

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO
INTERCONECTADO A RED CON SOPORTE DE ALMACENAMIENTO EN LA
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA**

**SEBASTIÁN SÁNCHEZ GUEVARA
JULIÁN FRANCO GIL**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE TECNOLOGÍAS
INGENIERÍA EN MECATRÓNICA
PEREIRA
2016**

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO
INTERCONECTADO A RED CON SOPORTE DE ALMACENAMIENTO EN LA
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA**

SEBASTIÁN SÁNCHEZ GUEVARA

JULIÁN FRANCO GIL

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero
en Mecatrónica**

Director

Ing. EDGAR ALONSO SALAZAR MARIN

Codirector

ANDRES FELIPE GOMEZ GOMEZ

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

FACULTAD DE TECNOLOGÍAS

INGENIERÍA EN MECATRÓNICA PEREIRA

2016

Nota de aceptación:

Firma del presidente o jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Pereira 20 de Mayo de 2016

Contenido

1. TITULO	1
2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	1
3. JUSTIFICACIÓN.....	3
4. OBJETIVOS.....	4
4.1. OBJETIVO GENERAL.....	4
4.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	4
5. MARCO DE REFERENCIA	5
5.1. MARCO HISTORICO.....	5
5.1.1. MARCO CONTEXTUAL.....	7
5.2. MARCO TEÓRICO-CONCEPTUAL.....	8
5.2.1. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.....	8
5.2.2. GENERACIÓN DE ENERGÍA.....	9
5.2.3. INTERCONEXIÓN A LA RED ELECTRICA.....	9
6. DISEÑO METODOLOGICO	12
6.1. COMPONENTES BASICOS DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO CON INTECONEXIÓN A RED EN EL VIVERO DE LA UNIVERSIDAD TECNOLOGICA DE PEREIRA.....	16
6.2. DISEÑO DEL SISTEMA DE INTERCONEXIÓN ELECTRICA PARA EL VIVERO DE LA UNIVERSIDAD TECNOLOGICA DE PEREIRA	18
7. RESULTADOS	25
8. CONCLUSIONES	26
9. BIBLIOGRAFIA.....	27
10. ANEXOS.....	28

LISTA DE TABLAS

Tabla 1, Comparación Sistemas (Propio)	11
Tabla 2, Artículos del Sistema Inicial. (Propia).....	18

LISTA DE FIGURAS

Figura 1, Sistema fotovoltaico (2)	8
Figura 2. Adecuación del sistema.....	13
Figura 3. Plano definitivo del sistema	14
Figura 4, Sistema Real	15
Figura 5. Inversor AURORA	15
Figura 6. Inversor INFINISOLAR	16
Figura 7. Banco de baterías ROLLS	16

RESUMEN

Este proyecto comprende el diseño e implementación de un sistema fotovoltaico con interconexión a la red trifásica del sector vivero de la Universidad Tecnológica de Pereira, para el suministro energético del jardín botánico del jardín botánico, incentivando el uso de energías renovables en la región.

El aporte tecnológico generado por y para la universidad brinda como solución la generación de energía eléctrica de forma autónoma a bajo costo, de manera eficiente usando tecnologías híbridas de mayor rendimiento, siendo este un proyecto líder en energías renovables en Colombia.

Todo el proceso de diseño e implementación genera como resultado un trabajo de investigación que aporta al desarrollo de la generación de energías renovables, análisis de eficiencia, planos eléctricos, programación de equipos y disposición de energía acumulada, afianzado así lo aprendido durante el periodo de formación.

INTRODUCCIÓN

El actual sistema de generación eléctrica en Colombia, está basado en fuentes hídricas y fósiles, las cuales impactan en el medio ambiente de forma directa, la primera cambia por completo el ecosistema donde se hacen los embalses y la segunda impactos entre los que podemos destacar el “efecto invernadero”, la “lluvia ácida” y la deforestación.

Por estos motivos, se debe apostar al aprovechamiento de las energías renovables.

Se da el nombre de energías renovables a aquellas que provienen de fuentes “inagotables”, ya sea por la cantidad de energía que estas poseen o porqué se regeneran de forma natural, estas además son respetuosas con el medio ambiente. Dependiendo del recurso utilizado para la generación de energía son nombradas eólica, geotérmica, hidroeléctrica, mareomotriz, undomotriz, la biomasa, solar y los biocombustibles.

Según el último informe del ministerio de minas y energía de Colombia, publicado en marzo del año 2015, expresa que el consumo de energía eléctrica durante la última década provino de los hogares. El consumo residencial pasó de representar el 41% del consumo total del consumo de energía eléctrica en 2003, a ser el 46% del consumo total en 2014, por su parte, el consumo industrial se redujo entre 2003 y 2014, del 40% al 30% del consumo total de energía eléctrica, con relación al sector comercial, entre 2003 y 2014, su participación en el consumo total de energía eléctrica pasó de 20% a 23%. Los indicadores de la UPME proyectan el aumento del consumo de energía eléctrica en Colombia en un 3.7% anual, entre 2009-2020 (1). La presencia del fenómeno del niño y otros factores que afectan al país, crean la necesidad de implementar sistemas de generación con energías renovables, generando así una disminución del uso de combustibles fósiles y métodos no amigables con el medio ambiente.

Lo anterior sugiere la necesidad de implementar en el país sistemas pilotos alternativos de generación eléctrica basados en la temática de energías renovables.

Dado que los sistemas solares fotovoltaicos utilizan como fuente de energía el sol, se pueden considerar como no contaminantes y no contribuyentes con el “efecto invernadero” y una fuente de energía inagotable, se postula así como una alternativa de generación de energía eléctrica viable para Colombia y un proyecto prometedor para la implementación de energías renovables en el sistema de interconexión nacional.

1. TITULO

Diseño e implementación de un sistema fotovoltaico interconectado a red con soporte de almacenamiento en la Universidad Tecnológica de Pereira.

2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

En el año 2010 por medio de la construcción del puente helicoidal de la vía Pereira - Manizales, la empresa encargada del mismo, dentro de la planeación tenía instaurado un sistema fotovoltaico capaz de abastecer de energía eléctrica el alumbrado público de la zona cubierta del puente helicoidal, después de instalado el sistema y probado, no tuvo los resultados esperados por lo cual se hizo el proyecto a un lado. En años posteriores por medio de acuerdos para exención de impuestos la Universidad Tecnológica de Pereira recibió este sistema como donación.

Al llegar el Sistema Solar Fotovoltaico creó la oportunidad de un proyecto piloto el cual sirviera para la generación de energía eléctrica a través de fuentes renovables.

