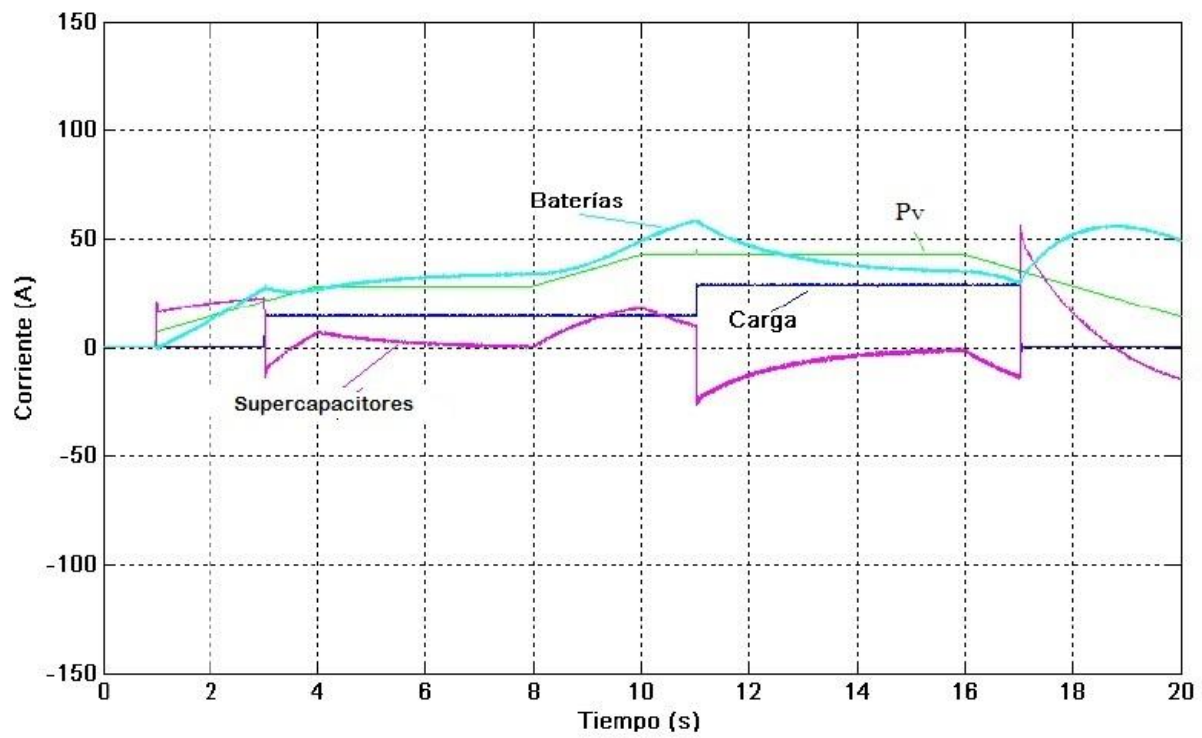


Figura 3.18. Escenario de Corrientes III

3.7.4. Escenario IV. Potencia demandada mayor que potencia generada

En base a lo anteriormente expuesto:

- El sistema de almacenamiento es el encargado de suministrar la potencia restante para abastecer la demanda de la carga.

Los resultados arrojados por las simulaciones se muestran a continuación. En la Figura 3.19., se puede visualizar el reparto de potencias; y en la Figura 3.20., y Figura 3.21., los estados de las tensiones y corrientes respectivamente.

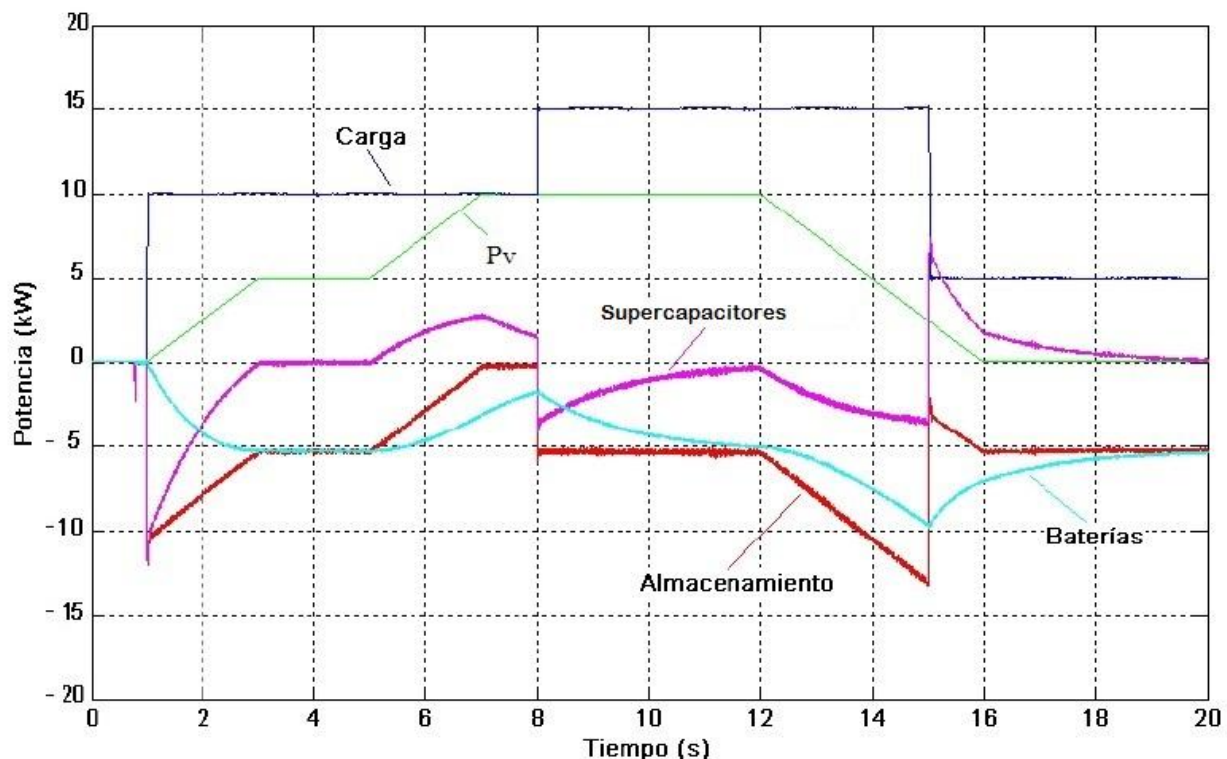


Figura 3.19. Escenario de Potencias IV

Como se aprecia en la Figura 3.19., el conjunto formado por la fuente de energía renovable y el sistema de almacenamiento se encargan de suministrar la potencia demandada por la carga. Nótese las dinámicas de actuación de los supercapacitores, de las baterías, y la correspondiente al conjunto de ambas.

En la Figura 3.20., las tensiones del sistema y en la Figura 3.21., las corrientes. Se aprecian las fluctuaciones de la tensión del DC_res y de la red en las entradas y salidas de la carga.

