

TRABAJO DE DIPLOMA

EN OPCIÓN AL TÍTULO DE

INGENIERO ELÉCTRICO

Título: Propuesta de microrrejillas acopladas para el docente 1 del Instituto Superior Minero Metalúrgico "Antonio Núñez Jiménez".

Autor: Teresa Esteris Ramírez

Tutor: Ing. Daniel Mendiola Ellis

Moa, Curso 2016-2017

"Año 59 de la Revolución"

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Con relación al contenido de la presente tesis, el autor es responsable y certifica la propiedad intelectual a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa Dr. "Antonio Núñez Jiménez", el cual podrá hacer el uso que estime pertinente con los resultados.

Para que así conste firmamos la presente:

A los _____ días del mes de _____ del _____

(Diplomante)

PENSAMIENTO



“Crezcan como buenos revolucionarios. Estudien mucho para poder dominar la técnica que permite dominar la naturaleza. Acuérdense que la Revolución es lo importante y que cada uno de nosotros, solo, no vale nada. Sobre todo, sean siempre capaces de sentir en lo más hondo cualquier injusticia cometida contra cualquiera en cualquier parte del mundo. Es la cualidad más linda de un revolucionario.”

Ernesto Che Guevara

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a mi abuelita Fefi que a pesar de que ya no esté con nosotros la llevo en mi corazón, a mi familia, profesores y amigos, en especial a mi bella mami que he tenido su apoyo incondicional.



AGRADECIMIENTOS

Agradezco:

A mi mami por haberme ayudado a conseguir todas las metas que me he propuesto.

A mis abuelos, a mi querida hermana, a mis bellos sobrinos por su apoyo y amor.

A Rafa que ha sido como un padre para mí y se ha ganado todo mi cariño.

A mi amorcito Wilber, que me ha sabido apoyarme y darme su amor que necesitaba para llegar hasta el final.

A mis amigos que me extendieron sus manos en estos largos años de estudios.

A todos aquellos que me han servido de apoyo para el desarrollo de esta investigación tutores y profesores.

A todos muchísimas gracias,



RESUMEN

Actualmente en el mundo, el uso de energías renovables no convencionales que ayudan a preservar el medio ambiente es un tema que va a la par con el concepto de generación distribuida donde las redes eléctricas deben garantizar en todo momento disponibilidad de suministro eléctrico, por lo cual se ha hecho énfasis en el desarrollo de microrredes para que de esta manera los consumidores no sean dependientes de un solo suministro de energía sino más bien puedan tener varias alternativas disponibles y garantizar de esta manera un sistema eléctrico más confiable, flexible, accesible y económico. El objetivo principal de esta tesis es la propuesta del diseño de una microrred fotovoltaica en el docente¹ del ISMM. El sistema es sencillo y se compone de módulos fotovoltaicos, un regulador de carga, un inversor y una batería. Con motivo de mejorar el servicio al docente¹ al completo, se decidió realizar una microrred que electrifique ese docente.

ABSTRACT

Currently in the world, the use of non-conventional renewable energies that help to preserve the environment is an issue that goes hand in hand with the concept of distributed generation where electricity grids must guarantee availability of electricity at all times, emphasis has been placed on the development of microgrids so that consumers are not dependent on a single energy supply but rather can have several alternatives available and thus guarantee a more reliable, flexible, accessible and economical electrical system. The main objective of this thesis is the proposal of the design of a microrred photovoltaic in the teacher1 of the ISMM. The system is simple and consists of photovoltaic modules, a charge controller, an inverter and a battery. In order to improve the service to the teacher1 in full, it was decided to make a microrred that electrify this teacher.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN GENERAL	1
CAPÍTULO1. MARCO TEÓRICO-CONCEPTUAL	4
1.1. Energía solar.....	4
1.1.2 Motivación respecto a la utilización de la energía solar en instituciones académicas en Cuba,	4
1.2 Microrred	5
1.3 Arquitectura de una microrred.....	6
1.4 Elementos que conforman una microrred	8
1.4.1 Sistemas de generación distribuida	9
1.4.2 Reguladores de carga.....	9
1.4.3 Acumuladores o baterías	9
1.4.4 Inversores	10
1.4.5 Generadores eléctricos	10
1.4.6 Sistemas de transferencia de carga.....	11
1.4.7 Protecciones	12
1.5 Sistemas de control de microrredes.....	13
1.6 Tipos de microrredes	14
1.6.1 Topologías de microrredes.....	14
1.7 Control y manejo de la microrred	15
1.8 Características y modos de operación	16
1.9 Tipos de acoplamientos para una microrred	17
Conclusiones del capítulo	18
CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS A EMPLEAR.....	19
2.1 Propuesta para el dimensionado.....	19
2.2 Determinación de la demanda	19
2.3 Selección de los generadores	20
2.4 Método de dimensionado con PVsyst.....	22
2.5 Datos de radiación	23
2.6 Estudio de cargas del docente 1	25



2.7 Dimensionado de los paneles fotovoltaicos	25
2.8 Dimensionado del inversor	27
2.9 Dimensionado del cableado	28
2.10 Criterios de selección del acoplamiento	30
Conclusiones del capítulo	30
CAPÍTULO 3. RESULTADOS, VALORACIÓN ECONÓMICA E IMPACTO MEDIO	
AMBIENTAL	31
3.1 Descripción del escenario	31
3.2 Localización	32
3.3 Consideraciones para las simulaciones	33
3.4 Dimensionado final del sistema.....	33
3.5 Comportamiento energético del sistema.....	34
3.6 Diagrama de pérdidas generales	36
3.7 Seguridad y protecciones.....	36
3.8 Valoración Técnico-Económica.....	37
3.8.1 Cálculo de acuerdo a la energía generada	38
3.8.2 Cálculo del costo de inversión y el costo salarial	38
3.8.3 Tiempo de recuperación de la inversión,	40
3.8.4 Valor Actual Neto (VAN)	40
3.8.5 Relación Beneficio-Costo (B/C).....	41
3.8.6 Cálculo del ahorro de combustible	42
3.9 Procedimiento del cálculo económico	43
3.10 Efecto medioambiental.....	43
CONCLUSIONES GENERALES.....	46
RECOMENDACIONES	47
Bibliografía	48
ANEXOS	49



INTRODUCCIÓN GENERAL

La producción, la transformación y el consumo de energía eléctrica son esenciales en la sociedad en la que vivimos actualmente, tanto para su crecimiento como para su bienestar. Las principales fuentes de energía, como la fósil o la nuclear, son fuentes de energía finitas y puede llegar el momento en que no puedan suplir la demanda necesaria. Por este motivo han empezado a desarrollarse las llamadas energías renovables, que obtienen la energía de fuentes inagotables como pueden ser la radiación solar o el viento.

Otro de los motivos por el que se ha producido el crecimiento de las energías renovables es la escasa contaminación que producen. El uso de petróleo o la combustión de carbón como fuentes fósiles producen gases nocivos para la capa de ozono que llegan a deteriorarla, además de elevar el grado de contaminación de la zona, perjudicial también para los seres vivos como en el caso de la lluvia ácida[1].

Sin embargo, la instalación de sistemas generadores de energía en base a recursos renovables debe estar acompañada de la modernización del modelo de distribución y administración del sistema energético, en países como Cuba. De igual forma, si la reglamentación actual no se modifica de manera que se obtengan beneficios por la instalación de estos sistemas, se reduzcan las tarifas de los impuestos de importación de los equipos y se faciliten los trámites para la obtención de los permisos de funcionamiento, el impacto e inversión de este tipo de sistema se verá reducido. La dependencia de los sistemas de generación en base a recursos energéticos asociados a condiciones climáticas, evidentemente cambiantes, requiere la integración de la red eléctrica como parte del sistema, debido a que se debe garantizar que, sin importar las condiciones meteorológicas, se abastezca confiablemente de energía a las cargas. A este escenario de red eléctrica integrada se le ha denominado microrred.

Esta tecnología se ha venido aplicando en otros países debido a la creciente demanda de energía eléctrica, sin embargo en Cuba a pesar de que se está implementando la generación a través de paneles fotovoltaicos, parques eólicos, no existe un sistema que utilice las microrrejillas para abastecer dicha demanda. En el

ISMM se han estado haciendo algunos estudios relacionados con la implementación de energías renovables para aumentar la eficiencia de algunos sistemas eléctricos, sin embargo todavía existen algunas temáticas que requieren una mayor profundización de este contenido.

Situación problémica

En los trabajos realizados en las áreas docentes del ISMM se han encontrado que existe desbalance y necesidad de modernizar la forma de gestión y distribución teniendo en cuenta las tendencias actuales para ahorrar y usar Energías Renovables.

Problema de investigación: Lograr autonomía en la satisfacción de la demanda en el docente.1 del Instituto Superior Minero Metalúrgico.

Hipótesis: Si se aplica el concepto de microrred en áreas del ISMM, se producirá beneficios importantes a los procesos institucionales y al medio ambiente, ya que mejorará la confiabilidad de suministros de energía y optimizará los costos al utilizar fuentes alternativas de energía renovable.

Objetivo General: Conformar una microrred acoplada para la gestión y control de la demanda en el edificio docente.1del ISMM.

Objetivos Específicos:

- Determinar el estado del arte vinculado con las microrrejillas.
- Identificar los consumos de electricidad del docente 1 del ISMM.
- Diseñar una red de distribución que logre hacer un reparto eficiente de esa energía entre los distintos centros.
- Diseñar un sistema generador de electricidad a partir de la energía solar utilizando la tecnología fotovoltaica.

Objeto de estudio: Microrredes de potencia académicas.

Campo de acción: Redes y sistemas de distribución.

Tareas:

1. Realización de un análisis del estado del arte e investigaciones precedentes relacionadas con las microrrejillas.
2. Realizar un estudio de las bases de acoplamiento.
3. Realizar un estudio de la demanda en el docente número 1.
4. Llevar a cabo un estudio económico (ahorro).
5. Valoración económica del trabajo.

CAPÍTULO1. MARCO TEÓRICO-CONCEPTUAL

El sol es la principal fuente de energía del planeta. La tecnología solar fotovoltaica convierte la luz en electricidad. En apenas una hora el sol transmite a la superficie de la tierra, más energía de la que el planeta utiliza en un año. Una energía gratuita, limpia, renovable e ilimitada que se puede convertir en electricidad para abastecer su empresa o vivienda.

1.1. Energía solar

La energía solar es una energía renovable, obtenida a partir del aprovechamiento de la radiación electromagnética procedente del Sol. La radiación solar que alcanza la Tierra ha sido aprovechada por el ser humano desde la Antigüedad, mediante diferentes tecnologías que han ido evolucionando. En la actualidad, el calor y la luz del Sol puede aprovecharse por medio de diversos captadores como células fotovoltaicas, heliostatos o colectores térmicos, pudiendo transformarse en energía eléctrica o térmica. Es una de las llamadas energías renovables o energías limpias, que podrían ayudar a resolver algunos de los problemas más urgentes que afronta la humanidad.

1.1.2 Motivación respecto a la utilización de la energía solar en instituciones académicas en Cuba,

Cuba viene realizando grandes esfuerzos para solucionar el problema energético y entre sus planes incluyó la intensificación de la utilización de energía solar, fundamentalmente en zonas de difícil acceso donde no llega el Sistema Electroenergético Nacional, utilizando paneles solares constituidos por celdas fotovoltaicas. Estos sistemas comenzaron a instalarse fundamentalmente en consultorios del médico de la familia, hospitales rurales, círculos sociales, salas de televisión y escuelas, Más de 1944 escuelas han recibido este beneficio.



