

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Electroenergética



TRABAJO DE DIPLOMA

Dimensionamiento óptimo de sistemas fotovoltaicos interconectados a red.

Autor: *Carlos A. Castellón de la Torre.*

Tutor: *M.Sc. Rodolfo Arias García.*

Cotutor: *Dr. Ignacio Pérez Abril.*

Santa Clara

2015

"Año 57 de la Revolución"

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Departamento de Electroenergética



TRABAJO DE DIPLOMA

Dimensionamiento óptimo de sistemas fotovoltaicos interconectados a red.

Autor: *Carlos A. Castellón de la Torre.*

e-mail: ccastello@uclv.edu.cu

Tutor: *M.Sc. Rodolfo Arias García.*

e-mail: rodolfoag@vc.copextel.com.cu

Cotutor: *Dr. Ignacio Pérez Abril.*

Santa Clara

2015

"Año 57 de la Revolución"



Hago constar que el presente trabajo de diploma fue realizado en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas como parte de la culminación de estudios de la especialidad de Ingeniería Eléctrica, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la Universidad.

Firma del Autor

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

Firma del Tutor

Firma del Jefe de Departamento
donde se defiende el trabajo

Firma del Responsable de
Información Científico-Técnica

PENSAMIENTO

Nunca consideres el estudio como un deber, sino como una oportunidad para penetrar

en el maravilloso mundo del saber

Einsten, Albert

DEDICATORIA

A mis padres y mi hermano por su apoyo incondicional, cariño y paciencia, gracias por siempre estar ahí para mí.

A mi abuelita Lilia Rodríguez que en paz descanse, estoy seguro que estaría muy orgullosa de ver por terminado lo que un día comencé.

A mis tíos Olivio y Carmen Elena aunque estén lejos siempre han estado presente.

En fin a todos mis amigos.

AGRADECIMIENTOS

Son varias las personas que han aportado un poco de confianza y ayuda en este recorrido que ya llega a su fin, pero es imposible dejar pasar por alto a mi tutor Rodolfo Arias por su dedicación en todo este tiempo y sobre todo por todos los conocimientos transmitidos, verdaderamente muchas gracias.

TAREA TÉCNICA

1. Realizar una revisión bibliográfica sobre la generación fotovoltaica.
2. Desarrollar una metodología para la predicción del inversor adecuado de acuerdo al sistema fotovoltaico.
3. Desarrollar un software para determinar la capacidad de generación fotovoltaica en el suelo, cubiertas planas e inclinadas y seleccionar inversores de inyección a red.

Firma del Autor

Firma del Tutor

RESUMEN

Con el paso del tiempo las instalaciones fotovoltaicas han ido ganando terreno en la integración a los sistemas eléctricos y se presentan como una variante prometedora en la integración de una manera vertiginosa en la actualidad.

Para alcanzar este objetivo es necesario continuar reduciendo los costos de los sistemas. No obstante, la utilización óptima de la energía solar fotovoltaica solo puede alcanzarse si se toman en cuenta las condiciones locales en el momento del diseño de la instalación. No es suficiente utilizar el equipamiento de mayor calidad, resulta decisivo darle el uso adecuado y dimensionar correctamente la instalación para lograr la armonía de todo el equipamiento que la integra para conseguir su máxima eficiencia en explotación.

Para facilitar el trabajo de los proyectistas en tal sentido este trabajo consiste en el desarrollo de una aplicación computacional, confeccionada en *Matlab* que lleva a vías de hecho una metodología que permite dimensionar de forma óptima los sistemas fotovoltaicos de inyección a red.

El software posibilita de una manera fácil configurar instalaciones y desarrollar disímiles análisis por parte del proyectista al contar con: herramientas, amplias bases de datos de equipamiento existente en el mercado y un ambiente amistoso para desarrollar los cálculos y análisis.

TABLA DE CONTENIDOS

PENSAMIENTO	i
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
TAREA TÉCNICA	iv
RESUMEN	v
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. GENERALIDADES DE LOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.	4
1.1 Características de las energías renovables.	4
1.2 Energía solar fotovoltaica.	7
1.2.1 Tipos de sistemas fotovoltaicos.	8
1.3 La energía solar fotovoltaica en los sistemas energéticos descentralizados.	9
1.4 Tecnologías de inversores para sistemas conectados a red.	9
1.4.1 Inversor Central.	10
1.4.2 Inversor <i>String</i>	10
1.4.3 Inversores Multi- <i>string</i>	11
1.4.4 Inversores con módulos integrados.	11
1.4.5 Regulación automática de la frecuencia de potencia efectiva.	11
1.4.6 Mantenimiento estático de la tensión mediante potencia reactiva.	12
1.5 Herramientas de diseño y análisis.	13
1.6 Matlab como herramienta.	16
1.7 Conclusiones parciales.	17
CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.	¡Error! Marcador no definido.

2.1	Estructura del sistema fotovoltaico de inyección a red.....	18
2.2	Dimensionado óptimo de las instalaciones fotovoltaicas.....	19
2.2.1	Límites eléctricos del inversor.....	20
2.3	Criterios para optimizar la rentabilidad o la eficiencia.....	21
2.4	Consideraciones sobre la eficiencia del inversor.....	22
2.5	Arreglo fotovoltaico.....	23
2.5.1	Modelo del módulo fotovoltaico.....	24
2.5.2	Cálculo de la capacidad de generación fotovoltaica.....	25
2.6	Inversores de inyección a red.....	25
2.7	Transformador y sistema electroenergético.....	25
CAPÍTULO 3. DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE.....		¡Error! Marcador no definido.
3.1	Generalidades.....	27
3.2	Herramientas.....	29
3.2.1	Datos geográficos.....	29
3.2.2	Base de datos de componentes.....	32
3.2.3	Simuladores.....	37
3.3	Diseño del proyecto.....	38
3.3.1	Datos generales del proyecto.....	38
3.3.2	Cálculos del proyecto.....	39
3.3.3	Ejemplo de cálculo.....	45
3.3.4	Casos de estudio.....	46
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		50
Conclusiones		50
Recomendaciones		51

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52
ANEXOS	54

INTRODUCCIÓN

Las fuentes tradicionales de generación de energía, los combustibles fósiles, se están agotando a un ritmo acelerado. Según los pronósticos actuales terminarán agotándose en el transcurso de este siglo, además el empleo de estas fuentes de energía tales como el petróleo, gas natural o carbón acarrea consigo problemas como la progresiva contaminación debido a las emisiones de CO₂ y otros gases contaminantes, causantes del calentamiento global y los cambios climáticos. De ahí la necesidad de reorientar el enfoque de generación energética de la humanidad, buscar fuentes de energía alternativas, renovables que aseguren el futuro energético, la producción de energías limpias.

No es por tanto una cultura o un intento de mejorar el medio ambiente, sino una necesidad a la que el ser humano se va a ver abocado, independientemente de nuestra opinión, gustos o creencias [1].

En cualquier caso, en la combinación de energías renovables empleadas no es posible dejar de lado la energía fotovoltaica. Aunque la corriente fotovoltaica no está disponible las 24 horas del día, tiene un gran valor: genera electricidad sobre todo a mediodía, cuando mayor es la necesidad energética. La generación de la corriente fotovoltaica se produce principalmente de forma descentralizada y, con ello, contribuye a la descarga de las redes, por último y no menos importante, el sol, en contraposición a las fuentes de energías fósiles, es un proveedor de energía prácticamente inagotable.

En el Sexto Congreso del Partido Comunista de Cuba se ha discutido y analizado el proyecto final de los Lineamientos de la Política Económica y Social del Partido y la Revolución, para actualizar el modelo económico cubano, con el objetivo de garantizar la continuidad e irreversibilidad del Socialismo, el desarrollo económico del país y la elevación del nivel de vida de la población, donde varios de sus artículos (135; 247; 253) abordan el

aprovechamiento de las distintas fuentes renovables de energía, priorizando aquellas que tengan el mayor efecto económico, concibiendo las nuevas inversiones, el mantenimiento constructivo y las reparaciones capitalizables con soluciones para el uso eficiente de la energía, y definir así una política tecnológica que contribuya a reorientar el desarrollo industrial y que comprenda el control de las tecnologías existentes en el país; a fin de promover su modernización sistemática atendiendo a la eficiencia energética, eficacia productiva e impacto ambiental, y que contribuya a elevar la soberanía tecnológica en ramas estratégicas. Considerar importar tecnologías, la capacidad del país para asimilarlas y satisfacer los servicios que demanden, incluida la fabricación de piezas de repuesto, el aseguramiento metrológico y la normalización [1].

Por todo esto se aboga por la energía solar fotovoltaica, al ser esta una de las más prometedoras de todas en nuestro país en cuanto a su disponibilidad, al estar nuestro país en una región favorecida por el recurso solar, pensando así en el aprovechamiento de los espacios disponibles para la generación fotovoltaica para interconectarlas a la red eléctrica planteando como objetivos:

Objetivo General:

Desarrollar un software que permita dimensionar óptimamente los sistemas fotovoltaicos interconectados a la red eléctrica.

Objetivos específicos:

- Realizar una revisión bibliográfica sobre la generación fotovoltaica.
- Desarrollar una metodología para la predicción del inversor adecuado de acuerdo al sistema fotovoltaico.
- Desarrollar y validar en Matlab un software, que permita determinar la capacidad de generación fotovoltaica en el suelo, cubiertas planas e inclinadas.

Hipótesis.

Para desarrollar la tecnología fotovoltaica en una forma óptima y fiable es esencial constar con herramientas que permitan: analizar diferentes configuraciones, evaluar los resultados e identificar la mejor solución.

En la medida que desde la etapa de proyecto se realicen con mayor precisión estos análisis, se dará un mejor escenario a las fuentes de energía renovables, en particular a la tecnología fotovoltaica, que se desarrolla rápidamente.

En tal sentido el desarrollo de programas computacionales encaminados a este fin, permiten desarrollar disímiles análisis de forma rápida y eficiente, propiciando utilizar las mejores soluciones técnicas y económicas.

Organización del informe.

Inicialmente en este informe se explicará la temática general que enmarca el trabajo realizado, presentando los objetivos y alcance generales del mismo.

En el primer capítulo se presenta un breve análisis de la bibliografía consultada, indicando los aportes de cada publicación, contrastando finalmente con la contribución del presente trabajo.

En el segundo capítulo se hace referencia a los fundamentos teóricos necesarios a tener en cuenta para la realización del software.

En el tercer capítulo primeramente se explica cómo funciona el software, luego se analiza un ejemplo de cálculo y se analizan diferentes casos en el cálculo de proyecto de un sistema fotovoltaico interconectado a red.

No constituye objeto de este trabajo la evaluación económica de las soluciones por cuanto esto será tratado de manera independiente e integral para todo el software en estudios posteriores.

Finalmente se presentan las conclusiones más relevantes de este trabajo, así como las recomendaciones que permiten continuar avanzando en este tema.

CAPÍTULO 1. GENERALIDADES DE LOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.