El país ha sido tímido en decisiones políticas que promuevan decididamente la implementación de sistemas de generación fotovoltaicos OFF GRID y ON GRID, los sistemas OFF GRID han sido implementados de manera parcial por una evidente problemática en la carencia de energía en zonas no interconectadas, sin embargo los proyectos de interconexión a red son apenas un esfuerzo puntual de pocas entidades interesadas en estudiar esta alternativa. El decreto Ley 1715 del 13 mayo de 2014 ha sido un tema referente para lograr este objetivo. Sin embargo no ha tenido la suficiente acogida política para sea realmente ejecutable. Las juntas decisorias del congreso de la república no han designado plazo para la regulación de esta ley, dejando de lado la oportunidad de diversificar la matriz energética del país. La racionalidad energética que actualmente está propuesta por el gobierno nacional es el fiel resultado de la poca diversidad en fuentes de generación energética. Es imperativo con los recursos renovables que cuenta el país como el potencial solar, visualizar opciones de generación diferentes, como lo han hecho países en vía de desarrollo por ejemplo Brasil, Chile, Costa Rica, México y Uruguay (2).

La Universidad Tecnológica, como centro de investigación de la región cuenta con la oportunidad de introducirse en la implementación de sistemas alternativos de generación de energía eléctrica. Siendo este un referente de análisis de

factibilidad económica y ambiental de este tipo de sistemas que interesará a las empresas de energía de la región y el país.

3. JUSTIFICACIÓN

La energía solar fotovoltaica es utilizada en países desarrollados para obtener energía eléctrica desde los hogares y esta ha sido utilizada en muchos casos para la red eléctrica pública a través de contadores bidireccionales. En Pereira los niveles de radiación en horas picos solares corresponden a aproximadamente 4.64 (3) lo cual hace viable la idea de implementar un sistema fotovoltaico y demostrar como proyecto piloto que la energía solar es factible en la región.

Para la puesta en marcha de un sistema fotovoltaico para la Universidad Tecnológica de Pereira se debe tener en cuenta que los diferentes sistemas de interconexión a red tienen presentes dispositivos electromecánicos de alta potencia, que permiten la modulación y puesta en fase de las señales entrada – salida, haciendo que desde el punto de vista Mecatrónico sea viable la participación y desarrollo del proyecto generando efectividad de las diferentes áreas y aptitudes que puedan ser implicadas.

“El niño tiene sudando a todos los colombianos y ha puesto en jaque al sistema de generación nacional como advierte Vladimir Martínez Tejada, profesor de la Universidad Pontificia Bolivariana, depende en alto grado del agua, “las hidroeléctricas alimentan alrededor del 67 por ciento de la planta energética colombiana y el gas y el carbón un 26 por ciento. Esto significa que una disminución de las lluvias de entre un 40 y 70 por ciento la pone en una situación altamente vulnerable” (4)

A raíz del cambio climático, la energía solar con sistemas de interconexión a red ha sido una opción viable y eficiente para generar energía libre de efectos adversos para el medio ambiente, mitigando así la progresiva contaminación que perjudica en la actualidad al planeta en general.

Si se empieza tomar en cuenta y de forma seria el aprovechamiento de los recursos naturales, se podría llegar a prolongar la existencia de nuestro planeta como hoy lo conocemos.

4. OBJETIVOS

4.1. OBJETIVO GENERAL

Diseñar e implementar un sistema fotovoltaico interconectado a red con soporte de almacenamiento en la Universidad Tecnológica de Pereira.

4.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Determinar la base conceptual de los sistemas de interconexión a red.
- Realizar un diagnóstico de los componentes del sistema fotovoltaico.
- Diseñar el sistema de interconexión a red para para suplir la carga del Vivero-UTP.
- Realizar el montaje eléctrico y la puesta a punto del sistema de interconexión a red.
- Evaluar la eficiencia del sistema mediante mediciones de energía obtenida y energía entregada.
- Consolidar este trabajo como proyecto piloto a nivel nacional para determinar la validez técnico-económica de sistemas solares interconectados a red y soporte a acumuladores.

5. MARCO DE REFERENCIA

5.1. MARCO HISTORICO

El uso de paneles solares a lo largo del último siglo ha hecho que estos sean una alternativa para producir energía en casi cualquier lugar, ya sea un edificio o casa ubicada en la comodidad de la ciudad o una propiedad agrícola a kilómetros de la red eléctrica.

El efecto fotovoltaico fue descubierto por el francés Alexandre Edmond Bequerel¹ en 1838 cuando tenía sólo 19 años. Bequerel estaba experimentando con una pila electrolítica con electrodos de platino cuando comprobó que la corriente subía en uno de los electrodos cuando este se exponía al sol. El siguiente paso se dio en 1873 cuando el ingeniero eléctrico inglés Willoughby Smith² descubre el efecto fotovoltaico en sólidos; en este caso sobre el Selenio. Pocos años más tarde, en 1877, El inglés William Grylls Adams profesor de Filosofía Natural en la King College de Londres, junto con su alumno Richard Evans Day, crearon la primera célula fotovoltaica de selenio. (2).

Si bien en todos estos descubrimientos la cantidad de electricidad que se obtenía era muy reducida y quedaba descartada cualquier aplicación práctica, se demostraba la posibilidad de transformar la luz solar en electricidad por medio de elementos sólidos sin partes móviles.

La posibilidad de una aplicación práctica del fenómeno no llegó hasta 1953 cuando Gerald Pearson³ de Bell Laboratories, mientras experimentaba con las aplicaciones en la electrónica del silicio, fabricó casi accidentalmente una célula fotovoltaica basada en este material que resultaba mucho más eficiente que cualquiera hecha de selenio. A partir de este descubrimiento, otros dos científicos también de Bell, Daryl Chaplin y Calvin Fuller perfeccionaron este invento y produjeron células solares de silicio capaces de proporcionar suficiente energía eléctrica como para que pudiesen obtener aplicaciones prácticas de ellas. De esta manera empezaba la carrera de las placas fotovoltaicas como proveedoras de energía.

Fue solo hasta el comienzo de la carrera espacial donde los paneles fotovoltaicos tuvieron grandes avances pues allí el costo de inversión para⁴ la investigación no

¹Alexandre Edmond Bequerel: Físico francés, nacido en París en 1822 y fallecido su ciudad natal en mayo de 1891.

²Willoughby Smith fue un ingeniero eléctrico inglés que descubrió la fotoconductividad del selenio.