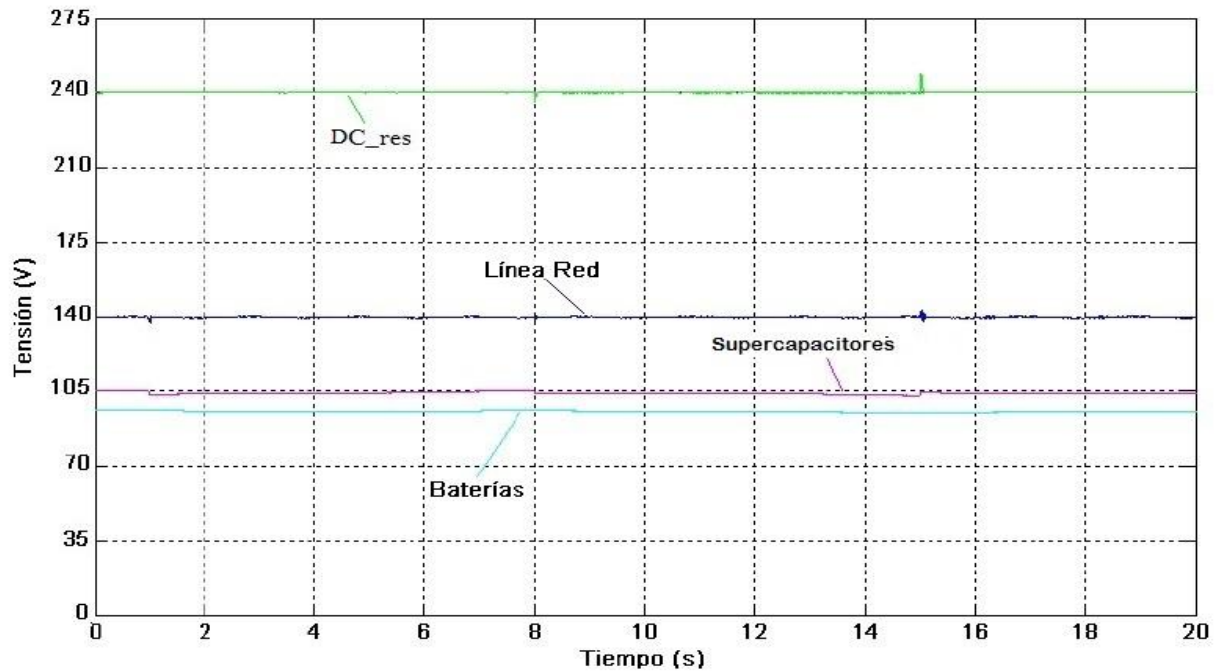


Figura 3.20. Escenario de Tensiones IV

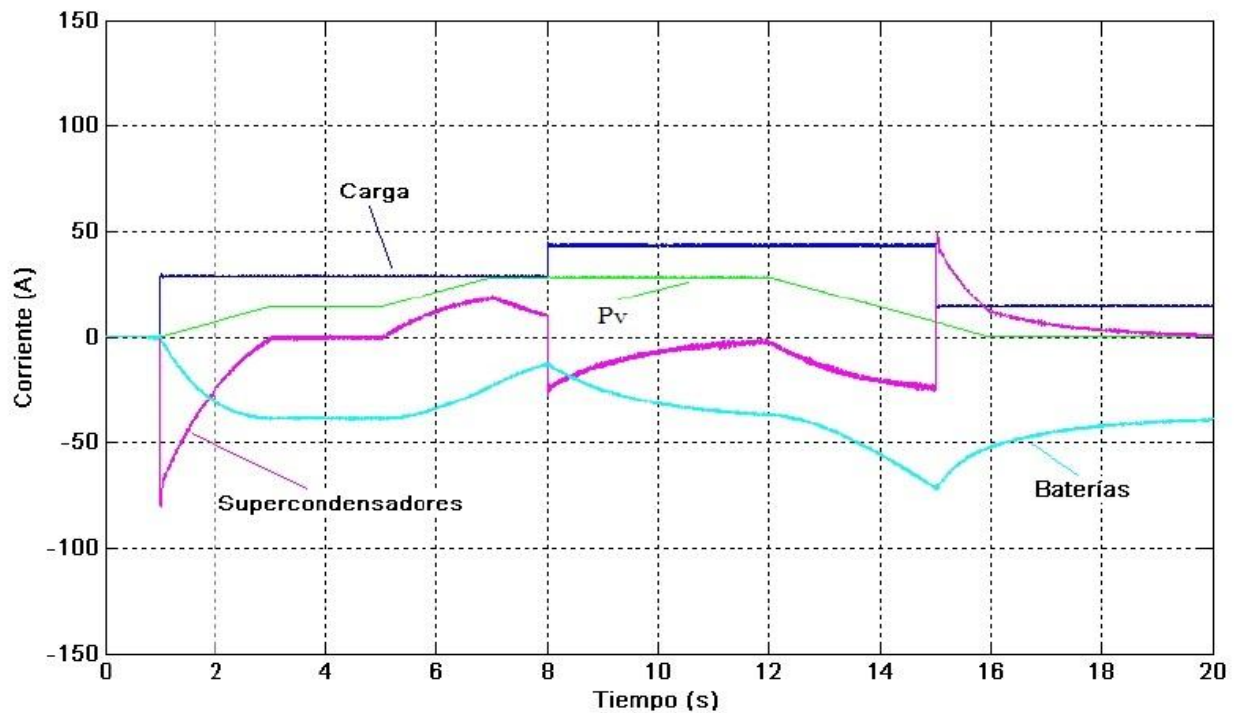


Figura 3.21. Escenario de Corrientes IV

3.8 Sistema de control

El sistema de control del convertidor es el encargado de gobernar cada una de las partes que integran el hardware de potencia del mismo, siguiendo los patrones marcados por el software de control. Es el encargado de gestionar los modos de funcionamiento del sistema, la marcha de los mismos y las transiciones entre ellos.

La electrónica de control del convertidor se basa en una placa de circuito impreso (PCB), provista de un microcontrolador PIC16F877 como núcleo principal de procesamiento, en el cual se incluye el software de control implementado. Además de ello, la PCB incluye las necesarias adaptaciones de señales, sensores, actuadores y los consiguientes periféricos para la aplicación.

3.8.1. Especificaciones de diseño

Las especificaciones de la tarjeta de control del equipo vienen dadas por la topología y naturaleza del convertidor, por los requerimientos del software implementado, y por los sistemas de comunicación que se desean disponer. A continuación se detallan los requerimientos del hardware de control del sistema:

- ADC: 4 señales de adquisición analógica.
- 4 señales de disparo.
- 4 salidas de indicadores de medición.
- 2 sensores de tensión de rango 10-500V
- 2 sensor de corriente de rango ± 200 A
- Adaptación y acondicionamiento de medidas analógicas.

3.8.2. Esquema electrónico de control

En la figura 3.22 se muestra el esquema electrónico de control como diagrama de bloques funcionales. La unidad central de procesamiento la compone el procesador PIC16F877 y periféricos internos. El resto del hardware es el encargado de las adaptaciones y acondicionamiento de señales, y adquisiciones de parámetros físicos del equipo en funcionamiento.

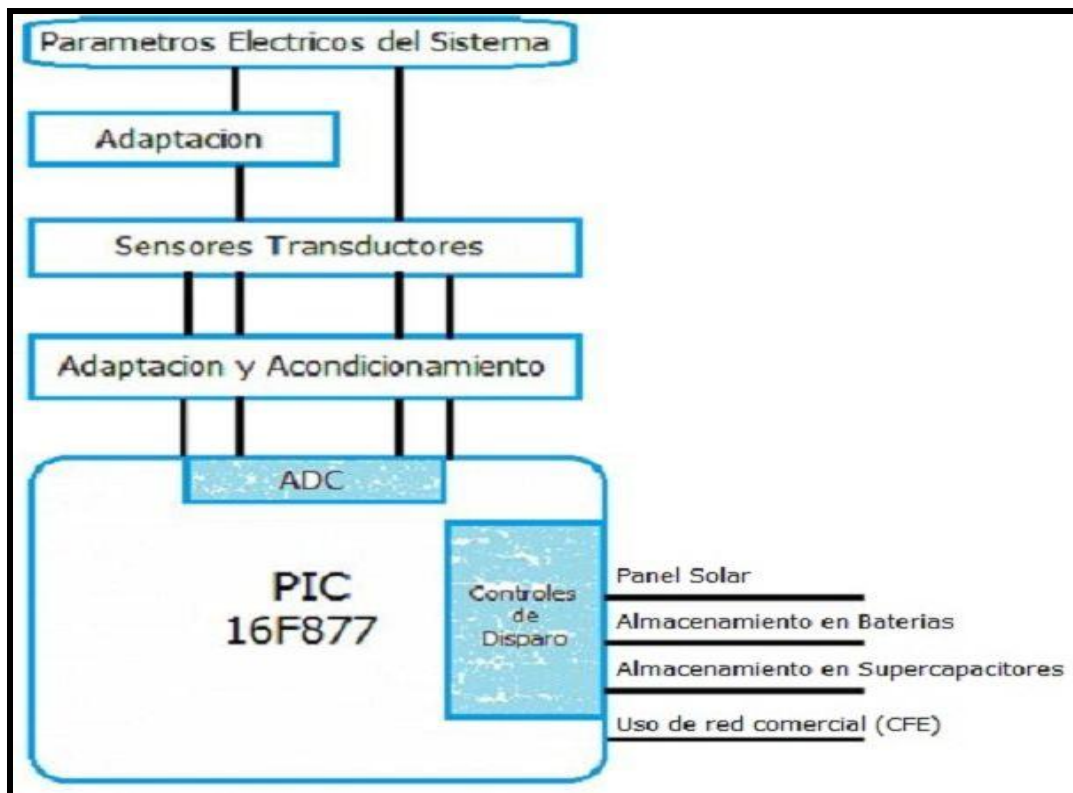


Figura 3.22. Esquema electrónico de control

3.8.3. Adquisición de parámetros eléctricos tensiones y corrientes

La adquisición de parámetros eléctricos se realizara como lo muestra el siguiente diagrama:

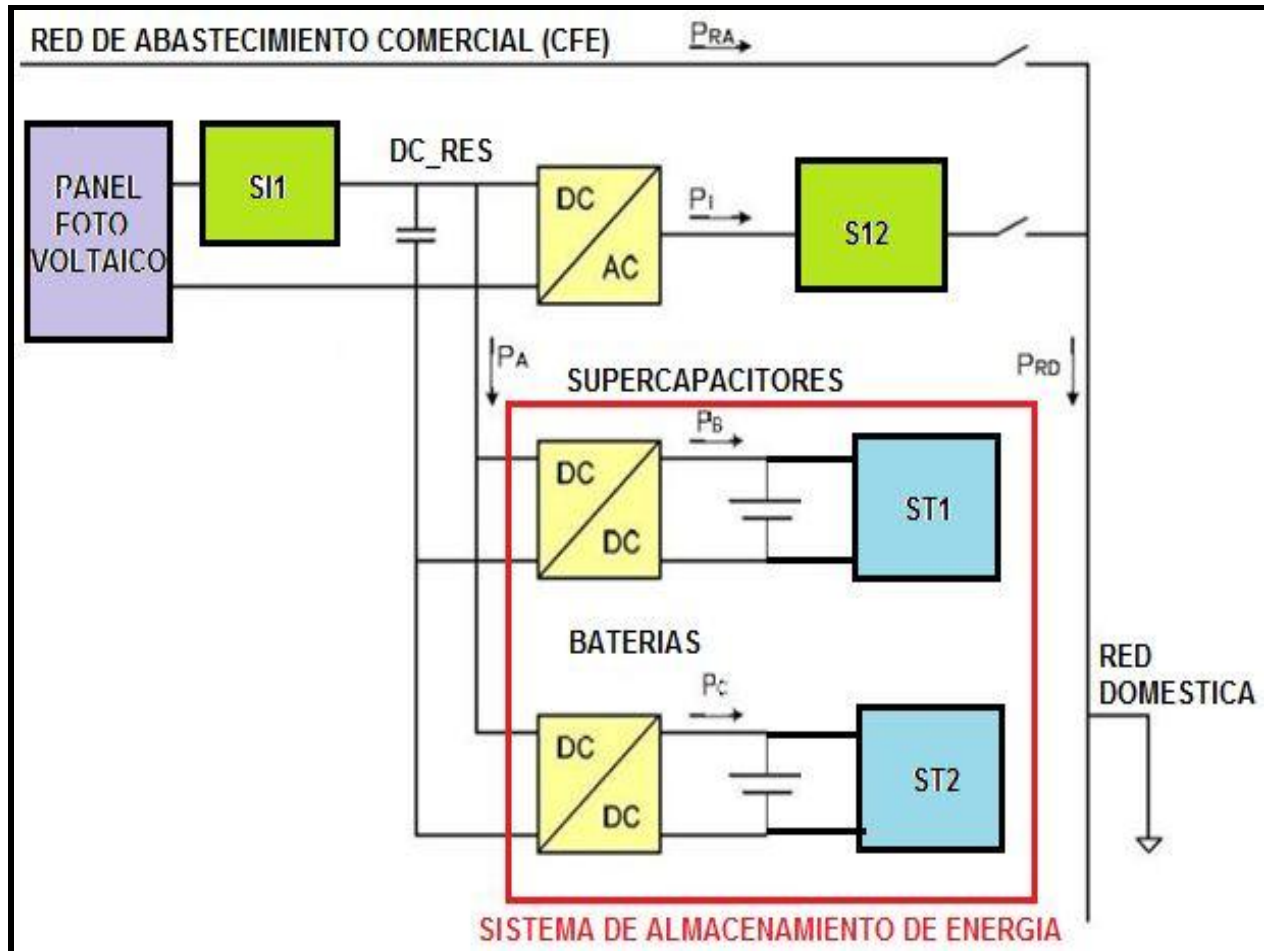


Figura 3.23. Adquisición de parámetros eléctricos.

La adquisición de dichos parámetros se realiza gracias a la conversión de los mismos a señales de medida analógicas, mediante sensores transductores. Los dispositivos utilizados son:

- $ST1$. SENSOR LV 25P, sensor de tensión de rango 0-180V para medición de tensión en banco de supercapacitores.

- ST2. SENSOR LV 25P para medida de rango 0-125V para medición de tensión en banco de baterías.
- SI1. SENSOR ACS755 CB200, sensor de corriente de rango 0-200 A para medición de corriente entregada por paneles fotovoltaicos.
- SI2. SENSOR ACS755 CB200, sensor de corriente de rango 0-200 A para medición de corriente requerida en la carga.



Figura 3.24. Sensores transductores

Las principales características del sensor ACS CB200, con alimentación de 5V, son:

- Muestra de corriente primaria 200 A
- Voltaje máximo 353 VAC, 500 VDC.
- Voltaje de salida 0-5v
- Corriente de salida 8mA.
- Operación a temperatura ambiente nominal -20 a 85°C.

