

EVALUACIÓN DE UN SISTEMA ELÉCTRICO DOMÉSTICO DC UTILIZANDO UNA FUENTE SOLAR FOTOVOLTAICA



Jorge Luis Hernández Castaño
Andrés Felipe Pinilla Cepeda

Universidad Santo Tomás
Facultad de Ingeniería Electrónica
Bogotá D.C.
2019

EVALUACIÓN DE UN SISTEMA ELÉCTRICO DOMÉSTICO DC UTILIZANDO UNA FUENTE SOLAR FOTOVOLTAICA

Jorge Luis Hernández Castaño

Andrés Felipe Pinilla Cepeda

Documento Proyecto de Grado

Director: Ing. Edwin Francisco Forero García

Universidad Santo Tomás
Facultad de Ingeniería Electrónica
Bogotá D.C.

2019

Nota de aceptación

Firma docente tutor

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá D.C (2019)

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme la oportunidad y la fortaleza de estudiar esta carrera compleja pero completa. A mi familia por su apoyo incondicional: a mis amigos y compañeros que me acompañaron en este proceso. A cada uno de los docentes que nos enseñaron a solucionar los problemas desde otra perspectiva y al Profesor Edwin Francisco Forero por creer en nosotros y en nuestras ideas.

Jorge Hernández

Quiero expresar mis sinceros agradecimientos a mis padres que siempre han sido un apoyo incondicional a lo largo de la carrera, a mis amigos por compartir ideas sobre diferentes proyectos los cuales me ayudaron a mi formación profesional, por ultimo quiero agradecer a todos los profesores que hicieron realidad este sueño de poder convertirme en ingeniero electrónico.

Andrés Pinilla

Índice General

INDICE DE ILUSTRACIONES	4
INDICE DE TABLAS	5
RESUMEN	6
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	7
ANTECEDENTES	8
JUSTIFICACIÓN	13
OBJETIVOS	14
General	14
Específicos	14
MARCO TEÓRICO	15
Diseño del sistema sin inversor DC/AC y análisis de las Cargas.....	20
Motor Universal	20
Reglamentación Técnica Vigente en Colombia.....	21
DISEÑO Y EJECUCIÓN DEL PROYECTO	22
Introducción.....	22
Caracterización de Cargas.....	23
Topología para el Sistema Eléctrico DC utilizando la Normatividad técnica vigente para Instalaciones domésticas.....	24
Metodología para el diseño del Sistema DC utilizando Paneles Solares como fuente Primaria.	27
SIMULACIONES Y RESULTADOS	32
Simulación - Puente Rectificador	32
Simulación - Motor Universal	34
Simulación - Cargas Residenciales.....	35
Simulación – Perdidas en AC.....	36
Simulación – Perdidas en DC	37
Simulación – Sistema Fotovoltaico.....	38
Implementación #1 – Comparación de Alimentación en DC y AC de cargas.....	40
Implementación Final – Evaluación de la factibilidad en la Implementación del Proyecto en comparación a la Red de Alimentación Actual	41
ANALISIS DE RESULTADOS	46
CONCLUSIONES.....	47

RECOMENDACIONES.....	48
REFERENCIAS	49

INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Torres de distribución de energía (AC-DC) [18]	15
Ilustración 2 Arreglo Fotovoltaico; VDC = 24V, I = 30A [19]	18
Ilustración 3 Arreglo de baterías - Generación Bus DC [19]	19
Ilustración 4 Promedio de Radiación mensual en Bogotá [20]	27
Ilustración 5 Rango de Radiación por Colores [20]	27
Ilustración 6 Mapa de Radiación en Colombia [20]	28
Ilustración 7 Tipo de Instalación Fotovoltaica dependiendo de la radiación en kWh/m ² [19].....	29
Ilustración 8 Tipo de Instalación Fotovoltaica con las especificaciones necesarias del sistema [19]29	
Ilustración 9 Simulación - Puente Rectificador de Onda Completa con Fuente AC.....	32
Ilustración 10 Simulación - Puente Rectificador de Onda Completa con Fuente DC.....	33
Ilustración 11 Respuestas de las simulaciones del Puente Rectificador con AC y DC	33
Ilustración 12 Simulación Motor Universal con Fuente AC y DC.....	34
Ilustración 13 Respuesta Simulación Motor Universal con Alimentación en AC y DC.....	35
Ilustración 14 Simulación de la alimentación de una carga residencial convencional	35
Ilustración 15 Pérdidas en simulación con Alimentación con AC	36
Ilustración 16 Pérdidas en simulación con Alimentación en DC.....	37
Ilustración 17 Simulación Sistema Fotovoltaico propuesto	38
Ilustración 18 Respuesta del arreglo fotovoltaico con el elevador de tensión para 120VDC	38
Ilustración 19 Simulación de la resistencia del Cable por medio de resistencias previo a llegar a las cargas caracterizadas	42

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Especificaciones Alimentación en AC y DC en Colombia	16
Tabla 2 Tipos de Paneles solares fotovoltaicos	17
Tabla 3 Tabla de Caracterización de Cargas	23
Tabla 4 Tabla de caracterización de cargas	25
Tabla 5 Especificaciones del panel fotovoltaico necesario para la implementación del Sistema	30
Tabla 6 Especificaciones del arreglo fotovoltaico para la implementación del Sistema	30
Tabla 7 Pérdidas en alimentación de cargas en AC	36
Tabla 8 Barrido de Tensión DC y pérdidas en simulación de las cargas.....	37
Tabla 9 Valores de Tensión y Potencia para barrido de Tensión en AC y DC	40
Tabla 10 Cargas del Sistema a implementar	41
Tabla 11 Parámetros de diseño y distribución de cargas para la implementación del sistema.....	42
Tabla 12 Valores de Tensión y Corriente equivalente para alimentación en AC.....	43
Tabla 13 Valores de Tensión y Corriente equivalente para alimentación en DC	43
Tabla 14 Valores de Corriente para cada carga en AC y DC	44
Tabla 15 Pérdidas en AC y DC en el sistema implementado	44

RESUMEN

En esta monografía se presenta el estudio, diseño, simulación e implementación de un sistema de alimentación DC para cargas residenciales simulando una fuente solar fotovoltaica.

Este proyecto tuvo el objetivo de entender qué es una instalación fotovoltaica, los elementos que la componen, las condiciones técnicas establecidas para su implementación y la manera como se alimentan las cargas en la actualidad con estos sistemas fotovoltaicos: teniendo en cuenta que gran parte de las cargas residenciales tienen su alimentación final en DC, se realizó el estudio y el diseño de un bus DC para alimentar estas cargas universales (que pueden ser alimentadas en AC y DC) y comparar las pérdidas y parámetros técnicos con la red de alimentación actual la cual está implementada en AC.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Esta monografía expone el diseño y la implementación de un sistema eléctrico DC, el cual aporta a una de las grandes problemáticas actuales en términos de sobreutilización de recursos naturales para la generación de energía y desarrolló un aporte al el análisis en la manera en la que se está realizando la distribución de energía actual que, según la ejecución del proyecto, en un bus AC se presentan perdidas teniendo en cuenta las diferentes etapas de conversión de energía necesarias para alimentar las cargas eléctricas, que en este caso son cargas residenciales.

Además de presentar pérdidas, la red de distribución actual no está aportando significativamente en la utilización de energías renovables, teniendo en cuenta que la mayoría de los generadores renovables entregan un bus DC y que gran parte de las cargas residenciales al ser dispositivos electrónicos, tienen su alimentación final en DC o son cargas universales que funcionan tanto en AC como en DC. La implementación de un bus DC simulando una instalación fotovoltaica convencional sin la inversión eléctrica (AC/DC) es un aporte para entender el comportamiento de las cargas residenciales, y proponer parte del avance en la manera en la cual se van a alimentar las cargas eléctricas en un futuro

ANTECEDENTES

La idea de implementar un bus DC en aplicaciones residenciales está orientado al mejoramiento en la eficiencia energética, el ahorro de recursos, y una proyección a futuro en la utilización de energías renovables para el cuidado del planeta. En el artículo *“Potential Energy Savings by Using Direct Current for Residential Applications: A Danish Household Study Case”* [1] se expone un prototipo de una microrred eléctrica en DC, utilizando paneles solares y energía eólica con el propósito de cargar una batería, la cual es la fuente de energía para las cargas residenciales.

Un elemento importante del artículo es la forma en la que se re – diseña la red eléctrica convencional, reduciendo de forma notable el número de convertidores, los cuales son expuestos como uno de los principales agentes en la sobreutilización de energía y reducción de la eficiencia. Además de esto, el artículo hace una aclaración con respecto a las especificaciones técnicas sobre la potencia máxima que podría cubrir una microrred en los sistemas eléctricos actuales, que en efecto es poca y que no sería eficiente en muchos de los escenarios donde la potencia de operación es alta. Sin embargo, gran parte de las cargas residenciales actuales son alimentadas a baja potencia y tensión, lo cual sería uno de los beneficios de la micro red eléctrica del artículo, y en el caso específico de este proyecto, el bus DC podría ser también parte de la solución energética.

En el artículo *“Design and Specification of Building Integrated DC Electricity Networks”* [2] se habla de las alternativas de utilizar un bus DC para diferentes aplicaciones comerciales y un enfoque en las Tecnologías de la información y las comunicaciones (ICT). Hace referencia a uno de los cambios más importantes en la iluminación, migrando de los bombillos incandescentes a los bombillos LED, lo cual no solo está presente en las ICT, sino también en el desarrollo de muchos proyectos relacionados con en el Internet de las cosas (IoT), que será una de las grandes innovaciones de este siglo, y desarrollan la hipótesis que los buses DC están proyectados a estar al mismo nivel de operación de los buses AC al año 2020, para garantizar el adecuado funcionamiento de diferentes tipos de cargas. En el artículo también se menciona la manera en la que las herramientas tecnológicas están cambiando y la disminución en la potencia utilizada: por ejemplo, la migración de computadores operando a 19V – 45W a dispositivos como Tablet que operan a 5V – 10W, lo cual es conveniente para el diseño de las micro redes eléctricas de bajo consumo en el sentido que cada vez se necesita menos energía para la alimentación de los sistemas.

El uso de fuentes renovables como los paneles solares son implementadas en los sectores rurales para el uso diario, y a pesar que la implementación de estos

sistemas no es económico, ofrece una gran ventaja al momento del aprovechamiento de las energías no convencionales, las cuales requieren una nueva infraestructura para el montaje de estas. El uso de convertidores en este ambiente es muy necesario debido al constante consumo de energía durante el día, por lo tanto, la industria brinda un aporte en la implementación con dos convertidores, uno que se utiliza durante el día para aprovechar la energía solar y otro para la carga de una batería, la cual se usará en horas de la noche, la cual utiliza un controlador MPPT, que tiene la función de obtener la máxima potencia del panel [3].

El uso de corriente directa (DC) en hogares en donde no hay un servicio de energía constante y la implementación de líneas DC, presentan una solución a sus problemas como es el caso de las 90.000 familias en India que ahora tienen electricidad las 24 horas al día, 7 días a la semana. El proceso que se realizó para que estas personas pudieran acceder a este servicio, fue implementar un transformador (AC - DC) desde la central hasta los lugares de residencia, implementando buses DC de 48V y contadores inteligentes que le permiten a la central tener un sistema de control con respecto a la energía consumida y obtener una respuesta inmediata ante alguna falla [4].

El almacenamiento de energías renovables es un tema muy importante el cual representa un reto muy grande para la implementación de este tipo de sistemas ya sea “micro-grid” o “macro-grid”, pero este proyecto se enfocará en una elaboración a futuro de una “micro-red”, en donde su principal fuente de alimentación será por medio de arreglos de paneles solares, los cuales tienen como fin mantener el consumo energético de una residencia y así mismo, almacenar una parte de esta energía para que posteriormente sea utilizada en las horas de la noche y así mismo la energía que no sea utilizada durante el día, pueda ser parte de la red eléctrica nacional, y lo anterior se puede llevar a cabo mediante unos convertidores DC - AC y convertidores DC - DC controlados para obtener un voltaje constante y su máxima potencia [5]. Este artículo aporta una idea de cómo manejar un bus de corriente DC, cuya única fuente de alimentación será los paneles solares y la batería cuando esta sea necesaria para el uso en la “smart-home”, además del uso de convertidores controlados, los cuales permitirán tener un mejor manejo del sistema que se desearía crear a futuro.