³Gerald Pearson fue un físico cuyo trabajo sobre rectificadores de silicio en los Laboratorios Bell llevó a la invención de la célula solar

era un limitante, así en 1955, se le asigna a la industria en EEUU el encargo producción de paneles fotovoltaicos para aplicaciones espaciales. Esto significó sin duda un importantísimo impulso que permitió un crucial desarrollo tecnológico del sector. Como ejemplo cabe citar que la empresa Hoffman Electronic ofreció, en 1955, células de 14 mW con un rendimiento del 3% a un costo de 1500\$/W. Dos años después esta misma empresa desarrolla células solares ya con un rendimiento del 8%.

El 17 de Marzo de 1958, finalmente, se lanza el Vanguard I, el primer satélite alimentado con paneles solares fotovoltaicos. El satélite llevaba 0,1W en una superficie aproximada de 100 cm² para alimentar un transmisor de 5 mW. Si bien en este satélite los paneles solares eran solo la fuente de energía de respaldo, acabaron por convertirse en la fuente principal cuando las baterías consideradas fuente de alimento se agotaron en tan sólo 20 días. El equipo estuvo operativo con esa configuración por 5 años. (2).

Hasta este momento los paneles solares eran exitosos en su funcionamiento pero la idea de tenerlos en proyectos más pequeños y con bajos costos aún era un reto el cual Dr. Elliot Berman decidió afrontar con el patrocinio de EXXON, desarrolló y creó una célula solar mucho más barata que reducía el costo por vatio de 100 USD a 20 USD. Para ello empleo un silicio con un grado de pureza menor y unos materiales encapsulantes más baratos pero combinando todo para mayor eficiencia.

Así los desarrollos de energía solar fotovoltaica empezaron a multiplicarse y ser utilizados en electricidad para la protección contra la corrosión de oleoductos y gaseoductos, iluminación de boyas marinas y faros, repetidores de sistemas de telecomunicaciones, sistemas de iluminación en líneas férreas. Esta tecnología tomó las riendas para ser confiable y eficiente en cada uno de los usos que se daba, a tal punto de ser usada para extraer agua en sitios alejados y producir energía en los lugares donde llevar líneas eléctricas era mucho más costoso que cambiar las baterías gastadas por otras cargadas. En la década de los 80 se impulsaron diversos proyectos para electrificar países que tenían este problema. Como iniciativa en países desarrollados los hogares empezaron a ser autosuficientes en cuanto a la generación de energía.

En la actualidad, países desarrollados han tomado la iniciativa de competir e implementar la tecnología fotovoltaica siendo pioneros y con objetivos muy claros en que la producción de energía eléctrica sea 100% renovable, por ejemplo Alemania con un uso total de 10.000 MW se convierte en el líder mundial en uso de energías renovables, en 2009, Alemania instaló 3.806 MW de capacidad de energía solar, lo cual es mayor que la capacidad total de España y casi ocho veces más de lo que EE.UU. ha instalado recientemente. España hace uso de un total de 3.500 MW y fue líder en 2008 de energía solar fotovoltaica con 2.605 MW, perdió su primer puesto debido a la grave crisis económica. Junto a estos países se encuentra Japón con un uso total de 2.700 MW, Estados Unidos con 1.800

MW, Italia con 1.300 MW, La República Checa con 600 MW, Bélgica con 450MW, China como un importante fabricante de paneles solares, hace uso de ellos en su territorio produciendo 400 MW, Francia con 350 MW e India con 200 MW, su clima es ideal para la producción de energía solar y el gobierno Indio también ha ido avanzando en gran medida de la energía limpia. El país tiene una meta a alcanzar los 20 GW en 2020. (3)

A nivel regional, en Latinoamérica encontramos a Chile que en 2013 Sant Edison y grupo Cup anunciaron su alianza para construir en el desierto de atacama la mayor planta de energía solar fotovoltaica de Latinoamérica, Atacama es el desierto más árido del planeta con más de 3000 horas de sol al año, este proyecto consistió en el desarrollo, financiación, construcción, operación y mantenimiento de una planta solar de 100 MW al año con una subestación transformadora de 23 KV a 220 KV y una subestación seccionadora para conexión a red. (4)

Colombia por su parte no cuenta con sistemas a gran escala, pero se puede destacar al grupo Éxito, que tiene en sus instalaciones del éxito Panorama en la ciudad de Barranquilla la planta fotovoltaica más grande del país, construida por Green Yellow, una planta de 6300 m² generando así el 24% de la energía consumida por el almacén unos 788 MW/H (5)

Actualmente en la región del eje cafetero no posee sistemas fotovoltaicos considerables.

5.1.1. MARCO CONTEXTUAL

Pereira Risaralda Colombia, Universidad Tecnológica de Pereira, Programa de Ingeniería en Mecatrónica Ciclo III, Jardín Botánico, Centro de visitantes.

5.2. MARCO TEÓRICO-CONCEPTUAL.

5.2.1. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Los sistemas fotovoltaicos basan su funcionamiento en el efecto fotoeléctrico para transformar la energía lumínica proveniente del sol en energía eléctrica. Este proceso de generación de electricidad renovable no contamina, no emite gases nocivos, su mantenimiento es mínimo y no genera ruidos molestos. La tecnología fotovoltaica es totalmente confiable y su instalación en residencias e industrias es sencilla.

A continuación a través de la figura 1 se enuncian las partes que conforman un sistema de generación fotovoltaico aislado a nivel residencial.



Figura 1, Sistema fotovoltaico (2)

- 1) Paneles Solares Fotovoltaicos: Los paneles solares están formados por celdas fotovoltaicas, las cuales recolectan los rayos del sol y los convierten en corriente directa (DC).
- 2) Inversor: Recibe la corriente directa (DC) generada por los paneles solares y la convierte en corriente alterna (AC), el tipo de electricidad comúnmente utilizada.
- 3) Tablero Eléctrico: La corriente alterna (AC) que sale del inversor llega a un tablero eléctrico donde está lista para ser utilizada.
- 4) Medidor de Energía Bidireccional: Mide la energía entregada por la compañía de luz al usuario así como la energía fotovoltaica residual compensada en su

estado de cuenta, de esta manera la energía residual producida por su sistema fotovoltaico se descuenta de su próximo recibo de luz.