Los problemas a nivel mundial relacionados con el abastecimiento energético no se deben atribuir solamente a los perjuicios ocasionados por el clima y el medio ambiente, sino también al consumo creciente y a la anunciada escasez de recursos energéticos fósiles. El consumo global en aumento, sobre todo de la energía eléctrica ha causado grandes cambios en el ámbito de las redes de alimentación, así como también en la renovación y aplicación de las centrales eléctricas. Las repercusiones actuales en la disponibilidad y calidad de la energía atraviesan serias consecuencias, por lo que se exigen soluciones que se puedan aplicar técnicamente y que respondan a las exigencias del desarrollo sostenible. La utilización de las energías renovables durante las últimas décadas, ha demostrado que se puede contribuir sustancialmente a favor de la solución de este problema, no solo basándose en criterios ecológicos, sino también por motivo de la estructura descentralizada de las energía renovables sobre todo aquellas que usan de manera directa la radiación solar, la energía solar térmica y la fotovoltaica.

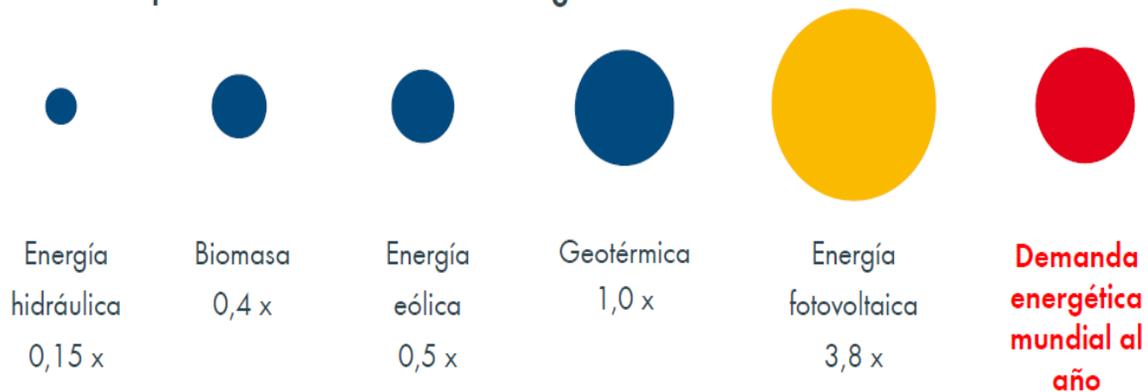
Las tecnologías de energía renovables presentan una alternativa económica y ambiental factible para la provisión de energía a las comunidades y para la expansión de la capacidad eléctrica instalada, adicionalmente estas tecnologías pueden disminuir la contaminación del medio ambiente, sin embargo existen barreras que dificultan un mayor desarrollo de este tipo de energía: la falta de conocimiento de las tecnologías y las capacidades institucional y técnica aún incipientes [1].

1.1 Características de las energías renovables.

Se denomina energía renovable a la energía que se obtiene de fuentes naturales virtualmente inagotables, ya sea por la inmensa cantidad de energía que contienen, o porque son capaces de regenerarse por medios naturales. Entre las energías renovables se cuentan la eólica, geotérmica, hidroeléctrica, mareomotriz, solar, undimotriz, la biomasa y los biocombustibles.

Las energías renovables son ilimitadas y permiten reducir las emisiones nocivas para el clima. Solo con energía fotovoltaica se podría cubrir 3,8 veces la demanda energética mundial (figura 1.1).

Cobertura posible de la demanda energética mundial



►► **Tan solo utilizando energías renovables se podría cubrir varias veces la demanda energética mundial.**

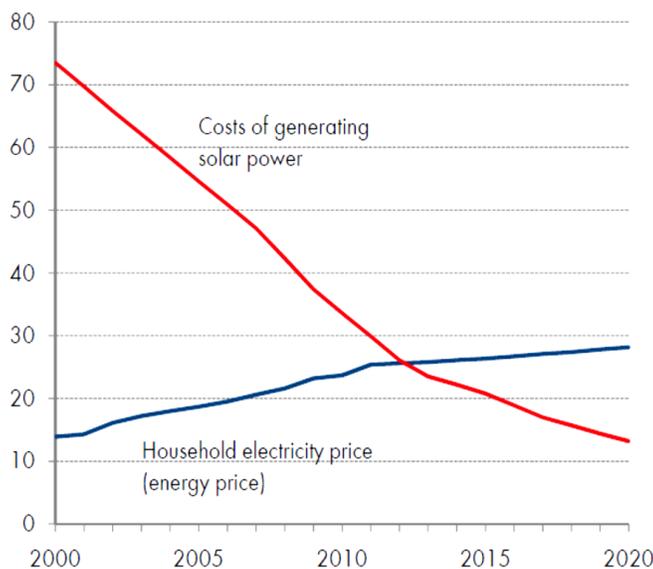
Figura 1.1: Cobertura posible de la demanda energética mundial [2].

La energía solar fotovoltaica cuenta con innumerables ventajas:

- Proviene de una fuente energética inagotable, el Sol.
- No contamina, no produce emisiones de CO₂ u otros gases.
- No precisa de un suministro exterior, no consume combustible, ni necesita presencia de otros recursos como el agua o el viento.
- No produce ruidos.
- Reduce la dependencia energética de los países.
- La mayor producción coincide con las horas de mayor consumo.
- Los sistemas son sencillos y fáciles de instalar.
- Elevada versatilidad, los sistemas pueden instalarse en casi cualquier lugar y las instalaciones pueden ser de cualquier tamaño.
- Las instalaciones son fácilmente modulables, con lo que se puede aumentar o reducir la potencia instalada fácilmente según las necesidades.
- Las plantas apenas requieren mantenimiento y tienen un riesgo de avería muy bajo.

- Los módulos gozan de una larga vida.
- Los sistemas resisten condiciones climáticas extremas: granizo, viento, frío...
- Es un sistema de aprovechamiento de energía idóneo para zonas donde el tendido eléctrico no llega o es difícil y costoso su traslado.
- Cada vez en un mayor número de países, se está imponiendo una legislación que permite el autoconsumo, generando notables ahorros económicos para propietarios e inversores de plantas solares fotovoltaicas.
- Está demostrado que la generación de energía limpia es un valor añadido a la imagen individual de las personas o empresas, contribuyen a su desarrollo. Valores como “responsabilidad”, “sostenibilidad”, “preservación del medioambiente”, “tecnología”, “compromiso”, “futuro” e “innovación” son valores positivos con los que se identifica a las marcas que promueven el uso de las energías renovables.

Precio de la electricidad en céntimos de euro por kilovatio/hora



- > Solamente en los últimos diez años los costes de producción de la energía solar se abarataron un 60%.
- > La energía solar ya es más barata que la energía de consumo doméstico.
- > Una energía barata a largo plazo requiere mayores incentivos a corto plazo que estimulen las inversiones en las tecnologías de sistemas y de almacenamiento.

Figura 1.2: Costo de la energía solar contra costo de energía convencional [2].

Además de las características anteriores, el costo de los componentes disminuye a medida que avanza la tecnología, como evidencia del abaratamiento progresivo de la energía solar en el transcurso de los años (figura 1.2) [3].

1.2 Energía solar fotovoltaica.

La energía solar fotovoltaica es aquella que se obtiene por medio de la transformación directa de la energía del sol en energía eléctrica, este proceso ocurre por medio de fotocélulas o celdas fotovoltaicas, que están hechas de cristales especiales, el cristal tiene junturas semiconductoras del tipo P y tipo N cerca de la superficie, al incidir la luz solar sobre dicha área, separa los electrones de los átomos, entonces hay dos áreas diferenciadas con campo eléctrico; una donde incide la luz solar, que es donde se encuentran los electrones (cargas negativas) y la otra es la opuesta donde están los huecos (cargas positivas). Al unir las dos áreas por medio de un conductor metálico en ambas caras se genera una diferencia de potencial y por lo tanto los electrones circulan para igualar las cargas, generando una corriente eléctrica constante mientras incida la luz solar sobre la fotocélula, por lo tanto se está en presencia de una conversión fotovoltaica, que es la transformación de la energía solar en eléctrica.

Las fotocélulas pueden conectarse de dos formas en serie y en paralelo, formando así el denominado módulo fotovoltaico, la primera conexión suma los voltajes de cada fotocélula. En la segunda conexión el voltaje es constante.

Los principales problemas técnicos que se plantean para el aprovechamiento de la energía solar son los siguientes:

- Gran dispersión de la energía solar sobre la superficie terrestre.
- Carácter aleatorio y variable en el tiempo de la intensidad de la radiación solar.

En resumen la cantidad de radiación solar (energía) que recibirá un sistema fotovoltaico está condicionada por factores de tipo astronómico y geográfico (posición relativa sol-tierra y lugar donde esté ubicado el sistema) y factores de tipo atmosférico (presencia de nubes, vapor de agua, ozono,...). En el diseño y los estudios de viabilidad de los sistemas de aprovechamiento de la radiación solar es necesario cuantificar la energía que producirán los sistemas que dependen principalmente de la irradiación solar (energía) que incide sobre el sistema [4].

1.2.1 Tipos de sistemas fotovoltaicos.

Los sistemas fotovoltaicos pueden clasificarse como:

- **Sistemas fotovoltaicos autónomos:**

Son aquellos que se encuentran en lugares remotos alejados de la red eléctrica, entre ellos pueden citarse los *Solar House System* y los sistemas fotovoltaicos autónomos propiamente dichos con inversores para el funcionamiento de equipos que utilizan corriente alterna. En ambos casos se requieren de baterías para el almacenamiento de energía.

- **Sistemas fotovoltaicos aislados:**

Son sistemas que se conectan de manera descentralizada con inversores y estos a su vez se interconectan entre sí, digamos en una comunidad formando una isla eléctrica, donde además existe al menos un inversor bidireccional con baterías que se encarga de la gestión del sistema para que funcione correctamente, actuando como el nodo de balance del sistema electroenergético aislado [5].

- **Sistemas interconectados a red:**

Existen dos posibles variantes, los sistemas instalados en el suelo, normalmente plantas de grandes capacidades que se conectan al sistema mediante inversiones de gran capacidad. Estos sistemas pueden ser con una orientación fija de los módulos fotovoltaicos o con seguimiento solar lo que complejiza la instalación fotovoltaica; pero propicia un incremento en la energía que se obtiene de la instalación de alrededor del 25%. La otra variante son los sistemas instalados en edificaciones urbanas fundamentalmente en cubiertas y fachadas de los inmuebles, al igual que en el caso anterior se conectan al sistema mediante inversores de conexión a red. En ambos casos estos inversores representan la parte esencial de la planta solar, pues regula, controla y optimiza la instalación fotovoltaica [6].