El diseño e implementación de una “micro-red” conlleva un gran estudio, el cual corresponde a la investigación del lugar en el cual se a realizar la construcción de la red con energías renovables, aquellas cargas que serán conectadas al sistema, y la potencia reactiva que los diferentes dispositivos consuman en un día normal de uso, por lo que en [6] presentan un diseño en una isla para la alimentación de un centro institucional, el cual permita que se alimente a través de paneles solares, aerogeneradores y un generador diésel en caso de emergencia. En el caso de este proyecto, es importante tener en cuenta las cargas de una residencia y su respectivo

consumo, para así mismo hacer el dimensionamiento de los paneles solares y las baterías a implementar. Por ahora se tendría un sistema “off-grid”, lo que quiere decir es que la casa genera y consume su propia energía, pero no se conecta a la red eléctrica, así mismo para tener un control del consumo, sería necesario usar contadores inteligentes y sensores, los cuales indiquen el consumo de la vivienda en tiempo real.

En [7] se expone varios de los beneficios de la transición de AC a DC en aplicaciones residenciales. En el artículo se analiza el impacto que puede tener alimentar con DC cargas como una licuadora, un bombillo, y cómo se podría adaptar la red eléctrica para proporcionar una alimentación DC. Se habla de la facilidad de cambiar la alimentación a DC cuando en un sistema está presente un Corrector de Factor de Potencia (PFC), lo cual implica una importante reducción en los componentes utilizados en el circuito. Además, se habla de los motores universales, lo cuales pueden ser una buena alternativa en DC, sin embargo, habría que tener en cuenta factores como la tensión de alimentación para las distintas cargas con el propósito de asegurar su adecuado funcionamiento.

La implementación de una microrred eléctrica con paneles solares debe tener en cuenta distintos factores para su adecuado funcionamiento: en [8] se expone que la energía proporcionada por el sistema de paneles no es suficiente, por ende, se debe implementar un sistema en donde se cargue una batería, la cual será ideal para proporcionar un bus DC y alimentar así las cargas. Agrega además que el hecho de implementar el sistema con una batería, sería ideal para reducir el gasto de energía, un balance en Potencia, y aprovechar al máximo la energía adquirida por los paneles.

Para el diseño y la implementación de una microrred eléctrica y específicamente un bus DC, es necesario tener en cuenta la generación distribuida de energía, la cual puede ser afectada por la falta de control y la vulnerabilidad a la interferencia. En [9] se expone la idea de crear una arquitectura de control comprensivo para asegurar una adecuada distribución de energía en una conversión AC/DC, que puede ser el punto de partida para solucionar los posibles inconvenientes que surgen al conectar la red eléctrica con una micro red diseñada en corriente directa (DC).

Hay además una idea de crear un sistema en donde haya varias microrredes eléctricas, tanto en AC como en DC, lo cual será un soporte entre redes, ya que se implementan sistemas como el cambio de unidad de potencia, lo cual cumple con el objetivo de la implementación de sistemas con energías renovables.[10]

Para tener un diseño adecuado en una microrred eléctrica, es necesario tener claridad en la cantidad de potencia que puede proporcionar una red de paneles solares: es por ello que en [11] se realiza un estudio de una Red Neuronal Artificial (ANN), implementado en MATLAB, para tener una idea de la producción de los paneles solares y tener un adecuado control de la microrred, y así mismo del bus

DC implementado. El artículo expone que el error de la predicción en el diseño en potencia y la potencia generada está solo entre el 0.5% y el 9%, lo cual es un diseño efectivo para un adecuado proyecto.

En el proceso de diseñar e implementar el bus DC, es necesario tener en cuenta el papel que tiene la batería, la cual será la principal fuente de alimentación para las cargas, y es de vital importancia su adecuado funcionamiento y la distribución de la energía. En [12], se expone un sistema de gestión de la energía en las baterías (BEMS), lo cual hace referencia al análisis de las características, del proceso de carga y descarga que tienen las baterías, para así determinar la metodología en la que se extienda la vida útil con el propósito de disminuir la generación por medio de los generadores Diesel.

Actualmente la implementación de las microrredes eléctricas está teniendo una transición de la academia a la industria, por factores como el mejoramiento en la tecnología, la reducción de costos en la implementación, y los beneficios a largo plazo que puede tener una red implementada con paneles solares. En [13] se describe todos los posibles beneficios de las redes diseñadas a base de fuentes de energías renovables, con el enfoque de llevar la energía a aquellos lugares donde no hay una infraestructura para la distribución de electricidad, y la reducción en la utilización de energías fósiles.

Durante la investigación para el diseño de la red fotovoltaica y la obtención del bus DC, fue de vital importancia encontrar que la energía solar intermitente puede ser un elemento a tener en cuenta para la demanda de las cargas en las redes eléctricas: es por ello que en [14] proponen un resorte eléctrico en serie en DC y una carga no crítica para reducir la capacidad de almacenamiento de la batería en instalaciones fotovoltaicas sustanciales. Además, en [15] se muestra la importancia del diseño de una red cuando se quiere combinar la alimentación de energías renovables y energías fósiles, utilizando un algoritmo denominado "*Multi-Objective Self-Adaptive Differential Evolution*" (MOSaDE) el cual no solo ayuda en el diseño sino también en términos de disminución en pérdidas, el costo de la energía, y el Factor Renovable.

Complementando el análisis de implementar un bus DC, en [16] se resalta que en la actualidad la mayoría de los generadores de energías renovables proporcionan un valor en corriente continua y se hace referencia a la posibilidad de la implementación de sistemas únicamente en DC: se habla que una instalación fotovoltaica evitando la inversión y la transformación de energía a AC puede ahorrar hasta un 20% en el costo de la instalación y se previene más de un 8% en pérdidas de energía. En el documento se muestra una instalación fotovoltaica convencional teniendo en cuenta el MPPT, el inversor, rectificador, el corrector de factor de potencia, la carga y luego de todas las etapas se logra una eficiencia de un 85%. En la instalación propuesta implementada sólo en DC se tiene el MPPT, los

convertidores DC/DC, la carga y el inversor bidireccional a la red de distribución: en esta instalación, al tener un menor número de etapas, la eficiencia energética es de un 93%. Teniendo en cuenta que una de las limitaciones de la alimentación de las cargas en DC son los distintos niveles de tensión de alimentación, se propone un controlador para controlar el valor de tensión para las distintas cargas. El sistema se implementó teniendo en cuenta los problemas que tiene la red de distribución de energía actual en AC como la variación de frecuencia que afecta directamente la vida útil de las cargas que tienen una alimentación final en DC, y pensando también en la implementación de un sistema más eficiente y sencillo para sistemas aislados o tipo isla.

La transmisión y distribución de energía en DC en alta tensión (HVDC) es una de las temáticas que se está tratando en la academia y en la industria teniendo en cuenta la transición que se está teniendo con la adquisición y generación de energía. En [17] se expone una metodología para la implementación de un sistema eléctrico utilizando Alta Tensión en DC por medio de convertidores eléctricos resonantes, los cuales son una herramienta que permite transformar la energía con valores muy pequeños de pérdidas en tensión y corriente: se propone un sistema para bajar la tensión DC utilizando un convertidor DC/AC/DC. En el artículo se hace referencia a que el sistema puede ser una buena solución a largo plazo en el avance de la distribución de energía, sin embargo, se habla de las pérdidas potenciales que puede tener la etapa en AC por la frecuencia que se maneje dependiendo el nivel de tensión.

JUSTIFICACIÓN

El proyecto tuvo el propósito de proponer una solución a la problemática del uso de fuentes de energía no renovables, su poca eficiencia en la distribución y el diseño de un sistema en donde haya una disminución de etapas de conversión de la energía, para lograr alimentar ciertas cargas residenciales por medio de un bus de corriente directa (DC).

Uno de los objetivos estuvo orientado en reducir la demanda y la utilización de los recursos naturales en la generación eléctrica actual. La mayoría de las cargas presentes en los hogares funcionan con corriente directa, lo que significa que el bus DC es una alternativa para ser la fuente de alimentación principal, utilizando únicamente convertidores DC/DC por los diferentes niveles de tensión que las cargas utilizan. Se pudo comprobar que en la industria existen motores que funcionan tanto en AC como en DC y se propuso un bus de alimentación DC y la comparación con la red distribución actual (Bus AC a 120VAC)

Además de crear el bus DC para aplicaciones residenciales, es decir, a pequeña escala, el proyecto es la apertura para desarrollar un sistema en aplicaciones industriales y continuar con la innovación a favor del ahorro de energía con base en el estudio llevado a cabo en el proyecto, creando así un sistema en donde cada uno de los consumidores puedan compartir la energía, obteniendo un beneficio social y económico para aquellos hogares no interconectados a la red eléctrica y tener una reducción notable en la utilización de los recursos naturales. La idea de implementar este sistema a futuro a gran escala está sustentado en el hecho de que en la actualidad se está tomando la posibilidad de diseñar un sistema de distribución de energía a alta tensión en corriente continua (HVDC) ya que responde a las críticas en términos de pérdidas y por medio de convertidores DC/DC se podrían alimentar las cargas que en la actualidad funcionan con convertidores AC/DC.

OBJETIVOS

General

- Evaluar la factibilidad en la implementación de un bus en corriente directa (DC), utilizando paneles solares para el suministro eléctrico de equipos residenciales.

Específicos

- Caracterizar las cargas eléctricas domésticas y su viabilidad para alimentación en DC.
- Definir la topología del sistema eléctrico en DC para alimentación de electrodomésticos cumpliendo con la normatividad técnica vigente.
- Establecer una metodología para el diseño de sistemas eléctricos domiciliarios en DC utilizando sistemas fotovoltaicos locales como fuente primaria.
- Evaluar la factibilidad en la realización del proyecto y realizar una comparación en la eficiencia energética con la red de distribución actual de Corriente Alterna (AC).

MARCO TEÓRICO

Para lograr comprender el estudio y la implementación del proyecto, es necesario definir conceptos técnicos que hacen parte de las distintas etapas que se llevarán a cabo, logrando la adecuada comprensión de los objetivos y la ejecución de cada uno de ellos. El primer a tener en cuenta para para entender lo que significa un sistema residencial DC es la definición de qué es un bus de alimentación:

Un bus de alimentación es una fuente de electricidad, la cual puede ser tanto en AC como en DC (Corriente Alterna - Corriente Directa). Este proyecto tiene la finalidad de simular e implementar el sistema utilizando únicamente DC para evaluar su eficiencia y consumo comparando el bus DC con la red de distribución de energía actual, la cual está implementada en AC. La distribución de la energía en DC y en AC es como se muestra en la *Ilustración 1*:

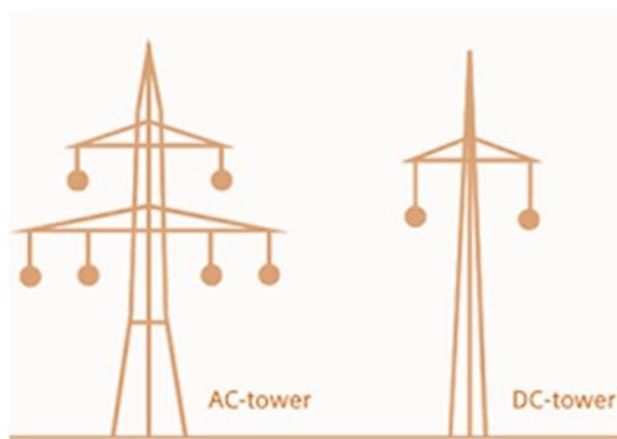


Ilustración 1: Torres de distribución de energía (AC-DC) [18]

Como es posible visualizar en la *Ilustración 1*, la distribución de energía en AC tiene un mayor número de líneas que en DC, lo cual conlleva un mayor número de recursos para poder llevar la energía a su destino final. En la *Tabla 1* se presenta una comparativa de las líneas necesarias para la alimentación tanto en AC como en DC:

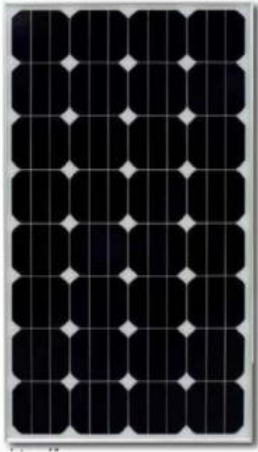
AC	DC
Líneas de Alimentación: 3 fases – 220V, Tensión de línea. Líneas de Protección: Neutro: Línea con potencial 0 – Permite la conducción de 110 – 120 VAC con una fase. Tierra: Conductor con la función de protección para sobre tensiones.	Líneas de Alimentación: Se necesitan dos líneas para la alimentación de las cargas: en algunos medios o investigaciones se dice que puede ser sólo una línea y el retorno a la fuente realizarlo por medio de la tierra física.