Figura 1.1. Escuela rural.

Llevar algunos de estos programas a lugares intrincados del sector rural, esencialmente del Plan Turquino, donde no llega el Sistema Electroenergético Nacional (SEN) resultaba imposible por la falta de electricidad.

En otros países debido a la creciente demanda energética a nivel mundial, el aumento del cambio climático y la disminución de combustibles fósiles, es que se ha vuelto indispensable buscar nuevas formas de generación eléctrica. Una alternativa es el uso de Energías Renovables, como lo son la energía solar, eólica, mareomotriz, hidráulica, la biomasa, etc.,[2]. Entre sus ventajas, estas energías se pueden utilizar en pequeñas redes eléctricas, llamadas microrredes, las que permiten alimentar eléctricamente zonas aisladas de la red.

1.2 Microrred

La arquitectura unidireccional de la red eléctrica actual, vertical en su operación de generación, distribución y consumo ha empezado a requerir cambios drásticos debido a los avances en las nuevas tecnologías en generación, así como necesidades de características dinámicas y velocidad en la transferencia de información y comunicaciones. El desarrollo de las redes inteligentes, está enfocado a la solución de problemas de confiabilidad y a la implementación de sistemas a base

de energías renovables, con todas las características positivas que se les reconocen a estos.[3]

De este concepto surge la microrred, se trata de pequeños sistemas inteligentes de distribución eléctrica auto gestionados localmente, de forma que podrían funcionar tanto conectados a la red pública de distribución como aislados de la misma. Las microrredes eléctricas están siendo ampliamente investigadas y comienzan a ser implementadas[4].

Una mejor manera de aprovechar todo el potencial emergente de la generación distribuida es tomar un enfoque de sistema que considera la asociación de generación y cargas como un subsistema o “microrred”. Este enfoque nos permite un control y operación local de la generación distribuida, reduciendo o eliminando la necesidad de un control central. Además nos proporciona un alto nivel de servicio, ya que es posible la desconexión de la microrred y sus correspondientes cargas del sistema eléctrico, especialmente durante perturbaciones, fallas o eventos de calidad de potencia.[5].

Las microrredes pueden funcionar conectadas a una red principal o en forma aislada[6]. Cuando una microrred se encuentra conectada a la red, ésta es reconocida por la red como un consumo o una fuente de generación. De esta forma, si la microrred genera menos de lo que está consumiendo, puede obtener potencia desde la red y en caso de generar más energía, ésta es enviada a la red[7].

En el caso de funcionar desconectada de la red, lo que es conocido como modo isla, la microrred debe generar la energía necesaria para alimentar sus consumos.

1.3 Arquitectura de una microrred

A partir de [8] y [4] se tiene la estructura básica de una microrred, la cual se presenta en la Figura 2. Ésta se compone de cargas, fuentes de generación y sistemas de almacenamiento, como las baterías. Estas últimas son importantes porque permiten almacenar energía de fuentes intermitentes como generadores eólicos o paneles fotovoltaicos y entregarla cuando el sistema lo necesite [9].

La microrred se une a la red principal a través de un interruptor estático[4], aunque el dispositivo de conexión puede variar de una microrred a otra. Además cuenta con

tres alimentadores (A, B, C). Cada alimentador tiene controladores y desconectores, de modo que frente a problemas de calidad en el voltaje de la red, o zonas de la microrred, éstas se pueden aislar mediante los desconectores. De este modo, las protecciones de la microrred deben responder tanto a fallas de la red principal, cuando se encuentra conectada a ésta, como de la microrred. Si la falla se ubica en la red principal la microrred debe aislarse rápidamente de ella para proteger las cargas, mientras que si la falla es en la microrred, se debe aislar la zona afectada[4].

En general el voltaje de operación de las microrredes es de baja tensión ($<480V$), y las fuentes de generación (micro-turbinas, paneles fotovoltaicos, generadores eólicos) tienen potencias menores a 100kW. Las fuentes se conectan al sistema a través de interfaces electrónicas, como inversores y convertidores, los que permiten el control y dan flexibilidad a la microrred, cumpliendo con los diversos requisitos de los clientes. En la actualidad se puede encontrar microrredes instaladas con fines experimentales, y otras que efectivamente se encuentran operacionales y alimentan pequeñas poblaciones.

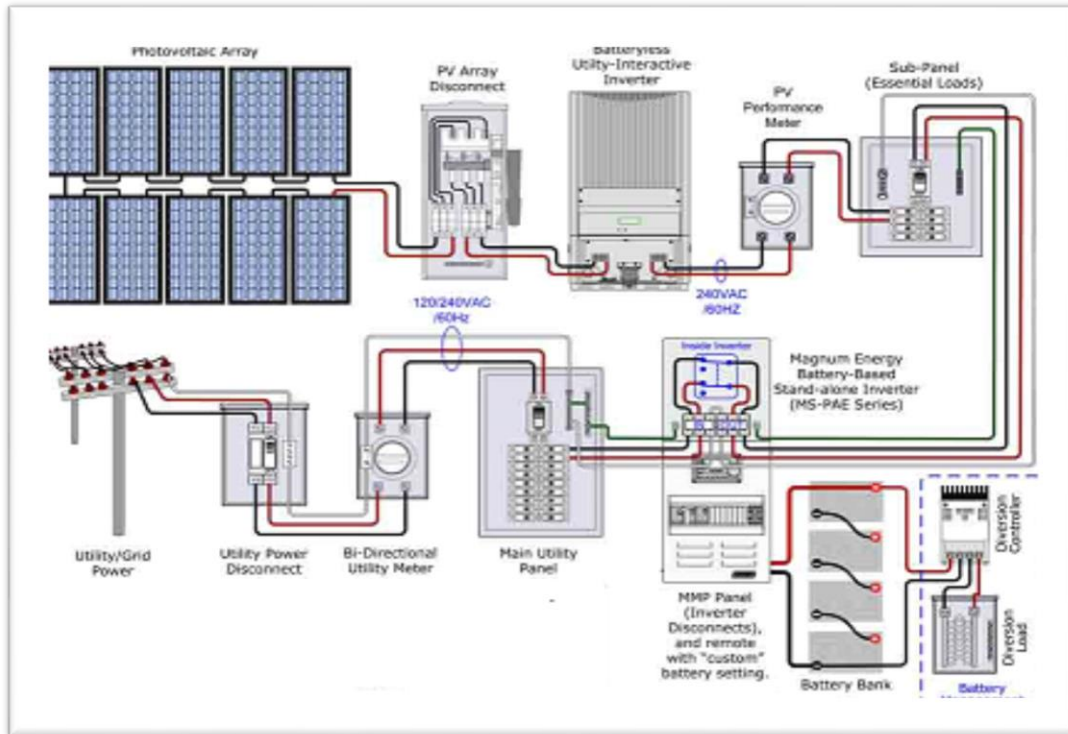


Figura 1.2

1.4 Elementos que conforman una microrred

La microrred proporciona beneficios a los usuarios en calidad y seguridad de servicio, como también a la empresa electrificadora al resolver los problemas de sobrecarga. El núcleo principal de una microrred está compuesto por un sistema de control basado en la tecnología de la información y comunicación, en este sistema permite manejar la red eléctrica como un ente único basado en un sistema de medición avanzado para la gestión de la generación y consumo interno de la red.

Además del sistema de control principal, la microrred está compuesta por sistemas de generación distribuidas que utilizan energías renovables. Las fuentes de generación para las microrredes de especial interés son las de menor generación (<100 kW) con interfaces electrónicas. Estos sistemas, generalmente micro turbinas, paneles solares, aerogeneradores, se ubican cerca de los sitios de consumo.

La estructura de la microrred además contiene acumuladores de DC o baterías, reguladores de carga, inversores de tensión para la conversión de tensión DC en AC,

un sistema de transferencia de potencia y las protecciones necesarias para brindar seguridad a la red eléctrica ante cualquier perturbación o variación inesperada de las condiciones climáticas, fallas por corto circuito o en los equipos.

A continuación se describirán elementos importantes que componen a las microrredes:

1.4.1 Sistemas de generación distribuida

Los sistemas de generación distribuida que conforman una microrred son un grupo de fuentes de energía que se pueden conectar a la red principal o que pueden funcionar de manera autónoma. Generalmente, fuentes de energía renovables como solar, eólica, microturbinas, celdas de combustibles y esquemas de cogeneración. La instalación e implementación de cada uno de estos sistemas dependerá en gran medida de las condiciones climáticas y ubicación geográfica del lugar donde se ubicará la microrred.

1.4.2 Reguladores de carga

Para el correcto funcionamiento del sistema es necesario instalar un sistema de regulación de carga entre la unión de paneles solares y las baterías. Este dispositivo recibe el nombre de regulador y tiene la función de evitar situaciones de carga y sobrecarga de las baterías, con el fin de alargar su vida útil. El regulador trabaja por lo tanto en los dos procesos. En la parte relacionada con la carga, su función es garantizar una carga suficiente al acumulador o batería y evitar situaciones de sobrecarga. Y en la parte de descarga se encargará de asegurar el suministro diario necesario y evitar la descarga excesiva de la batería.

1.4.3 Acumuladores o baterías

Para almacenar la carga que se genera en los paneles solares, los aerogeneradores y otras fuentes dependientes de condiciones variables, se utilizan comúnmente acumuladores o baterías. Con estos, se pueden construir sistemas de tamaño pequeño. Generalmente, se emplean baterías especiales que permiten reducciones de carga hasta del 60% sin daños. Su vida útil bajo estas condiciones llega a ser de 5 a 7 años dependiendo del fabricante y de la operación del sistema. La

configuración de las baterías se diseña de manera que se pueda mantener la tensión de operación mientras se proporciona la potencia necesaria para el funcionamiento de la carga, sin sobrepasar los límites mínimos de almacenamiento de las baterías, según las características definidas por los fabricantes. El número total de baterías dependerá del consumo promedio en amperes-hora y el número de días de autonomía que se estime conveniente.

1.4.4 Inversores

Los inversores son dispositivos que tienen como función cambiar un voltaje de entrada de corriente continua a un voltaje simétrico de salida de corriente alterna, con la magnitud y frecuencia deseada por el usuario o el diseñador. Los inversores se utilizan en una gran variedad de aplicaciones, desde pequeñas fuentes de alimentación para computadoras, hasta aplicaciones industriales para controlar alta potencia. Los inversores también se utilizan para convertir la corriente continua generada por los paneles solares fotovoltaicos, acumuladores o baterías, en corriente alterna y de esta manera poder ser inyectados en la red eléctrica o usados en instalaciones eléctricas aisladas. Existen diferentes tipos de inversores, entre los que se pueden mencionar están: los monofásicos y los trifásicos.

Se distinguen varios tipos de inversores, el inversor de onda sinusoidal es capaz de producir corriente alterna de onda sinusoidal similar a la red, este tipo de inversor es utilizado en sistemas aislados. Los inversores autoconmutados pueden producir electricidad compatible con la red usando su propio circuito interno y utilizan la misma tecnología que los inversores sinusoidales. Los inversores autoconmutados son utilizados en las microrredes debido a su capacidad de producir una señal eléctrica compatible con la de la red. Así, cuando sea necesario, la red eléctrica principal puede ser desconectada y el inversor puede proporcionar la potencia que sea requerida por la carga, sin detener el suministro.

1.4.5 Generadores eléctricos

Los generadores eléctricos son máquinas capaces de poder cambiar la energía mecánica, en energía eléctrica. Esto permite poder transportar la energía a largas distancias, desde donde se genera hasta donde se usa.