- **Sistemas fotovoltaico de bombeo solar:**

Está compuesto por un conjunto de módulos fotovoltaicos y un inversor que optimiza la potencia que se puede extraer de la instalación fotovoltaica, generalmente se oferta como un kit donde la bomba posee incorporado el variador de velocidad que optimiza

el funcionamiento de la instalación, no requiere de baterías para su funcionamiento, el líquido extraído se almacena en tanques en forma de energía potencial [7].

1.3 La energía solar fotovoltaica en los sistemas energéticos descentralizados.

Hasta hoy en día se abastecen a los consumidores de energía eléctrica por medio de centrales eléctricas aisladas, por lo que se necesitan largos caminos de transmisión y extensas redes de distribución. Estas redes de abastecimiento suministran a los consumidores con electricidad a una frecuencia y voltaje constante. Sería razonable que esta infraestructura se complementase con sistemas descentralizados para la generación de calor y electricidad. Este abastecimiento descentralizado se caracteriza por unidades de abastecimiento relativamente pequeñas que se encuentran en la cercanía del consumidor.

Esto posibilita un aprovechamiento más intenso tanto de la electricidad como del calor y una mejora en el empleo de los potenciales energéticos existentes en el lugar. Adicionalmente se minimizan las pérdidas energéticas ocasionadas por transformaciones de voltajes y por largas redes de transmisión y distribución. En resumen esto conlleva a un aumento de la eficiencia total, lo que propicia una mejora económica en la explotación de las redes y el cumplimiento de los criterios de desarrollo sostenible.

Las bondades y beneficios del abastecimiento energético descentralizado, corresponde justamente al carácter descentralizado de las energías renovables, en especial las que utilizan la radiación solar de manera directa, como se planteó con anterioridad. Este concepto se puede llevar a cabo, dependiendo de las condiciones regionales, bien sea por conexión de una instalación fotovoltaica (en valores de kW o MW), a la red de abastecimiento público o bien por el montaje de un sistema aislado de consumidores alejados o no conectados a la red [1].

1.4 Tecnologías de inversores para sistemas conectados a red.

En la actualidad, la aplicación más importante de la energía fotovoltaica, lo constituyen las instalaciones fotovoltaicas conectadas a la red eléctrica. Existen diversos métodos conceptuales basados en la teoría de sistemas eléctricos para este tipo de instalaciones. Todos tienen en común, que el generador fotovoltaico está directamente conectado a la red eléctrica,

por medio de un inversor y así inyecta la energía solar a la red. Como se señaló anteriormente los inversores juegan un importante papel en cuanto a la eficiencia energética y fiabilidad del sistema. Su función no es únicamente la transformación de la corriente directa generada por los módulos fotovoltaicos en corriente alterna con el voltaje y la frecuencia deseada, sino también se encarga de hacer trabajar el campo fotovoltaico en el punto de máxima potencia (Del Inglés MPPT) de forma que el sistema pueda extraer en cada instante de tiempo la máxima potencia a los módulos fotovoltaicos. Los inversores deben además supervisar la red eléctrica, en lo que a posibles averías se refiere e interrumpir la conexión en caso de fallas de la red [8].

Hoy en día existen cuatro topologías de inversores y configuraciones de las instalaciones, que ofrecen buenas soluciones técnicas, teniendo en cuenta las condiciones locales individuales.

1.4.1 Inversor Central.

Los módulos fotovoltaicos de una gran instalación (más de 10kW), se conectan en serie en dependencia del voltaje máximo que soportan los inversores a la entrada (los que se denominan en la literatura *Strings*), y estos a su vez conectando un diodo en cada rama, se conectan en paralelo hasta cubrir la capacidad de la planta y los requerimientos del inversor. El generador fotovoltaico estructurado de esta manera, está unido con un único inversor central en el lado de corriente continua. Los inversores centrales ofrecen una elevada eficiencia de escasos gastos específicos. La adaptación incorrecta de los módulos al igual que una sombra parcial, disminuyen el aprovechamiento óptimo de cada *string* del generador fotovoltaico y como consecuencia reduce la eficiencia energética. La fiabilidad de la instalación está limitada, al depender de un único inversor. Una avería del inversor central conlleva una paralización de toda la instalación [9].

1.4.2 Inversor *String*.

Al igual que en el caso del inversor central el campo fotovoltaico se subdivide en *string* según el voltaje máximo que puede admitir el inversor a su entrada, sin embargo cada *string* se une con un inversor *string* propio. Como resultado de ello cada *string* trabaja de esta manera en su propio MPPT. Esta técnica minimiza la aparición de adaptaciones defectuosas, reduce pérdidas ocasionadas por sombras y evita las pérdidas ocasionadas por diodos *string* y el

cableado del generador en el lado de corriente continua. Estas cualidades técnicamente superiores, conducen a una reducción de gastos del sistema y aumentan la eficiencia energética, así como la fiabilidad de la instalación.

1.4.3 Inversores Multi-*string*.

El inversor Multi-*String* permite la conexión y el funcionamiento en el MPPT de varias *string*, por medio de un regulador estático de tensión de corriente directa conectados a cada *strings* y estos a su vez, a un punto común a la entrada del inversor, de esta manera se ofrece una solución compacta y económica, utilizando a su vez todas las ventajas de la técnica *string*. Instalaciones fotovoltaicas compuestas por *string* de diferente orientación geográfica (diferentes ángulos azimutales), y por lo tanto con una potencia temporalmente variable entre ellos en dependencia de la posición del Sol, pueden funcionar con una eficiencia óptima. Estos inversores se emplean en instalaciones fotovoltaicas de intervalos de potencia media, de 3 a 10 kW [10].

1.4.4 Inversores con módulos integrados.

En este tipo de inversor cada uno de los módulos posee un inversor propio, por lo que las pérdidas por adaptación son mínimas. No obstante poseen una eficiencia inferior a los inversores *strings*. Estos sistemas requieren de mayor cableado en el lado de corriente alterna ya que cada módulo de la instalación tiene que estar unido a la red. Este tipo de sistema es apropiado para instalaciones fotovoltaicas de potencias bajas desde 50 hasta 400 W.

Todos los inversores hasta aquí tratados están disponibles en el mercado. La elección del inversor apropiado se debe basar en las condiciones de empleo establecidas.

1.4.5 Regulación automática de la frecuencia de potencia efectiva.

La frecuencia en las redes de corriente alterna se mantiene constante dentro de unos límites, normalmente en 50 o 60 Hz. Si la red consume menos energía que la que suministran los generadores, aumenta la frecuencia provocando que los inversores fotovoltaicos tengan que desconectarse de la red súbitamente, incluso con subidas de frecuencia reducidas, aunque el valor límite solo se hubiera superado durante poco tiempo. Los equipos han de restringir paulatinamente su potencia de red ascendente y pueden desconectarse de la red con un

aumento de la frecuencia más potente. En la actualidad los inversores pueden estabilizar la red a la vez que se evita la desconexión súbita de muchas instalaciones fotovoltaicas, algo cada vez más problemático para la regulación de la red [11].

1.4.6 Mantenimiento estático de la tensión mediante potencia reactiva.

Además de la frecuencia, la potencia de red también tiene que mantenerse dentro de los límites definidos, especialmente en la red de distribución. Con su capacidad para preparar la potencia reactiva, los inversores fotovoltaicos pueden contribuir a garantizar la calidad de la tensión requerida en los puntos correspondientes de enlace con la red. Concretamente, gracias a la potencia reactiva los equipos pueden reducir notablemente las subidas de tensión no deseadas. Los inversores con capacidad de potencia reactiva se emplean también para la compensación de contribuciones de potencia reactiva existente y no deseadas de la red, provocados, por ejemplo, por transformadores, grandes motores o líneas de cables más largos. De este modo pueden evitarse en gran medida las tradicionales medidas de expansión de la red. Un estudio de Roland Berger encargado por la organización alemana Bundersverbandes Solarwirtschaft e. V. (BSW) ha dado a conocer que en el suministro de potencia reactiva se esconde el mayor potencial para la integración de la red en instalaciones de generación descentralizadas. En consecuencia, la capacidad de absorción de las redes eléctricas existentes podría elevarse hasta el 200%. Para ajustar la proporción de potencia reactiva existen varias posibilidades: la primera es que el operador de la instalación puede usar valores nominales fijos dados por el operador de la red y la segunda posibilidad es la regulación de la proporción de la potencia reactiva según una curva característica que depende de la tensión de la red medida en el punto de conexión o de la potencia efectiva del inversor [11].

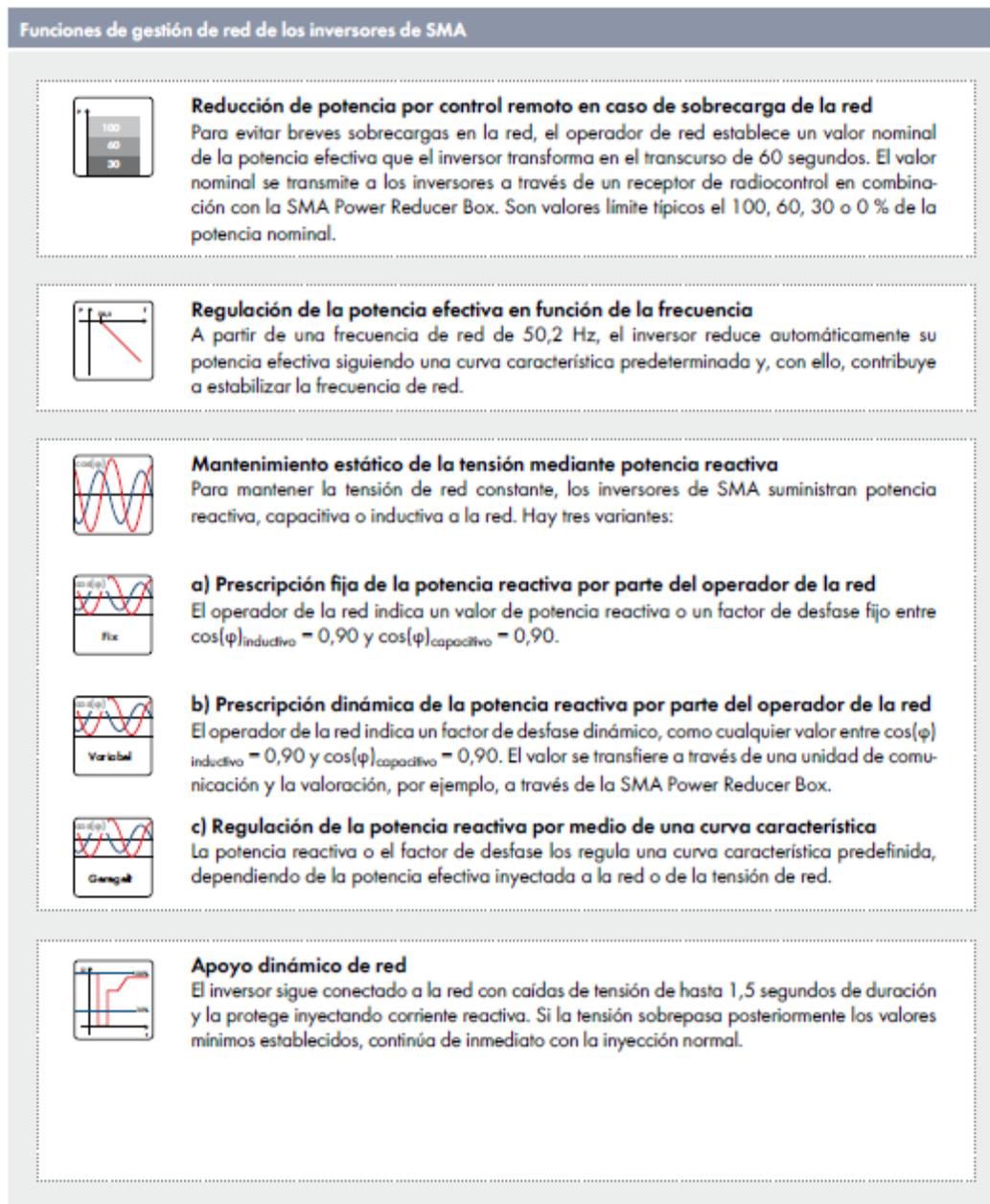


Figura 1.3: Funciones de gestión de red de los inversores de SMA [11].