Tabla 1 Especificaciones Alimentación en AC y DC en Colombia

Teniendo en cuenta que la fuente primaria en el diseño del bus de alimentación DC es por medio de paneles solares, es pertinente entender qué es una fuente solar fotovoltaica:

Una Fuente Solar Fotovoltaica se define como una fuente de alimentación renovable, la cual utiliza células fotovoltaicas para recibir la radiación solar y generar energía eléctrica por medio de un efecto fotoeléctrico a cualquier tipo de carga eléctrica teniendo en cuenta ciertos parámetros técnicos.

Existen diferentes tipos de paneles solares, sin embargo, los más comerciales y convencionales son los de **Silicio Monocristalino y Policristalino**:

Panel Monocristalino	Descripción
	Las celdas solares Monocristalinas son aquellas que tienen un único cristal de silicio: tiene una superficie uniforme, y pocas imperfecciones lo que hace que tenga una alta eficiencia. Normalmente la eficiencia disminuye con la temperatura, sin embargo, supera el 20%, lo que ocasiona que sea una tecnología costosa de adquirir, pero ideal para sistemas precisos en el diseño.

Panel Policristalino	Descripción
	Los paneles Policristalinos en donde el proceso de cristalización no es uniforme, lo cual significa que es un sistema en donde se presenta imperfecciones en el cristal. La composición de estas células fotovoltaicas es en silicio, y la eficiencia que se maneja disminuye de las células Monocristalinas a un margen entre el 11% al 15%. Al ser una opción menos eficiente y menos precisa en la construcción, el precio de adquisición es menor que los paneles monocristalinos.

Tabla 2 Tipos de Paneles solares fotovoltaicos

Los paneles solares tienen ciertas especificaciones técnicas en términos de tensión, corriente y potencia, las cuales son necesarias a tener en cuenta para poder diseñar un sistema determinado a pequeña o gran escala. Cuando se tiene claridad sobre el nivel de tensión y la corriente que se necesita para alimentar la carga equivalente del sistema, se debe diseñar el arreglo fotovoltaico necesario para ello, realizando conexiones en serie o paralelo dependiendo si se requiere subir la tensión o corriente.

El funcionamiento técnico de los paneles solares es igual a una fuente de tensión de corriente continua convencional: es decir, si los paneles se conectan en serie, se suma el valor de tensión y se mantiene la corriente. Si la conexión es en paralelo, se aumenta la corriente y se mantiene la tensión.

Generalmente en las instalaciones fotovoltaicas se hacen arreglos de paneles con las mismas especificaciones para obtener un valor de tensión y corriente ideal.

Un ejemplo claro en la utilización y configuración de paneles está presente en el documento denominado *“Instalación de sistemas solares fotovoltaicos individuales en zonas no interconectadas”* del Departamento Nacional de Planeación (DNP) de Colombia:

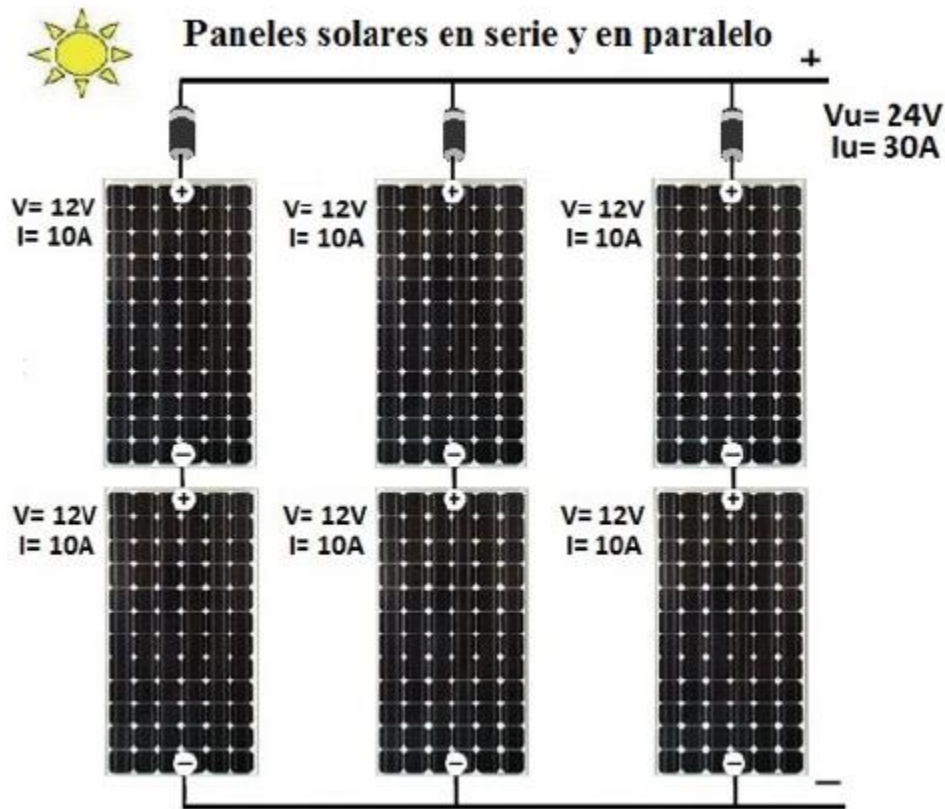


Ilustración 2 Arreglo Fotovoltaico; $V_{DC} = 24V$, $I = 30A$ [19]

La *Ilustración 2* muestra la aplicación de los dos métodos de conexión:

- Hay tres juegos de conexiones de 2 paneles en serie, en donde se busca aumentar la tensión del sistema a 24V, conectando los paneles de 12V.
- Así mismo, hay una conexión de esos tres juegos de paneles en paralelo con el fin de aumentar la corriente de cada rama (10A) al triple de capacidad (30A).

Como es posible visualizarlo en la *Ilustración 2*, se obtiene una fuente de tensión en DC de 24V a 30A.

Luego de tener el arreglo fotovoltaico que estará diseñado de acuerdo a la demanda en un determinado escenario, debe ir la etapa de **Regulación de Tensión**.

En la actualidad existen módulos que cumplen con las siguientes funciones:

- Regular la tensión para la carga del banco de baterías.

El módulo tiene una salida para la carga de las baterías, el cual entrega un nivel de tensión determinado dependiendo de la configuración del banco de las baterías. Si

hay iluminación constante sobre los paneles solares, se cargarán las baterías y el tiempo de carga estará determinado por la corriente que el arreglo fotovoltaico puede entregar.

Así como en la *Ilustración 2* se presentó una posible configuración en el arreglo de paneles solares, los bancos de baterías tienen la misma metodología en su implementación como lo muestra *Ilustración 3* tomada del DNP de Colombia:

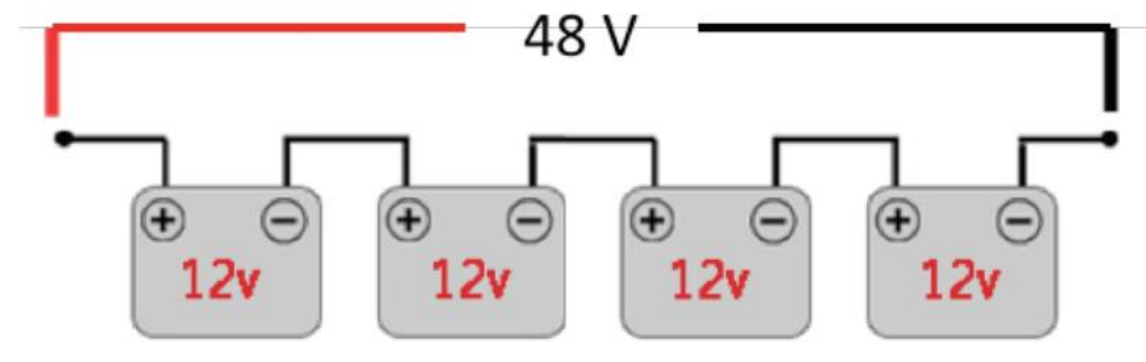


Ilustración 3 Arreglo de baterías - Generación Bus DC [19]

El anterior arreglo de baterías es un arreglo en serie que aumenta la tensión del bus de DC a 48V, teniendo en cuenta la conexión de 4 baterías de 12V.

- Generación de un bus de alimentación DC directo para cargas con alimentación en Corriente Continua.

Un bus de alimentación en DC es una red de alimentación en la que se encuentran colgadas las cargas eléctricas, que en el caso de este proyecto son cargas residenciales: el bus DC se genera por medio del banco de baterías.

Las cargas eléctricas son aquellos equipos y dispositivos que cuentan con ciertas especificaciones eléctricas para su alimentación. Se debe tener en cuenta parámetros como la tensión, corriente y potencia que necesita cada una de las cargas a caracterizar para poder saber el tiempo y la forma adecuada de funcionamiento del sistema.

Diseño del sistema sin inversor DC/AC y análisis de las Cargas

Uno de los objetivos principales de este proyecto es alimentar las cargas domésticas con corriente continua, evitando así el inversor eléctrico en las instalaciones fotovoltaicas convencionales de DC/AC.

En la actualidad existe una gran cantidad de cargas residenciales que son universales, es decir, que pueden conectarse directamente a una fuente de alimentación en corriente continua o corriente alterna. En primer lugar, se encuentran los bombillos LED, los cuales tienen la posibilidad de ser conectados a corriente alterna por medio de un rectificador interno, el cual genera un nivel de tensión en corriente continua y enciende los leds internos del bombillo. Así mismo, los bombillos LED que están actualmente en el mercado tienen la posibilidad de ser alimentados directamente en corriente continua, siendo una carga ideal para este proyecto.

Además de los bombillos LED, hay electrodomésticos o equipos que operan por medio de motores eléctricos universales: equipos como licuadoras, taladros, aspiradoras y algunas lavadoras tienen este tipo de motores.

Motor Universal

Un motor eléctrico universal es un circuito eléctrico en serie, en donde están presentes dos embobinados y por medio de la alimentación de uno de ellos, se crea un campo magnético el cual hace girar el otro bobinado siendo este último el inducido. Normalmente los bobinados se suelen denominar estator y rotor, los cuales están conectados por un tipo de puente que se denomina “escobillas”

La velocidad de operación de un Motor Universal está determinada por el nivel de tensión en la alimentación. El sentido del giro del motor está determinado por la orientación de la corriente sobre el circuito en serie anteriormente mencionado: es decir, en el caso de alimentación en DC sobre el circuito, la orientación de los cables de alimentación va a determinar el sentido del giro.

Reglamentación Técnica Vigente en Colombia

El Ministerio de Minas y Energías Colombiano diseñó e implementó la reglamentación Técnico - Legal que rige la distribución, la transformación, la utilización y la adecuada manipulación de la energía es la RETIE (Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas).

Además del reglamento, existen varias normas, las cuales están enfocadas en ciertos escenarios donde se utiliza la energía: las normas tienen como siglas NTC (Norma Técnica Colombiana). En el caso de este proyecto se tomó como referencia la norma NTC 2050 que expone todo lo relacionado con los parámetros de diseño y seguridad que se deben tener en cuenta para instalaciones domiciliarias.