Considerando que para el óptimo funcionamiento del microcontrolador PIC16F877 se recomienda una corriente de entrada en los puertos menor a 10mA y un voltaje menor a 5v, no es necesario realizar un acondicionamiento de señal para conectarlo a el puerto de entrada del microcontrolador.

Las principales características del sensor de tensión LV 25-P, con alimentación de $\pm 15V$ son:

- Ratio de Conversión 25 : 10
- Corriente Nominal Entrada 10 mA
- Corriente Nominal Salida 25 mA
- Resistencia Medida Salida 100 Ω a 350 Ω
- Precisión $\pm 0.9 \%$
- Linealidad $< 0.2 \%$
- Ancho de Banda 25 kHz.

Para la adaptación del sensor en cuestión a las medidas requeridas se deben dimensionar las resistencias de medida del primario (R_{PI}), esto para acondicionar la señal a los rangos de corriente admitidos por el sensor. El cálculo se ha realizado de tal manera que la tensión máxima del punto de medida lleve al primario del transductor a la corriente nominal de entrada al mismo.

Para ST1

$$R_I = V/I_n = 180 / 10\text{mA} = 18 \text{ K } \Omega$$

Para ST2

$$R_I = V/I_n = 125 / 10\text{mA} = 12.5 \text{ K } \Omega$$

Cada uno de los valores se ha pretendido obtener mediante dos resistencias de valor comercial y potencia especificada. En la Figura 3.25 y Figura 3.26 se muestran los mismos.

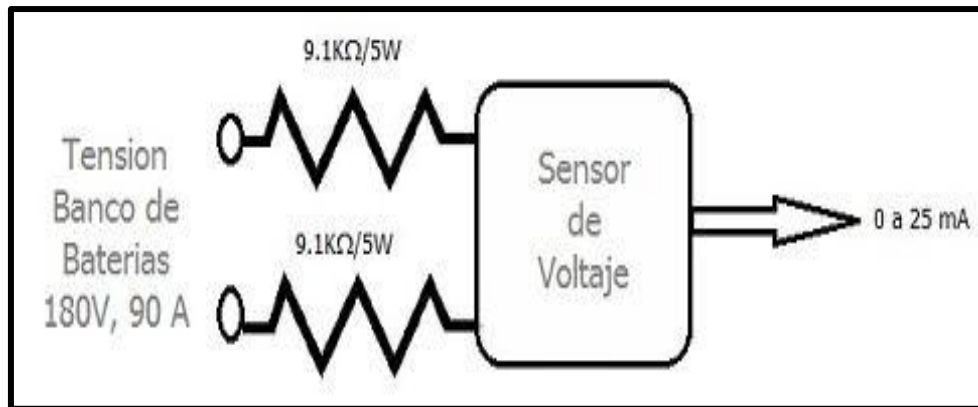


Figura 3.25. Resistencias de medida de entrada para el ST1. Adaptación 1.

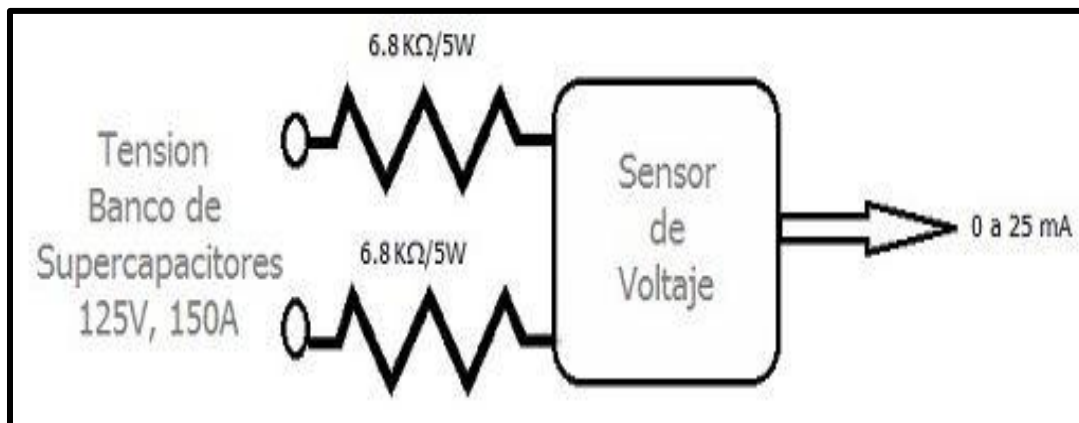


Figura 3.26. Resistencias de medida de entrada para el ST2 adaptación 3.

Dados estos valores resistivos a la entrada de los dispositivos, el rango de tensión de medida de los mismos es de 0V a 182 V para ST1; y 0 a 136 V para ST2.

En el esquema de la Figura 3.27 se muestran las etapas de adaptación para las medidas de tensiones y, en la Figura 3.28, las correspondientes a las de corrientes.

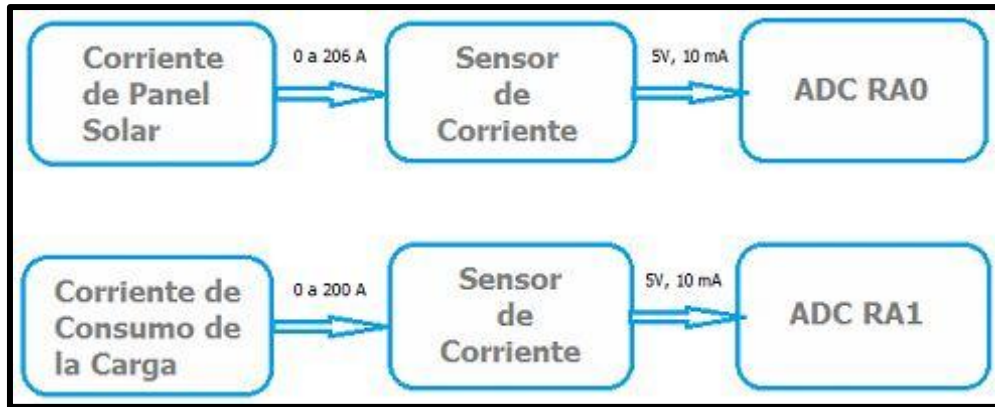


Figura 3.27. Adquisición de medidas de corrientes

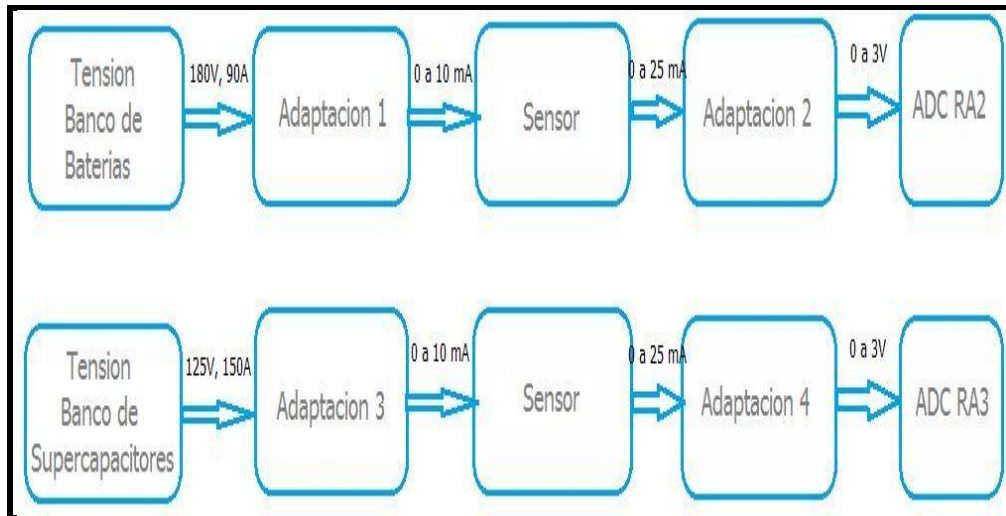


Figura 3.28. Adquisición de medidas de tensión

Para el caso de las adaptaciones 2 y 4 para el acondicionamiento de la señal que entrega el sensor 0-25 mA hacia una caída de tensión de 0-3v para enviarlo a los puertos RA2 y RA3 del ADC del microcontrolador usamos una circuitería basada en el amplificador operacional de precisión “rail-to-rail” **OPA350** en realimentación negativa, se lleva la medida al conveniente rango de tensión de entrada del microcontrolador.

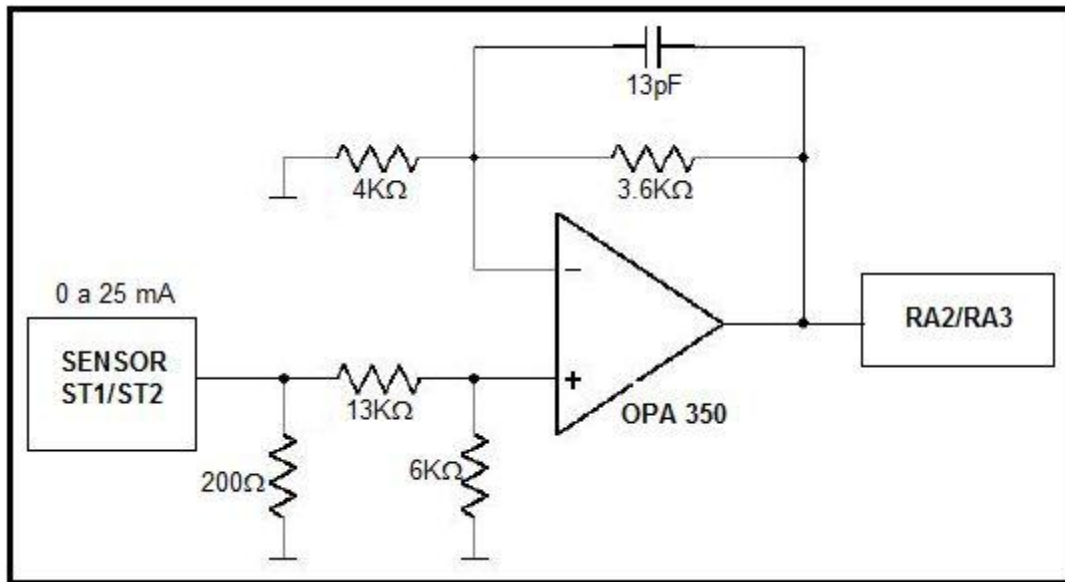


Figura 3.29. Circuito de adaptación de medidas de tensiones.

3.9 Simulaciones en PROTEUS

Para la simulación de nuestro sistema de control utilizamos el PROTEUS 7.0, realizando la simulación para los 4 casos de operación descritos en la propuesta de solución del capítulo 3.