1.5 Herramientas de diseño y análisis.

Existe una gran variedad de herramienta para el diseño y análisis de sistemas fotovoltaicos. Se pueden encontrar desde simples herramientas de dimensionado, usadas por instaladores o diseñadores de sistemas, hasta herramientas de gran complejidad, necesarias para científicos e ingenieros en la optimización y diagnóstico de sistemas. Pese a esta gran variedad de herramientas es difícil encontrar una que englobe todos los requisitos precisos a lo largo de

las etapas de planificación, diseño o explotación de una instalación fotovoltaica: pues los requerimientos necesarios son diferentes en el caso de pre-viabilidad, diseño de sistemas, optimización, etc. [12].

Para ello se ha recurrido a organizar los programas destinados al análisis de sistemas fotovoltaicos en tres categorías: viabilidad, dimensionado y simulación.

Herramientas para el cálculo de la viabilidad: Las herramientas para el cálculo de la viabilidad de una instalación fotovoltaica realizan automáticamente los cálculos que un ingeniero normalmente realizaría manualmente. Permite determinar el tipo de sistema fotovoltaico que sería más adecuado para la aplicación especificada, proporcionando información sobre la cantidad de energía proporcionada o el costo económico de la puesta en marcha de la instalación. Este tipo de herramienta básicamente realiza la automatización de cálculos simples que requieren poco trabajo interactivo por parte del usuario. Se tratan de herramientas usadas habitualmente por vendedores, promotores de sistemas, consultores sobre sistemas de energía, etc. Es decir, profesionales interesados en evaluar las posibilidades de instalación de un sistema fotovoltaico.

Entre el abanico de aplicaciones disponibles en el mercado destacan:

- *FATE2-P*. Se trata de un programa de análisis financiero creado por la NREL (*National Renewable Energy Laboratory*) y el departamento de investigación económica de Princeton. Este programa calcula el costo y el tiempo de amortización del sistema fotovoltaico. Tiene en cuenta parámetros financieros como la tasación, créditos, impuestos, etc.
- *RETScreen*. Creado por CEDRL (*CANMET Energy Diversification Research Laboratory*). El núcleo de esta herramienta consiste en la integración y estandarización del análisis de un proyecto de energía renovable basado en Microsoft Excel. Proporciona un asistente para determinar la producción de energía, el costo del ciclo de vida, etc. Soporta diferentes tipos de energías renovables entre las que se incluyen los sistemas fotovoltaicos.

Herramientas de dimensionado: Este tipo de herramienta permite dimensionar un sistema. A partir de unos requerimientos energéticos determinan el tamaño óptimo de cada uno de los diferentes componentes del sistema. Proporcionan información detallada sobre el balance

energético en los componentes, indicando además los períodos críticos en los que puede darse una pérdida de carga durante el año. Las herramientas de dimensionado normalmente son pequeños paquetes de software. Suelen tener un entorno de diseño sencillo para facilitar su uso y, en la mayoría de casos, este tipo de software lo proporciona el propio fabricante.

Entre las aplicaciones más remarcables en el dimensionado de sistemas se hallan:

- *Design Your System*. De la compañía *Helyos Technology*, permite el dimensionado de sistemas autónomos a partir del balance energético previsto. Aporta información sobre el número necesario de paneles solares y baterías de una base de datos con productos comerciales para cubrir las necesidades de potencia de un perfil de carga definido por el usuario.
- *Nsol*. La compañía *Orion Energy Corporation* dispone de esta aplicación para el dimensionado de sistemas autónomos con baterías. El programa utiliza algoritmos estadísticos para el cálculo del dimensionado. La información necesaria para los cálculos consiste en la localización, irradiancia, características de paneles solares y baterías, y un perfil de carga.

Herramientas de simulación: Las herramientas de simulación aportan la visión opuesta a las herramientas de diseño. El usuario especifica la naturaleza y dimensiones de cada componente y la aplicación proporciona un análisis detallado de las características del sistema. La precisión de los cálculos y el tiempo de simulación requerido varían dependiendo del nivel de detalle necesario y del tipo de datos proporcionados. Se utilizan para verificar el dimensionado del sistema, investigar el impacto de futuros cambios en la carga, analizar el funcionamiento en condiciones extremas, investigar la sensibilidad del diseño respecto a parámetros concretos, o analizar el impacto que causaría la avería o deterioro de componentes. Estas herramientas de diseño son creadas normalmente por universidades o centros de investigación especializados.

Algunas de las principales aplicaciones para la simulación de sistemas fotovoltaicos son:

- *PVSYST*. La aplicación integra análisis de viabilidad de dimensionado y simulaciones para sistemas fotovoltaicos. Una vez definidas las cargas, el usuario selecciona los diferentes componentes de una base de datos y el programa automáticamente calcula las dimensiones de cada componente. El módulo de simulación permite visualizar el

resultado de este dimensionado y otro módulo de viabilidad financiera permite hacer un rápido análisis económico basado en la localización.

- *ILSE*. Software desarrollado por la Universidad Técnica de Berlín, permite realizar numerosos cálculos y simulaciones, entre los que destacan diagramas de órbitas solares, determinación de las características de células fotovoltaicas o influencia de la temperatura en los paneles solares.
- *ASHLING*. Desarrollado por el consorcio formado por NMRC-Ireland, ARMINES-France, ICI-Romania e IMIO-Poland, Ashling 7.0 es un programa de modelado y simulación de sistemas fotovoltaicos, tanto autónomos como conectados a red. Entre sus características principales destacan el diseño, análisis, simulación y análisis de costos de sistemas fotovoltaicos.
- *PVSOL*. Aplicación creada por *Valentin Energy Software* de Berlín, permite planificar, diseñar, y simular sistemas fotovoltaicos. Permite obtener informes detallados, gráfica o numéricamente, con una resolución máxima de una hora de sistemas solares autónomos o conectados a red. Entre sus prestaciones destacan poder tener en cuenta ángulos de incidencia de la irradiancia y sombras en los paneles solares, disponer de bases de datos de productos comerciales y variables climáticas, creación de perfiles de carga para simular el consumo y análisis de costos económicos.

1.6 Matlab como herramienta.

Matlab fue creado por Mathworks en 1984 y ha sido ampliado y mejorado en numerosas ocasiones [13]. Es un entorno abierto de cálculo numérico que ofrece avanzadas herramientas de manipulación matemática con un potente e intuitivo lenguaje de programación. Mathworks proporciona numerosos paquetes de librerías, toolboxes, para ampliar las prestaciones de análisis en múltiples campos de matemática aplicada. También incorpora interfaces con tarjetas de adquisición y control para enlazar el núcleo de cálculo con sistemas externos. Así como un enlace a internet mediante un servidor Web. Pese a que las rutinas son potentes y variadas, el desarrollo de simulaciones de sistemas complejos no es trivial [12].

Matlab se puede clasificar como una herramienta genérica con arquitectura abierta. Este tipo de herramienta se caracteriza por tener un alto nivel de flexibilidad en la interacción entre

sus componentes. Las herramientas tradicionales de simulación pueden realizar extensos y precisos análisis, pero generalmente, no permiten al usuario modificar los algoritmos que describen la respuesta individual de cada uno de los componentes. Este grado de libertad solo se encuentra en una arquitectura abierta: el software consiste en una selección de rutinas, que describen los componentes y métodos numéricos, y una plataforma que interrelaciona todas estas rutinas. El usuario tiene así a su disposición la posibilidad de modificar las rutinas existentes o de incluir nuevas. La flexibilidad y potencia de cálculo de una arquitectura abierta hacen que sea el tipo de herramienta usada habitualmente por universidades y centros de investigación especializados.

Con Matlab el entorno de trabajo se hace fácil, la herramienta es de fácil utilización, portabilidad, modularidad de los componentes, adecuación a diferentes niveles de precisión, flexibilidad en el manejo de los algoritmos de cálculos, etc. Por ello se ha optado por la utilización de Matlab como eje central, ya que presenta la mejor capacidad para adecuarse a las necesidades de la aplicación a desarrollar.

1.7 Conclusiones parciales.

1. Los sistemas fotovoltaicos conectados a red juegan un papel primordial en la actualidad y en el futuro debido al carácter descentralizado del uso de este tipo de energía.
2. Los sistemas conectados en el suelo propician la descentralización de la energía; pero ocupan extensiones de tierra grande y aunque las pérdidas por transmisión disminuyen deben estar conectados preferiblemente cerca de grande consumidores.
3. Es necesario tener en cuenta que la generación eléctrica fotovoltaica es la única que puede producir, a partir de una fuente renovable, electricidad en el lugar donde se consume.
4. Por lo costoso que es la tecnología solar, y por lo difícil que resulta predecir el comportamiento de un sistema fotovoltaico conectado a red, atendiendo a la cantidad de variables a las que está sujeto su comportamiento cada día del año, es factible contar con herramientas de dimensionado que a partir de los componentes del sistema, permitan conocer su comportamiento en cualquier latitud donde se prevé la instalación del sistema.
5. Una vez expuestas las herramientas que se pueden utilizar para el análisis de los sistemas fotovoltaicos, se opta por Matlab ya que presenta la mejor capacidad para adecuarse a las necesidades de la aplicación a desarrollar.

Capítulo 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.

Con el paso del tiempo, las instalaciones fotovoltaicas ya forman parte de los conocimientos generales sobre instalaciones. Las instalaciones fotovoltaicas, que por su magnitud, hacen apenas pocos años eran noticias hoy ni siquiera aparecen en las primeras páginas de la lista, debido al acelerado crecimiento de la generación fotovoltaica. Para lograr el objetivo de seguir creciendo a un régimen acelerado es necesario continuar reduciendo los costos de los sistemas.