DISEÑO Y EJECUCIÓN DEL PROYECTO

Introducción

A continuación, se presenta cada uno de los procedimientos necesarios para el desarrollo del proyecto y el cumplimiento de los objetivos: el objetivo principal fue diseñar e implementar un bus DC simulando una fuente solar fotovoltaica con el fin de evaluar la eficiencia y diferentes parámetros técnicos realizando una comparación con la red de distribución eléctrica actual para cargas residenciales.

La idea de diseñar e implementar un sistema de alimentación en DC viene de [1], en donde proponen una red de alimentación basada en paneles solares como fuente de alimentación primaria para cargas residenciales en Dinamarca: allí se habla de la reducción en el gasto de recursos para la implementación del sistema si se remueve los inversores AC/DC y DC/AC y se implementa el sistema únicamente con convertidores DC/DC, ya que los inversores eléctricos pueden representar pérdidas en sistemas robustos.

Para este proyecto se decidió tomar como referencia este estudio, y diseñar un sistema de alimentación DC en donde las cargas tuvieran la posibilidad de ser alimentadas con AC y DC. Se realizó el estudio de las cargas y los parámetros técnicos para su alimentación. Se realizaron simulaciones para entender el comportamiento de las cargas al ser alimentadas en AC y DC, variando la tensión en DC, obteniendo conclusiones de los valores donde se podrían presentar menos pérdidas y finalmente se implementó un prototipo de la instalación con cargas residenciales resistivas e inductivas, teniendo en cuenta el diseño previo y la planeación y así tener los resultados para proponer un sistema de alimentación en DC y compararlo con la red de distribución actual.

Caracterización de Cargas

En la *Tabla 3* se presentan las cargas residenciales más comunes para simular su comportamiento por medio de un bus DC, teniendo en cuenta que la mayoría de estas son cargas que tienen un funcionamiento tanto en Corriente Alterna como Corriente Directa, lo cual facilitará su diseño y su posterior análisis para determinar cuál de las dos alimentaciones es más eficiente y utiliza un menor consumo.

Carga	Tensión	Potencia (W)	Consumo (A)
TV	120v 50/60 Hz	50	450mA
Plancha	120 50/60 Hz	1000	8A
Bombillo Ahorrador	120v 50/60 Hz	7	0.9A
Lavadora 12 Libras	120 60Hz	750	6.25A
Computador	100-240v 50/60 Hz	45	2.25A
Cargador Celular	100-240v 50/60 Hz	13.59	500mA
Licuada	120~ 60 Hz 10A	450	3.7A
Nevera	120~ 60 Hz	175	2A

Tabla 3 Tabla de Caracterización de Cargas

Las cargas caracterizadas en la *Tabla 3* son en su mayoría cargas electrónicas a baja tensión y cargas inductivas, es decir, cargas que funcionan con motores eléctricos. Algunas cargas que utilizan motores para su funcionamiento no funcionan en DC, pero ciertas referencias de estas cargas tienen motores universales, los cuales se tomarán como referencia para la realización de las simulaciones y las pruebas.

Topología para el Sistema Eléctrico DC utilizando la Normatividad técnica vigente para Instalaciones domésticas

Uno de los objetivos del proyecto es diseñar el sistema basado en la reglamentación eléctrica vigente para Colombia, por lo cual se utilizó el documento desarrollado por Centelsa denominado *“Guía para el Diseño de Instalaciones Eléctrica Domiciliarias Seguras”*

La reglamentación está diseñada para instalaciones en Corriente Alterna como fuente de alimentación primaria, y teniendo en cuenta que el proyecto está orientado a proponer un diseño en Corriente Continua, se debe tomar como referencia la reglamentación actual y realizar una propuesta en el diseño del bus DC con todas las especificaciones de seguridad y la adecuada instalación teniendo en cuenta espacios, conductores y distancias.

Antes de mencionar cada paso para el diseño y la implementación de una red de alimentación, es importante tener presentes algunos aspectos claves para tener resultados satisfactorios:

Los siguientes puntos son los pasos que se deben seguir para poder diseñar el sistema de alimentación en Corriente Continua, que luego serán explicados en profundidad uno a uno:

1. Identificación de cargas y la corriente que necesitas cada una de ellas.
2. Diseño de los circuitos ramales y las respectivas protecciones.
3. Selección de Conductores con criterios normalizados, teniendo en cuenta la corriente equivalente en la carga, respetando así la normatividad actual vigente, evitando accidentes por una conexión inadecuada.

Identificación de cargas y la corriente que necesitas cada una de ellas.

Teniendo en cuenta el cuadro realizado para la caracterización de las cargas, sus especificaciones y la configuración en paralelo (teniendo así una carga equivalente), se puede decir que hay un consumo aproximado de corriente que está entre **23 y 30 Amperios** en un escenario donde todas las cargas estén funcionando a su máxima potencia. Este valor de Corriente será fundamental para poder calcular cuál debe ser la capacidad de la fuente de alimentación que se debe utilizar en términos de la Intensidad que brinda en horas para acercar el sistema a un consumo diario de las cargas caracterizadas.

Diseño de los circuitos ramales y las respectivas protecciones.

Los Circuitos Ramales son la forma de distribuir las protecciones dependiendo de la agrupación de cargas, las cuales están determinadas por el valor de corriente que se consume.

La RETIE propone los siguientes circuitos ramales:

- Circuito de alumbrado general
- Circuito para pequeños aparatos eléctricos
- Circuito para conexión de Plancha y Lavadora
- Circuito para Iluminación y Fuerza

En la *Tabla 4* se presenta la relación de los circuitos ramales con las cargas anteriormente caracterizadas:

CIRCUITO RAMAL	CARGA
Alumbrado General	Bombillo Ahorrador
Pequeños aparatos eléctricos	TV
	Computador
	Cargador de Celular
Plancha y Lavadora	Pancha
	Lavadora 12 Libras
Aparatos específicos	Licuadora
	Nevera

Tabla 4 Tabla de caracterización de cargas

- Protecciones

En la actualidad existe gran variedad de protecciones para instalaciones de corriente continua, y específicamente para Instalaciones domésticas fotovoltaicas: Ideales para la protección de las baterías, transformadores eléctricos y las cargas presentes en el sistema.

Teniendo en cuenta que en el mercado existen protecciones de 16, 32, 40 y 63 amperios, las protecciones para el sistema a evaluar tendrían que ser las de **32 amperios** para la carga equivalente.

En un sistema fotovoltaico convencional existen protecciones tanto en el canal de corriente directa como también después del inversor a corriente alterna: En este sistema se tendría únicamente la protección para el bus donde irían las cargas conectadas en conjunto.

Selección de Conductores con criterios normalizados, teniendo en cuenta la corriente equivalente en la carga, respetando así la normatividad actual vigente, evitando accidentes por una conexión inadecuada.

Teniendo en cuenta el valor de corriente equivalente que consume las cargas anteriormente mencionadas, y teniendo en cuenta también la reglamentación eléctrica vigente de Centelsa, el calibre debe ser el **12 AWG** que soporta hasta **25 amperios** siendo la corriente promedio que puede consumir el sistema.

Metodología para el diseño del Sistema DC utilizando Paneles Solares como fuente Primaria.

En orden de establecer una metodología para el diseño del Sistema Fotovoltaico del proyecto, es importante tener claro los recursos y elementos necesarios para realizarlo. Este diseño Fotovoltaico tendría una variación de los Sistemas convencionales, ya que sólo habría alimentación en Corriente Continua para las cargas del sistema, teniendo únicamente convertidores de tensión, evitando los inversores a Corriente Alterna que es el objetivo principal del proyecto.

El primer elemento que se tiene que tener en cuenta para el diseño fotovoltaico es el lugar geográfico donde se va a poner el sistema, teniendo en cuenta la altura en msnm (metros sobre el nivel del mar) y la radiación de ese lugar determinado. Esta información será importante para la determinación del tipo de panel que se debe utilizar:

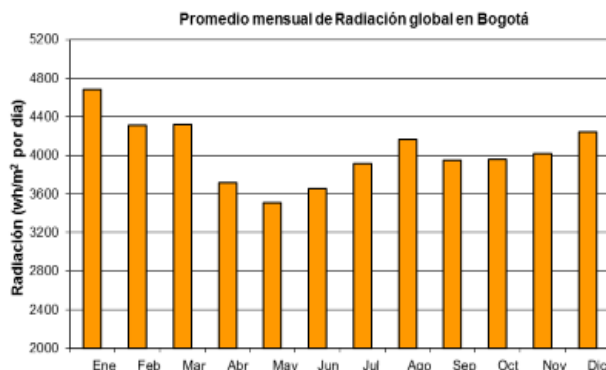


Ilustración 4 Promedio de Radiación mensual en Bogotá [20]

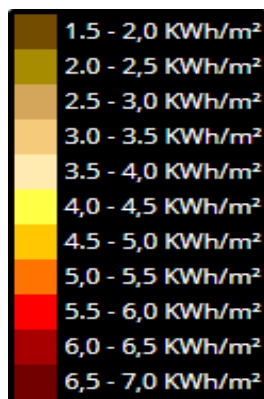


Ilustración 5 Rango de Radiación por Colores [20]

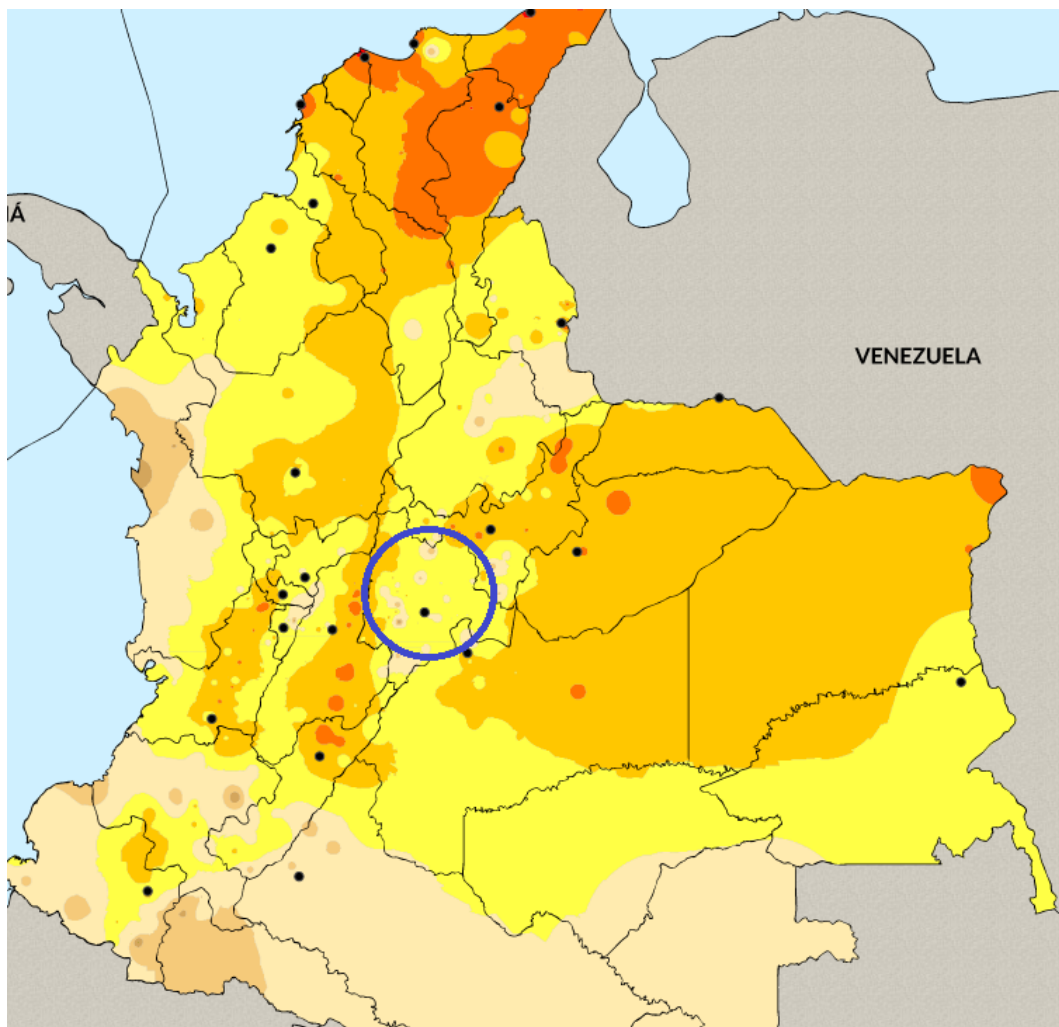


Ilustración 6 Mapa de Radiación en Colombia [20]

Teniendo en cuenta la *Ilustración 6* del mapa de Colombia, y el rango de radiación, se podría decir que en Bogotá hay un promedio de 4,0 - 4,5 KWh/m^2 .