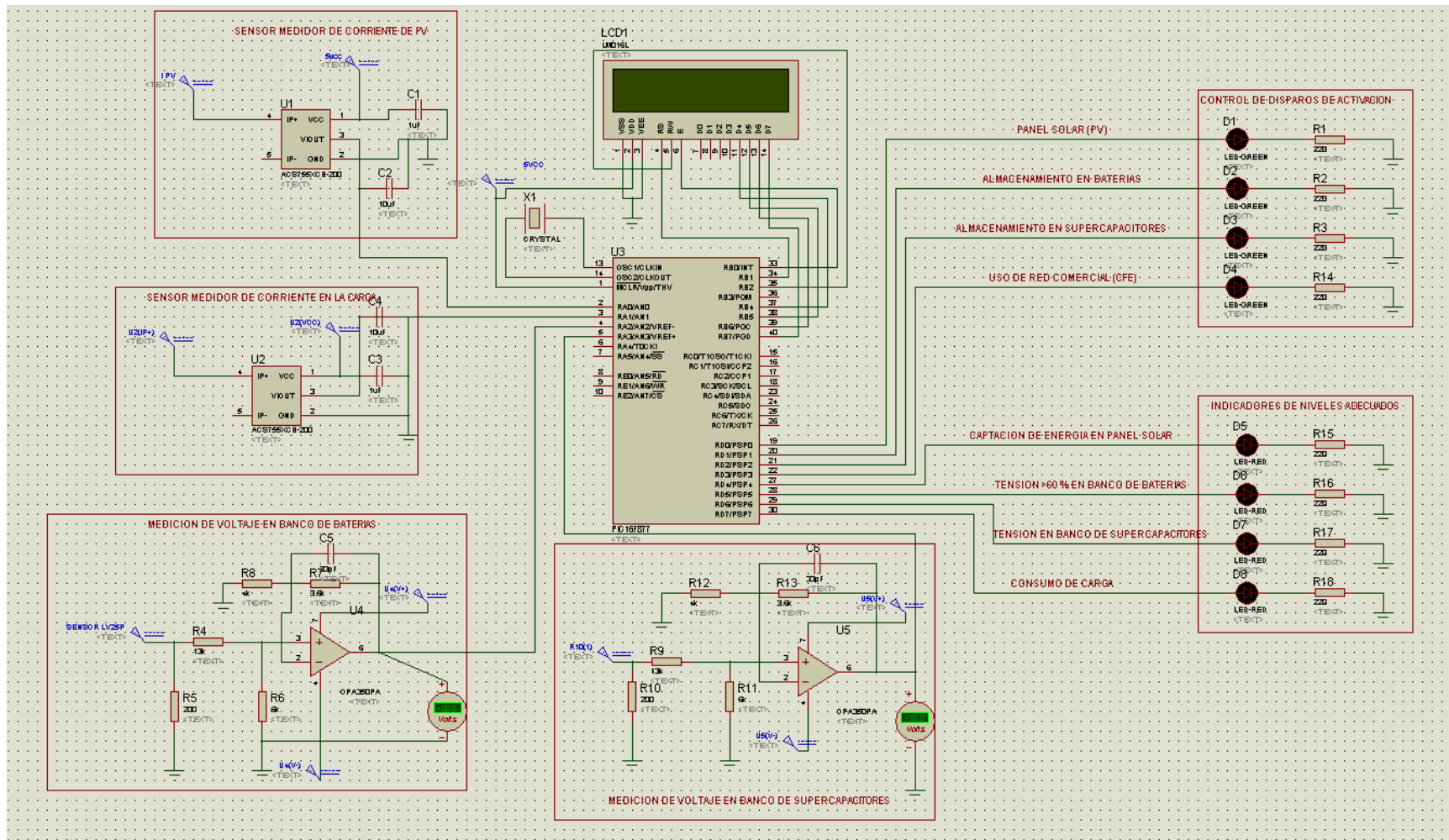


Figura 3.30. DIAGRAMA DE SIMULACION EN PROTEUS

En la simulación utilizamos 4 entradas de AD para medir los parámetros eléctricos del sistema, una vez obtenidos estos, el microcontrolador se encarga de mandar los disparos para la desactivación del panel, para el almacenamiento en la batería, el almacenamiento en los supercapacitores y el disparo para el uso de la red comercial (CFE).

También se incluyen indicadores sobre la captación de energía en el panel solar, tensión en banco de baterías mayor al mínimo que debe mantenerse, tensión en banco de supercapacitores mayor al mínimo y sobre la activación de consumo en la red doméstica o carga.

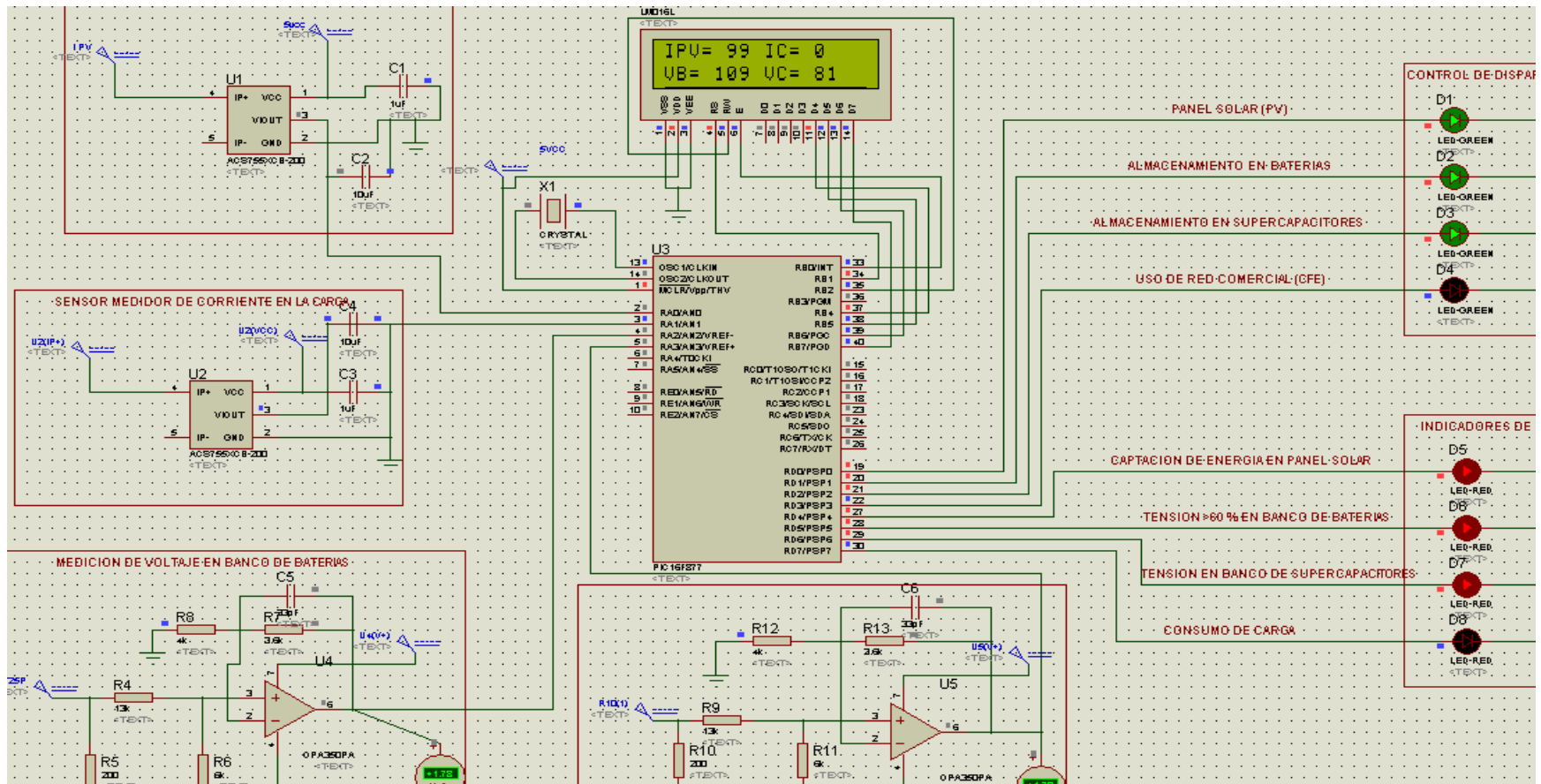


Figura 3.31. Diagrama de simulación caso 1: $I_{pv} > 0$, $I_c = 0$, $MAX > V_{BAT} > MIN$ V, $MAX > V_{CAP} > MIN$

Se aprecia generación de energía en el panel sin demanda de la red doméstica, por lo tanto se revisa el nivel de almacenamiento de la batería, y al ser menor al máximo, activamos el almacenamiento en batería y supercapacitores.

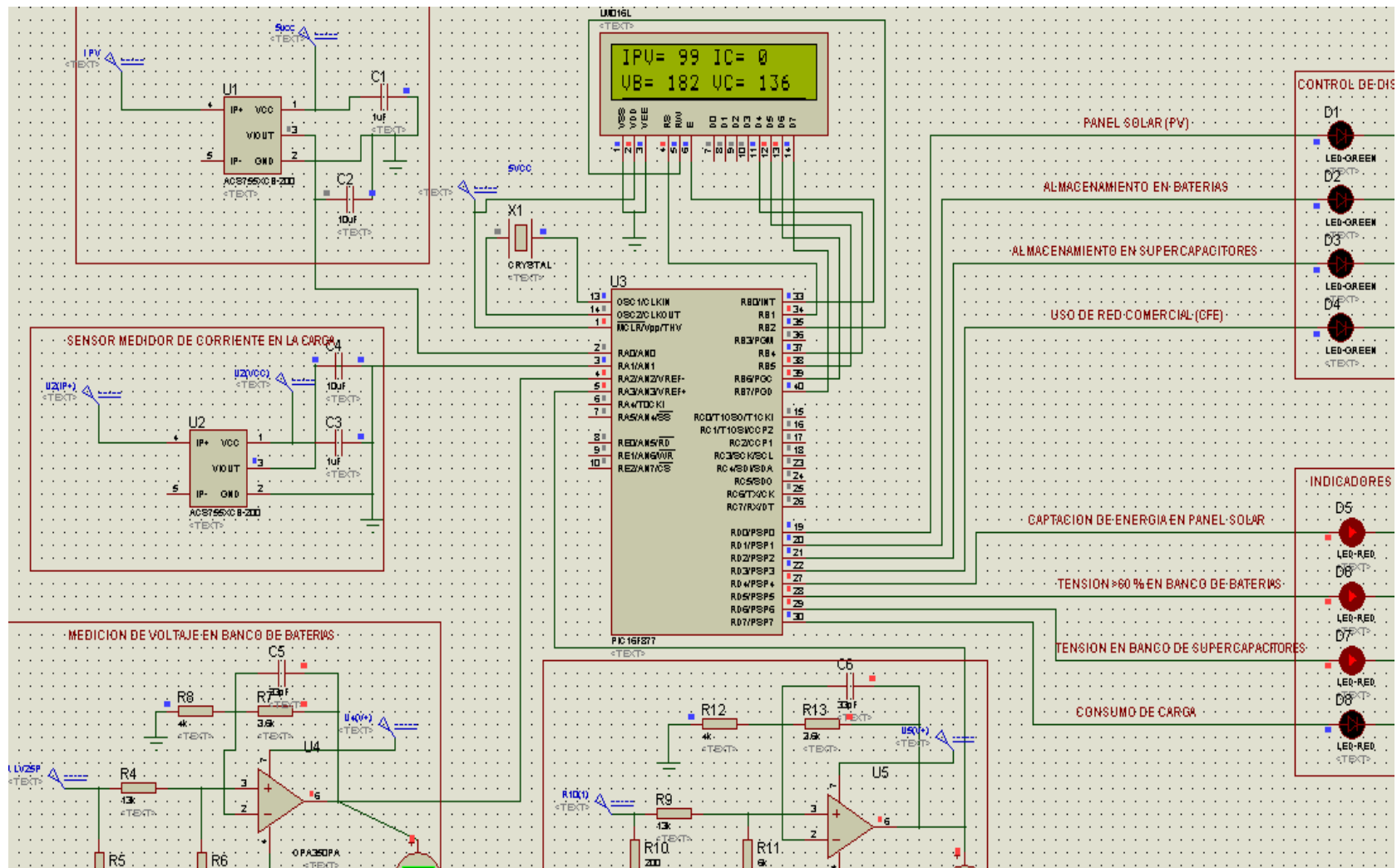


Figura 3.32. Diagrama de simulación caso 1: $I_{pv} > 0$, $I_c = 0$, $V_{BAT} = MAX$, $V_{CAP} = MAX$

Se aprecia generación de energía en el panel sin demanda de la red doméstica, por lo tanto se revisa el nivel de almacenamiento de la batería, y al ser el valor máximo, desactivamos el almacenamiento en batería y supercapacitores y desconectamos el panel para evitar sobrecarga.