La utilización óptima de la energía fotovoltaica, solamente puede alcanzarse si se tienen en cuenta las condiciones locales individuales en el momento del diseño de la instalación, no es suficiente utilizar simplemente los componentes de mayor calidad, resulta decisivo darle el uso adecuado y dimensionar correctamente la instalación. En tal sentido el conocimiento y experiencia son el verdadero capital de un planificador e instalador de éxito.

Los siguientes epígrafes se encaminan a exponer con determinado rigor aspectos que se tuvieron en cuenta para la confección del software y para guiar al proyectista por el buen camino.

2.1 Estructura del sistema fotovoltaico de inyección a red.

La figura 2.1 muestra la estructura de un sistema de inyección a red, los cuales se encuentran relacionados para posibilitar el correcto funcionamiento del sistema.

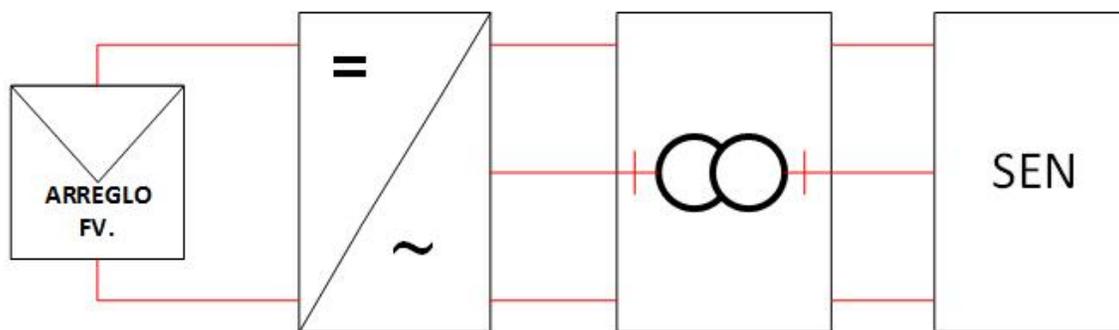


Fig. 2.1 Estructura del Sistema Fotovoltaico de Inyección a red

Los dos primeros bloques lo constituyen el arreglo fotovoltaico, que se encarga de producir energía eléctrica de corriente directa, a partir de la radiación solar que inciden sobre los

módulos fotovoltaicos que lo conforman. El segundo bloque lo constituye el inversor que convierte la energía de corriente directa a su entrada en corriente alterna a su salida sincronizada a la red eléctrica con la frecuencia y el voltaje del transformador que media entre el inversor y el sistema electroenergético nacional (SEN).

Sin embargo, la interacción de los dos primeros bloques es decisivo en lograr un exitoso desempeño del sistema fotovoltaico durante la etapa de explotación, por lo que resulta de gran importancia lograr desde la etapa del proyecto la mayor armonía posible para lograr el éxito. En todo este proceso el inversor juega un importante papel y cada vez los fabricantes refuerzan su participación en la gestión de la red para lograr un mejor desempeño de los sistemas.

A continuación se exponen consideraciones importantes que deben ser tomadas en cuenta para el dimensionamiento óptimo de las instalaciones fotovoltaicas y que como buenas prácticas se han tomado en cuenta en la confección del software.

2.2 Dimensionado óptimo de las instalaciones fotovoltaicas.

El dimensionado óptimo de las instalaciones fotovoltaicas conectadas a la red, no existe de manera absoluta, aunque sin duda alguna hay dimensionamientos que maximizan el rendimiento energético y minimizan el tiempo de amortización. Los principios técnicos y sus interrelaciones, deben tomarse en cuenta para un dimensionado correcto, pues aportan al proyectista directrices y reglas empíricas que ayudan a concebir una instalación fotovoltaica que funcione correctamente con la red. Para cada dimensionamiento hay que comprobar si las condiciones de funcionamiento y ambientales del generador fotovoltaico y del inversor divergen de las condiciones estándar preestablecidas. En tal caso hay que modificar la estructura eléctrica del arreglo fotovoltaico, seleccionar un inversor con características eléctricas diferentes, interconexión de inversores en paralelo en cantidades diferentes, etc., pero todo lo que se haga debe conllevar al funcionamiento en total armonía del conjunto arreglo fotovoltaico-inversor.

La figura 2.2 muestra una configuración manual de un arreglo fotovoltaico, de un proyecto de la Fiscalía Provincial de Villa Clara, donde se marcan en rojo los puntos de diseño de la

instalación, y en amarillo los márgenes de las magnitudes eléctricas que debe presentar el inversor para lograr optimizar el funcionamiento de la instalación fotovoltaica.

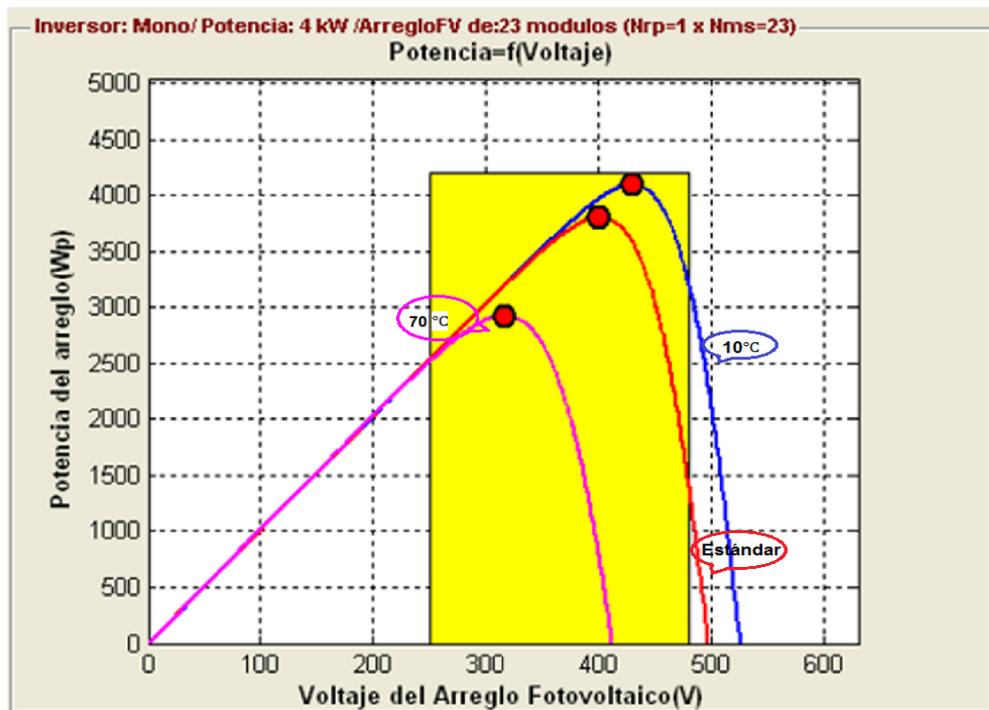


Figura 2.2. Rango de trabajo del generador fotovoltaico a lo largo de un año civil, en la Fiscalía Provincial y rango de magnitudes eléctricas requeridas por el inversor a 1000 w/m^2 .

2.2.1 Límites eléctricos del inversor.

En el proyecto se deben tener en cuenta los límites eléctricos del inversor, no solo la potencia que corresponde con el número total de módulos fotovoltaicos es importante, sino que hay que tomar en consideración que la tensión y la corriente del generador fotovoltaico sean compatibles con los valores máximos de entrada admitidos por el inversor.

Si bien los aspectos anteriores son de vital importancia para lograr evitar daños en la instalación (módulos fotovoltaicos y/o inversores), no garantizan la optimización del sistema, por lo que es necesario tomar en cuenta otros parámetros eléctricos del inversor, para lograr que el arreglo fotovoltaico trabaje el mayor tiempo posible, en el punto de funcionamiento de máxima potencia (marcados con círculos rojos en la figura 2.2). Sin embargo por fallas en el sistema o desconexión del inversor por cualquier otra causa, el inversor puede quedar expuesto a su entrada a la tensión de vacío del generador fotovoltaico. Para lograr conjugar todos los elementos deben tomarse en consideración los siguientes aspectos:

1. La tensión de entrada mínima del inversor debe corresponder como máximo a la tensión del punto de máxima potencia del arreglo fotovoltaico bajo condiciones de 1000 w/m^2 y una temperatura de $70 \text{ }^\circ\text{C}$ ($\text{VMPP}_{\text{inversor}}(70^\circ\text{C})$).
2. El rango de tensión $\text{VMPP}_{\text{inversor}}$, debe estar lo más próximo posible a los puntos máximos de las características externas del arreglo fotovoltaico de manera que garantice que los mismos se encuentren dentro de la zona de optimización del inversor, para lograr la mayor eficiencia del sistema en el intervalo de mayor aporte energético del arreglo fotovoltaico.
3. La tensión de entrada máxima del inversor debe corresponder como mínimo a la tensión en vacío en las condiciones de 1000 w/m^2 y la temperatura mínima de la celda de los módulos del arreglo fotovoltaico (se asume en función de datos de temperatura mínima de la localidad). Es de vital importancia prestar atención a este requerimiento, una sobretensión aplicada a la entrada del inversor; incluso no estando conectado a la red, puede dañar sus componentes y causar averías irreparables al equipo.
4. La tensión máxima del generador fotovoltaico (tensión del arreglo a 1000 w/m^2 y temperatura mínima de la localidad), no debe exceder la tensión máxima de los módulos utilizados en la instalación, pues se provocan daños en las celdas.

2.3 Criterios para optimizar la rentabilidad o la eficiencia.

En una instalación fotovoltaica bien planeada debe corresponder la tensión del inversor, a la tensión del generador fotovoltaico conectado, como parámetro en este caso se utiliza la relación de la tensión, que describe la interfaz de ambos sistemas en relación a la tensión máxima de entrada del inversor y la tensión pico del generador fotovoltaico.

En caso de un dimensionamiento con el fin de conseguir un rendimiento máximo, se tiene que alcanzar una relación de potencia de un 110 % aproximadamente.

En el caso de un dimensionamiento optimizado para conseguir la máxima rentabilidad, se evita un sobre diseño del inversor, y sobre todo en lugares con latitudes fuera de las tropicales, como las altas radiaciones solares son escasas, el análisis del comportamiento del

campo fotovoltaico se hace con una menor irradiancia (aproximadamente 800 w/m^2), lo que conduce a financiar un inversor más pequeño y más barato.

La optimización de la rentabilidad y la minimización del tiempo de amortización dependen también de las radiaciones, del coeficiente de eficiencia del inversor a media carga y del costo del kWh.

Desvíos de la alineación ideal del generador fotovoltaico (ángulo azimutal diferente de cero, utilización en fachadas fotovoltaicas, ángulos de elevación distantes del óptimo), se deben tener también en cuenta en la selección del inversor, ello también conduce a un inversor de menor capacidad y costo.