Con el valor de la radiación, y teniendo presente que Bogotá se encuentra por encima de los 1000 msnm, se puede utilizar el siguiente cuadro para identificar el tipo de panel solar que se debe utilizar según la reglamentación actual vigente en Colombia estipulada por el Ministerio de Minas y Energías:

Rango de radiación kWh/m ²	Piso térmico menor a 1000 msnm	Piso térmico mayor o igual a 1000 msnm
2,5-3,0 3,0-3,5	SSA TIPO A	SSA TIPO E
3,5-4,0 4,0-4,5	SSA TIPO B	SSA TIPO F
4,5-5,0 5,0-5,5	SSA TIPO C	SSA TIPO G
5,5-6,0 6,0-6,5	SSA TIPO D	SSA TIPO H

Fuente: Ministerio de Minas y Energía

Ilustración 7 Tipo de Instalación Fotovoltaica dependiendo de la radiación en kWh/m² [19]

Según la *Ilustración 7*, y los parámetros de diseño mencionados anteriormente, el Panel que se debería utilizar sería el **SSA Tipo F**

Teniendo en cuenta el tipo y las especificaciones del SSA, el Ministerio de Minas y Energías propone una tabla con el diseño y las especificaciones técnicas necesarias para la implementación del sistema en Bogotá:

TIPO	SSA TIPO F	
		Cantidad
Potencia Sistema (W)	930	
Panel (Wp)	310	3
Arreglo paneles	1 String de 3 paneles en serie por string	
Inversor	1200VA / 48Vdc / 120Vac	1
Regulador (A-V)	20 A-150 V	1
Batería (Ah-V)	150 Ah- 12V	4
Banco baterías	Arreglo en serie a 48 V	

Ilustración 8 Tipo de Instalación Fotovoltaica con las especificaciones necesarias del sistema [19]

El parámetro que se debe tener en cuenta de la tabla anterior es la Potencia que necesita el sistema teniendo en cuenta la radiación y los msnm.

En el mercado existen gran variedad de paneles solares con especificaciones en Potencia, Tensión y corriente para el diseño de estos sistemas. Para la simulación del sistema propuesto en el proyecto, se determinó diseñar el sistema con la siguiente configuración de paneles:

PANEL SOLAR POLICRISTALINO	
Potencia	300W
Voltaje	18,2V
Corriente	16,5A
Arreglo de Paneles	1 String de 3 paneles en serie

Tabla 5 Especificaciones del panel fotovoltaico necesario para la implementación del Sistema

La tabla anterior corresponde al diseño del sistema para que la sumatoria del arreglo pueda suplir la potencia que dice la reglamentación actual vigente para el lugar donde se va a implementar el sistema(900W).

El arreglo de paneles será entonces una fuente con las siguientes especificaciones:

Potencia	900W
Voltaje	54,6V
Corriente	16,5A

Tabla 6 Especificaciones del arreglo fotovoltaico para la implementación del Sistema

Regulador Solar Fotovoltaico y cálculo del banco de baterías

El Regulador solar fotovoltaico cumple con la función de interruptor entre los paneles solares y el banco de baterías, con el objetivo de proteger el sistema, asegurar que se carguen en el menor tiempo posible, y evitar una sobrecarga cuando estén en su máxima capacidad. Teniendo en cuenta la tabla del diseño que propone el Ministerio de Minas y Energías, el regulador de 150 Voltios a 20 Amperios se adaptaría a las necesidades y condiciones del sistema.

Es necesario clarificar que el banco de baterías de un sistema fotovoltaico puede representar la inversión más alta en el diseño: teniendo en cuenta que este proyecto está orientado a realizar diferentes pruebas con distintos niveles de tensión en DC(utilizando elevadores y reductores) es posible establecer que el banco de baterías puede ser como lo propone también el Ministerio de Minas y Energía, el cual establece un número equilibrado de baterías: Un arreglo en serie de 4 baterías de 12V a 150Ah, teniendo al final una fuente DC de 48V.

SIMULACIONES Y RESULTADOS

Luego de realizar la planeación del sistema teniendo en cuenta lo planteado en los objetivos, se procedió a realizar las simulaciones e implementación del sistema descrito:

Simulación - Puente Rectificador

En la actualidad gran parte de las cargas residenciales tienen un inversor eléctrico (AC-DC), que en algunos casos es por medio de un puente rectificador de onda completa. La finalidad de realizar las siguientes simulaciones fue verificar que la salida del puente rectificador a las cargas eléctricas no iba a depender si a la entrada se alimenta con AC o DC y tener la plena seguridad que las cargas que actualmente funcionan en AC puedan ser alimentadas en DC también.

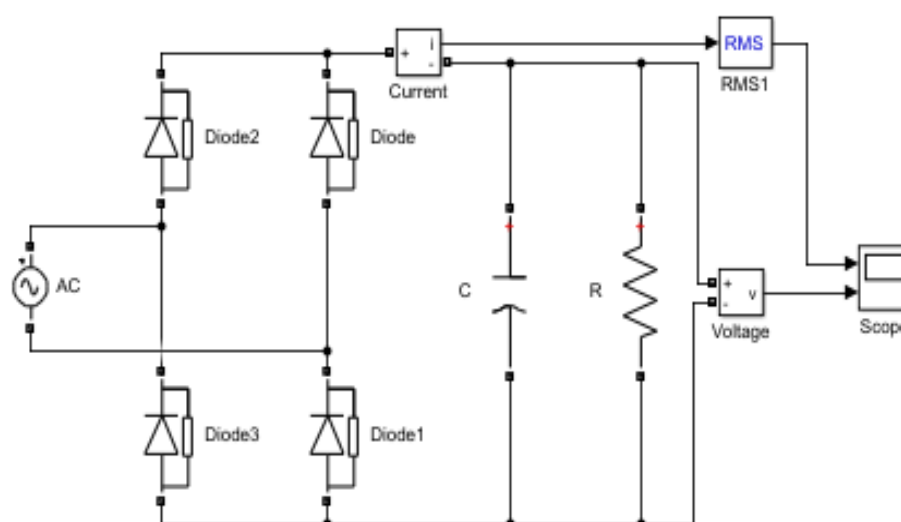


Ilustración 9 Simulación - Puente Rectificador de Onda Completa con Fuente AC

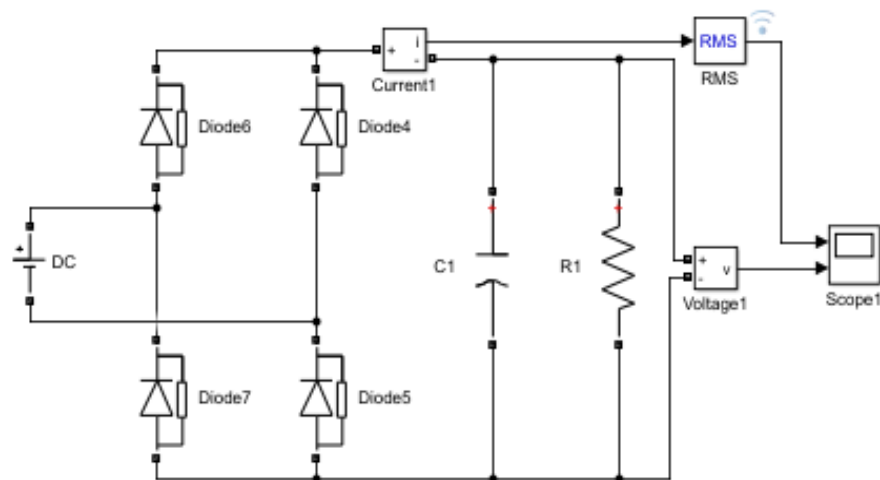


Ilustración 10 Simulación - Puente Rectificador de Onda Completa con Fuente DC

En la *Ilustración 11* se muestran los resultados obtenidos de la simulación anterior, en donde la línea azul es la tensión con alimentación en DC y la roja en AC. Es posible visualizar un rizado, el cual se disminuye con una capacitancia respectivamente. En comparación, la señal DC como es un valor constante a la entrada, no presenta alteraciones y el nivel de tensión es el mismo a la salida.

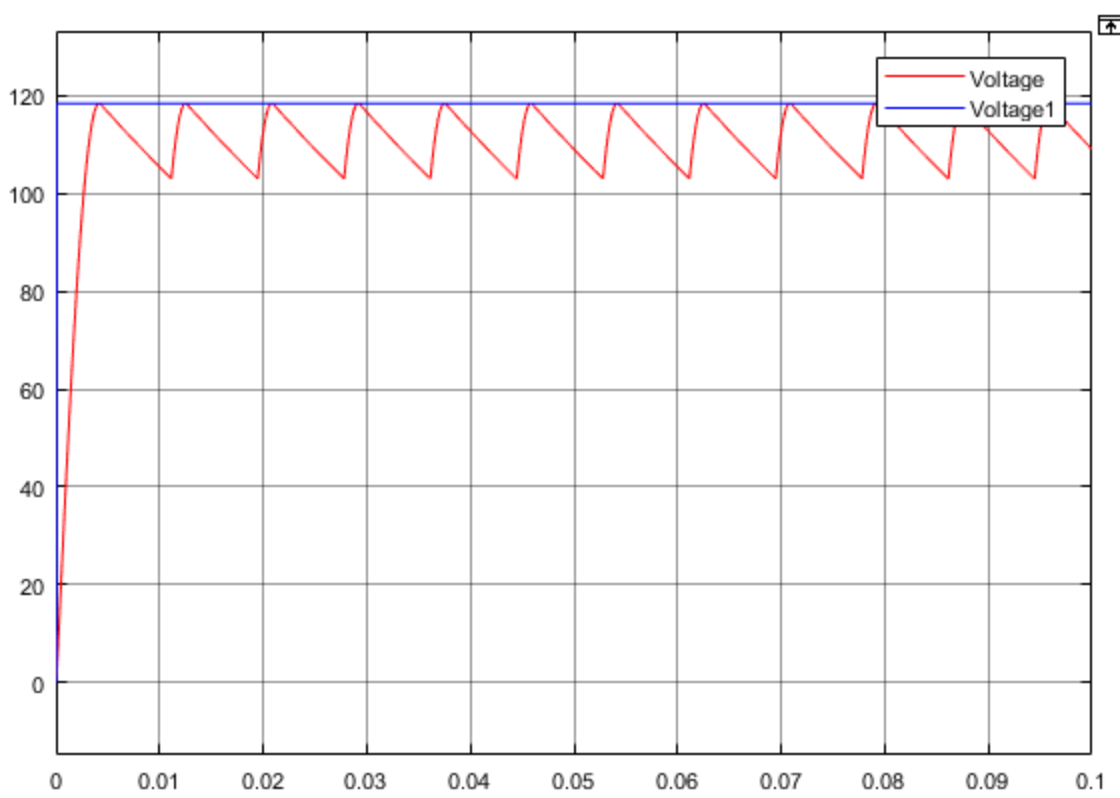


Ilustración 11 Respuestas de las simulaciones del Puente Rectificador con AC y DC

Teniendo en cuenta los resultados de la simulación, es posible decir que para alimentar las cargas residenciales que originalmente son diseñadas en AC, pueden ser alimentadas con DC y es posible visualizar que la respuesta en AC de la tensión de algunos rectificadores puede tener algún rizado, el cual afecta la alimentación de las cargas y la vida útil de los dispositivos.