Existen diferentes tipos de generadores:

Generadores electromecánicos: Generadores en los que un motor de cualquier tipo mueve el eje de una máquina para producir electricidad. Ejemplos: generadores eléctricos eólicos, generadores eléctricos hidráulico, generadores eléctricos nucleares, etc.

Generadores electroquímicos: Son pilas o baterías recargables de acumuladores. Los acumuladores eléctricos se utilizan para almacenar la corriente eléctrica producida por otros medios y utilizarla cuando sea preciso.

Generadores fotovoltaicos: son dispositivos que permiten convertir la energía contenida en la radiación solar en energía eléctrica mediante el efecto fotoeléctrico. Su componente elemental es la celda solar, compuesta de una delgada capa de material semiconductor normalmente silicio [10]. Los paneles solares, instalados sobre tejado o en tierra, captan la luz del día y la convierten en energía eléctrica, Su nombre completo es paneles solares fotovoltaicos o FV (“Foto” significa “luz” y “voltios” electricidad).

1.4.6 Sistemas de transferencia de carga

Los sistemas de transferencia de potencia o transferencia de carga (STS), son los equipos encargados de la coordinación de inyección de potencia a la carga. Son el eje central de la microrred, pues su función va más allá de coordinar la entrega de potencia. Este equipo debe contar con la tecnología infraestructura necesaria para transferir la alimentación de una carga crítica hacia cualquiera de los sistemas de generación (o la red eléctrica) que conforman la microrred y garantizar el suministro constante y estable en fase, tensión y frecuencia.

Los equipos de transferencia de carga actuales poseen la capacidad de expandir el número de fuentes de los sistemas de generación distribuida a las cuales se encuentran conectadas. Esto, debido a que es posible realizar una configuración con más equipos similares para garantizar la potencia que sea requerida por las cargas. Este equipo debe garantizar la separación completa de los sistemas de generación,

de tal forma que si se detecta una falla en la red o alguno de los sistemas de generación distribuida, este sea aislado de la microrred y la operación continúe de forma normal. El STS cuenta con equipos internos de medición de los parámetros y variables de la calidad de la energía eléctrica que es suministrada, software de control, protocolos de comunicaciones y capacidades de monitorización remota mediante Ethernet.

1.4.7 Protecciones

Las protecciones utilizadas para la conexiones que derivan de los inversores en corriente alterna, son las protecciones comunmente utilizadas en las instalaciones electricas. Para proteger de una sobretención, se colocan cerca de los sistemas de generación dispositivos conocidos como descargadores de tensión o varistores de alta energía. La función de este dispositivo es detectar sobretensiones en un espacio-tiempo determinado y derivarlas a tierra. Para las protecciones de los paneles solares se recomienda utilizar protecciones magnetotérmicas o interruptores seccionadores.

Las protecciones deben responder a las dos estructuras básicas que componen la microrred, la red eléctrica y los sistemas de generación distribuida. Si la falla es en la red eléctrica, la respuesta deseada del sistema es que aisle la microrred de la red principal, tan rápido como sea necesario para proteger las cargas del sistema. Si la falla es dentro de la microrred, el sistema coordinador debe aislar la menor parte posible de la microrred para eliminar la posible falla. Los sistemas de protección convencionales se basan en la medición de la corriente de cortocircuito del sistema.

La coordinación de protecciones es por tanto un componente de diseño de gran importancia. Para esto hay que tener en cuenta que actualmente los sistemas de distribución se diseñan en base a un alimentador a partir del cual se ramifican las fases y las cargas del sistema, por ser un sistema estático, es relativamente sencillo dimensionar las corrientes y potencias estimadas así como los diferentes tipos de corrientes de falla. En una microrred, la complejidad de esta coordinación puede aumentar a medida que existan posibilidades de reconfiguraciones, lo cual implica

diferentes escenarios. La coordinación, por tanto, debe prever este tipo de posibilidades, mediante una adecuada planificación de la microrred.

1.5 Sistemas de control de microrredes

En general existen dos tipos de control para sistemas: centralizado y distribuido. El control centralizado es la forma más común de controlar sistemas de pequeña escala. Consiste en medir todas las salidas del sistema en un punto común y de forma central determinar la entrada de cada planta. La principal ventaja de éste es que las decisiones se toman en base a toda la información del sistema, por lo que se llega a un solo resultado. Sin embargo, también se presentan las siguientes desventajas, las que se amplifican a medida que el sistema crece [11]:

- A medida que el sistema crece la cantidad de información que debe ser transmitida aumenta, lo que hace crecer considerablemente los requerimientos de comunicación en el sistema, así como volver el sistema poco confiable y susceptible a fallas en la comunicación.
- La implementación de este tipo de control requiere de sistemas computacionales con elevadas capacidades.
- La expansión del sistema no es sencilla ya que cada nueva unidad debe conectarse al controlador central.

En el caso de microrredes, el control centralizado en áreas con grandes distancias entre inversores es poco práctico y costoso, porque las señales tardan en llegar y requieren un gran ancho de banda [12].

El caso distribuido consiste en dividir el control del sistema en varios módulos o subprocesos, cada uno con su propio controlador independiente del resto. Para alcanzar un objetivo final, como es el control de frecuencia y voltaje en el caso de las microrredes, cada subproceso intercambia información con los otros. De esta forma, el control distribuido permite evitar los problemas computacionales y de comunicación del control centralizado. Sin embargo, la solución alcanzada no siempre es óptima y única, puesto que el óptimo de cada subsistema no necesariamente es el óptimo global, en algunos casos incluso se puede producir

inestabilidad porque los subprocesos llegan a soluciones incompatibles[11]. Para superar este inconveniente es común realizar estudios de estabilidad previa a la aplicación de las soluciones de los controladores.

1.6 Tipos de microrredes

- Entorno del campus / microgrids institucionales

El enfoque de las microgrids del campus es la agregación de la generación existente en el sitio con múltiples cargas que se localizan en una geografía estrecha en la que el propietario las maneja fácilmente.

- Remoto "fuera de la red" Microgrids

Estas microgrids nunca se conectan a la Macrogrid y en su lugar operan en un modo de isla en todo momento debido a la cuestión económica o posición geográfica. Típicamente, una microgrid "fuera de la red" está construida en áreas que están muy lejos de cualquier infraestructura de transmisión y distribución y, por lo tanto, no tienen conexión con la red eléctrica.

- Base Militar Microgrids

Estos microgrids se están desplegando activamente con el foco en la seguridad física y cibernética para las instalaciones militares para asegurar energía confiable sin confiar en el Macrogrid.

- Comercial e Industrial (C & I) Microgrids

Estos tipos de microgrids están madurando rápidamente en Norteamérica y Asia Pacífico; sin embargo, la falta de estándares bien conocidos para estos tipos de microgrids los limita globalmente. Las principales razones para la instalación de una microgrid industrial son la seguridad de la fuente de alimentación y su fiabilidad. Hay muchos procesos de fabricación en los que una interrupción de la fuente de alimentación puede causar pérdidas de ingresos altas y un largo tiempo de arranque.

1.6.1 Topologías de microrredes

Existen tres formas de clasificación de las microrredes según [13]:

- AC. Donde los elementos se conectan a través de un sistema de conexión en AC en el que se lleva a cabo el intercambio energético, Dentro de la microrred se realiza una distribución de energía eléctrica en AC.
- DC. Donde la distribución de la energía dentro de la microrred se hace en DC. El intercambio energético se hace a través de un sistema de conexión DC y es éste el que se conecta a la red eléctrica a través de un inversor DC/AC. Las cargas en AC se alimentan también a través de inversores.
- Mixta. Es el caso en el que coexisten dos sistemas de conexión, uno en DC conectado a la red eléctrica a través de un inversor y otro AC que puede ser la propia red. Los diferentes elementos se conectan de acuerdo a su naturaleza al sistema de conexión correspondiente.

1.7 Control y manejo de la microrred

El control de la microrred está cargo del sistema de tranferencia de potencia o STS, debido a que este equipo cumple la función de eje central de tranferencia de potencia proveniente de los sistemas de generación distribuida o de la red de servicio público. El STS, debido a los medidores internos que posee, es capaz de realizar un analisis de los diferentes párametros de operación de las dos fuentes redundantes, y de las condiciones de operación de la carga, con el objetivo de decidir si la fuente prioritaria proporciona las mejores condiciones de operación para el correcto funcionamiento de la carga o es necesario hacer la transferencia hacia la fuente de respaldo.

No obstante, para robustecer el control de todos los nodos de conexión y transferencia de energía, las microrredes utilizan medidores inteligentes. Estos medidores son capaces de proporcionar, mediante diferentes protocolos de comunicación, valores en tiempo real de las condiciones de operación de cada uno de los sistemas de generación.

Toda esta integración, entre sistemas de medición y comunicación, permiten la estructuración de una red capaz de operar de forma autónoma y con alta eficiencia, con el fin de garantizar el flujo de potencia hacia la carga, pero teniendo como prioridad el uso de la energía producida mediante los sistemas de energías renovables instalados.

1.8 Características y modos de operación

La microrred tiene dos modos de operación, conectada y aislada de la red principal. A esto, para efectos de control, también se puede sumar el estado en conexión/desconexión de la microrred. En[8], [9] y [14] se estudia el sistema conectado y desconectado de la red; en [15],[16] y [17] se estudia el sistema aislado de la red; y en se estudia el sistema en conexión.

Cuando la microrred opera conectada a la red, la mayoría de las dinámicas de ésta están dadas por la red principal, debido a que en comparación las fuentes de generación de la microrred son despreciables[15].De esta forma, la microrred es vista como una fuente de voltaje AC de capacidad infinita por la red y los inversores operan en modo de entrega de corriente (CSI) y siguen el valor del voltaje fijado por la red. Debido a esto, el sistema de control de la microrred no debe controlar la frecuencia y voltaje para mantener la estabilidad [7].

Cuando la microrred opera aislada de la red, la dinámica de ésta depende de los microgeneradores, del sistema de control y de la red [2]. La generación local sigue a la carga, y normalmente utiliza unidades de almacenamiento y participación de la demanda para aumentar la seguridad de la red [9].

En generales, las microrredes tienen cinco funciones básicas:

- Mantener la amplitud del voltaje y la frecuencia de la microrred en un rango normal cuando opera desconectada de la red [14].
- Distribuir potencia activa y reactiva desde las fuentes de generación a las cargas cuando opera desconectada de la red [14].
- Compartir energía entre los inversores conectados en paralelo cuando opera desconectada de la red, Si no hay un sistema de control adecuado, no se puede compartir carga correctamente por cada unidad. La carga compartida es afectada por la no uniformidad de las unidades, las tolerancias de los componentes, y las variaciones en las impedancias de línea [17].
- Intercambiar potencia con la red principal al operar conectada a ella [14].
- Asegurar un cambio suave desde el modo conectado a desconectado y viceversa [8].

1.9 Tipos de acoplamientos para una microrred

¿Qué es un acoplamiento?

En pocas palabras, el acoplamiento es la transferencia de energía de un medio a otro, por ejemplo, de un alambre metálico a un cable óptico. Esta transferencia de energía puede ser deseable o indeseable.