- 5) Red Eléctrica: Es el sistema eléctrico de la compañía de luz. Su sistema fotovoltaico permanecerá conectado a la red eléctrica para permitir el funcionamiento de la red eléctrica cuando se requiera energía adicional a la que su sistema fotovoltaico produjo, por ejemplo durante la noche, garantizando así un suministro constante y confiable de electricidad.
- 6) Sistema de Monitoreo: Su sistema fotovoltaico ofrece la posibilidad de monitorear la producción diaria de energía fotovoltaica y verificar que su sistema funcione adecuadamente, así como llevar un registro del CO2 no emitido al ambiente.

5.2.2. GENERACIÓN DE ENERGÍA.

Hoy en día, es indispensable el uso de equipos o herramientas eléctricas para cumplir a cabalidad las labores cotidianas, es por esta razón, que la demanda energética se hace cada vez mayor. (6) Algunos de los métodos de generación de energía tienen efectos negativos según su fuente de generación, por lo que ha generado que las normas ambientales sean más rigurosas con el paso de los años con el objetivo de proteger el medio ambiente, velando porque las practicas que se generen sea en pro y no en contra se los ecosistemas. Esta situación ha despertado en algunos empresarios (7), el interés por optar por un método de generación de energía eléctrica factible que a su vez sea amigable que aporte al medio ambiente y cumpla con las normatividades establecidas, teniendo en cuenta que el beneficio a largo plazo será mayor, debido a que está generando su propio sustento eléctrico y no depende de la red eléctrica local.

La generación de energía de forma amigable comprende diferentes fuentes de producción, para cada fuente se utilizan mecanismos de aprovechamiento particulares a cada situación. En ciertas ocasiones como el aprovechamiento de fuentes hídricas, es necesario elementos electromecánicos que sean capaces de aprovechar el libre movimiento (energía potencial) del fluido, para así tener un proceso adecuado. También hay otro mecanismo de tipo químico; como lo es el proceso que ocurre en los módulos fotovoltaicos, que por medio de una reacción química de algunos elementos al ser expuestos a los rayos solares producen cargas eléctricas que pueden ser aprovechadas o recolectadas en elementos para su posterior aprovechamiento.

5.2.3. INTERCONEXIÓN A LA RED ELECTRICA.

Dentro de los sistemas de energía solar fotovoltaica, existen dos tipos configuración para realizar la conexión, ya sea sistema aislado o un sistema de interconexión a red.

Un sistema de conexión aislado, al igual que el de interconexión a red, utilizan paneles fotovoltaicos para transformar la energía solar en energía eléctrica, con la diferencia de que en el caso del sistema aislado toda la energía producida es almacenada en un banco de baterías.

Este sistema independiente, con la virtud de que almacena la energía en un banco de baterías, tal energía almacenada puede ser utilizada en ocasiones donde la radiación solar no esté disponible.

Este sistema es muy práctico y versátil, Dado que se puede implementar en casos donde se desea suministrar energía eléctrica a veredas, zonas rurales alejadas y aisladas de los centros de generación.

A un sistema interconectado, “un Sistema Interconectado a Red es una instalación que aprovecha la energía solar para producir electricidad mediante módulos fotovoltaicos. La Energía Solar se transforma en electricidad y se inyecta a la red pública. No es necesario contar con un medio de almacenamiento (baterías)” (8). Existen dos tipos de sistema interconectado con respaldo y sin respaldo.

Aunque es poco común encontrar un sistema interconectado a red con respaldo, es decir, con banco de batería, es posible realizar este, lo cual, naturalmente aumenta los costos de inversión inicial del proyecto, sin embargo la demanda de suministros energético por parte de la red pública se reduciría. El modo de funcionamiento va de la siguiente manera, al momento de generar de electricidad mediante los paneles solares se empieza a cargar el banco de baterías almacenando la capacidad calculada de energía, el remanente o energía extra producida por el sistema es entregada a la red pública, teniendo así un mayor costo beneficio dado que el respaldo de energía almacenado en las baterías puede ser utilizado en horas de la noche en iluminación o cualquier otra actividad, por lo tanto el suministro energético por parte de la red pública se reduce considerablemente generando así una reducción en el costo de la factura.

En cambio, un sistema interconectado a red sin respaldo, implementa un contador bidireccional que permite tener un control del consumo y producción de energía eléctrica, como es esto, al consumir energía eléctrica de la red el contador gira en un sentido contabilizando la energía consumida durante un lapsus de tiempo y este es el método por el cual las empresas de energía facturan a los consumidores, pero al producir energía eléctrica por medio del sistema fotovoltaico y esta energía es proporcionada a la red pública, este elemento contador gira en dirección opuesta, es decir descuenta al consumo generado. Es por decirlo de alguna manera de que la energía producida es almacenada en la red eléctrica.

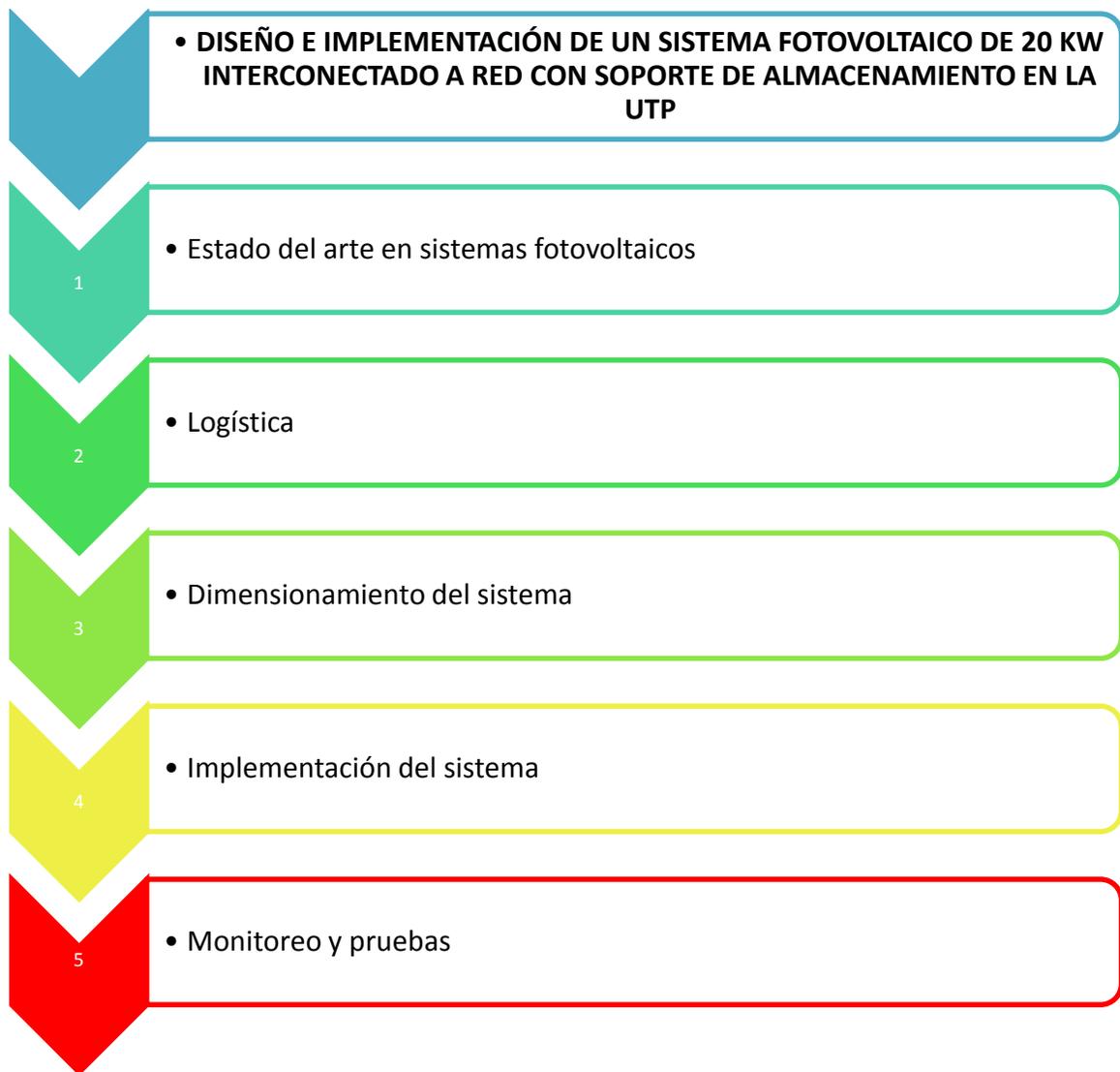
Cabe destacar que para implementar un sistema interconectado, se deben contar con los permisos necesarios y equipos proporcionados por las empresas generadoras de energía de cada localidad.