2.4 Consideraciones sobre la eficiencia del inversor.

El coeficiente de eficiencia del inversor no es el mismo en todo el rango de trabajo. El nivel de la tensión de entrada influye sustancialmente en la eficiencia de los inversores, por causa de la necesaria adaptación de la tensión entre la entrada y la salida del inversor. Según el circuito utilizado (transformador a la frecuencia de la red, transformador de alta frecuencia, convertidor elevador), disminuye o aumenta el coeficiente de eficiencia del inversor respecto a la tensión de entrada.

Como consecuencia de lo planteado anteriormente:

1. Para alcanzar un elevado coeficiente de eficiencia, los inversores con transformador deben trabajar con una baja tensión de entrada.
2. Para alcanzar un elevado coeficiente de eficiencia los inversores sin transformador deben trabajar con una tensión de entrada de aproximadamente la amplitud máxima de la tensión de entrada de la red eléctrica.

La mayoría de las recomendaciones para un buen dimensionamiento de la instalación se basa en un ajuste de los datos característicos de los módulos que conforman el arreglo fotovoltaico y del inversor. Algunos de estos datos característicos no se pueden obtener directamente de las fichas técnicas, sino que deben ser calculados mediante modelos, tal es el caso de la resistencia serie y paralelo del módulo fotovoltaico. Para facilitar este trabajo el software determina estos parámetros a partir de datos nominales de los módulos, lo que facilita que de una manera muy rápida se puedan configurar variados arreglos fotovoltaicos.

Las reglas empíricas aquí descritas, si se toman en cuenta en la confección de herramientas que apoyen al proyectista de los sistemas, le brindan en primer lugar seguridad en lo que hace y le permite detectar oportunamente posibles desvíos del diseño estándar.

En la medida que se cuenten con herramientas que de manera fácil y precisa le permitan al proyectista evaluar diferentes variantes y seleccionar la mejor de ellas, evaluando los principales parámetros que inciden en la eficiencia y gastos de inversión, se puede ofrecer a los clientes una instalación personalizada.

2.5 Arreglo fotovoltaico.

El sistema fotovoltaico convierte directamente la luz solar en electricidad. El dispositivo básico de un sistema fotovoltaico es la fotocelda. Las celdas se agrupan y forman los módulos o paneles fotovoltaicos. A su vez estos paneles se agrupan en serie y paralelo y/o serie-paralelo y forman los denominados arreglos fotovoltaicos que a fin de cuenta constituyen el generador fotovoltaico.

El voltaje disponible en los terminales del dispositivo fotovoltaico puede alimentar directamente cargas de corriente directa. Aplicaciones más sofisticadas requieren de convertidores electrónicos para variar las magnitudes eléctricas de corriente directa (V_{cc} , $f=0$) en magnitudes eléctricas diferentes (V_{ca} , $f \neq 0$), para poderse acoplar a cargas o sistemas de corriente alterna. Estos convertidores pueden ser usados para regular el voltaje y la corriente en la carga, controlar el flujo de potencia de los sistemas conectados a red y esencialmente para seguir el punto de máxima potencia del generador fotovoltaico [14].

Para estudiar y calcular las interacciones de los sistemas fotovoltaicos con convertidores electrónicos, la primera necesidad es conocer el modelo del generador fotovoltaico que se encuentra conectado al convertidor. Los módulos fotovoltaicos presentan una característica $I=f(v)$, no lineal, que es necesario ajustar a partir de modelos que toman en consideración datos aportados por los fabricante. El modelo matemático es de gran utilidad en el estudio de análisis dinámicos de convertidores, en el estudio de algoritmos de seguimiento del punto de máxima potencia y para simular sistemas fotovoltaicos y realizar el cálculo óptimo de los componentes del sistema fotovoltaico.

2.5.1 Modelo del módulo fotovoltaico.

La figura 2.3 muestra el circuito equivalente del módulo fotovoltaico utilizado en este trabajo, el cual es el más utilizado en la actualidad, sin embargo las diferencias de varios autores se encuentran en la obtención de los parámetros no aportados por el fabricante que en algunos casos son algoritmos largos, y la aproximación de los parámetros introduce un determinado por ciento de error en los modelos por consideraciones en la realización del algoritmo y la formulación matemática de las ecuaciones.

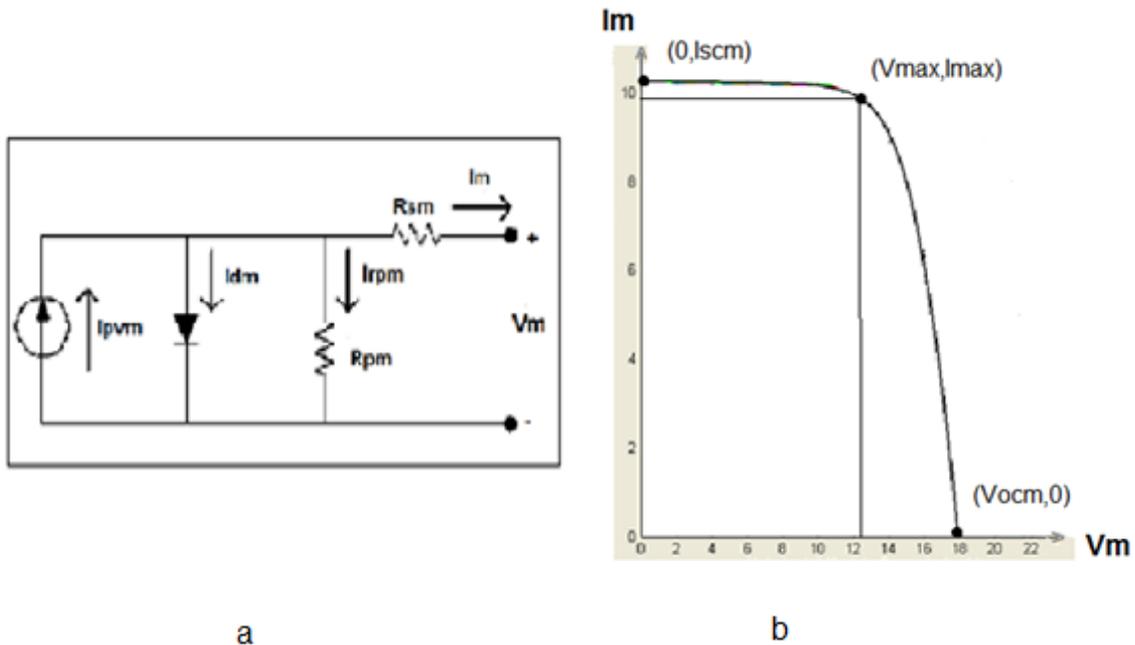


Fig. 2.3 Modelo del módulo fotovoltaico (a) circuito eléctrico equivalente (b) característica $I_m=f(V_m)$.

Para el desarrollo de este trabajo los tutores desarrollaron un procedimiento para el cálculo de las resistencias serie y paralelo del módulo ($R_{s\ m}$ y $R_{p\ m}$), así como para el arreglo fotovoltaico ($R_{s\ a}$ y $R_{p\ a}$) a partir de los valores señalados en la figura 2.3 los que corresponden con los datos nominales aportados por el fabricante. El Anexo A, muestra la hoja de datos y las curvas características del fabricante del módulo fotovoltaico Isofotón I-100 Wp. En el propio anexo se muestran las curvas obtenidas mediante el software, donde el lector puede comprobar la eficacia del modelo.

2.5.2 Cálculo de la capacidad de generación fotovoltaica.

El procedimiento de cálculo de la posible capacidad de generación fotovoltaica en cubiertas planas, en el suelo y en cubiertas inclinadas, su parte fundamental se encuentra desarrollada en la referencia [1]. EL procedimiento se adaptó y enriqueció para los cálculos en cada uno de los tres casos en función de los datos elegidos para la realización de los cálculos de la cantidad de módulos en cada caso.

2.6 Inversores de inyección a red.

Para desarrollar los cálculos del comportamiento óptimo del conjunto arreglo fotovoltaico configurado con el inversor se tomaron en consideración los datos de entrada que aportan los fabricantes y de igual modo se toman en consideración los datos de salida. Todas estas magnitudes eléctricas esenciales para los cálculos se consideran en el desarrollo de los algoritmos.

En el anexo B se muestra una hoja de datos con los datos nominales de un inversor de inyección a red fabricado por SMA.

2.7 Transformador y sistema electroenergético.

Su integración al software está relacionada con la necesidad de conocer la reactancia equivalente presente entre el sistema equivalente del conjunto sistema electroenergético-transformador en el modo de conexión del sistema fotovoltaico de inyección a red.

La reactancia equivalente entre el sistema y el inversor, influyen en la transferencia de potencia activa y reactiva hacia la red por lo que se toman en consideración para desarrollar los diseños.

La reactancia en el caso del sistema se calcula a partir del método del cálculo de la corriente de cortocircuito por el método de las impedancias, partiendo de conocer el nivel de cortocircuito y la tensión del sistema del nodo en cuestión [15].

En el caso del transformador se hace a partir de sus datos nominales y el conocimiento del por ciento de impedancia. El algoritmo desarrollado, toma en consideración la metodología

desarrollada para este caso, la que está tratada en el mismo artículo al que se hizo referencia anteriormente.

Capítulo 3. DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE.

3.1 Generalidades.

La aplicación computacional desarrollada llena la incertidumbre que le puede dejar al proyectista al realizar un estudio de un sistema fotovoltaico, el software permite ya desde la etapa de proyectos dimensionar el sistema y calcular una aproximación de cómo va a quedar el arreglo módulos fotovoltaico-inversores. En la actualidad los sistemas fotovoltaicos instalados pueden ser víctimas del divorcio que pudiera existir entre el arreglo fotovoltaico y el inversor, por lo que se hace necesario utilizar este tipo de herramienta antes de realizar la instalación de un sistema fotovoltaico.

La información necesaria para los cálculos consiste en la localización, irradiancia, temperatura, características de paneles solares, inversores, transformadores y sistema al que se va a conectar.

Muchas veces el inversor como corazón de la planta cumple con los datos nominales del arreglo fotovoltaico, pero su curva puede estar alejada de la del arreglo, es por eso que el objetivo final del programa es llegar a una armonía entre arreglo del campo fotovoltaico y el inversor, pudiendo así el inversor trabajar en un amplio margen en donde puede extraer la máxima potencia del campo fotovoltaico.

Con el objetivo de facilitar la comprensión y uso del programa en la figura 3.1 se muestra la estructura que posee el mismo.

La ventana de inicio del programa muestra una breve descripción de las opciones de herramientas y diseño del proyecto, para poder realizar los cálculos del proyecto debe seleccionar la ubicación del sistema fotovoltaico a instalar, la opción de **Seguimiento** está en desarrollo. La figura 3.2 muestra las características de la ventana.