El término acoplamiento se refiere al punto a punto de conexión. La mayoría de los sistemas fotovoltaicos constan de dos sistemas eléctricos distintos, DC y AC. Cuando estos sistemas emplean la función de respaldo de batería, hay dos puntos de conexión que se pueden hacer con la salida de la matriz solar. La matriz puede conectarse al lado DC del sistema eléctrico o al lado AC. En cualquier caso, se necesita una pieza de equipo para gestionar el conjunto fotovoltaico con el fin de extraer la mayor cantidad de energía de la matriz mediante un seguimiento del punto de potencia máximo (MPPT), así como proporcionar una salida eficiente de la energía solar cosechada.

En resumen, la energía solar cosechada tiene dos caminos de flujo distintos en DC y AC-sistemas acoplados. En los sistemas acoplados de CC, la energía solar cosechada fluye primero a un banco de baterías a través de un controlador de carga y luego a cargas de CA a través de un inversor basado en baterías. En los sistemas acoplados a CA, la energía solar recolectada fluye primero a cargas de CA a través de un inversor acoplado a la red y luego a un banco de baterías a través de un inversor basado en baterías. Además, los sistemas acoplados de CC, como su nombre indica, están conectados en el sistema eléctrico de CC, mientras que los sistemas de acoplamiento de CA están conectados en el sistema eléctrico de CA.

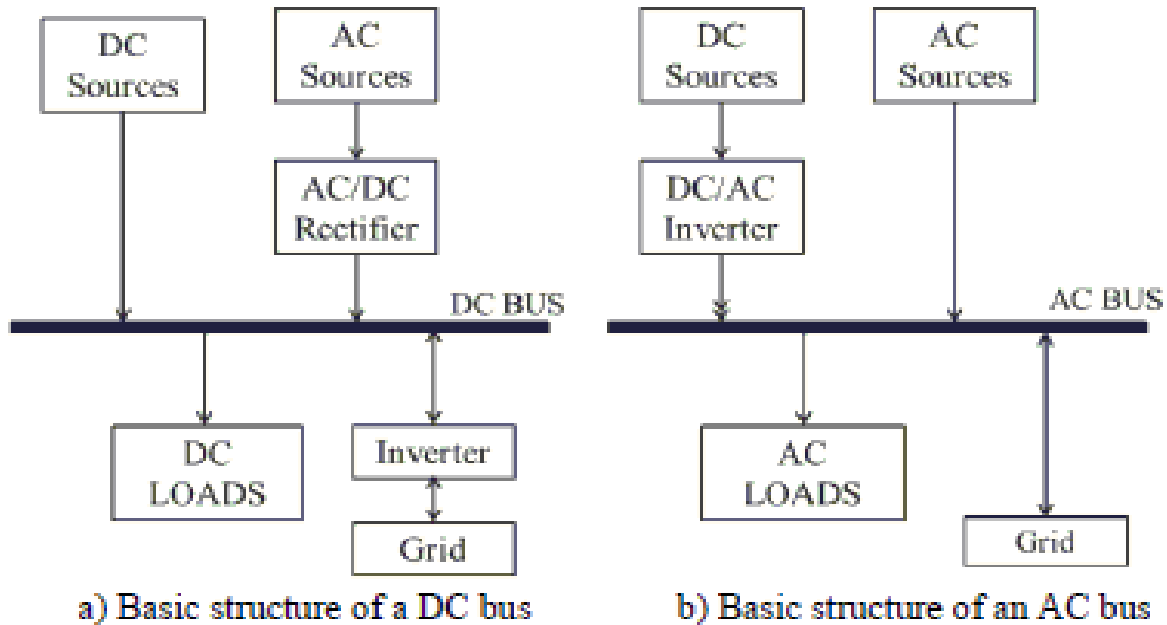


Figura 1.3

Conclusiones del capítulo

En el capítulo se recogen los fundamentos teóricos necesarios que sirven de base a los posteriores capítulos. Se ha presentado un estado del arte en el que se presenta el concepto de microrred como una solución de generación distribuida para la creciente demanda energética. Todo esto gracias a la recopilación de datos atendiendo a autores anteriores los cuales han hecho investigaciones profundas en temas similares.

CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS A EMPLEAR

En este capítulo se expone la metodología empleada para el diseño de la microrred para el docente 1 del ISMMM. Así como la selección y dimensionamiento de los diferentes elementos para el sistema conectado a la red.

2.1 Propuesta para el dimensionado

Los pasos a seguir en el dimensionado que se propone son las siguientes:

- Paso 1 Determinación de la demanda
- Paso 2 Capacidad de generación
- Paso 3 Dimensionar y seleccionar los generadores
- Paso 4, Dimensionado del inversor
- Paso 5, Criterios de selección del acoplamiento

2.2 Determinación de la demanda

Demanda eléctrica y microrredes

La demanda eléctrica juega un importante rol en la planificación de los sistemas eléctricos, ya que gracias a las predicciones de ésta se puede planificar la generación requerida para satisfacer un consumo previsto. Ésta corresponde a la potencia presente en los terminales de un sistema promediada en un intervalo específico de tiempo. La generación instalada debe ser capaz de cumplir con la demanda máxima, la cual cambia durante el día y a lo largo del año, además se debe tener capacidad suficiente para hacer frente a incertezas en la generación y aumentos inesperados en la demanda.

En microrredes, para tener una operación segura es de vital importancia mantener el balance entre la generación y la demanda. Este balance debe mantenerse en tiempo real, ya que las fluctuaciones de voltaje pueden causar serios daños a artefactos y en casos críticos se puede llegar a colapsos del sistema dejando a toda el área, cubierta por la microrred, sin energía. La demanda eléctrica se puede clasificar como

industrial, comercial y residencial. Las demandas comercial y residencial varían estacionalmente, debido al uso de calentadores y aire acondicionado, la demanda industrial es mayormente estable durante el tiempo.

La demanda de energía impone muchas de las características de la instalación, por lo que en la planificación de las necesidades se debe anotar todo lo relacionado con los diferentes equipos eléctricos que serán la carga del sistema. Se deberá calcular la energía que el usuario necesitará diariamente. Para ello se deberá determinar la potencia de todos los equipos de que constará la instalación, individualmente, junto con el tiempo medio de uso de cada uno de ellos.

2.3 Selección de los generadores

Ejemplos de generadores:

Solar: los generadores eléctricos solares transforman los rayos solares en energía eléctrica, que permite abastecer varias formas de uso. La energía producida por los módulos fotovoltaicos, es controlada por un regulador de carga y reserva las energías baterías.



Figura 2.1 generador fotovoltaico

Generadores Diesel: es capaz de suministrar electricidad en todos los casos en los que está disponible el suministro de electricidad, o cuando deje de por alguna razón el suministro de electricidad de la red.



Figura 2.2 Generador Diesel

Eólica: Los generadores eléctricos eólicos funcionan con la fuerza que el viento, Usan los denominados “molinos de vientos”. Este movimiento de rotación es transmitido al eje del generador eléctrico, el cual transforma la energía mecánica de rotación en energía eléctrica. Los molinos se ubican en “parques eólicos”. Las aspas pueden estar vertical u horizontalmente.



Figura 2.3 Generador eólico

Hidráulica: son centrales hidroeléctricas las que producen esta electricidad, y están puesta en lugares donde las aguas fluyan con mucha fuerza.

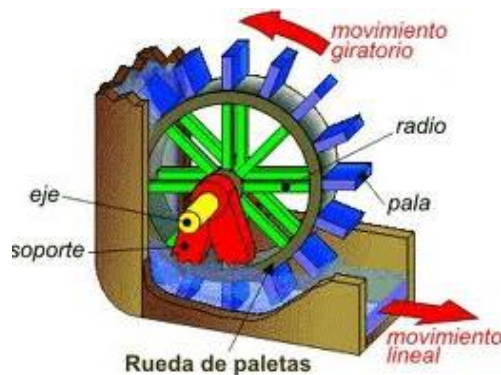


Figura 2.4 Generador hidráulico

Existen varios escenarios donde son utilizados estos generadores:

- Industria
- Comunidad
- Edificación

En el escenario académico la selección primaria la constituyen edificaciones o estructuras acopladas o separables a las que se alimenta con generadores fotovoltaicos.

2.4 Método de dimensionado con PVsyst

En los últimos años han proliferado gran cantidad de aplicaciones informáticas capaces de realizar los cálculos necesarios para el dimensionado de sistemas fotovoltaicos. Estos programas realizan cálculos que permiten tener en cuenta muchas situaciones que, para un ingeniero proyectista, serían muy difíciles de considerar, ya que requieren de mucho tiempo [18]. La figura 2.5 ayuda a entender mejor el funcionamiento de estos programas,

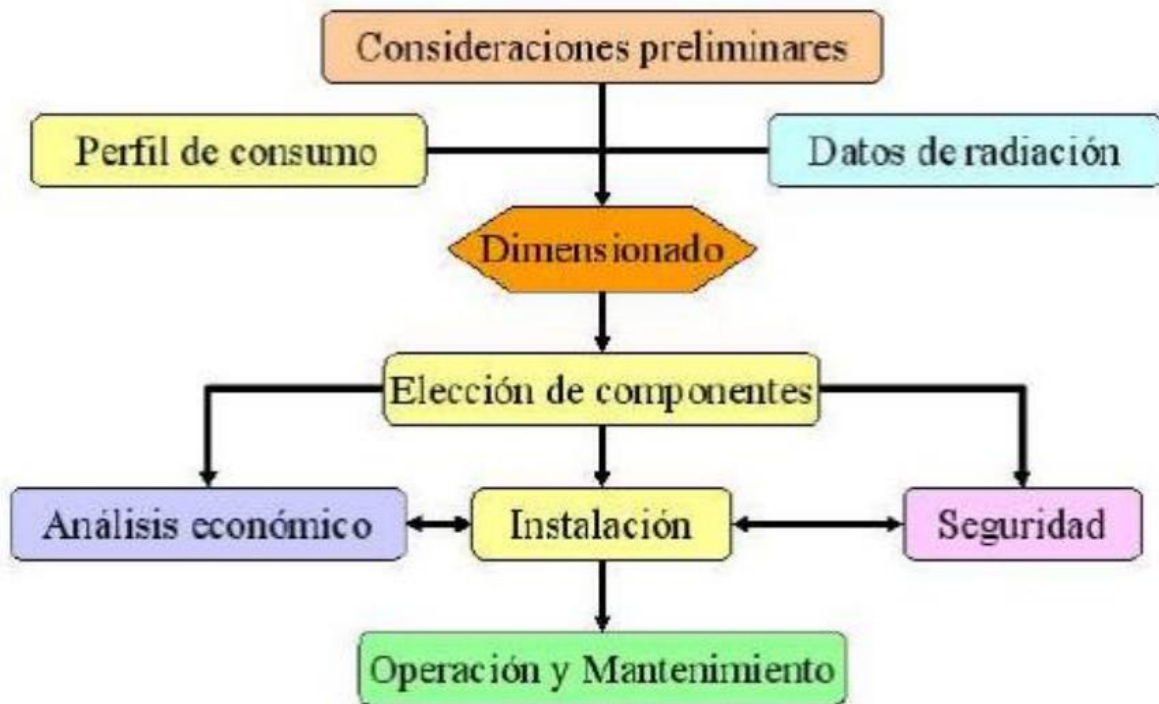


Figura 2.5 Diagrama de flujo del dimensionado

Los métodos de dimensionado tienen en común un objetivo, diseñar el sistema con la mayor fiabilidad y el menor coste, modificando los valores de tamaño del generador fotovoltaico y del acumulador. Sin embargo, habrá aplicaciones en las que se busque más fiabilidad aunque se aumente el coste de la instalación, por ejemplo, sistemas de comunicaciones y, otras que requieran de menor fiabilidad, como algunas aplicaciones domésticas.