Para hacer una comparación de las características de cada sistema, se ilustra en la tabla 1

	Sistema Interconectado sin back-up	Sistema Interconectado con back-up	Sistemas Aislado
Costos iniciales	Económico.	Costoso por el banco de baterías.	Costoso por el banco de baterías.
Costos de mantenimiento	Mínimo, con limpieza basta.	Limpieza, más costos de mantenimiento de batería.	Limpieza más costos de mantenimiento de batería.
Flexibilidad del sistema.	No hay problema con el consumo excesivo o sobre-uso.	No hay problema con el consumo excesivo o sobre-uso.	Limitado por la carga almacenada en lo calculado para el banco de baterías.
Dependencia	Depende del sistema eléctrico de la red pública	Semidependiente, por la red pública e independiente por el almacenaje de energía con el banco de batería	Totalmente independiente
Obligación legal	Permisos de las empresas generadoras de energía local	Permisos de las empresas generadoras de energía local	No hay necesidad de algún tipo de permiso si se está dentro de los límites de sus predios
Implementación	Fácil	Poco más complicada	Poco más complicada

Tabla 1, Comparación Sistemas (Propio)

6. DISEÑO METODOLOGICO



1. La investigación fue tipo aplicada con un alto componente tecnológico. El proyecto inició con la revisión del estado del arte en sistemas fotovoltaicos on-grid (interconectados a red), en especial aquellos que trabajan con soporte en bancos de almacenamiento.

2. Todos los aspectos logísticos fueron importantes y no menos complejos para el logro de resultados:

- Consecución de espacio a través de planeación. Al no conseguir espacio para el montaje del sistema, fue necesario proyectar el arreglo de paneles sobre el techo del cuarto de herramientas del Vivero.
- Trámite de recepción y traslado de equipos La donación de autopistas del café implicó una gestión compleja en documentación, desensamble, traslado y montaje de estructura y paneles. El semillero de energías renovables se encargó de este montaje.
- Acercamiento a empresa del sector y consecución de equipos para inversión a red. Se obtuvieron los equipos más importantes para el sistema a través de una empresa líder internacionalmente.
- Consecución de componentes. Necesarios para el montaje final de todo el sistema. Comprende la proyección de cables, protecciones, breaker, tablero, etc.

La figura 2 ilustra el momento de adecuación del lugar donde se definió era el propicio para el sistema fotovoltaico.



Figura 2. Adecuación del sistema.

3. La Fase 3 (dimensionamiento) es la que define los alcances y la buena orientación generada por los conocimientos adquiridos durante la trayectoria de diseños fotovoltaicos, es donde se realizaron los cálculos que en este caso dependieron de algunos equipos ya existentes pero buscando dar nuevas aplicaciones para incentivar la innovación en el diseño.

La figura 3 ilustra el plano unifilar definitivo para el sistema fotovoltaico.

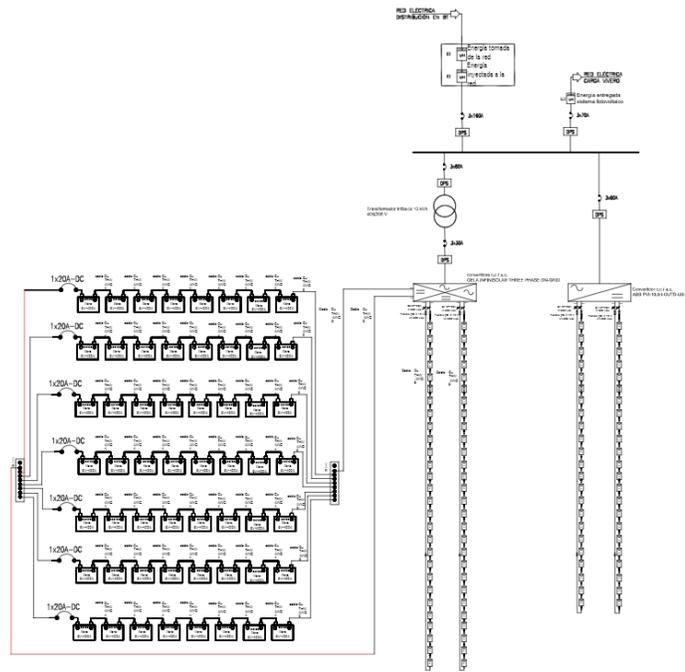


Figura 3. Plano definitivo del sistema

4. La fase de implementación. En esta fase se materializa todo el diseño proyectado, y se instalaron componentes y accesorios necesarios, distribuyendo de una manera óptima todos los equipos.