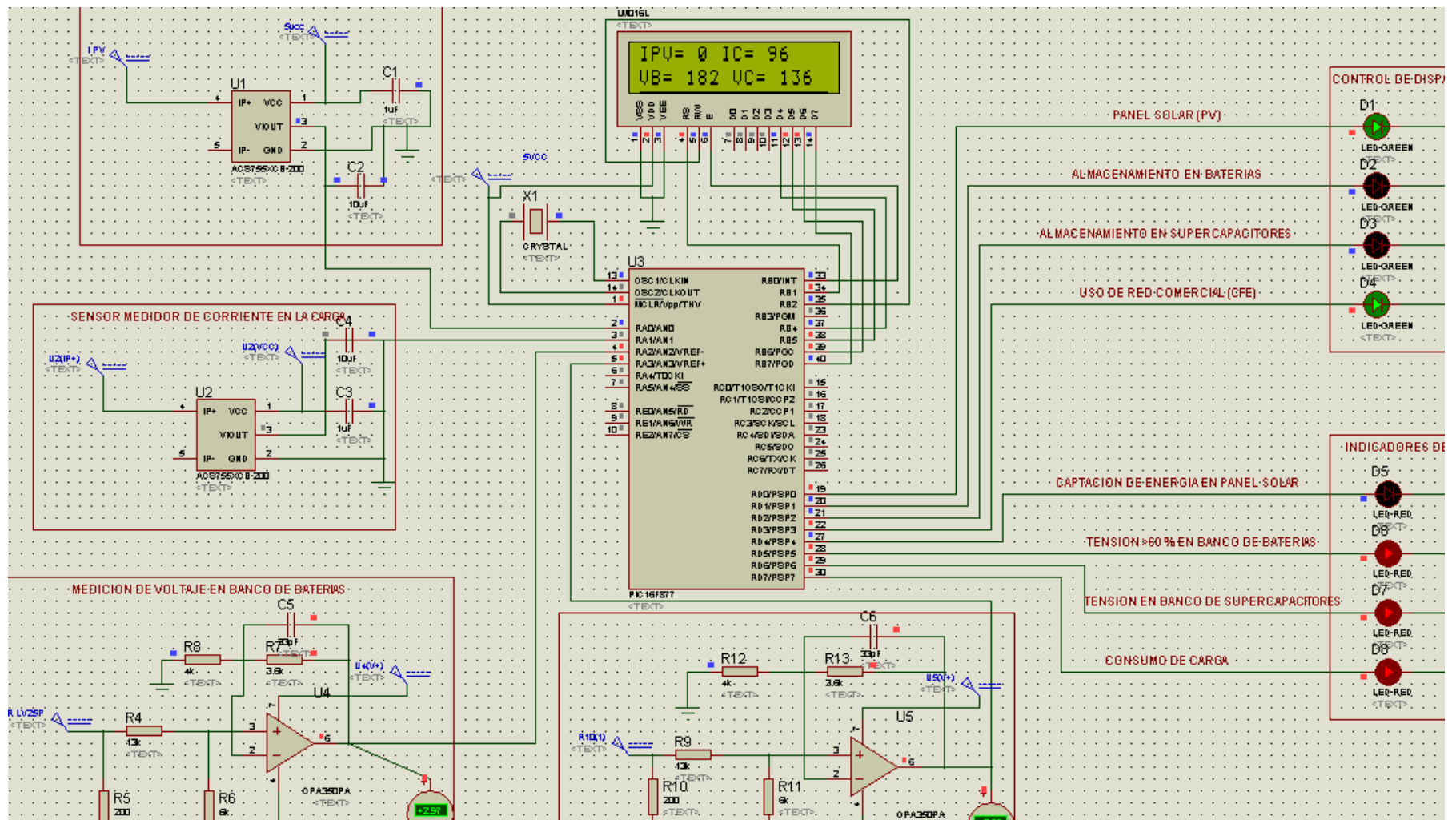


Figura 3.33. Diagrama de simulación caso 2: $I_{pv}=0$, $I_c > 0$, $P_A < P_{RD}$

Se aprecia generación de energía nula en el panel con demanda de la red doméstica, por lo tanto se revisa la potencia almacenada en la batería, y al ser menor a la potencia demandada, activamos el uso de la red comercial (CFE), para suministrar el excedente de demanda.

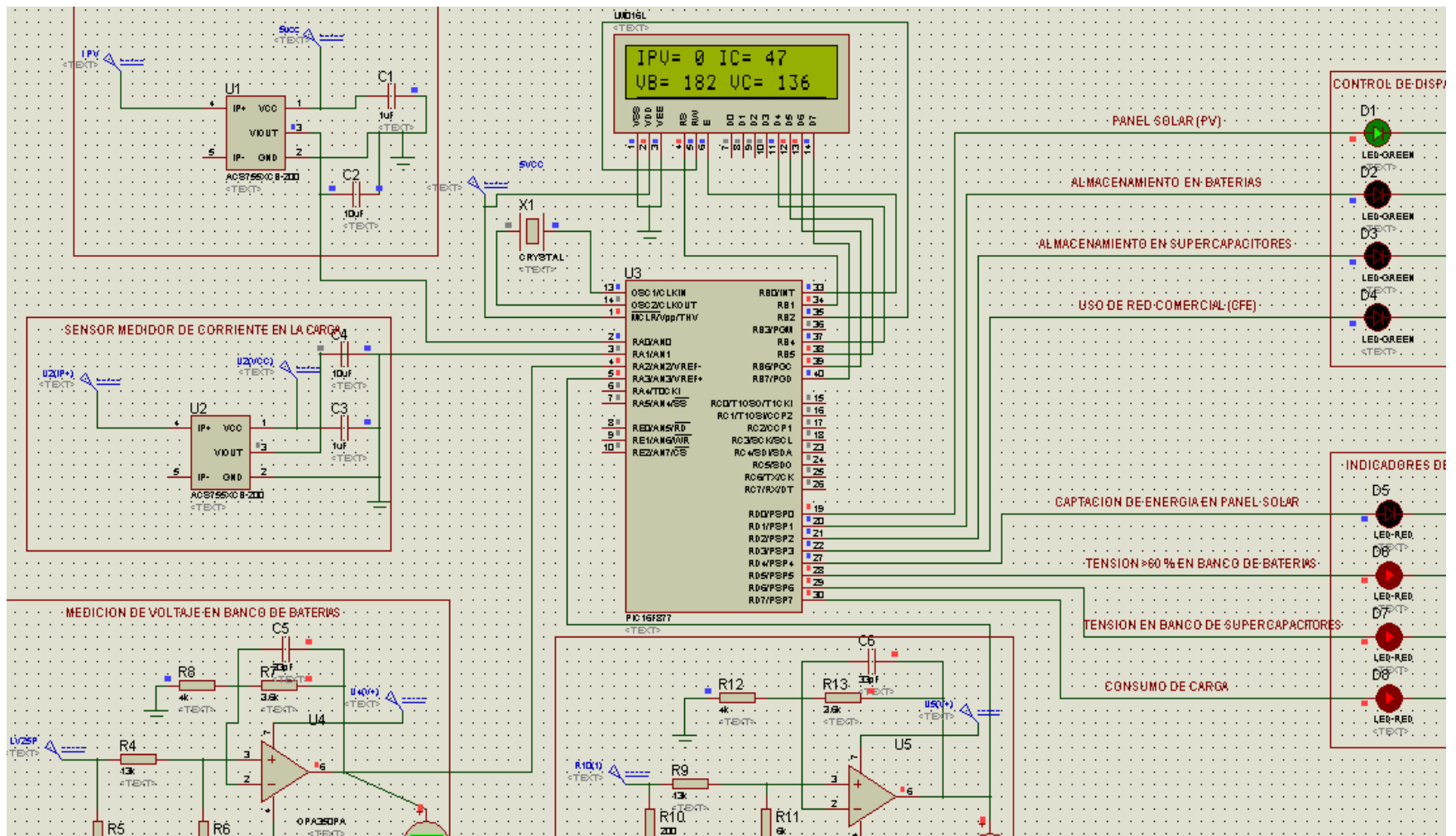


Figura 3.34. Diagrama de simulación caso 2: $I_{pv}=0$, $I_c > 0$, $P_A > P_{RD}$

Se aprecia generación de energía nula en el panel con demanda de la red doméstica, por lo tanto se revisa la potencia almacenada en la batería, y al ser mayor a la potencia demandada, suministramos la energía demandada con la almacenada en la batería.