Para este trabajo se escogió el software profesional PVsyst 6.60, ya que posee la capacidad de calcular valores diarios de radiación solar a partir de mediciones mensuales. Contiene, además, todos los subprogramas para el diseño, optimización y simulación de cuatro tipos de sistemas: conectados a red, autónomos, bombeo solar y redes de corriente directa. También incluye una base de datos con modelos de módulos FV y modelos de inversores.

2.5 Datos de radiación

El programa PVsyst dispone de los datos de radiación de un gran número de ciudades, sin embargo, Moa no es una de ellas. La otra opción que permite es introducir desde alguna base de datos externa, ya sea de forma manual o automática estos datos.

En este trabajo, se introdujeron de forma manual las coordenadas geográficas del ISMMM, para obtener el comportamiento de la radiación en el lugar del emplazamiento del sistema fotovoltaico. También se configuró el huso horario de Cuba. La figura 2.6 muestra la ventana del PVsyst de configuración de los datos geográficos.

Figura 2.6 Definición del lugar de emplazamiento del sistema (coordenadas geográficas).

La base de datos permite obtener, además de los datos de radiación global sobre superficie horizontal, la difusa, directa, radiación con un ángulo determinado. Se pueden dar los datos en valores horarios, diarios o mensuales. Además, entrega valores de temperatura, humedad.

Usando la aplicación de la base de datos de METEONORM, se obtuvieron los valores mensuales de radiación para 18 grados de inclinación. La tabla 2.1 muestra los resultados obtenidos. Nótese que el mes de julio es el de mayor radiación, mientras que el mes de diciembre es el de menor radiación.

Tabla 2.1 Comportamiento de la radiación solar en Moa

Principio intervalo	GlobHor kWh/m ²	DiffHor kWh/m ²	T Amb °C	GlobInc kWh/m ²
Enero	130.2	54.20	24.30	157.3
Febrero	134.5	55.10	24.60	153.6
Marzo	177.1	67.00	25.20	189.4
Abril	182.7	78.70	25.50	183.0
Mayo	179.2	85.70	26.70	169.7
Junio	168.5	89.70	27.30	157.0
Julio	186.0	94.30	28.30	175.0
Agosto	172.9	83.50	28.30	169.5
Septiembre	168.5	68.80	27.50	176.1
Octubre	148.7	72.10	27.20	164.7
Noviembre	123.8	56.10	25.60	145.8
Diciembre	118.0	49.10	25.19	144.8
Año	1890.1	854.30	26.32	1986.1

2.6 Estudio de cargas del docente 1

Uno de las primeras etapas del dimensionado de los sistemas fotovoltaicos lo constituyen las definiciones de las necesidades de los usuarios finales, es decir, es necesario establecer el perfil de consumo.

En la actualidad el gran porcentaje de cargas a abastecerse con energía eléctrica vienen diseñadas para un consumo de forma sinusoidal y no con voltajes DC, pero en un futuro sí se debería considerar, ya que se ahorraría una gran cantidad de dinero en la inversión DC/AC o viceversa.

Es por eso que este estudio solo se basará en cargas completamente con alimentación AC.

2.7 Dimensionado de los paneles fotovoltaicos

La propuesta del presente trabajo para el sistema, consiste primeramente en implementarlo con los paneles fotovoltaicos fabricados en Pinar del Rio. Se propone el empleo del modelo DSM-250 250 Wp.

Este módulo no se encuentra en la base de datos del PVsyst, por lo que fue necesario crear un nuevo fichero a partir de sus características eléctricas mostradas en la figura 2.7.

En el anexo 1 se muestran las características eléctricas y constructivas del panel fotovoltaico DSM-250.

Figura 2.7 Características eléctricas del panel fotovoltaico DSM-250,

La figura 2.8 muestra el dimensionado de los módulos fotovoltaicos DSM-250. Se necesitan 264 módulos que cubren un área de 431 m^2 , para una potencia total de 68 kW.

Figura 2.8 Dimensionado de los módulos FV DSM-250.

La figura 2.9 muestra las pérdidas por inclinación y orientación distinta a la óptima para optimizar la potencia pico a instalar, o lo que es lo mismo, el número de paneles a instalar.

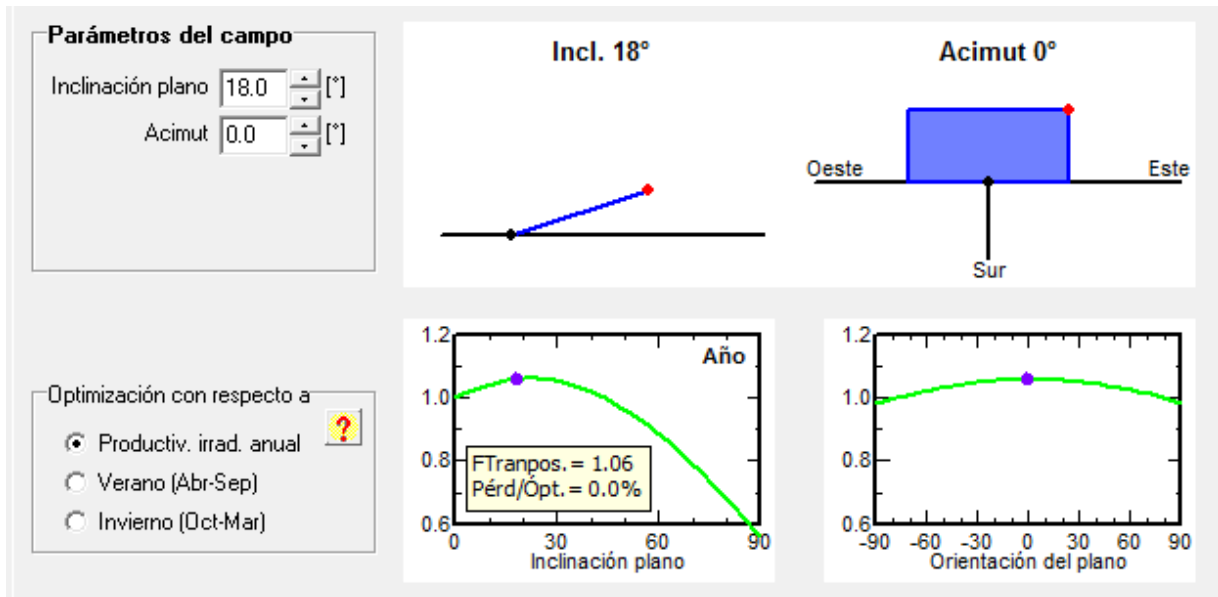


Figura 2.9 Configuración de la orientación e inclinación de los paneles fotovoltaicos,

2.8 Dimensionado del inversor

Las características fundamentales de funcionamiento a tener en cuenta de inversor son las siguientes [19]:

- La potencia nominal, que debe cubrir la demanda de la carga.
- La tensión nominal de entrada, que no será siempre constante, por lo que el inversor debe ser capaz de transformar distintas tensiones continuas de entrada dentro de un determinado margen.
- La tensión nominal de Salida, que puede ser fija o no, según el inversor actúe como fuente de tensión o como fuente de corriente, No obstante, lo más común es que el inversor actúe como fuente de tensión.

Para dimensionar el inversor se debe tener en cuenta la máxima potencia que puede demandar la carga. De manera que se elige un inversor cuya potencia nominal sea algo superior a esta potencia máxima demandada por la carga. No obstante, se debe

evitar el sobredimensionamiento del inversor para hacerlo trabajar en la zona donde tiene mayores rendimientos. Para ello no conviene considerar toda la potencia que puede consumir la carga, sino solamente toda la potencia que puede consumir simultáneamente la carga, aunque, como ya se ha indicado, esto puede resultar problemático.

Se puede dar el caso de que la carga, que está compuesta por diversos equipos no esté siempre en condiciones de absorber el máximo de potencia, ya que cuando funcionan unos equipos otros no lo deben de hacer. En estas circunstancias se elige un inversor con una potencia de trabajo que cubra solo la potencia máxima consumida simultáneamente.

La frecuencia de operación, debe ser muy estable para evitar funcionamientos incorrectos de los equipos.

Teniendo en cuenta estos aspectos mencionados anteriormente, en la figura 2.10 se muestra el dimensionado del inversor seleccionado.

Figura 2.10 Dimensionado del inversor

2.9 Dimensionado del cableado

El dimensionado del cableado debe realizarse teniendo en cuenta los valores máximos admisibles de caída de tensión en cada parte de la instalación. El no considerar correctamente esta cuestión puede suponer importantes pérdidas de energía en el sistema y averías en los equipos.

Estas pérdidas óhmicas deben cumplir la más restrictiva de las dos condiciones siguientes:

1. Verificar las normas electrotécnicas de baja tensión

2. La pérdida de energía debe ser menor que una cantidad prefijada,
Su valor puede calcularse con las siguientes expresiones:

$$PPC = I_2 * RC \quad (1.1)$$

$$RC = \rho * \frac{L}{S} \quad (1.2)$$

Siendo:

PPC: potencia de pérdidas en los conductores (W)

I: corriente que circula por los conductores (A)

RC: resistencia óhmica de los conductores (Ω)

ρ : Resistividad del conductor ($\Omega \cdot mm^2 / m$)

L: longitud de los conductores (m)

S: sección de los conductores (mm^2)

En la figura 2.11 se muestra la configuración del cableado de corriente continua y alterna, nótese que la distancia a emplear es de 20 metros de largo, teniendo un largo significativo a tener en cuenta.

Parámetros térmicos | **Pérdida óhmica** | Calidad módulos - Mismatch | Polvo y suciedad | Pérdidas IAM | Auxiliares

Circuito CC: pérdidas óhmicas en el generador

Resistencia global en el cableado mOhm ☐ Calculada **Cálculo detallado**

o fracción de pérdida en STC % ☐ Defecto

Caída de Tensión a través del diodo V ☒ Defecto

Circuito CA: inversor punto inyección

☒ Largo significativo, a tomar en cuenta

Largo inversor a inyección m

Fracción pérdidas en STC %

STC: Pac = 64 kW, Vac = 400 V Tri, I = 92 A

Caída de tensión en STC (0.6 %)

Transformador externo

☐ Transformador externo presente

Pérdida hierro (valor constante) %

Pérdidas Resistivas/Inductivas % en STC

(cuadrático, $R * I^2$, R = 0.0 mOhm)

Figura 2.11 Configuración del cableado,

2.10 Criterios de selección del acoplamiento

Las microrredes pueden funcionar conectadas a una red principal o en forma aislada [6]. Cuando una microrred se encuentra conectada a la red, ésta es reconocida por la red como un consumo o una fuente de generación. El tipo de acoplamiento es: acoplamiento corriente alterna.

Cómo funciona el acoplamiento de CA

El acoplamiento de CA es el proceso de atar en un inversor / cargador basado en batería adicional fuera de la red. El inversor / cargador funciona junto con su cadena de rejilla existente o micro-inversores, manteniendo el sistema funcionando durante un corte de energía. En los sistemas acoplados a CA el punto de conexión está en el lado de la CA. En este tipo de sistema, el inversor atado a la red es responsable de gestionar el potencial de cosecha de la red a través del punto de potencia máximo (MPPT), así como la salida de la energía solar recolectada (observe que algunos sistemas emplean optimizadores DC que son responsables de MPPT). La salida del inversor atado a la red está conectada a las cargas AC del sitio. En la mayoría de los casos, las cargas de CA del sitio se separan en cargas AC normales y cargas críticas de CA. Las cargas críticas de CA son aquellas que se activarán cuando se pierda energía de la red pública. La parte de respaldo de un sistema acoplado a CA proviene del banco de baterías y de un inversor basado en baterías que toma el relevo de la red durante la pérdida de la red. Cuando la utilidad se desconecta, la energía solar recolectada fluye primero a cargas críticas de CA a través del inversor atado a la red y luego al banco de baterías a través del inversor basado en baterías.