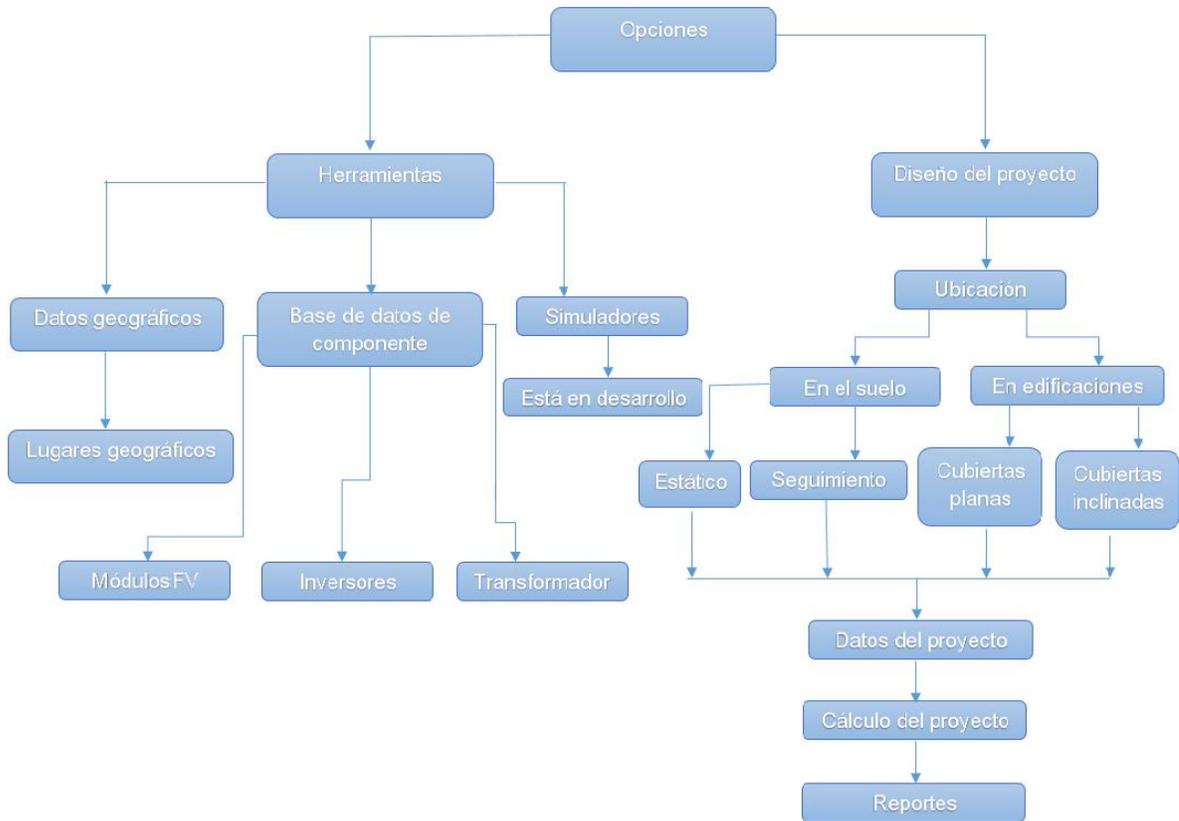


Fig. 3.1 Estructura del programa.



Fig. 3.2 Ventana Inicio.

3.2 Herramientas.

Las bases de datos, las partes componentes del sistema de inyección a red, los datos geográficos del lugar de instalación y los simuladores son indispensables para la ejecución de un proyecto. La figura 3.3 muestra la estructura que tiene la ventana herramientas desde donde se puede acceder a las bases de datos.



Fig. 3.3 Ventana Herramientas.

3.2.1 Datos geográficos.

En la actualidad entre las llamadas energías limpias (energías renovables), la fotovoltaica es una de las más prometedoras de todas en cuanto a disponibilidad, ella solo depende de factores astronómicos, geográficos (lugar donde está ubicado el sistema) y atmosféricos, siendo así un requisito necesario que el usuario conozca los datos geográficos del lugar de

instalación del generador fotovoltaico, esto le permitirá cuantificar la energía que producirán los sistemas debido a la radiación solar que incide sobre el lugar de instalación.

✓ Lugares geográficos

En la ventana se brinda información de una extensa lista de países y lugares en donde puede estar o no con exactitud la ubicación del generador fotovoltaico a instalar.

La figura 3.4 refleja un ejemplo de como está estructurada la ventana, tomando como ejemplo la ciudad de Santa Clara.

The screenshot shows a software window titled "LugaresGeograficos". The window is divided into several sections:

- Lugares Geograficos:** Contains two dropdown menus. The "País" dropdown is set to "Cuba". The "Lugares" dropdown is open, showing a list with "Santa Clara" selected.
- Datos Geograficos:** Contains two sub-sections:
 - Ubicación:** Includes text input fields for "Lugar:" (Santa Clara), "País:" (Cuba), and "Región:" (América del Norte). There is also a radio button labeled "País nuevo?".
 - Datos Del Lugar:** Includes text input fields for "Latitud(grados):" (22.4), "Longitud(grados):" (-79.96), "Altitud(m):" (5), and "Huso Horario:" (-5). Explanatory text "(+ = Norte, - = Hemisferio Sur)" and "(+ = Este, - =Oeste Greenwich)" is provided.
- Actualizar Base De Datos:** Contains two buttons: "Actualizar base de datos" and "Salvar cambios".
- Graficar:** Contains a button labeled "Trayecto Solar".
- Retornar:** A button located at the bottom center of the window.

Fig. 3.4 Ventana Lugares Geográficos.

Si el país se encuentra en la lista seleccionada, debe buscar luego el lugar de instalación del generador fotovoltaico, si este aparece en la lista de lugares se muestra entonces la

información acerca de la: región, latitud, longitud, altitud y huso horario del lugar seleccionado.

En caso de que el país o lugar no se encuentran en la base de datos, el usuario puede actualizar la base de datos introduciendo un país nuevo, con los datos que requiere, si el país ya existe; pero el lugar no, solamente debe introducir los datos del lugar: latitud, longitud, altitud y huso horario. Una vez que los datos estén correctamente introducidos puede guardar los cambios, el lugar y los datos quedaran guardados en un fichero .mat y podrán ser utilizados por el proyectista para los cálculos del proyecto.

Una vez que todos los datos estén llenos se puede acceder entonces a ver el trayecto solar del lugar seleccionado.

- **Trayecto solar**

En la figura 3.5 se muestra para la ciudad de Santa Clara: el trayecto solar para el día característico del mes seleccionado, la hora de salida y puesta del sol, la diferencia horaria con el huso estándar y la duración del día.

La salida y puesta del sol se pueden ver afectados por el adelanto de hora (horario de verano). Al explorar la lista de meses para los días característicos (día en que la declinación es igual a la declinación promedio del mes), podrá obtener información visual del comportamiento solar a lo largo de todo el año, en que mes habrá más radiación y la duración de cada día del año.

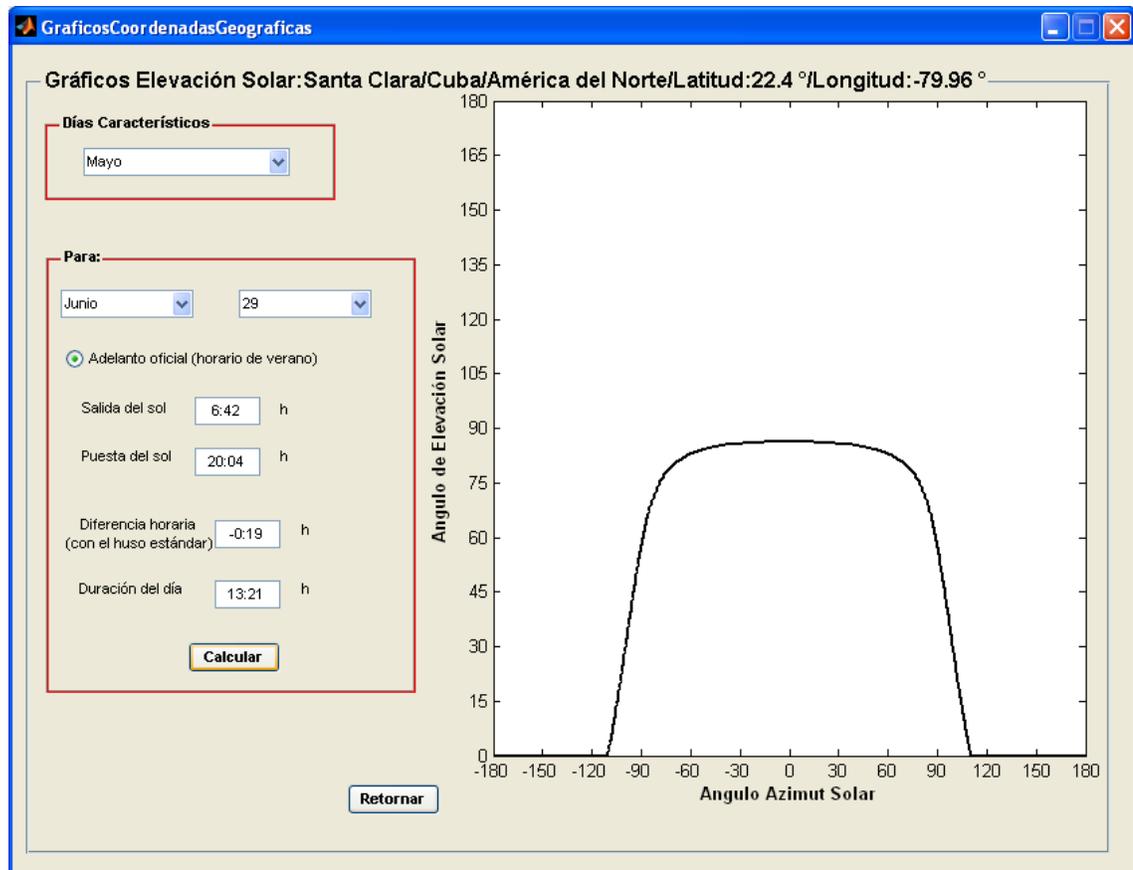


Fig. 3.5 Ventana Gráficos de Coordenadas.

3.2.2 Base de datos de componentes.

La base de datos de componentes posee una amplia gama de lo que a módulos fotovoltaicos e inversores respecta en el mercado actual. Siempre es aconsejable antes de realizar la ejecución del proyecto explorar sus base de datos para así conocer con los elementos que se disponen para la confección del proyecto. En la figura 3.3 puede observar los componentes a los que se hacen referencia.

✓ Módulos fotovoltaicos

La base de datos de módulos fotovoltaicos está archivada en un fichero .mat, en la figura 3.6 se muestra la información que se tiene de los módulos y en este caso se muestra un módulo isofotón de 100 Wp .

Primero se selecciona la lista de módulos que puede estar organizada por potencia, fabricante o estructura del marco. Si selecciona la opción de potencia, la lista se confecciona de acuerdo a las potencias de los módulos en un orden ascendente, pueden existir varios fabricantes que fabriquen módulos de la misma potencia. Al seleccionar fabricante, se conforma la lista con todos los módulos con que cuenta cada fabricante. Si se quiere explorar la lista por estructura del marco, esta se forma concibiendo solamente la estructura, es decir pueden existir varios fabricantes que sus módulos poseen estructuras iguales.