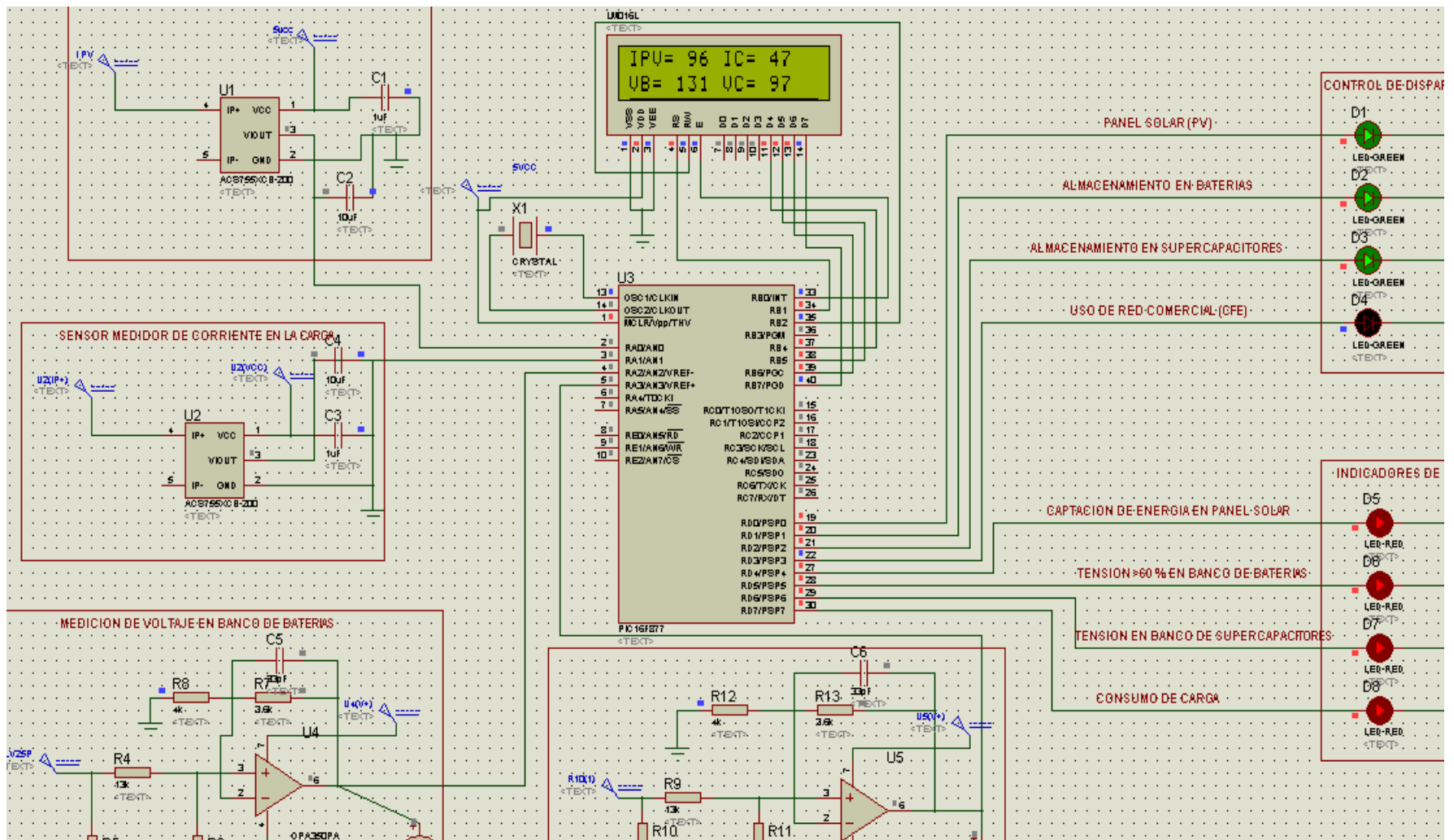


Figura 3.35. Diagrama de simulación caso 3: $PPV > PRD$, $PA < MAX$

Se aprecia generación de energía en el panel con demanda de la red doméstica, por lo tanto se compara si la potencia generada es mayor a la demandada, al cumplirse esto revisamos el nivel de almacenamiento en baterías y supercapacitores, al ser este menor al máximo activamos el almacenamiento en baterías y supercapacitores.

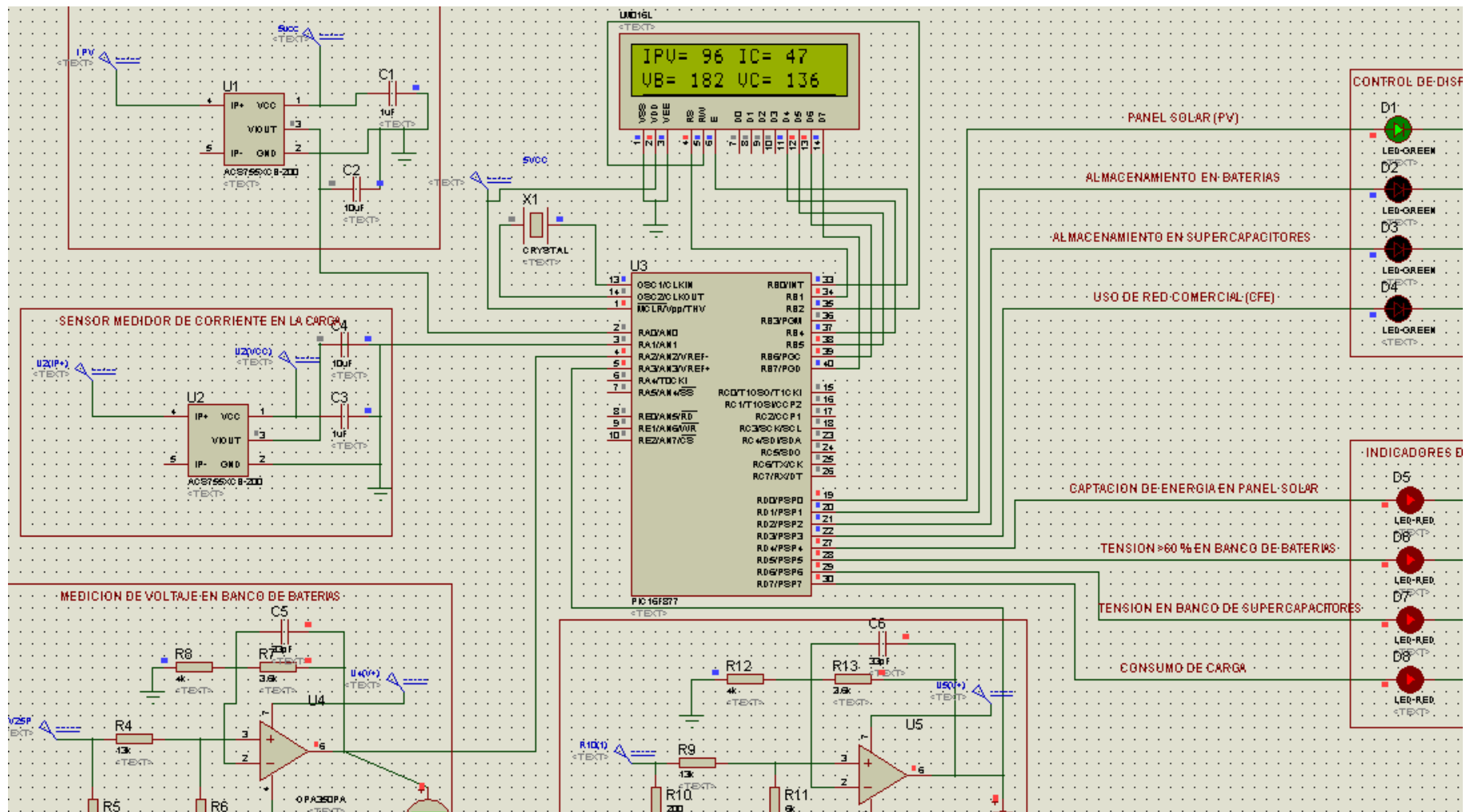


Figura 3.36. Diagrama de simulación caso 3: PPV>PRD, PA=MAX

Se aprecia generación de energía en el panel con demanda de la red doméstica, por lo tanto se compara si la potencia generada es mayor a la demandada, al ser así revisamos el nivel de almacenamiento en baterías y supercapacitores, al tener el nivel máximo en baterías y supercapacitores, desactivamos los almacenamientos.

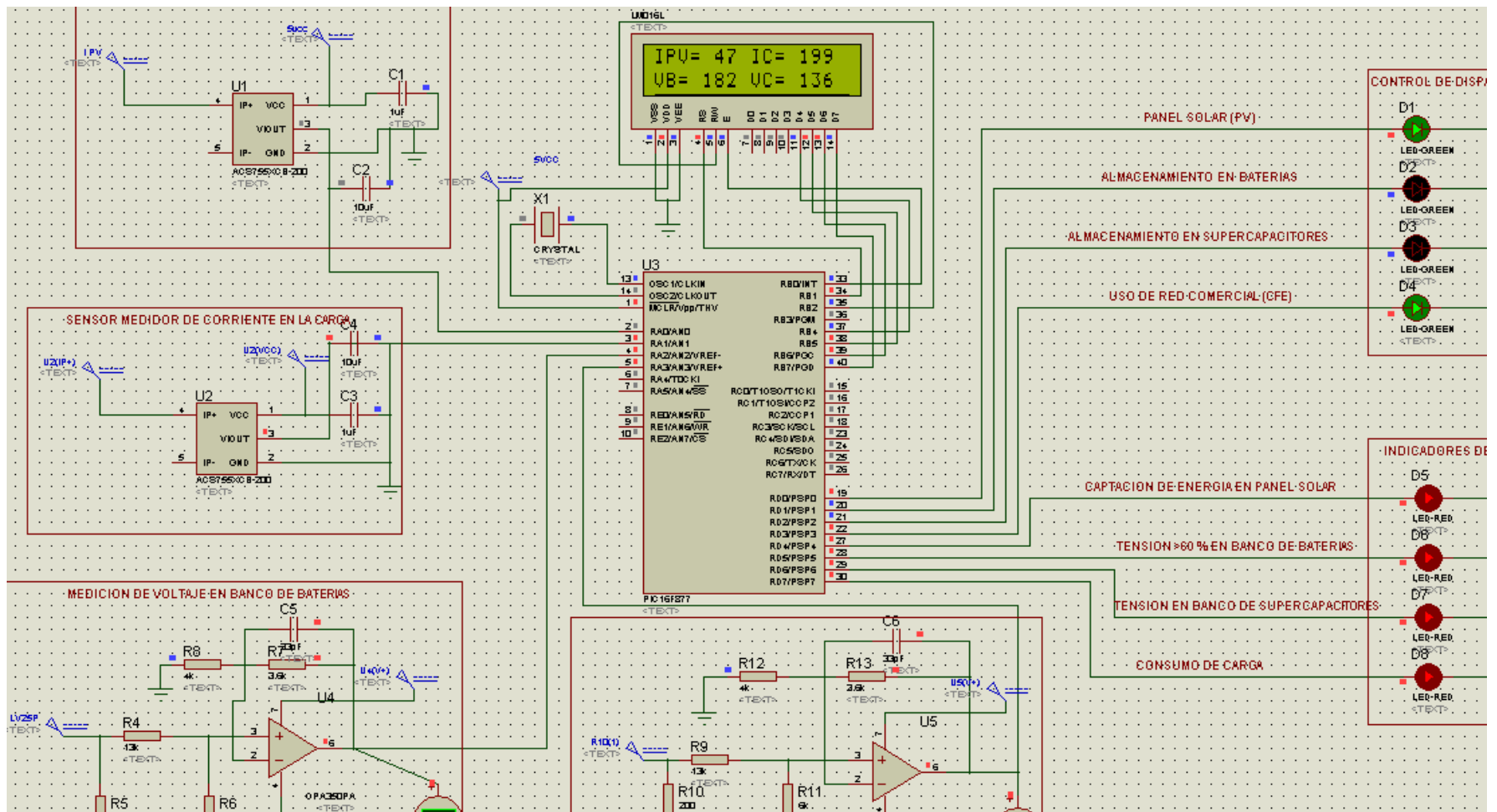


Figura 3.37. Diagrama de simulación caso 4: $PPV < PRD$, $PA = MAX$; $PPV + PA < PRD$

Se aprecia generación de energía en el panel con demanda de la red doméstica, por lo tanto se compara si la potencia generada es mayor a la demandada, al no ser así sumamos la potencia almacenada más la potencia generada, si la suma es menor a el valor de la potencia demandada, activamos el uso de red comercial (CFE) para que suministre el excedente de energía.