Simulación - Motor Universal

La siguiente simulación está orientada a simular el funcionamiento y la respuesta que tiene un motor universal con alimentación en DC y AC con el fin de verificar que en los dos casos hay un adecuado funcionamiento. Se busca también mostrar cuál sistema es más rápido en lograr la velocidad nominal en Revoluciones por minuto.

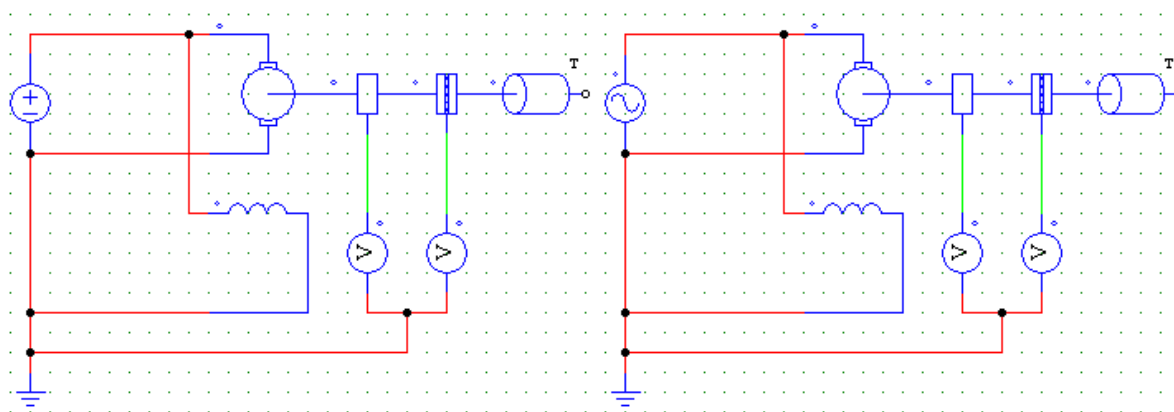


Ilustración 12 Simulación Motor Universal con Fuente AC y DC

La *Ilustración 13* presenta las revoluciones por minuto con respecto al tiempo de la anterior simulación, en donde la respuesta de color rojo representa las RPM del motor alimentado con AC y la respuesta de color azul las RPM del motor alimentado en DC. Es posible visualizar que en la alimentación en DC alcanza la velocidad de operación máxima en menos tiempo que la alimentación en AC y que el nivel nominal no se alcanza a visualizar siquiera en el cuadro de simulación que tiene cinco segundos en parámetro de tiempo.

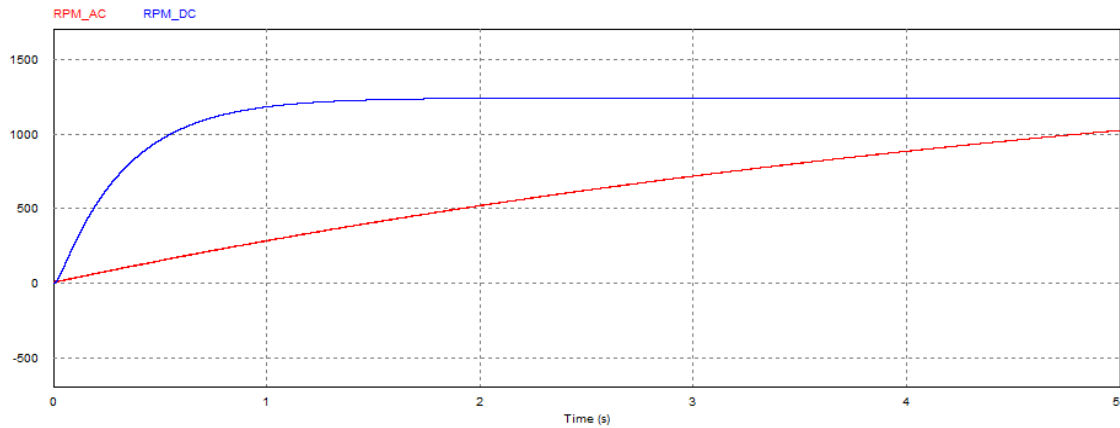


Ilustración 13 Respuesta Simulación Motor Universal con Alimentación en AC y DC

Simulación - Cargas Residenciales

La *Ilustración 14* presenta el modelo del circuito que representa una carga eléctrica doméstica convencional, con el fin de verificar las pérdidas que se presentaban al momento de la transmisión. Para las simulaciones se tomó un convertidor Buck con un controlador PID para estabilizar el nivel de tensión necesaria de cada electrodoméstico. Este mismo modelo se implementó para todas las cargas y se realizaron las respectivas pruebas en AC y DC tomando datos de corriente antes de que esta llegara a la resistencia de carga.

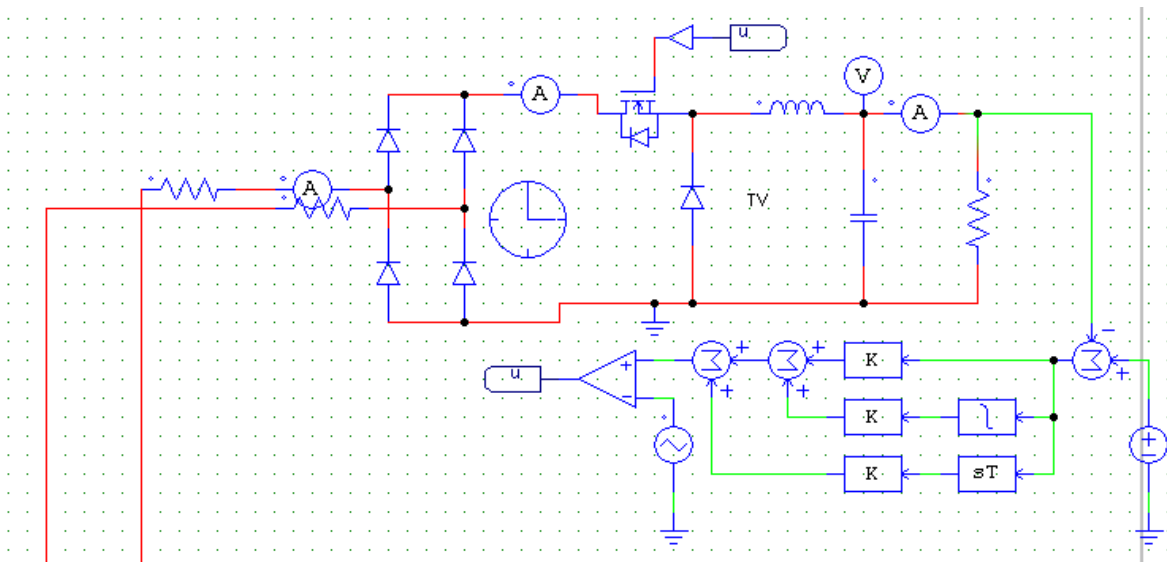


Ilustración 14 Simulación de la alimentación de una carga residencial convencional

Simulación – Pérdidas en AC

Mediante las simulaciones realizadas con una fuente de alimentación, se pudo obtener las pérdidas por efecto Joule, las cuales representan la disipación de energía de cada electrodoméstico. En la *Tabla 7* se presentan los resultados obtenidos en la simulación:

Cargas AC	P. Ef. Jule
Tv	0.30314
Cargador Celular	0.06533
Lavadora	6.33616
Bombillo LED	0.20365
Licuadora	5.35851
Nevera	4.2747
Plancha	14.6377
Portatil	0.4344

Tabla 7 Pérdidas en alimentación de cargas en AC

Graficando la tabla anterior, se puede tener una mejor visualización de los datos obtenidos y así poder tener una fácil identificación de las cargas que son las que presentan más pérdidas de transmisión al momento del funcionamiento.

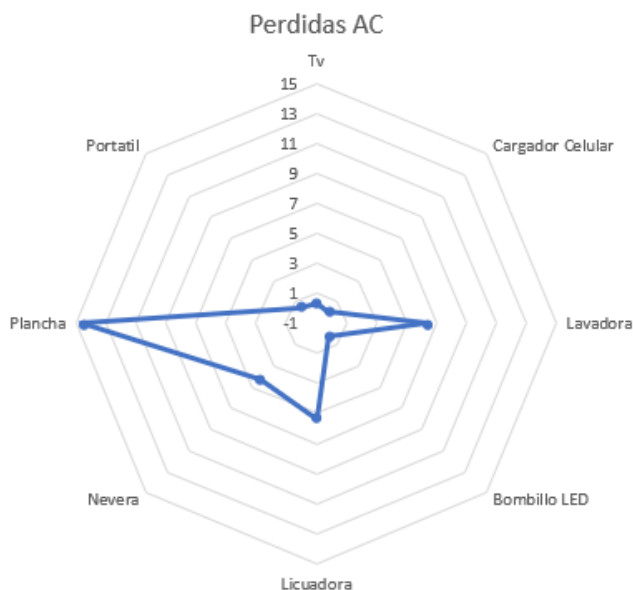


Ilustración 15 Pérdidas en simulación con Alimentación con AC

Simulación – Pérdidas en DC

Se realizó un barrido de tensión desde 120v hasta 500v DC con el fin de identificar cuál podría ser el nivel de tensión que presenta menores pérdidas con respecto a los datos mostrados en la tabla anterior. Estos resultados obtenidos fueron organizados en una tabla donde se muestran las diferentes cargas y las respectivas pérdidas de efecto Joule en cada uno de los niveles de tensión que fueron simulados. Los resultados en la *Tabla 8* muestran que a medida que se aumenta los niveles de voltaje las pérdidas disminuyen.

Cargas DC	120v	160v	200v	240v	280v	320v	360v	400v	440v	480v	500v
Tv	0.1094	0.09427	0.09085	0.08188	0.07534	0.07185	0.06492	0.06657	0.06129	0.05931	0.05622
Cargador Celular	0.02972	0.02675	0.02546	0.0232	0.0214	0.02058	0.01934	0.01922	0.01867	0.01834	0.01823
Lavadora	4.35628	3.61737	2.94708	2.54186	2.23529	2.00422	1.8662	1.68124	1.58821	1.48974	1.41009
Bombillo LED	0.04315	0.03603	0.03511	0.03262	0.03072	0.02888	0.02888	0.02742	0.02663	0.02615	0.02522
Licuada	2.05843	1.71646	1.42466	1.24821	1.10022	1.02565	0.96157	0.89194	0.83959	0.79599	0.76053
Nevera	0.8553	0.74283	0.63058	0.57056	0.5205	0.49293	0.48616	0.45298	0.44004	0.42098	0.40234
Plancha	15.4166	13.0242	10.5705	9.0124	7.8238	7.01407	6.32919	5.93123	5.41448	5.06495	4.76211
Portatil	0.16476	0.1412	0.13199	0.11752	0.10781	0.09978	0.09133	0.09061	0.08349	0.08188	0.07846

Tabla 8 Barrido de Tensión DC y pérdidas en simulación de las cargas

Teniendo en cuenta los datos obtenidos, se procedió a expresarlos en la *Ilustración 16* en donde los niveles de tensión utilizados se identifican por medio de diferentes colores, y es posible analizar que a medida que el valor de la tensión aumenta, las perdidas disminuyen significativamente en el momento de la transmisión de la energía:

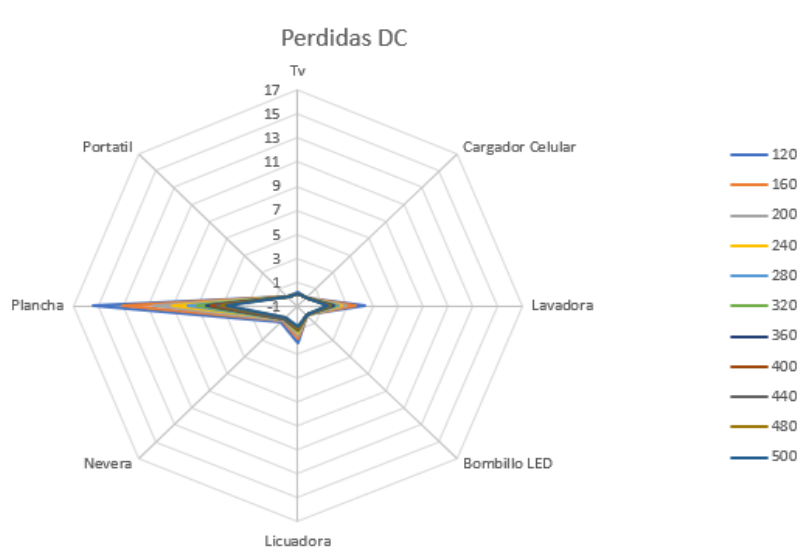


Ilustración 16 Pérdidas en simulación con Alimentación en DC

Simulación – Sistema Fotovoltaico

Teniendo en cuenta el Diseño Fotovoltaico realizado en la sección “Diseño y ejecución del Proyecto”, se implementó la simulación del sistema teniendo en cuenta los parámetros como la cantidad de Paneles y las especificaciones técnicas necesarias para la adecuada operación: se realizó una configuración en serie de tres paneles solares para obtener un aproximado de 60v y 16.5A, pero teniendo en cuenta que algunos electrodomésticos no funcionan con este nivel de tensión, se implementó en la simulación un convertidor DC – DC (elevador) para poder así obtener 120v DC a la salida y así tener un mejor rendimiento de las cargas y lograr uno de los objetivos del proyecto que es la comparación con la red de distribución actual que es de 120v AC. A continuación, el modelo:

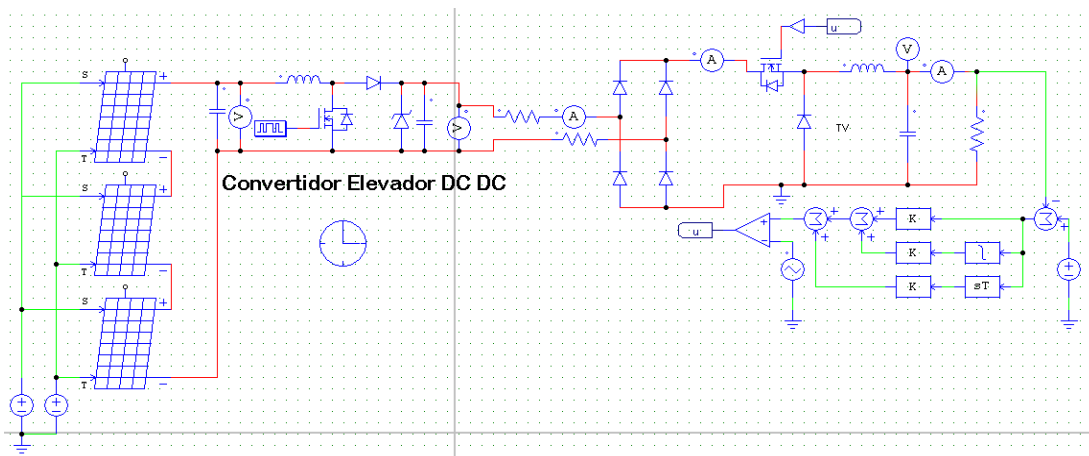


Ilustración 17 Simulación Sistema Fotovoltaico propuesto

La *Ilustración 18* muestra los resultados del modelo implementado en la simulación en donde se logró exitosamente elevar la tensión hasta los 120 VDC:

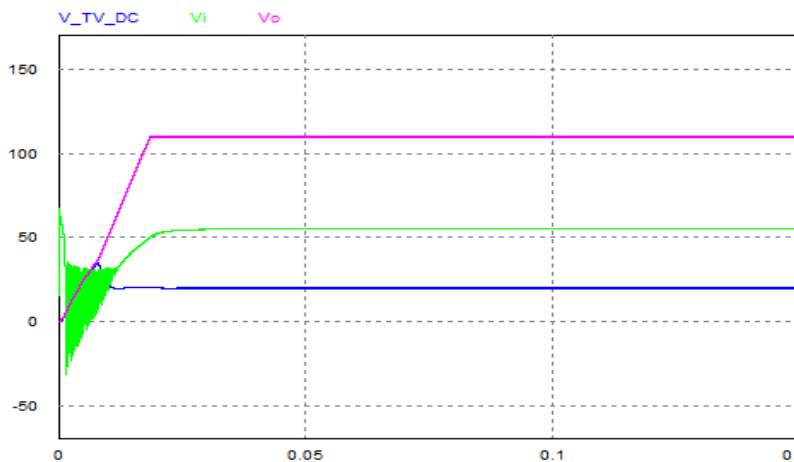


Ilustración 18 Respuesta del arreglo fotovoltaico con el elevador de tensión para 120VDC

La salida de tensión del arreglo fotovoltaico está representada en verde, la salida del elevador en morado y el nivel de tensión a la carga es azul. Lo anterior responde a la idea de poder implementar un sistema fotovoltaico para cargas residenciales sin necesitar un inversor eléctrico, el cual según estudios representa una pérdida. En este caso sólo se tuvo que diseñar el elevador de tensión para la alimentación de las cargas.

Implementación #1 – Comparación de Alimentación en DC y AC de cargas

La primera prueba que se realizó para la comparación en la alimentación entre DC y AC fue la alimentación variable de dos cargas conectadas en paralelo: un bombillo incandescente y un motor universal para la realización de las pruebas. En la *Tabla 9* se puede visualizar el comparativo de las dos fuentes de alimentación:

Tabla Tensión DC		
Tensión	Corriente	Potencia
10	0,96	9,6
20	1,2	24
30	1,28	38,4
40	1,36	54,4
50	1,36	68
60	1,52	91,2
70	1,6	112
80	1,68	134,4
90	1,76	158,4
100	1,76	176
110	1,84	202,4
120	1,92	230,4

Tabla Tensión AC		
Tensión	Corriente	Potencia
10	0,48	4,8
20	0,8	16
30	1,12	33,6
40	1,36	54,4
50	1,76	88
60	1,76	105,6
70	1,76	123,2
80	1,84	147,2
90	1,92	172,8
100	2	200
110	2,08	228,8
120	2,24	268,8

Tabla 9 Valores de Tensión y Potencia para barrido de Tensión en AC y DC

Cabe aclarar que el bombillo se tomó como una carga resistiva, y se determinó que las pruebas se debían hacer con un motor universal, teniendo en cuenta que su estructura es un circuito en serie que representa una carga con posibilidad de alimentación en DC como en AC.

Teniendo en cuenta los resultados, se puede analizar:

- En los primeros 4 valores de tensión (10V - 40V) fue posible evidenciar que había mayor disipación de potencia en las cargas utilizando DC.
- A partir de 40V, la disipación de potencia fue mayor utilizando AC, y la diferencia de potencia entre AC y DC variaba entre 7 y 40 vatios.
- En esta prueba fue posible tener un pequeño acercamiento a un sistema donde hay un menor consumo de energía utilizando un bus de alimentación de Corriente Continua para dos cargas residenciales que se utilizan con mucha frecuencia en un escenario doméstico.

Implementación Final – Evaluación de la factibilidad en la Implementación del Proyecto en comparación a la Red de Alimentación Actual

Luego de tener y analizar las simulaciones, se procedió a la implementación del sistema: se realizó el montaje de las cargas disponibles sobre una superficie de madera con el fin de tener una adecuada distribución, orden y seguridad. Se realizó el montaje de las siguientes cargas:

CARGAS
Pantalla LED - PC
Cargador de Celular
Motor 350 W
Motor de Licuadora
Bombillos LED (x3)
Caladora
Cargador Computador Portátil

Tabla 10 Cargas del Sistema a implementar

Uno de los objetivos del proyecto estuvo orientado a visualizar y analizar las pérdidas de energía en el cable en las instalaciones domésticas tanto en AC como en DC, por lo que se simuló la resistencia del cable utilizando resistencias previo a cada carga como se observa en la *Ilustración 19*:

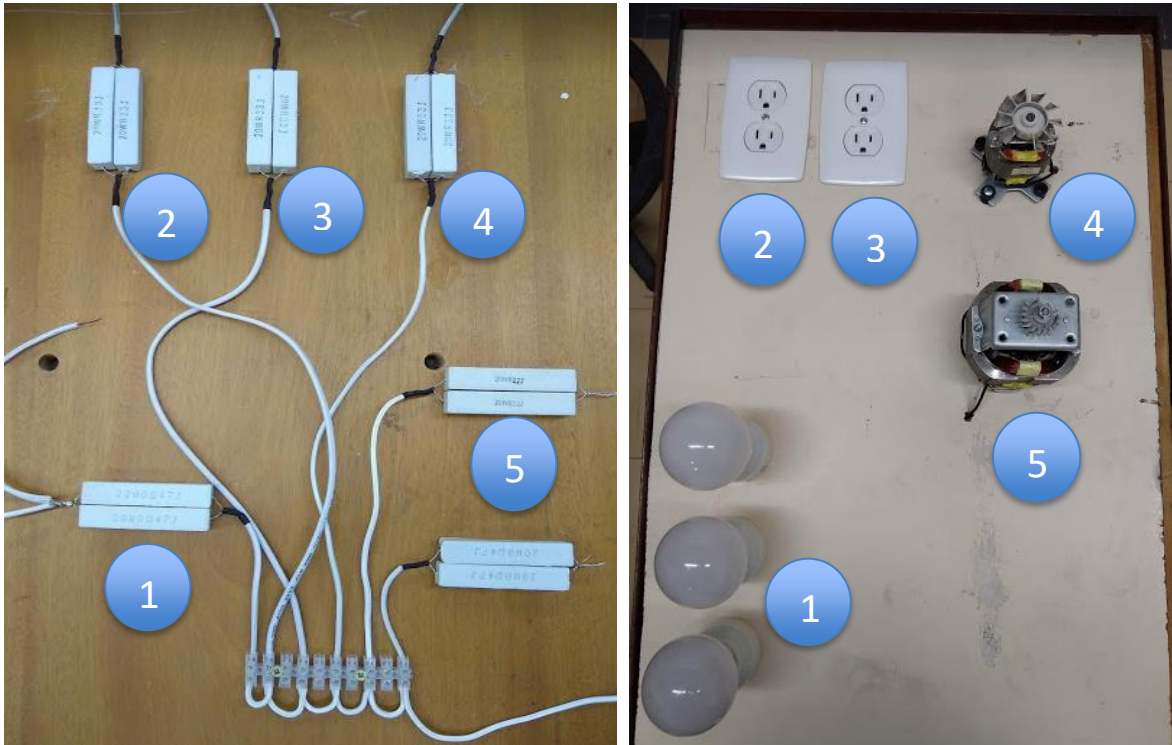


Ilustración 19 Simulación de la resistencia del Cable por medio de resistencias previo a llegar a las cargas caracterizadas

El cálculo de las resistencias se obtuvo teniendo en cuenta el valor de la resistencia del cable de cobre calibre 12, el cual se obtuvo en el diseño del sistema teniendo en cuenta la corriente máxima de operación de todas las cargas. El valor de la resistencia del cable es $5,21\Omega \times 1000m$. Teniendo en cuenta el anterior valor, y las distancias estipuladas en la siguiente tabla del cable para las cargas, es posible encontrar el valor de la resistencia para cada nodo donde están conectadas las cargas:

#	CARGA	CONFIGURACION	DISTANCIA (Metros)	RESISTENCIA (Ohmios)
1	Bombillo	Tres Bombillos en paralelo	45m	$235 \times 10^{-3}\Omega$
2	Clavija Monofásica 1	Pantalla PC	31m	$165 \times 10^{-3}\Omega$
		Cargador Celular		
3	Clavija Monofásica 2	Caladora	31m	$165 \times 10^{-3}\Omega$
		Cargador Computador Portátil		
4	Motor Licuadora	Sencilla	31m	$235 \times 10^{-3}\Omega$
5	Motor 350W	Sencilla	21m	$110 \times 10^{-3}\Omega$

Tabla 11 Parámetros de diseño y distribución de cargas para la implementación del sistema

Teniendo en cuenta que la resistencia del cable es muy pequeña para las distancias que se estipularon, se utilizaron resistencias de valores como 0.22Ω , 0.33Ω y 0.47Ω configurándolas en parejas iguales en paralelo para reducir la resistencia a los valores anteriormente descritos en la tabla.