Conclusiones del capítulo

En este capítulo se explica el método de dimensionado con el programa PVsyst, este método de dimensionado tiene un objetivo, diseñar el sistema con la mayor fiabilidad y el menor coste, modificando los valores de tamaño del generador fotovoltaico y del acumulador.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS, VALORACIÓN ECONÓMICA E IMPACTO MEDIO AMBIENTAL

La electricidad es la principal fuente de energía para la realización de la inmensa mayoría de las actividades productivas, económicas, administrativas y de servicios. A lo largo de los años, el precio del combustible ha aumentado considerablemente. Por lo que una disminución en el consumo de combustible del tipo que sea sin lugar a dudas debe reportar un ahorro significativo para el país. La alta demanda mundial en energía ha dañado el medio ambiente. Las emisiones producidas por los combustibles han afectado la calidad del aire y por consecuencia de la salud humana. Por lo tanto es importante que la finalidad de este trabajo aporte al desarrollo socio económico y medio ambiental. En este capítulo se presentará la propuesta de una microrrejilla aplicada al docente 1 del instituto, se muestran los resultados obtenidos en las simulaciones del PVsyst, así como la valoración económica del mismo y las principales ventajas de implementar esta propuesta.

3.1 Descripción del escenario

El edificio Docente #1 consiste en un bloque de pisos es una edificación tipo residencial, tiene 4 pisos de altura, tiene 87 metros de largo y 12 metros de ancho, consta de 4 plantas:

- 1ra planta tiene 15 compartimientos
- 2da planta tiene 52 compartimientos
- 3ra planta tiene 18 compartimientos
- 4ta planta tiene 20 compartimientos

El edificio residencial docente 1 del ISMM presenta un área total en su azotea de 700 m² de los cuales, 500 m² solo están disponibles para la instalación de los módulos fotovoltaicos. Para conformar la microrrejilla en el docente 1 hice un levantamiento y lo contrasté con el reporte de los datos estructurales y energéticos de oficinas

energéticas de la vicerrectoría de aseguramiento y la demanda es de 68kW, (Anexo 2 y Anexo 3),



Foto del docente 1

3.2 Localización

La microrred y todos los elementos inherentes a ella estarán situados dentro de los terrenos propios del docente 1 del ISMM, perteneciente al municipio Moa, sus coordenadas son : 20° 39' 25" Norte, 74° 56' 25" Oeste. El edificio apunta hacia el este – sureste.

El área ocupada por los módulos fotovoltaicos será de 431 m^2 , con un pasillo entre las filas de los paneles de 1,136 m.

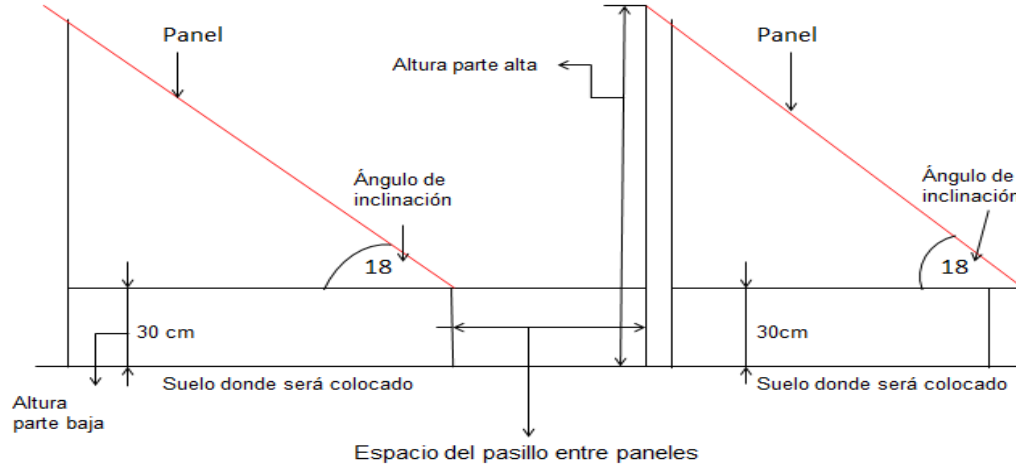


Figura 3.1 Vista lateral de los módulos, Fuente: Elaboración propia

3.3 Consideraciones para las simulaciones

Para el dimensionado del sistema fotovoltaico, se tuvieron varias consideraciones en cuenta:

- Autonomía de las baterías de 1 día. En un primer momento se pensó realizar las simulaciones para una jornada laboral, es decir, para 8 horas, pero el PVsyst solo permite una autonomía mínima de 1 día.
- Emplear paneles fotovoltaicos de producción nacional. Los paneles de la serie DSM que se fabrican en el Combinado de Componentes Electrónicos de Pinar del Rio, tienen una potencia máxima de 250 Wp.

3.4 Dimensionado final del sistema

La tabla 3.1 muestra un resumen del dimensionado del sistema fotovoltaico. El inversor es de Sungrow modelo SG60KTL, con potencia nominal de 60kW, voltaje en el rango de 570-950 V a 50/60 Hz.

Tabla 3.1 Resumen del dimensionado del sistema,

Número de módulos	2 6 4
Módulo en cadena	1 2
Módulo en serie	22
Superficie de los módulos	431m ²
Número de inversores	1
Potencia máxima FV	60.3kW
Potencia nominal (AC)	66kW

3.5 Comportamiento energético del sistema

La simulación genera información sobre el comportamiento del sistema fotovoltaico, en función de los datos que se han introducido anteriormente. Estos datos van desde la presentación de los datos meteorológicos o los de consumo, hasta balances energéticos, tensiones y corrientes de los distintos componentes.

Posiblemente, las gráficas más interesantes son las que se muestran. En ellas se reflejan las pérdidas en el generador (franja morada), las pérdidas en el inversor (franja verde) y la energía entregada a las cargas (franja roja).

Las pérdidas de los módulos FV representan el 20, 7 % (0,88 kWh/kWp/día), mientras que la del sistema electrónico de potencia representa el 2,3 % (0,07 kWh/kWp/día), para una producción de energía útil YF de 86 % (4,49 kWh/kWp/día),

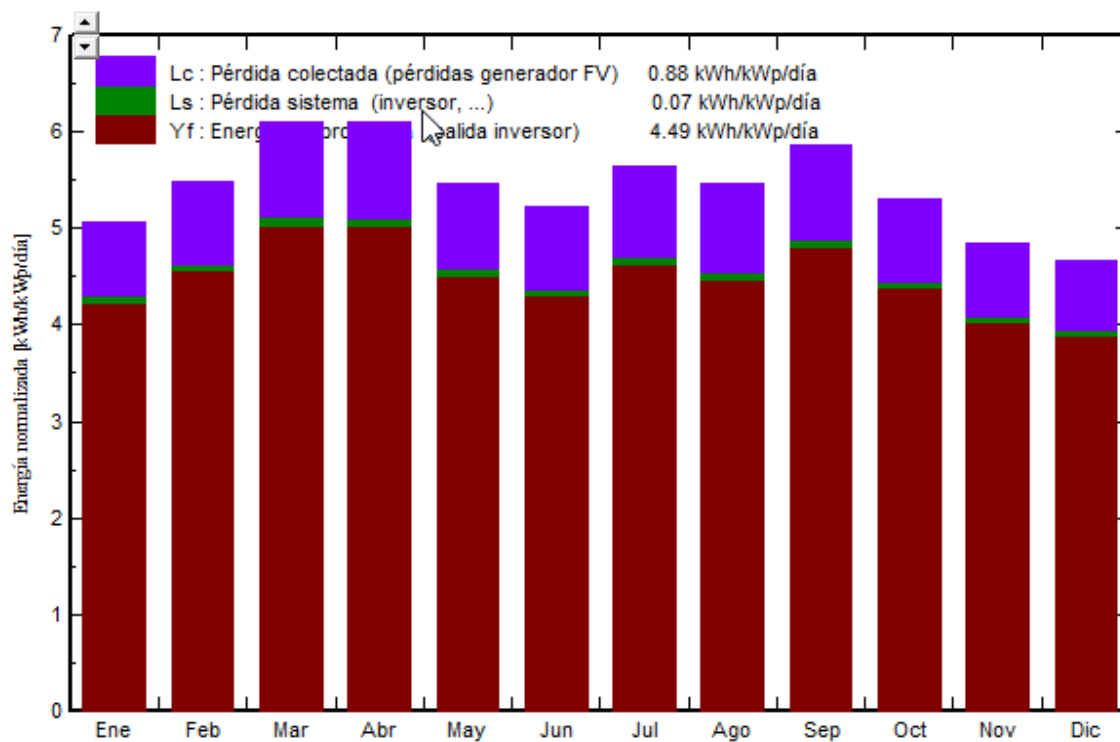


Grafico 3.1 Producción de energía por kWp instalado,

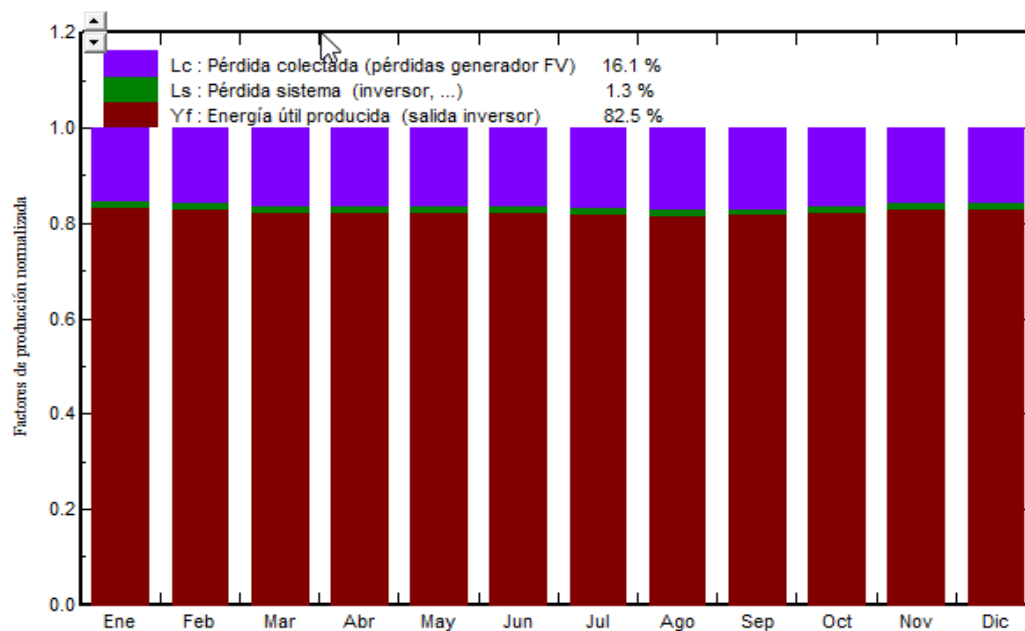


Grafico 3.2 Producciones normalizadas (por kWp instalado).