3.10. Acoplamiento de Señales de disparo del PIC 16F877

El Opto acoplador es un dispositivo electrónico que realiza la función de “aislar” ópticamente un circuito de otro, comportándose de esta manera como un interruptor, esto se realiza gracias a un Diodo emisor (cabe mencionar que no es como los Diodos emisores comunes), el cual satura un fototransistor o fototriac, desempeñando entonces uno el papel de emisor y el otro de receptor, unidos únicamente por óptica.

Para la protección de los puertos del PIC 16f877 se implementó un circuito con opto acopladores en los puertos que realizan los disparos, este es un circuito simple pero de mucha utilidad para la protección del Microcontrolador y para la separación de las etapas de potencia, el circuito es el mostrado a continuación:

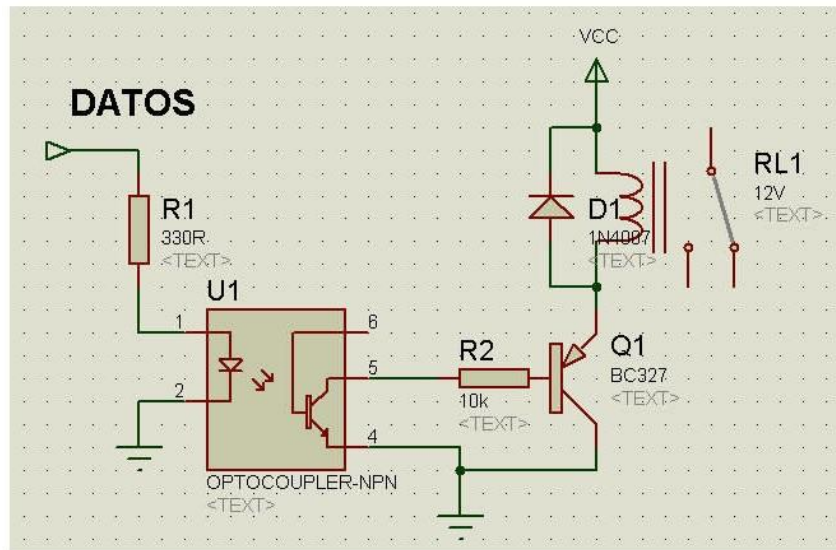


Figura 3.39. Circuito de protección con Optoacoplador

Para el cálculo de la resistencia a la salida del puerto del PIC 16F877 se cuenta con la siguiente ecuación:

$$R = \frac{V_{pic} - 1.2V}{5mA}$$

Para esta aplicación se tiene un valor de voltaje de salida de 3v, por lo que se obtiene un valor de resistencia:

$$R = \frac{3v - 1.2V}{5mA} = 360\Omega$$

Así entonces se elige un valor comercial cercano el cual es 330 Ω .

De esta forma se tiene protegido el PIC, separando las etapas y se asegura no se causará daños en el mismo.

Para el switcheo de las señales de activación del convertidor en baterías, del convertidor en supercapacitores, de la línea comercial (CFE) y del panel fotovoltaico se utilizara un relé de 12 V como se muestra en la figura 3.39.

3.11. Simulaciones del sistema de Ahorro de Energía en SolidWorks

Dentro de las simulaciones del sistema y las propuestas de solución se propone un modelo para la ubicación del sistema que se realizó, este se aplicó a una casa habitación promedio según parámetros del INEGI en el cual podemos observar una posible aplicación del sistema, los paneles solares se colocaron en un Angulo de irradiación solar que da la máxima captación de energía, así pues se hace una propuesta para la colocación del centro de carga teniendo en cuenta la seguridad y la facilidad de acceso al mismo.

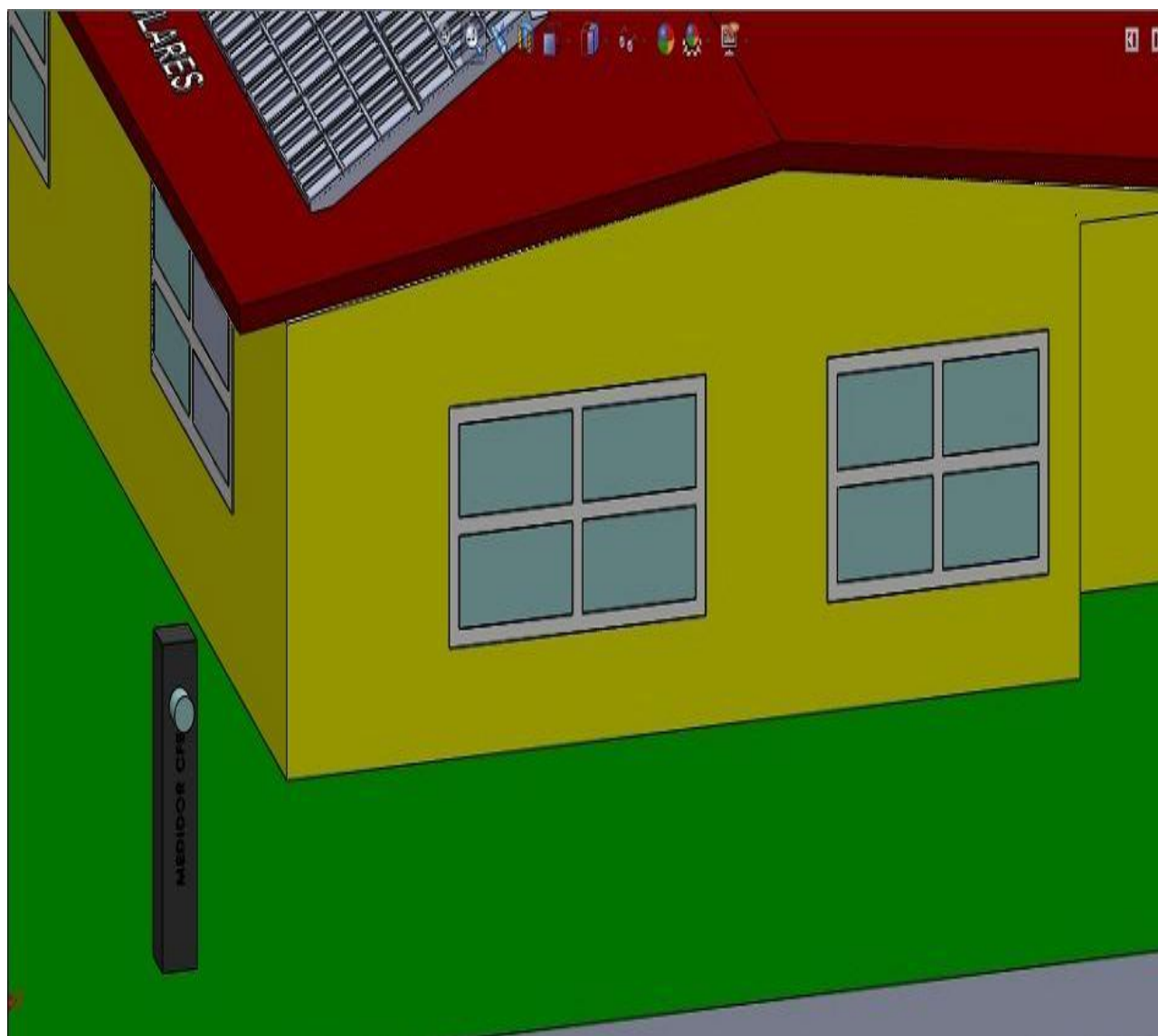


Figura 3.40. Perfil I del Sistema de Ahorro Energético en Casa-Habitación



Figura 3.41. Perfil II del Sistema de Ahorro Energético en Casa-Habitación

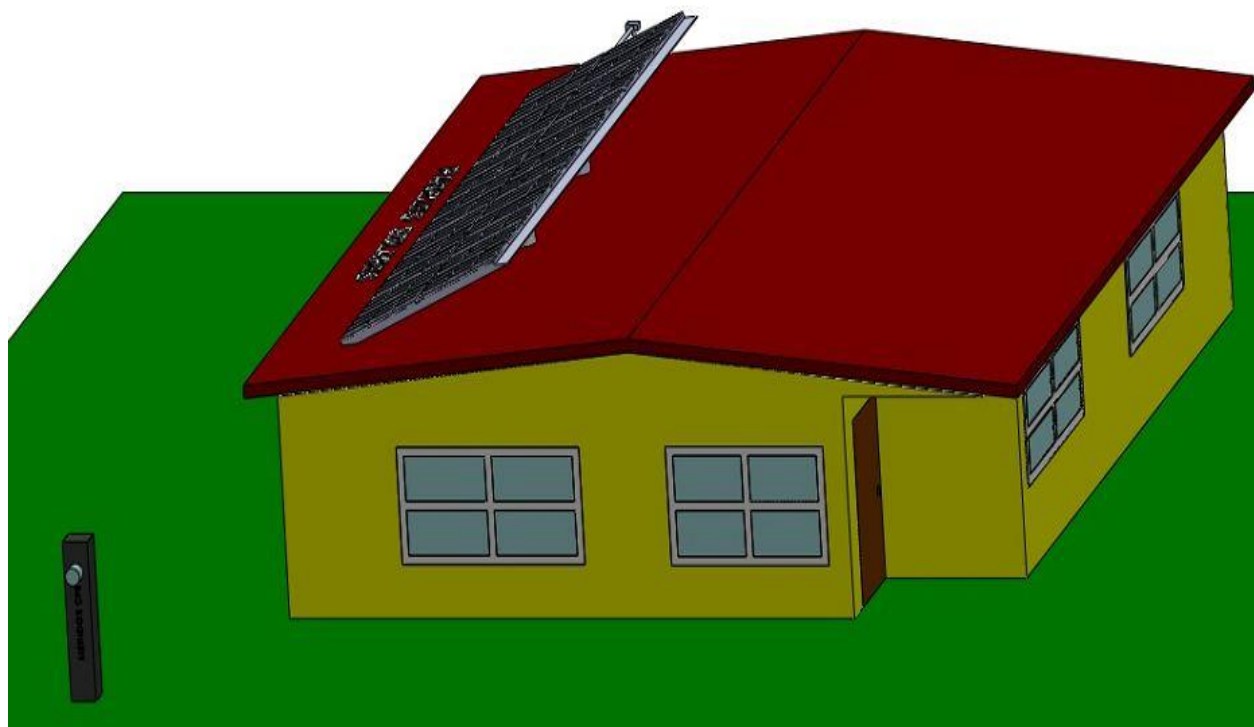


Figura 3.42. Perfil III del Sistema de Ahorro Energético en Casa-Habitación



Figura 3.43. Perfil IV del Sistema de Ahorro Energético en Casa-Habitación



Figura 3.44. Perfil I del Sistema de Ahorro Energético en Casa-Habitación

CAPITULO 4

Conclusiones, trabajo Futuro y anexos.