En la figura 4 se evidencian los adelantos físicos de la instalación del sistema



Figura 4, Sistema Real

En la figura 5, figura 6 y figura 7 se evidencian los inversores a red ya conectados y funcionales con el respaldo.



Figura 5. Inversor AURORA



Figura 6. Inversor INFINISOLAR



Figura 7. Banco de baterias ROLLS

5. Fase de monitoreo y pruebas. Fase esencial para establecer la funcionalidad y factibilidad del sistema. En esta fase se hizo esencial el montaje de equipos de monitoreo óptimos para el análisis de las variables energéticas en tiempo real.

6.1. COMPONENTES BASICOS DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO CON INTECONEXIÓN A RED EN EL VIVERO DE LA UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA.

El sistema que recibió la Universidad Tecnológica de Pereira posee una cantidad de elementos propicios para hacer la instalación de un sistema fotovoltaico aislado, los componentes se encuentran en la tabla 2.

Componentes		
Cantidad	Descripción	Marca
104	Panel solar 195 Watts 11.08 Imp 17.60 Vmp	Sun
2	XW6048- 230-50 Cargador Inversor	Xantrex
7	XW- MPPT60-150 Controlador de carga MPPT	Xantrex
4	FW-PV12 Caja de conexiones	Outback
2	XW kit de conexión para inversor	
26	Conectores para paneles NC4 de 50 pies	
2	XW Panel de distribución	
2	XW kit para conectar inversores	
65	S-530 400 AmpH 6V Baterías	Rolls
64	Cable de batería BC- 1,20 de 1 pie	
8	Cable de Inversor BC- 10 2/0 de 5 Pies	
28	20 Amp 150V Breaker	

14	60 Amp 150V DC Breaker (C.C/Bat) 2 por cada MPPT	
----	--------------------------------------------------------------	--

Tabla 2, Artículos del Sistema Inicial. (Propia)

La descripción de los componentes se encuentra en anexos.

Esta cantidad de paneles permite la generación de energía en grandes cantidades, descrita de la siguiente manera

$$PotenciaSFV = \# \text{ de Paneles} * Potencia de panel$$

$$PotenciaSFV^5 = 104 * 195 W$$

$$PotenciaSFV = 20,280 KW$$

Esta cantidad de energía se produciría en una hora de pico solar (HPS), pero la cantidad de energía al día en promedio sería 80 KW teniendo 4 HPS⁶, respectivamente al mes podrían generarse 2400KW/h.

Como soporte energético de almacenamiento se cuenta con un banco de acumuladores que proporcionan 2400 Wh, correspondientes a 64 acumuladores de 400 Ah y 6 Vdc cada una.

6.2. DISEÑO DEL SISTEMA DE INTERCONEXIÓN ELECTRICA PARA EL VIVERO DE LA UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

En general los sistemas fotovoltaicos son diseñados desde la carga necesaria a suplir y así se realizan los cálculos de número de paneles, controladores de carga, acumulador, inversor en el caso de un sistema aislado. En el caso de un sistema de interconexión se calculan la cantidad de paneles, controlador de carga si el sistema cuenta con respaldo, banco de acumuladores, inversor a red y protecciones.

Para este sistema ya existen unos componentes con los cuales se debe hacer el cálculo de la energía máxima entregada, pero existe una novedad gracias a que los inversores del sistema antiguo funcionan también como cargadores, abren la posibilidad de un arreglo del sistema completamente diferente a los convencionales.

⁵ SFV Sistema fotovoltaico

⁶ HPS Horas pico solar

En el transcurso de las ideas una donación de inversores a red ayudó a que el sistema pudiera ser una realidad, la Universidad Tecnológica de Pereira recibió 2 inversores a red los cuales tienen una capacidad de hasta 10KW permitiendo el manejo de los 20KW generados por el arreglo de paneles, uno de estos equipos cuenta con la tecnología híbrida, permitiendo así cargar las baterías de forma directa sin utilizar los cargadores inversores. Para aumentar la eficiencia del sistema no se usarán los controladores de carga, los paneles estarán conectados directamente a los inversores a red.

Las características del inversor AURORA dice que como mínimo empiezan a funcionar con 220V de entrada así que se diseñó el arreglo de paneles en base a esto.

$$Tensión\ del\ arreglo = \# \text{ paneles} * Tensión\ Circuito\ Abierto$$

$$Tensión\ del\ arreglo = 23 * 17.6 V$$

$$Tensión\ del\ arreglo = 404,8 V$$

Así con este arreglo, pudo asegurarse más de 220V para el funcionamiento pero por debajo de la tensión máxima permitida por el inversor que es 520V por entrada.

Para configurar el número de paralelos que se conectan al inversor se analiza la corriente máxima soportada por el inversor en cada entrada, la cual es 48 A, cada arreglo de paneles tiene una corriente en corto circuito de 9,69 A.

$$\# \text{ Paralelos máx} = \frac{Corriente\ Máxima\ Inversor}{Corriente\ I_{sc}\ Módulo}$$

$$\# \text{ Paralelos máx} = \frac{48 A}{9.69 A}$$

$$\# \text{ Paralelos máx} = 4,95$$

Utilizamos 1 paralelo por canal para asegurar que la potencia máxima de cada canal del inversor no sea excedida, usando 46 módulos fotovoltaicos en total para el inversor AURORA la potencia generada será la siguiente:

$$Potencia\ Entrada\ Inversor = Potencia\ Módulo * \# \text{ de Módulos}$$

$$Potencia\ Entrada\ Inversor = 195 W * 46$$

$$Potencia\ Entrada\ Inversor = 8,97 kW$$

Las características del inversor GEINFINISOLAR dice que como mínimo empiezan a funcionar con 220V de entrada así que se diseñó el arreglo de paneles en base a esto.

$$Tensión\ del\ arreglo = \# \text{ paneles} * Tensión\ Circuito\ Abierto$$

$$Tensión\ del\ arreglo = 27 * 17.6 V$$

$$Tensión\ del\ arreglo = 475,2 V$$

Así con este arreglo, pudo asegurarse más de 320V para el funcionamiento pero por debajo de la tensión máxima permitida por el inversor que es 900V por entrada.