3.6 Diagrama de pérdidas generales

La figura 3.2 muestra el diagrama de pérdidas como resultado de la simulación. Esta figura es muy importante, puesto que presenta los distintos porcentajes de pérdidas del sistema. Analizándolo, se puede optimizar el sistema para que dichas pérdidas sean mínimas.

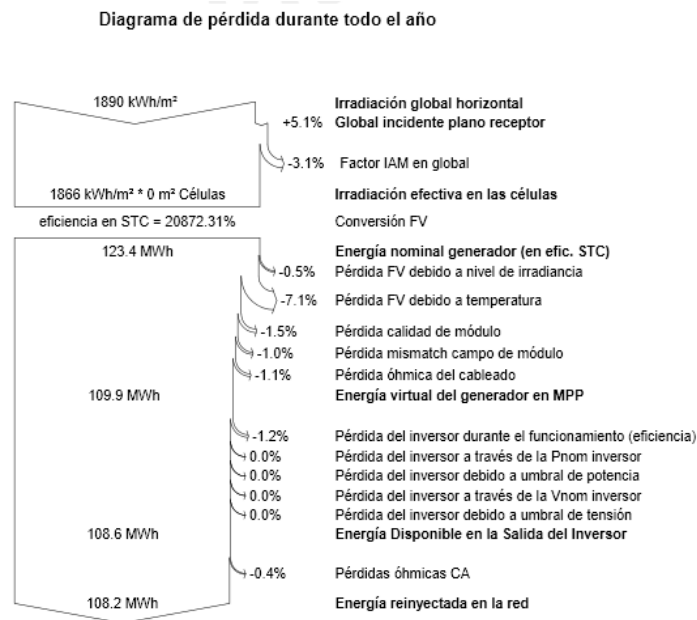


Figura 3.2 Diagrama de pérdidas del sistema fotovoltaico,

Los resultados del PVsyst muestran que la irradiación global sobre el plano horizontal recibida durante un año para la localidad de Moa es de 1890 kWh/m², en total correspondencia con el valor promedio anual para el territorio nacional.

3.7 Seguridad y protecciones

Se debe proteger tanto a los equipos como a las personas que van a hacer uso de la instalación o realizar su mantenimiento.

Medidas de protección del generador fotovoltaico

Al ser la tensión máxima alcanzable por el generador FV inferior a 75 V, no hace falta ninguna medida de protección especial, sólo poner a tierra los marcos de los módulos.

Medidas de protección de las baterías

Se tiene que tener especial cuidado en la renovación del aire, al ser las baterías de plomo. Se recomienda guardar las baterías en un local climatizado y que tenga buena climatización.

Al ser la tensión de las baterías inferior a 75 V, se podrán instalar el regulador y el inversor en la misma sala que éstas.

Medidas de protección del inversor

A la salida del inversor se debe instalar un interruptor magnetotérmico y un diferencial por cada circuito.

3.8 Valoración Técnico-Económica

El análisis de costos constituye una parte importante del diseño de los sistemas fotovoltaicos y no puede abordarse sólo en base al costo inicial de la instalación, el cual, generalmente es superior al de otras alternativas. A pesar de esto, ellos pueden resultar económicamente ventajosos a lo largo de toda su vida útil pues, como se verá más adelante, el costo de operación y mantenimiento es relativamente muy pequeño. Además esta instalación significaría una reducción de potencia activa y energía generada la cual se traduce en un ahorro de combustible que se refleja en la liberación de capacidad en plantas y redes. Para efectuar esta evaluación económica se utiliza el criterio del Valor Actual Neto (VAN) y se rectifica con el método de la Tasa Interna de Retorno (TIR) y la relación Beneficio-Costo (B/C).

3.8.1 Cálculo de acuerdo a la energía generada

De acuerdo a que este es un sistema productor de energía eléctrica, o sea es una fuente de energía renovable, este cálculo se dirige hacia el ahorro de energía producida.

Dada la simulación este sistema es capaz de entregar 108,2 MWh/año, con este dato se calcula el importe en pesos convertibles (CUC) que ahorraría este sistema fotovoltaico en caso de que la energía fuese comprada al SEN (Sistema Electroenergético Nacional).

$$108,2 \text{ MWh/año} * 118,2 \text{ (tarifa eléctrica)} = 12\,789,24 \text{ CUC/año}$$

3.8.2 Cálculo del costo de inversión y el costo salarial

Costo de inversión

Este costo viene dado por el equipamiento a utilizar, la cantidad de estos y el precio de cada uno. En la tabla 3.2 se muestra la relación de los mismos según la cantidad y los precios.

Tabla 3.2 Relación de materiales y equipamientos.

Materiales	Cantidad	Costo en CUC
Inversor SG60KTL	1	1560,2
Módulos fotovoltaicos	264	54 384
Cableado	20 m	24
	Costo total	55 968,2

Cálculo del costo salarial

$$Cs = S_{\frac{b}{h}} * h \quad (3.1)$$

$$S_{\frac{b}{h}} = \frac{S_b}{570.6} \quad (3.2)$$

Dónde:

Cs -Costo salarial en (\$)

h -Horas de trabajo en (h)

$\frac{S_b}{h}$ -Salario del trabajador por hora de trabajo en (\$/h)

S_b -Salario del trabajador en tres meses en (\$)

570,6- Horas de trabajo en tres meses en (h)

La tabla 3.3 muestra los valores de los costos salariales de los obreros vinculados al proceso de puesta en marcha del variador y la red neuronal, todo esto en el período de tres meses.

Tabla 3.3 Costos de los salarios de los trabajadores,

especialidad	cantidad	horas de trabajo	salarios por horas	valor en pesos
ingeniero	2	570,6	1,92	2191,104
técnico	2	570,6	1,52	1734,624
obreros	5	570,6	1,42	4051,26
			costo total	7976,988

$$C_{INV} = \left(\frac{C_{Stotal}}{25} \right) + C_{Totalcompra} \quad (3.3)$$

$$C_{INV} = \left(\frac{7976,988}{25} \right) + 55968,2$$

$$C_{INV} = 56287,28 \text{CUC}$$

Dónde:

C inv.: Costo de inversión

C Stotal: Costo de salario total

C Total compra: Costo total de la compra

3.8.3 Tiempo de recuperación de la inversión,

El tiempo de recuperación (T) del capital invertido es uno de los indicadores que represente los beneficios obtenidos, entre menor sea ese tiempo mayor son las ganancias adquiridas. Esto se determina mediante la ecuación 3.4 siguiente:

$$Ta = \frac{I}{A} \quad (3.4)$$

Dónde:

Ta: tiempo de amortización de la inversión (años)

I: inversión total del proyecto.

A: ahorro generado de acuerdo a la generación producida por el módulo

$$Ta = \frac{56\,287,28\text{CUC}}{12\,789,24\text{CUC}}$$

$$Ta = 4,40 \text{ Años}$$

3.8.4 Valor Actual Neto (VAN)

El método del Valor Actual Neto (VAN) se basa en evaluar los proyectos de inversión de capital mediante la obtención del valor presente de los flujos netos en el futuro, descontados al costo del capital de la empresa o la tasa de rendimiento requerido, Este será calculado en un período de 7 años debido a la vida útil del módulo empleado, [19],

$$VAN = -P + \frac{FNE}{(1+i)^1} + \frac{FNE}{(1+i)^2} + \frac{FNE}{(1+i)^3} + \frac{FNE}{(1+i)^4} + \frac{FNE}{(1+i)^5} + \frac{FNE}{(1+i)^6} + \frac{FNE}{(1+i)^7} \quad (3.5)$$

$$VAN = -56\,287,28 + \frac{12\,789,24}{(1+0,13)^1} + \frac{12\,789,24}{(1+0,13)^2} + \frac{12\,789,24}{(1+0,13)^3} + \frac{12\,789,24}{(1+0,13)^4} + \frac{12\,789,24}{(1+0,13)^5} + \frac{12\,789,24}{(1+0,13)^6} + \frac{12\,789,24}{(1+0,13)^7}$$

$$VAN = 297,15 \text{ CUC}$$

Dónde:

FNE: Flujo Neto de caja----ahorro de la inversión

P: Desembolso inicial,

Este indicador muestra cuánto mayor (o menor) son los ingresos equivalentes de un flujo de caja que los egresos equivalentes de dicho flujo de caja. Por lo que se deduce que si el $VAN > 0$ los ingresos son mayores que los egresos y se obtienen ganancias, si el $VAN < 0$, los ingresos son menores que los egresos y se incurren en pérdidas económicas, y si el $VAN = 0$, los ingresos son iguales a los egresos (no hay ganancias ni pérdidas). Por tanto a mayor VAN, la rentabilidad del proyecto es más atractiva.

3.8.5 Relación Beneficio-Costo (B/C)

La relación Beneficio-Costo (B/C) es el cociente entre el valor presente de los beneficios o ingresos de un proyecto y el valor presente de los costos o egresos del mismo. Los costos se consideran con signo positivo, pues el objetivo de este indicador es evaluar en valor presente, la proporción en que los beneficios superan a los costos, o son superados por los costos del proyecto. Un proyecto es rentable cuando su relación B/C es mayor que la unidad. El índice B/C tiene una relación directa con el VAN, por lo que el uso de estos valores proporciona los mismos resultados acerca de la decisión sobre la rentabilidad del proyecto. Sin embargo, la utilización del índice analizado facilita visualizar la productividad de la inversión realizada.

La expresión de cálculo es:

$$\frac{B}{C} = 1 + \frac{VAN}{I} \quad (3.6)$$

Dónde: I es el costo inicial de proyecto.

$$\frac{B}{C} = 1 + \frac{297,15}{56287,28} = 1,05$$

3.8.6 Cálculo del ahorro de combustible

A continuación, se calcula cuanta energía se ahorra en un año, utilizando la energía fotovoltaica de la instalación diseñada con respecto al consumo que actualmente existe en el docente¹ alimentándolas del Sistema Electroenergético Nacional. Teniendo en cuenta que el comportamiento de la demanda en el docente¹ es prácticamente constante, se determina cuánto equivale este ahorro de energía, en combustible dejado de consumir y pesos ahorrados al país por este concepto.

El consumo anual de energía de dicha instalación se calcula mediante la ecuación:

$$E = P * T * 365 \quad (3.7)$$

Donde

P: Potencia del sistema (kW),

T: Tiempo de radiación máxima (h)

$$E = 108200 \text{ kW}$$

Cálculo del ahorro de combustible

Luego de haber obtenido los resultados propuestos, se estima que los paneles fotovoltaicos producirán una energía:

Anual Total: 108200kWh.

Se tiene que:

Ca-Costo del combustible ahorrado en un año,

$$Ca = Cc * E(\text{año}) \quad (3.8)$$

Cc - Costo promedio del combustible $Cc = 261.52 \text{ CUC} / \text{ton}$

Sustituyendo en la ecuación 3.8 se obtiene que:

$$Ca = 261.52CUC / ton * 108.2MWh / año$$

$$Ca = 28296.46CUC / año$$

3.9 Procedimiento del cálculo económico

Como horizonte temporal de la inversión se considera 25 años, pues es el tiempo de duración de las celdas fotovoltaicas.

3.10 Efecto medioambiental

Uno de los impactos más importantes a la hora de realizar un proyecto es su consecuencia sobre el medio ambiente, sea positivo o negativo, este resulta en medidas que se deben seguir analizando, para eliminar las condiciones indeseables.

Aun cuando en el mundo se estudian varias opciones para la explotación de energías alternativas, el consumo de combustible en las Centrales Termoeléctricas no es nada despreciable encontrándose en un tercio del combustible fósil que actualmente se extrae de la corteza terrestre. La emisión de gases producto de la quema de combustibles fósiles es un severo problema que en la actualidad afecta seriamente nuestro planeta.