4.1. Conclusiones

Se analizó un sistema energético basado en captación de energía renovable que consiste en un generador fotovoltaico con un banco de baterías y Supercapacitores para abastecer a una red de energía doméstica, que a su vez también está conectada a la red de abastecimiento comercial. El impacto de esta investigación arroja que tanto las baterías como los Supercapacitores se complementan entre sí en términos de potencia y densidades de energía, de esta forma se aumentan las vidas útiles de estos componentes así como se mejora su rendimiento.

En la instalación fotovoltaica el banco de baterías suministra energía a la carga a través de reacciones químicas. Se requieren reducir descargas pico de alta potencia que reducen la capacidad de la batería, lo que resulta en una caída de tensión. Cuando la batería está en un mínimo de almacenaje se deben cumplir una serie de condiciones para que nuestro sistema fotovoltaico suministre la potencia necesaria. Los supercapacitores en el sistema fotovoltaico ofrecen la potencia de pico, aliviando la caída de tensión de la batería como se observó en graficas anteriores donde la gráfica del comportamiento de la batería decía que se comportaba de forma suave ante la brusquedad del supercapacitor, por lo que puede así mantener la carga durante un período de tiempo más largo.

Los supercapacitores también tienen un tiempo de respuesta más rápido en comparación con la batería.

El proyecto requirió una profunda investigación acerca del comportamiento de los paneles fotovoltaicos, enfocándose en el área del DF, esto con el fin de saber cuál sería la forma correcta para colocar estos paneles, cuanta corriente podría proporcionarnos y cuántos de estos paneles podrían utilizarse para la realización del proyecto.

El sistema optimizado se analizó con la utilización de un software llamado PSCAD el cual tiene un costo elevado ya que se especializa en la simulación de sistemas de potencia, por lo que basados en nuestra figura 3.1 la cual corresponde al diagrama eléctrico del sistema, se obtuvo el comportamiento del sistema en cuanto a potencia, tensión y corriente se refiere. A partir del análisis realizado se encontró que este sistema cumple con los requisitos que se desean de la casa habitación, cumpliendo a cada momento con las potencias requeridas por la carga.

Para los perfiles de carga evaluados, el ahorro de costo incurrido por el empleo de la supercapacitores sólo varía dependiendo de la potencia a utilizar en la carga. Así sería muy fácil recalcular las potencias y obtener modelos redituables para cargas más grandes.

La optimización del sistema para el peor día, arroja como resultado un posible período en el que el sistema fotovoltaico no suministra a la carga la potencia necesaria para realizar la labor que esta esté realizando, por lo cual se tiene la opción de recurrir a la línea de abastecimiento comercial (CFE) el cual proporcione a ultima la potencia requerida, este caso se debe a la duración del período de baja radiación solar debido a diferentes factores meteorológicos (Días nublados, tormentas, huracanes, frentes fríos). Cuando el sistema se ha optimizado para el peor momento, el sistema tiene la capacidad de ofrecer un día más de energía sin necesidad de requerir de la red de abastecimiento comercial.

El costo de los componentes está variando todo el tiempo, hace un poco de tiempo esta tecnología era realmente cara pero ha ido bajando sus costos a través del tiempo, gracias a los múltiples descubrimientos de nuevas tecnologías aplicadas a estos dispositivos.

4.2 Trabajo Futuro

Como parte de los trabajos futuros este sistema podría ser más avanzado al incluir componentes adicionales para selección en el programa de optimización. En general, la batería de iones de Litio, incluido en este trabajo, es la elección más común para el almacenamiento de energía. Los avances en otras baterías (NiMH y Li-ion), así como el almacenamiento de hidrógeno y pilas de combustible van haciendo que la utilización de estas tecnologías más atractivo.

Investigaciones llevadas a cabo respecto a los nuevos generadores de energía renovable ha demostrado beneficios de la combinación de diferentes tipos de generadores, así como la disminución de los costos en cuanto a este aspecto se refiere. La energía eólica y la generación fotovoltaica tienden a ser tecnologías complementarias que en pocos años se vislumbra será una tecnología muy barata gracias a la enorme competencia que se está generando en este rubro. Generalmente en los períodos de baja energía solar la radiación durante el período de invierno corresponde a un aumento en el viento y el vicio versa durante los meses de verano. Conviene prever en la optimización del programa el permitir que el tamaño de un generador híbrido para que complemente el sistema utilizando estas dos fuentes de energía renovable.

Un Modelado estocástico podría ser introducido en el programa de optimización para variar la carga y de la radiación solar para determinar el sistema óptimo teniendo variaciones en ambos perfiles en cuenta.

En este sentido se puede implementar un sistema que sense la posición del sol y mediante esta medición determine la posición óptima de los paneles solares para maximizar la obtención de energía solar.

Con respecto a la aplicación de este sistema, se puede hablar de una ampliación del mismo, esto sugiere que se puede realizar un sistema ampliado el cual pueda suministrar mayores potencias a cargas más grandes, podría hablarse así de una

aplicación para un conjunto de casas habitación, como podría ser un poblado pequeño, teniendo en cuenta también que existe la posibilidad de modificar el control del sistema y añadir una nueva condición de control, esta nueva situación sería la que se da cuando la carga no requiere de potencia y tenemos la capacidad de almacenamiento de las baterías al máximo, si esto sucede y tenemos que el Panel fotovoltaico está generando energía, se tendrá un exceso de energía desperdiciada en el sistema en nuestro caso cuando esto sucede se desconecta el panel para evitar sobrecarga, este exceso se podría utilizar creando una salida a la red de abastecimiento comercial (CFE) y/o enviándola a una nueva comunidad que la requiera, teniendo en cuenta los proyectos realizados por empresas en países avanzados que aprovechan este exceso y lo venden para evitar su desperdicio, esto requerirá de la creación de una interfaz bidireccional que sea capaz de medir la carga suministrada y la carga adquirida del sistema y entregarnos la diferencia de estas para que sea está la energía que el cliente pague o cobre.

La complejidad del programa de optimización se incrementará con la adición de nuevas características, opciones de componentes, la opción de un generador híbrido y la red conexión. Los beneficios de la utilización de lenguajes de programación y/o software alternativos deben ser estudiados para mejorar el sistema.

4.3 Bibliografía

- [1] S.Y. Kan, M. Verwaal, H. Broekhuizen, "El uso de la batería – Condensador Las combinaciones de productos de energía fotovoltaica “, Diario de fuentes de energía, Vol. 162, N°2, pp 971-974, 2006.
- [2] D. Cericola, P.W. Ruch, R. Kötz, P. Novak, A. Wokaun, " Simulación de un Supercapacitor / Li -ion híbrido de batería para aplicaciones de impulsos “, Journal of Fuentes de alimentación, vol. 195, pp 2731-2736,

2010.

- [3] C. E. Holland, J. W. Weidner, R. A. Dougal, R. E. Blanco, " Experimental Caracterización de los sistemas de energía híbridos Bajo Pulso Cargas corrientes ", Diario de fuentes de energía, vol. 109, pp 32-37,2002.
- [4]<http://www.osinerg.gob.pe/newweb/uploads/GFE/GuiaCalcularConsumo1.pdf>
- [5]<http://www.conuee.gob.mx/work/sites/CONAE/resources/LocalContent/7067/2/04EstudioFV.pdf>
- [6]http://www.sener.gob.mx/res/PE_y_DT/pub/prospectiva_elect.pdf
- [7]http://www.maxwell.com/products/ultracapacitors/docs/datasheet_bmod0063_1014696.pdf
- [8] <http://www.teknosolar.com/bateria-de-litio-12-8v-200ah-serie-cb.html>
- BUSTAMANTE, W. (1997). USO EFICIENTE DE LA ENERGÍA EN EL HOGAR. (Primera Edición.). Madrid. Ed. Mujeres Tecnologías.
- INCHAUSTEGUI VARGAS, J. (1994). ENERGIA. (Tercera Edición.).ED San Marcos.

El programa para el funcionamiento del PIC16F877 se creó en CCS y a continuación se anexa el código de este:

78

```

        {
            output_high(tbbat);
            if(PCAR>PREF) //comparamos si la potencia demandada es mayor a la suma de
            { //la almacenada en baterias y suministrada por el panel
                output_high(scfe); //ACTIVAMOS LA ALIMENTACION DE CFE
            }
            else
            {
                output_low(scfe); //desactivamos alimentacion de cfe
            }
        }
        else
        {
            output_high(scfe); // ACTIVAMOS LA ALIMENTACION DE CFE
        }
    }
    else
    {
        if(VBAT<180) //revizamos si la bateria necesita carga
        {
            output_high(bbat); //activamos la carga de baterias y supercapacitores
            output_high(bcap);
        }
    }
}
else
{
    if(VBAT<180) //en caso de no haber demanda revizamos si las baterias se pueden cargar
    {
        output_high(bbat); //cargamos baterias y supercapacitores
        output_high(bcap);
    }
    else //baterias llenas y sin demanda
    {
        output_high(bbat); //cargamos baterias y supercapacitores
        output_high(bcap);
    }
    else //baterias llenas y sin demanda
    {
        output_low(svd); //desactivamos panel
        output_low(bbat); //desactivamos carga de baterias y supercapacitores
        output_low(bcap);
    }
}
}
else //si no hay suministro de paneles
{
    output_high(svd); //mantenemos la conexcion en espera de la captacion de energia
    output_low(svb); //descativamos indicador de captacion de energia solar
    if(car>0) //revizamos si existe demanda
    {
        output_high(carga); //encendemos indicador de demanda
        if(PCAR>PSV)
        {
            if(VBAT>100) //revizamos si las baterias estar cargadas por encima del limite inferior de operacion
            {
                if(PCAR>PREF)
                {
                    output_high(scfe); //SI LA POTENCIA DEMANDADA ES MAYOR A LA ALMACENADA ACTIVAMOS ALIMENTACION DE CFE
                }
                else
                {
                    output_low(scfe); //DESACTIVAMOS ALIMENTACION DE CFE
                }
            }
            else
            {
                output_high(scfe); //si las baterias no tienen carga por encima del minimo activamos alimentacion de CFE
            }
        }
    }
}
else
{
    output_low(carga); //si no hay suministro ni carga desactivamos indicador de carga
}
}
printf(lcd_putc, "\fIPV= %ld",ISV); //imprimimos datos de referencia en un lcd, para observar mediciones
printf(lcd_putc, " IC= %ld",ICAR); //de nuestros sensores
printf(lcd_putc, "\nVB= %ld",VBAT);
printf(lcd_putc, " VC= %ld",VCAP);
delay_ms(300);
}
}

```