Para configurar el número de paralelos que se conectan al inversor se analiza la corriente máxima soportada por el inversor en cada entrada, la cual es 18,6 A, cada arreglo de paneles tiene una corriente en corto circuito de 9,69 A.

$$\# \text{ Paralelos máx} = \frac{Corriente\ Máxima\ Inversor}{Corriente\ Isc\ Modulo}$$

$$\# \text{ Paralelos máx} = \frac{18,6 A}{9,69 A}$$

$$\# \text{ Paralelos máx} = 1,92$$

Utilizamos 1 paralelo por canal para asegurar que la potencia máxima de cada canal del inversor no sea excedida, usando 54 módulos fotovoltaicos en total para el inversor INFINISOLAR la potencia generada será la siguiente:

$$Potencia\ Entrada\ Inversor = Potencia\ Modulo * \# \text{ de Módulos}$$

$$Potencia\ Entrada\ Inversor = 195 W * 54$$

$$Potencia\ Entrada\ Inversor = 10,530 kW$$

Por tanto el arreglo de 2 series de 27 módulos para el inversor INFINISOLAR, 2 series de 23 módulos para el inversor AURORA, será la metodología a usar para entregar la energía a la red. Los inversores AURORA E INFINISOLAR se encargan de poner en fase la energía eléctrica entregada, evitando inconvenientes para la red eléctrica local.

Para dar funcionamiento al sistema de carga del INFINISOLAR la tensión de entrada desde baterías debe ser 48v.

$$\# \text{ Acumuladores en serie} = \frac{\text{tensión deseada}}{\text{tensión de acumulador}}$$

$$\# \text{ Acumuladores en serie} = \frac{48V}{6V}$$

$$\# \text{ Acumuladores en serie} = 8$$

La capacidad del banco de acumuladores esta proporcionada por el número de paralelos formados con estas series, se utilizarán 7 paralelos brindando como resultado una capacidad de:

$$\text{Capacidad Banco Acumuladores} = \text{Capacidad Bateria} * \# \text{ paralelos}$$

$$\text{Capacidad Banco Acumuladores} = 400 \text{ AmpH} * 7$$

$$\text{Capacidad Banco Acumuladores} = 2800 \text{ AmpH}$$

Después de calcular los equipos a utilizar, se realizaron los cálculos de las líneas eléctricas y las protecciones de la siguiente manera

Cableado de paneles hacia el barraje:

$$\text{Corriente paneles} = (\text{Isc Modulo}) * 1.15$$

$$\text{Corriente paneles} = 13.92 \text{ A}$$

El cableado de paneles hacia barraje debe ser THW AWG 10 pues supera la corriente necesaria y permite uniformidad en el cableado, adicionalmente se está trabajando con un factor de temperatura de 35 Celsius correspondiente a 71%.

La corriente soportada por el barraje se calculó así:

$$\text{Corriente Barraje Paneles} = (\text{Isc Modulo} * \# \text{ paralelos}) * 1.15$$

$$\text{Corriente Barraje Paneles} = (12.11 \text{ A} * 2) * 1.15$$

$$\text{Corriente Barraje Paneles} = 27.85 \text{ A}$$

El barraje necesario es de 12x2 según la NTC2050 tabla de CIPERMI

Cableado entrada de canal del inversor a red:

$$\text{Corriente entrada canal} = (\text{Isc Modulo} * \# \text{ paralelos}) * 1.15$$

$$\text{Corriente entrada canal} = (12.11 \text{ A} * 2) * 1.15$$

$$\text{Corriente entrada canal} = 27.85 \text{ A}$$

El cableado de paneles hacia barraje debe ser THW AWG 10 según la NTC2050, que sin problema supera la corriente a usar.

Cableado a la salida del inversor a red:

$$\text{Corriente máx Inv a Red} = \left(\frac{10 \text{ kW}}{\sqrt{3} * 208 \text{ V}} \right)$$

$$\text{Corriente máx Inv a Red} = 28 \text{ A} * 1.15$$

$$\text{Corriente máx Inv a Red} = 32.2 \text{ A}$$

El cable a usar será un THW AWG 6 según la NTC2050. Por cada línea trifásica.

Barraje a usar en las líneas triásicas para los inversores a red:

$$\text{Corriente barraje salida} = (\text{corriente Inv a red} * \# \text{ Inversores})$$

$$\text{Corriente barraje salida} = (28 \text{ A} * 2) * 1.15$$

$$\text{Corriente barraje salida} = 64.4$$

El barraje necesario es de 12x2 según la NTC2050 tabla de CIPERMI.

Cableado entre barraje del inversor INFINISOLAR hacia baterías deber soportar la corriente necesaria que se encuentra entre 10A-200A, se elige trabajan con 25A para asegurar mayor vida a las baterías:

$$\text{Corriente de Inversor Cargador} = 25 \text{ A} * 1.15$$

$$\text{Corriente de Inversor Cargador} = 28.75 \text{ A}$$

El cable a usar será un THW AWG 8 según la NTC2050. Para las líneas de tensión de THW AWG 8 para la fase neutra.

Barraje a usar en las líneas de banco de baterías:

$$\text{Corriente barraje baterias} = (\text{Corriente de Inv Car} * \# \text{ Inv Car}) * 1.15$$

$$\text{Corriente barraje salida} = (25 \text{ A} * 2) * 1.15$$

$$\text{Corriente barraje salida} = 57.5 \text{ A}$$

El barraje necesario es de 12x2 según la NTC2050 tabla de CIPERMI.

La corriente de carga de cada línea de baterías es de 25A y necesita un cable THW AWG 10.

Las protecciones a usar en paneles serán fusibles de 12A ya que su corriente de corto circuito es de 12.11 A y el deber de estos fusibles es prevenir ese corto.

A la salida de los inversores hacia red serán usadas protección de:

$$\text{Corriente Máx Inv a red} = 30 * 1.25$$

$$\text{Corriente Máx Inv a red} = 37.5 \text{ A}$$

Las protecciones comerciales más cercanas son de 40A.

A la salida de INFINISOLAR a baterías serán usadas protección de:

$$\text{Corriente Máx Inv a red} = 25 * 1.25$$

$$\text{Corriente Máx Inv a red} = 31.25 \text{ A}$$

Las protecciones comerciales más cercanas son de 32A.

Para acercar los cálculos teóricos a los que interactúan en el campo fotovoltaico, se relacionan los cálculos de eficiencia respecto a la temperatura que se presenta en el lugar donde están instalados los paneles fotovoltaicos.