Durante el proceso de quema de combustible fósil en los hornos de las centrales termoeléctricas se emiten a la atmósfera una serie de gases perjudiciales al planeta, estos gases se enumeran a continuación:

- SO_2 y SO_3 (Dióxido de Azufre y Trióxido de Azufre),
- NO y NO_2 (Monóxido de Nitrógeno y Dióxido de Nitrógeno),
- Partículas de Cenizas,
- Productos de la combustión incompleta, mecánica y química como son:

CO (Monóxido de Carbono),

$C_{20}H_{12}$ (Benzopireno),

CH_4 y C_2H_4 (Hidrocarburos),

Para determinar la reducción de emisiones de contaminantes por concepto de ahorro de energía se utiliza la siguiente ecuación:

$$\left(\frac{g}{kWh} \right) * 10^{-6} \text{ Emisiones (t / año)} = \text{factor de emisión (g / kWh)} * 10^{-6} \quad (3.9)$$

En la Tabla 3.4 se muestran los factores de emisión de contaminantes a utilizar para determinar las emisiones por la fórmula antes expuesta.

Tabla 3.4 Factor de emisión de contaminantes,

Impactos ambientales	Contaminantes	Factor de emisión g/kWh
lluvias acidas	NO x	3,41
gases dañinos	CO 2	0,23
efecto invernadero	CO	799
Hidrocarburos	HC	0,083
Lluvias ácidas	SO 2	0,0984

Para la determinación de la reducción de emisiones de gases es necesaria la cantidad de energía ahorrada anualmente y haciendo uso de la tabla 3.4 donde se encuentran los factores de emisión se pueden determinar las emisiones de contaminantes de forma siguiente:

Lluvias ácidas (NO_x): $\text{Emisiones} = 3,41 * 108200 * 10^{-6} = 0,369 \text{ ton / año}$

Gases dañinos (CO_2): $\text{Emisiones} = 0,23 * 108200 * 10^{-6} = 0,025 \text{ ton / año}$

Efecto Invernadero (CO): $\text{Emisiones} = 799 * 108200 * 10^{-6} = 86,452 \text{ ton / año}$

Hidrocarburos (HC): $\text{Emisiones} = 0,083 * 108200 * 10^{-6} = 0,009 \text{ ton / año}$

Lluvias ácidas (SO_2): $\text{Emisiones} = 0,0984 * 108200 * 10^{-6} = 0.011 \text{ ton / año}$

Con la cantidad de energía que se genera con el Sistema Fotovoltaico diseñado se deja de emitir al medio ambiente un total de 86,866 toneladas de contaminantes al año y al cabo de 25 años, una cantidad de 2171.65 toneladas.

CONCLUSIONES GENERALES

- El desarrollo del marco teórico de la investigación permitió establecer los fundamentos teóricos necesarios para la comprensión del objeto de estudio.
- La generación de energía de los módulos aprovechando el espacio disponible en el Edificio Docente #1 es equivalente a la energía necesaria para satisfacer su potencia instalada.
- Aprovechando esta tecnología en las superficies de cubiertas disponibles en las demás áreas docentes y administrativas, se podría aumentar significativamente la potencia instalada de módulos fotovoltaicos y con ello, un ahorro sustancial de energía eléctrica.
- La microrred como tal se constituye en una alternativa económicamente viable, socialmente aplicable y de bajo impacto medio ambiental.

RECOMENDACIONES

- Comparar los resultados obtenidos en PVsyst con otros software profesionales.
- Utilizar la aplicación en PVsyst como una herramienta didáctica para fines docentes en pregrado y de investigación en posgrado en el ISMMM.
- Presentar los resultados del presente trabajo al claustro de profesores de la carrera de Ingeniería Eléctrica, para que sea estudiado en las asignaturas de energías renovables.
- Presentar los resultados del presente trabajo al Consejo Energético del ISMMM, para que sea valorado como una alternativa más en la generación de energía eléctrica.

Bibliografía

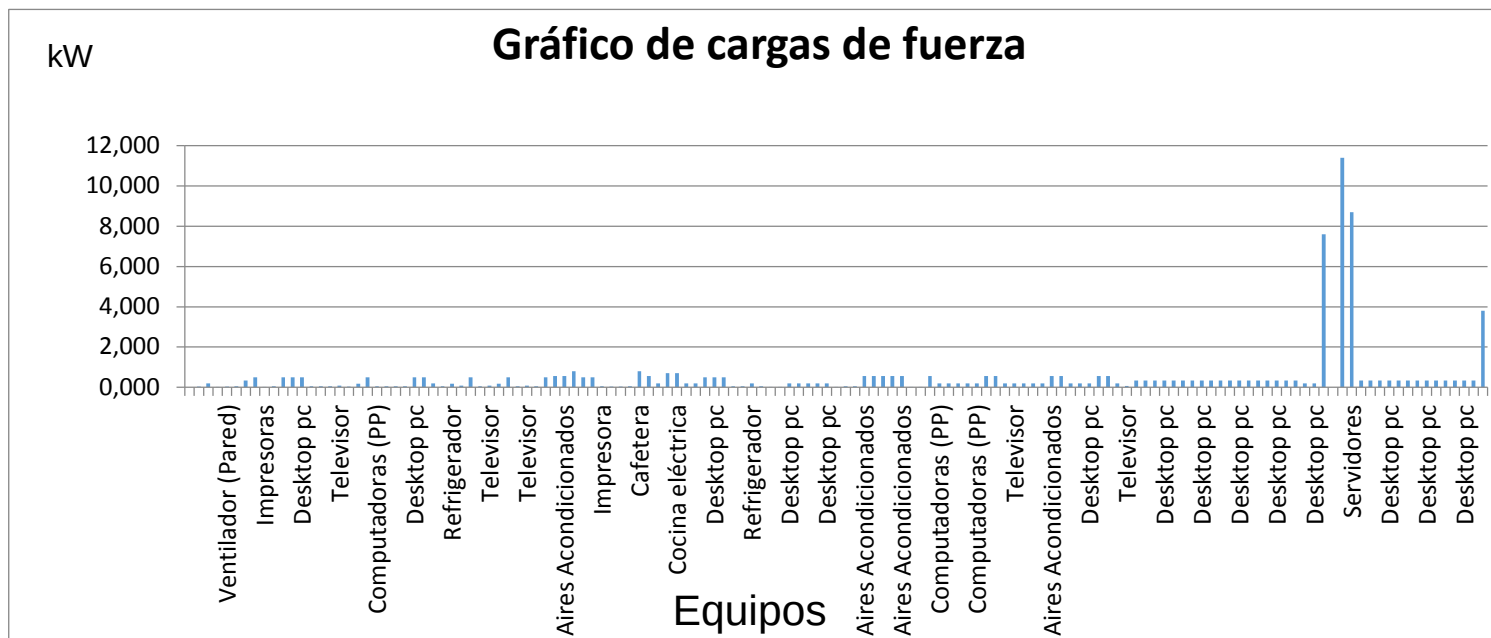
- [1] C. M. Escudero, "Instalación fotovoltaica aislada para torres de comunicaciones.," 2010.
- [2] M. P. y. T. C. G. Nagaraju Pogaku, "Modeling, analysis and testing of autonomous operation of an inverter based microgrid," March 2007.
- [3] A. J. A., "Alfonso. J. A. (2009). Microrredes, una alternativa micro para un mundo cada vez más macro," Maestría, Colombia, 2009.
- [4] A. A. R. Lasseter, ""The CERTs microgrid concept."." 2002.
- [5] F. R. Allende, ""Modelo y simulación orientada al análisis de una microrred eléctrica con generación fotovoltaica."," 2010.
- [6] J. H. P. y. H.-J. L. Jong-Yul Kim, ""Coordinated Control Strategy for Microgrid in Grid- Connected and Islanded Operation."," 2011.
- [7] M. A. P. y. T. Spooner, ""A Survey of Techniques Used to Control Microgrid Generation and Storage during Island Operation."," 2006.
- [8] W. y. H. Zhangjie, " "Control strategy of microgrid inverter operation in grid connected and grid disconnected modes."," 2011.
- [9] T. C. G. y. M. Prodanovic, *Control of inverter-based micro-grids*, 2007.
- [10] W. G. FERNÁNDEZ, "Análisis de Sensibilidad de la Modelización de Sistemas Fotovoltaicos con distintos Métodos de Medida de la Irradiancia Solar.," ingeniería, Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid (UC3M). 2016.
- [11] D. D. S. R.K Boel, G. Nijse, J.M. Schumacher y J.H. van Schuppen, "Approaches to modelling, analysis, and control of hybrid systems.," 2012.
- [12] Y. A.-R. I. M. y. E. F. El-Saadany, "Adaptive decentralized droop controller to preserve power sharing stability of paralleled inverters in distributed generation microgrids.," 2008.
- [13] M. Rivas Aguado, David Miguel "Microrredes eléctricas en Navarra," ingeniería Universidad Industrial Santander, 2012.
- [14] Y. M. L. F. Luo, Chi K. Tse y K. H. Loo, "A triple-droop control scheme for inverter-based microgrids," 2012.
- [15] M. P. y. T. C. G. Nagaraju Pogaku, "Modeling, analysis and testing of autonomous operation of an inverter based microgrid.," March 2007.
- [16] L. D. y. P. S. Jia Yaoqin, "Improved droop control of parallel inverter system in standalone microgrid.," in *8th International conference on power electronics - ECCE Asia*, The Shilla Jeju, Korea 2011.
- [17] H. J. A. Tuladhar, T. Unger y K. Mauch, "Control of parallel inverters in distributed AC power systems with consideration of line impedance effect.," 2014.
- [18] P. J. Trujillo, "Sistema fotovoltaico autónomo para casa de campo en Colmenar (Málaga, España)." ingeniería, Universidad Internacional de Andalucía, 2010.
- [19] A.-N. MOHAMED, "Propuesta de diseño de un sistema Fovovoltaico conectado a la red para el CNEA," ingeniería FACULTAD DE ENERGIA ELECTRICA, 2014.

ANEXOS

ANEXO 1 Modelo del panel DSM-250

Especificaciones		
Celda	Celda Solar de silicio Multicristalino 156 X 156 mm	
No. De celdas y conexiones	60 (6X10)	
Dimensiones del módulo	1650 mm X 990 mm X 40 mm	
Cubierta frontal	Vidrio Templado con capa anti reflexiva	
Material del marco	Aleación de aluminio anodizado	
Peso	20 Kg	
Características eléctricas		
Modelo	DSM-250	
Voltaje a circuito abierto (Voc) [V]	37,7	
Voltaje en el punto de máxima potencia (Vmp) [V]	30.5	
Corriente de corto circuito (Isc) [A]	8,55	
Corriente en el punto de máxima potencia (Imp) [A]	8,19	
Potencia máxima a STC (Pm) [Wp]	250	
Tolerancia, [%]	±3	
STC: 1000 W/m ² , 25°C, AM 1,5		
Límites		
Temperatura de operación	-40 a +85°C	
Voltaje máximo del sistema	1000 VDC	
Valor Máximo del fusible de la serie	15A	
Parámetros de las características térmicas		
NOCT	[°C]	45
Coeficiente de temperatura (Isc)	[%/°C]	0.065
Coeficiente de temperatura (Voc)	[%/°C]	-0.34
Coeficiente de temperatura (Pmp)	[%/°C]	-0.43

Anexo 2



Anexo 3