Posterior a tener las conexiones de la simulación del cable, se procedió a realizar las pruebas en la alimentación de las cargas conectadas en paralelo tanto en DC como en AC para realizar la comparación de pérdidas y parámetros como la corriente consumida de la carga equivalente y cargas independientes.

Para estas pruebas se utilizaron recursos y equipos de los laboratorios de Ingeniería de la Universidad Santo Tomás como la alimentación monofásica de 120VAC y una fuente de corriente continua configurada a 120VDC con el fin de realizar la comparación entre las dos fuentes de alimentación al mismo valor de tensión. Las mediciones de tensión se realizaron por medio de un osciloscopio, el valor de corriente que consume la carga equivalente se realizó por medio del valor brindado por la fuente DC y para la medición de corriente para cada carga independiente se utilizó la sonda de corriente. A continuación, se muestran los resultados obtenidos en términos de la corriente consumida por todo el sistema en AC y DC:

AC	
Tensión de Alimentación	Corriente Carga equivalente
120 VAC	5,5 A

Tabla 12 Valores de Tensión y Corriente equivalente para alimentación en AC

DC	
Tensión de Alimentación	Corriente Carga equivalente
120 VDC	4,5 A

Tabla 13 Valores de Tensión y Corriente equivalente para alimentación en DC

Teniendo en cuenta las *Tablas 12 y 13*, es posible evidenciar a primera vista que el consumo equivalente de las cargas utilizando DC es menor que en AC por un valor aproximado de 1A. Lo anterior muestra que las pérdidas luego de que el sistema se estabilizó puede ser mayor en AC que en DC realizando las pruebas con 120VDC y 120VAC.

Utilizando la sonda de corriente para tomar los datos en cada rama de cada carga se obtuvieron los siguientes resultados:

	Corriente AC Cargas Independientes (A)	Corriente DC Cargas Independientes (A)
Bombillos	0,1	0,1
Caladora	1,7	1,6
Pantalla PC	0,45	0,2
Cargador de Celular	0,43	0,2
Licuada	1,05	1,1
Motor 350W	1,38	1,31
Cargador Computador	0,8	0,2

Tabla 14 Valores de Corriente para cada carga en AC y DC

En la *Tabla 14* es posible evidenciar que el consumo independiente de cargas en AC es efectivamente mayor que en DC: aunque el consumo no varía mucho en cada carga, al tener la carga equivalente y realizar la sumatoria de la diferencia, se puede evidenciar que el total es 1A que afecta directamente en el valor de pérdidas por medio del análisis con el efecto Joule.

Teniendo en cuenta los datos mostrados anteriormente, y utilizando la ecuación de pérdidas por efecto Joule $E = I^2 * R$, se puede mostrar el resumen de las pérdidas de cada una de las cargas en la *Tabla 15*:

Cargas	Perdidas AC	Perdidas DC
Bombillos	0.03271	0.00523
Caladora	0.02986	0.00646
Pantalla PC	0.20836	0.18776
Cargador de Celular	0.00234	0.0076
Licuada	0.17806	0.22109
Motor 350W	0.70982	0.60019
Cargador Computador	0.10337	0.00646

Tabla 15 Pérdidas en AC y DC en el sistema implementado

La *Tabla 15* responde a las pérdidas ocasionadas por la corriente consumida por las cargas y da a entender que en el nivel de tensión de la red de distribución eléctrica actual (120V) son mayores las pérdidas en AC que en DC.

ANALISIS DE RESULTADOS

El sistema implementado tuvo el propósito de simular un sistema de alimentación para cargas residenciales con los parámetros necesarios para dicha instalación con el objetivo principal de comparar la eficiencia entre la distribución de energía en AC y DC.

El primer elemento a analizar está orientado a entender que tanto en AC como DC se presentan pérdidas en el cable: realizando cada paso correspondiente al diseño e implementación del sistema con la toma de datos y calculando las pérdidas por efecto Joule, se pudo observar que estas son mayores utilizando AC debido a que la corriente equivalente que consumen las cargas es mayor cuando hay un consumo de forma continua.

Las pruebas y los resultados obtenidos dan pie para tomar como posibilidad la implementación de un sistema en DC para pequeñas instalaciones domésticas con cargas que sean de uso primario, teniendo en cuenta que las cargas que son alimentadas normalmente con AC, pueden ser alimentadas con un bus DC, aun sin tener un convertidor eléctrico sino manejando una tensión DC de 120V como la tensión de distribución actual en Colombia en AC.

CONCLUSIONES

- La implementación de un bus de alimentación DC para cargas residenciales es una opción factible, siempre y cuando se tengan en cuenta parámetros en la adecuada distribución y alimentación, precisando en el diseño del sistema, de tal manera que se evite pérdidas significativas de energía como se logró proponer y realizar en el diseño y la ejecución del proyecto.
- La caracterización de las cargas fue un escenario para entender el funcionamiento de los equipos residenciales y que en la mayoría de los casos su núcleo de operación puede funcionar tanto en AC como en DC.
- Conocer la reglamentación eléctrica vigente es muy importante para el diseño, planeación y montaje de un sistema eléctrico DC no sólo por el cumplimiento de la norma, sino también para entender cómo funciona un sistema de alimentación y los recursos necesarios para su implementación.
- Con el fin de garantizar un adecuado diseño fotovoltaico, es necesario conocer no solo el sistema interno y las cargas presentes en el, sino también tener en cuenta las condiciones externas del medio con el propósito de diseñar un sistema seguro y eficiente.
- Los resultados obtenidos en las simulaciones del barrido de tensión para la alimentación en DC dieron pie a entender que el mejor escenario para implementar una instalación a gran escala sería en alta tensión donde las pérdidas son despreciables.
- En una instalación o sistema de alimentación de cargas residenciales existen pérdidas tanto en AC como en DC: teniendo en cuenta los resultados, el Sistema eléctrico DC propuesto en el proyecto podría ser eficiente para un escenario pequeño donde se pueda prevenir con facilidad las pérdidas, teniendo en cuenta que está determinado por el adecuado diseño e implementación del sistema.

RECOMENDACIONES

Este proyecto tiene un enfoque importante hacia el desarrollo energético actual y futuro: actualmente hay escenarios en los que se necesitan implementar soluciones de energía para zonas no interconectadas que necesitan un montaje eléctrico sencillo para cargas que garantizan el bienestar básico de las personas que habitan en esos medios. El Proyecto desarrollado es una propuesta para reducir recursos y aumentar la eficiencia en un sistema de alimentación fotovoltaico, lo cual puede ser la apertura para nuevos proyectos que quieran aportar y profundizar en proyectos orientados al ahorro de energía y eficiencia energética.

La distribución de la energía tendrá que cambiar al pasar de los años por la ausencia de recursos naturales. Por ende, la investigación está proponiendo constantemente soluciones a esta problemática y una de ellas es la distribución de alta tensión en DC (HVDC). Teniendo en cuenta esta solución, se podría decir que a futuro habría la posibilidad que la alimentación esté implementada en DC y que por medio de convertidores eléctricos se alimenten las cargas que en la actualidad tienen su alimentación final en DC.

REFERENCIAS

- [1] E. Rodriguez-Diaz, J. C. Vasquez and J. M. Guerrero, "Potential energy savings by using direct current for residential applications: A Danish household study case," 2017 IEEE Second International Conference on DC Microgrids (ICDCM), Nuremburg, 2017, pp. 547-552.
- [2] M. J. Stewart, J. M. Counsell and A. A. Kaykhan, "Design and specification of building integrated DC electricity networks," 2016 Future Technologies Conference (FTC), San Francisco, CA, 2016, pp. 1237-1240.
- [3] Soumya Shubhra Nag, Suman Mandal and Santanu Mishra, "Solar PV Based DC Power Supply for Rural Homes with Analog, Multiplier-less MPPT Controller", Department of Electrical Engineering, Indian Institute of Technology, Kanpur Kanpur, India, pp. 1-6.
- [4] V. Rajaraman, K. Vasudevan, L. Narasamma, V. Tamboli and A. Lolla, "Bringing Uninterrupted DC power to Indian homes: The Sasaram experience," 2016 First International Conference on Sustainable Green Buildings and Communities (SGBC), Chennai, 2016, pp. 1-6.
- [5] M. Wu, L. J. Sun, H. Zhang, W. Wang and G. M. Luo, "Research on optimal storage capacity of DC micro-grid system in PV station," in The Journal of Engineering, vol. 2017, no. 13, pp. 859-864, 2017.
- [6] A. Rehman, S. Zeb, H. Khan, S. Shahbaz, A. Ullah, "Design and Operation of Microgrid with Renewable Energy Sources and Energy Storage System: A Case Study", Engineering Technologies and Social Sciences (ICETSS), 2017 IEEE 3rd International Conference on, pp. 1-6.
- [7] A. Stippich et al., "From Ac to Dc: Benefits in Household Appliances," International ETG Congress 2017, Bonn, Germany, 2017, pp. 1-6.
- [8] M. Wu, L. J. Sun, H. Zhang, W. Wang and G. M. Luo, "Research on optimal storage capacity of DC micro-grid system in PV station," in The Journal of Engineering, vol. 2017, no. 13, pp. 859-864, 2017.
- [9] Wang, Y., Li, Y., Cao, Y., Tan, Y., He, L., Han, J. Hybrid AC/DC microgrid architecture with comprehensive control strategy for energy management of smart building (2018) International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 101, pp. 151-161.
- [10] Zhou, X., Zhou, L., Chen, Y., Guerrero, J.M., Luo, A., Wu, W., Yang, L.

A microgrid cluster structure and its autonomous coordination control strategy

(2018) International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 100, pp. 69-80.

[11] Rodríguez, F., Fleetwood, A., Galarza, A., Fontán, L. Predicting solar energy generation through artificial neural networks using weather forecasts for microgrid control (2018) Renewable Energy, 126, pp. 855-864.

[12] Thirugnanam, K., Kerk, S.K., Yuen, C., Liu, N., Zhang, M. Energy Management for Renewable Microgrid in Reducing Diesel Generators Usage with Multiple Types of Battery (2018) IEEE Transactions on Industrial Electronics, 65 (8), pp. 6772-6786. Cited 2 times.

[13] Hirsch, A., Parag, Y., Guerrero, J. Microgrids: A review of technologies, key drivers, and outstanding issues (2018) Renewable and Sustainable Energy Reviews, 90, pp. 402-411.

[14] Wang, M.-H., Tan, S.-C., Lee, C.-K., Hui, S.Y. A configuration of storage system for DC microgrids (2018) IEEE Transactions on Power Electronics, 33 (5), art. no. 7971939, pp. 3722-3733.

[15] Ramli, M.A.M., Bouchekara, H.R.E.H., Alghamdi, A.S. Optimal sizing of PV/wind/diesel hybrid microgrid system using multi-objective self-adaptive differential evolution algorithm (2018) Renewable Energy, 121, pp. 400-411.

[16] I. Mazhari and B. Parkhideh, "DC-bus voltage regulation for DC distribution system with controllable DC load," *2017 IEEE 8th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)*, Florianopolis, 2017, pp. 1-6. doi: 10.1109/PEDG.2017.7972501

[17] T. Lüth *et al.*, "Performance of a DC/AC/DC VSC system to interconnect HVDC systems," *10th IET International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC 2012)*, Birmingham, 2012, pp. 1-6. doi: 10.1049/cp.2012.1971

[18] E. Concepts, «Electrical Baba,» [En línea]. Available: <https://electricalbaba.com/comparison-of-ac-and-dc-transmission/>.

[19] DNP, «Departamento de Planeación COLOMBIA,» 2016. [En línea]. Available: <https://proyectostipo.dnp.gov.co/images/pdf/Celdas/ptceldas.pdf>.

[20] IDEAM, «Atlas Interactivo IDEAM,» 2019. [En línea]. Available: <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasRadiacion.html>.