TEMPERATURA ACTUAL 2016

$$\Delta T = 37,5^{\circ}\text{C}$$

$$t = 31^{\circ}\text{c}$$

$$T_{\text{celda}} = T_{\text{ambiente}} + C1 * G$$

$$G = 1000 \frac{\text{w}}{\text{m}^2}$$

$$C1 = \frac{NOCT - 20}{800}$$

$$NOCT = 45,2^{\circ}\text{C}$$

$$C1 = \frac{45,2 - 20}{800} = \frac{25.2}{800}$$

$$C1 = 0.0315$$

TEMPERATURA DE CELDA

$$T_{\text{max}} = 31^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{celda}} = 31^{\circ}\text{C} + (0.0315 * 1000)$$

$$T_{\text{celda}} = 31^{\circ}\text{C} + 31,5^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{celda}} = 62,5^{\circ}\text{C}$$

DELTA DE TEMPERATURA

$$\Delta T = T_{\text{celda}} - 25^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta T = 62,5^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C}$$

PÉRDIDA DE POTENCIA

$$P.P = -0.45\% * 37,5^{\circ}\text{C}$$

$$P.P = -16,74 \%$$

PÉRDIDA DE Voc POR T.

$$P V_{oc} = -0.33\% * 37,5^{\circ}\text{C}$$

$$P V_{oc} = -12,375 \%$$

RENDIMIENTO TÉRMICO

$$RT = 100 - 0,45\% * 37,5^{\circ}\text{C}$$

$$RT = 83,125\%$$

PRONÓSTICO DE TEMPERATURA 2018

$$t = 33^{\circ}\text{c}$$

$$T_{\text{celda}} = T_{\text{ambiente}} + C1 * G$$

$$G = 1000 \frac{\text{w}}{\text{m}^2}$$

$$C1 = \frac{NOCT - 20}{800}$$

$$NOCT = 45,2^{\circ}C$$

$$C1 = \frac{45,2 - 20}{800} = \frac{25,2}{800}$$

$$C1 = 0.0315$$

TEMPERATURA DE CELDA

$$T_{max} = 33^{\circ}C$$

$$T_{celda} = 33^{\circ}C + (0.0315 * 1000)$$

$$T_{celda} = 33^{\circ}C + 31,5^{\circ}C$$

$$T_{celda} = 64,5^{\circ}C$$

DELTA DE TEMPERATURA

$$\Delta T = T_{celda} - 25^{\circ}C$$

$$\Delta T = 64,5^{\circ}C - 25^{\circ}C$$

$$\Delta T = 39,5^{\circ}C$$

PÉRDIDA DE POTENCIA

$$P.P = -0.45\% * 39,5^{\circ}C$$

$$P.P = -17.775\%$$

PÉRDIDA DE Voc POR T.

$$P Voc = -0.33\% * 39,5^{\circ}C$$

$$P Voc = -13,035 \%$$

RENDIMIENTO TÉRMICO

$$RT = 100 - 0,45\% * 39,5^{\circ}C$$

$$RT = 82,225\%$$

7. RESULTADOS

Después de un arduo trabajo de gestión por parte de SIER la Universidad Tecnológica de Pereira dio vía libre al proyecto, aprobando el presupuesto de obras civiles.

Se dimensionó el sistema mediante AUTOCAD y los cálculos realizados se hicieron en base a los conocimientos adquiridos en el curso de sistemas de energías alternativas.

El sistema actualmente se encuentra instalado, las obras civiles fueron realizadas a lo largo del año 2014.

Actualmente los artefactos se encuentran conectados e interconectados a red por parte de la empresa de energía de Pereira, desarrollándose el análisis de eficiencia del sistema y demostrando que efectivamente la interconexión a red es el método a usar en los sistemas fotovoltaicos a gran y pequeña escala.

8. CONCLUSIONES

- Los sistemas de interconexión a red tienen un método de instalación más sencillo y efectivo frente a los sistemas aislados.
- Gracias a la diversidad de artefactos que se encuentran en el sistema, se logró dar un nuevo criterio de diseño híbrido, utilizando inversores a red híbridos e inversores a red convencionales, suprimiendo controladores de carga consiguiendo elevar la eficiencia del sistema.
- El sistema de interconexión a red instalado en el vivero de la Universidad Tecnológica de Pereira respalda el concepto de investigación en energías renovables, posicionando el proyecto como un referente piloto en el país para el desarrollo de próximos sistemas.

9. BIBLIOGRAFIA

1. **UPME.** *Proyección de Demanda de Energía en Colombia.* Bogotá : s.n., 2010.
2. *La fórmula de los países líderes en energías renovables.* **SCIDEV.NET.** Santiago de Chile : s.n., 2015.
3. **NASA.** NASA Surface meteorology and Solar Energy: RETScreen Data. [En línea] 2015. [Citado el: 19 de Enero de 2016.] <https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/retscreen.cgi?email=rets%40nrcan.gc.ca&step=1&lat=4.8143&lon=-75.6946&submit=Submit>.
4. *Más ciencia para el cambio climático.* **Semana.** 1764, Bogotá : Semana, 2016.
5. **Sitio Solar.** Sitio Solar. [En línea] 2013. [Citado el: 16 de 08 de 2015.] www.sitiosolar.com.
6. **CASTAÑO, DAVID ORTIZ.** *Los hogares y pequeños negocios consumieron más energía en noviembre.* [documento virtual] ENVIGADO - ANTIOQUIA, COLOMBIA : EL COLOMBIANO S.A. & CIA. S.C.A., 2015.
7. **Colombia, Grupo Éxito.** Youtube. *Grupo Éxito instaló la planta fotovoltaica más grande de Colombia.* [En línea] 24 de Marzo de 2015. [Citado el: 09 de Septiembre de 2015.] <https://www.youtube.com/watch?v=xs6uw2mNb8o>.
8. **MOGAMEX SOLAR.** MOGAMEX. [En línea] [Citado el: 15 de Enero de 2016.] http://www.mogamex.com/fv/fv_sic.
9. **ANCE.** *ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE SEGURIDAD Y FUNCIONAMIENTO DE PROYECTOS E INSTALACIONES DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.* Mexico : ANCE-ESP-02., 2012.
10. **Anónimo.** Instalación Energía Solar. [En línea] 2010. [Citado el: 22 de 08 de 2015.] <http://www.instalacionenergiasolar.com/>.
11. **Alta.** *Capacitación Planta Solar.* Pereira : s.n., 2011.
12. **CFE.** *Sistemas Fovoltaicos Conectados a la Red Electrica. Sistemas Fovoltaicos Conectados a la Red Electrica.* Mexico DF, Mexico : s.n.

10. ANEXOS

- Datasheet Equipos
- Evidencias Fotográficas(Adecuación, Lugar de instalación, Instalación)
- Planos del Sistema
- Reconfirmación ABB
- Pegatinas Sistema