En especificaciones se selecciona el módulo que desea, en la ventana se visualizan los datos nominales que ofrece el fabricante, las dimensiones y tecnología del módulo, la resistencia serie, resistencia paralelo y el factor de idealidad, parámetros obtenidos mediante un modelo matemático implementado en el software a partir de los datos nominales del módulo.

En el panel que define las magnitudes eléctricas a diferentes condiciones de operación, se puede comprobar la exactitud con que el modelo calcula los parámetros al compararlos con los resultados a los que arribo el fabricante, en este caso se utiliza una irradiancia igual a 1000 W/m^2 y una temperatura de 25°C .

Al variar los valores de las condiciones de funcionamiento (irradiancia y temperatura) varían también los parámetros del módulo, el usuario puede comprender y analizar el comportamiento dinámico de los módulos al afectar esas dos variables.

El usuario puede seleccionar la opción Gráficos en la cual se visualizan las curvas del módulo.

Modulos Fotovoltaicos

Revisar Modulos Fotovoltaicos

Por: Fabricante

Lista de Modulos: Fabricante

Isofoton

Especificaciones

Isofoton/80Wp/anodized alu, circular cells
 Isofoton/94Wp/anodized alu
 Isofoton/100Wp/anodized alu
 Isofoton/106Wp/anodized alu

Especificaciones del Fabricante: Isofoton/100Wp/anodized alu

Datos Nominales

Irradiancia	Gref	1000	W/m ²	Tref	25	°C
Corriente de cortocircuito	Isc	6.54	A	Circuito abierto Voc	21.6	V
Corriente de máxima potencia	Imp	5.74	A	Vmpp	17.4	V

Dimensiones y otros

Largo	1310	mm
Ancho	651	mm
Espesor	34	mm
Voltaje máximo del sistema	0	V
Tecnología	Si-mono	

Modelo Matemático Interno

Parámetros

Resistencia serie	Rsm	0.05149
Resistencia paralelo	Rpm	57.2582
Factor Idealidad	n	1.67

Magnitudes eléctricas a diferentes condiciones de operación

Condiciones de funcionamiento

Goper	1000	Toper	25
-------	------	-------	----

Punto Potencia Máxima

Pmpp	99.876	W/m ²
Imp	5.74	A
Vmpp	17.4	V

Otras Magnitudes

Voc	21.6	V
Isc	6.54	A
eficiencia/supmod	11.7114	%

Gráficos Retornar

Fig. 3.6 Ventana Módulos Fotovoltaicos.

- Curvas del módulo fotovoltaico

Los módulos cuentan con dos curvas de gran importancia a la hora de analizar su comportamiento, ellas son:

- Corriente=f (voltaje).
- Potencia=f (voltaje).

En la ventana solamente se pueden graficar hasta cinco curvas como se observa en la figura 3.7, que pueden ser a diferentes irradiancia y la temperatura se toma como parámetro principal o viceversa. Al manipular el parámetro principal se afecta el comportamiento de cada curva.

La información que brinda la curva de potencia en función del voltaje del módulo fotovoltaico es de gran importancia a la hora de seleccionar el inversor más óptimo para el arreglo, ya que este está determinado dentro de un margen que puede ser óptimo o no

para el arreglo fotovoltaico, lo que no significa que el inversor no va a transmitir potencia, pero pudiera ser que no trabaje eficientemente como el proyectista espera.

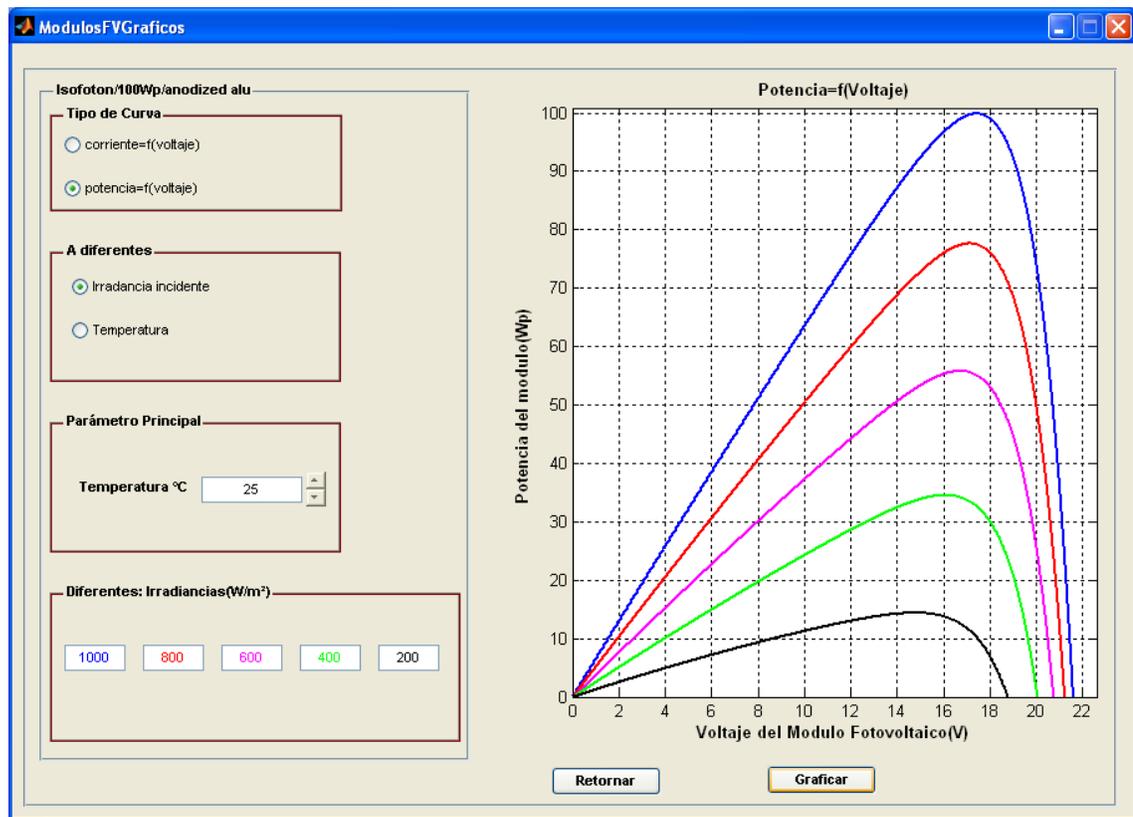


Fig. 3.7 Ventana Módulos Fotovoltaicos Gráficos.

✓ Inversores

A la hora de conformar la lista de inversores se utilizó el mismo procedimiento que en la ventana de módulos fotovoltaicos, lo único que varía es que se cambia la estructura del marco del panel por el grado de protección del inversor, dato importante debido a que se puede conocer cuál es el lugar idóneo para instalar el inversor sin que se dañe por condiciones de trabajo inapropiadas. La base de datos queda archivada en un fichero .mat. En la figura 3.8 se muestra la ventana de inversores.

Al seleccionar el inversor se podrá conocer sus parámetros de entrada y salida, parámetros mecánicos y la eficiencia con que trabajan.

Es de gran utilidad e importancia conocer que inversores se dispone, aunque la lista cuenta con más de 3000 inversores pudiera ser que el que se dispone o el más adecuado para conectar en su sistema fotovoltaico no aparezca en la base de datos, realizar una búsqueda le evitará emplear más tiempo en la fase de proyecto y además tener una concepción más amplia de las características de los componentes que puede utilizar de acuerdo con los inversores con que cuenta.

Inversores

Revisar Inversores

Por:

Lista de Inversores: Fabricante

Especificaciones

SMA/4.8kWp/-25 - +60°C, IP 65: outdoor installation
 SMA/4.85kWp/-25 - +60°C, IP 65: outdoor installation
 SMA/Na1kWp/
 SMA/5.3kWp/-25 - +45°C, IP 65 - NFMA 3R: outdoor installable

Especificaciones del Fabricante: SMA/4.8kWp/-25 - +60°C, IP 65: outdoor installation

Parámetros de entrada

Potencia nominal	PnomFV	4.8	kWp	Vmppmin	175	V
Tensión máxima	Vccmax	750	V	Vmppmax	500	V
Corriente máxima	IFVmax	6	A	Switch CC	y	
Número máximo de string		4		Potencia máxima	5.3	kWp

Parámetros mecánicos

Alto	519	mm	Profundidad	185	mm
Ancho	490	mm	Peso	26	kg

Parámetros de Salida

Potencia máxima	Pcamax	5	kW	Conexión	Mono
Potencia nominal	Pcanom	4.6	kW	Switch CA	n
Tensión nominal	Vcanom	230	V	Tecnología	herless, 16 kHz, IGBT, Multi String
Frecuencia nominal	Fnom	50/60	Hz	Inom	20
				Imax	22
					A

Eficiencia

Eficiencia máxima	N	97	%
Eficiencia Europea	N	96.5	%

Retornar

Fig. 3.8 Ventana Inversores.

✓ Transformadores

No existe la base de datos de transformadores, los datos se introducen manualmente en el diseño del proyecto, pero sería importante constar con la misma como medio de consulta para introducir datos de transformadores comerciales cuando el proyecto se realiza.

3.2.3 Simuladores.

Las herramientas de simulación brindan un estado ulterior al de dimensionado de una instalación fotovoltaica, el que complementado a este da las respuestas del sistema para determinadas condiciones de las variables de entrada y diferentes estados de carga, el cual permite la predicción del comportamiento del sistema ante las diferentes combinaciones posibles de las variables de entrada y perturbaciones, lo que posibilita que el dimensionamiento del mismo garantice el funcionamiento del sistema de forma aceptable para la peor condición, aportando una mayor cantidad de elementos a considerar, por lo que con este método se obtienen resultados de mayor precisión y exactitud que ayudan al proyectista a la toma de dediciones en su diseño [16].

A manera de resumen los simuladores:

1. Permite realizar el análisis de varias variables a tomar en consideración.
2. Permite la predicción del comportamiento del sistema ante las diferentes combinaciones posibles de las variables de entrada y perturbaciones, por lo que con este método se obtienen resultados de mayor precisión y exactitud.
3. Su desventaja es que los cálculos son más complejos y por ello los tiempos de simulación son más prolongados.

✓ **Sistemas conectados a red (SFCR)**

Un sistema fotovoltaico conectado a la red consiste básicamente en un generador fotovoltaico acoplado a un inversor que opera en paralelo con la red eléctrica convencional. Se instalan en zonas urbanas que disponen de red eléctrica y su función es producir electricidad para el abastecimiento local y cuando su generación cubre la necesidad de los receptores, la suministra entonces al sistema eléctrico conectado [17].

Los SFCR presentan la gran ventaja de no necesitar baterías ni reguladores de carga, por lo que se convierten en sistemas más baratos y que requieren de menor mantenimiento. En cambio los inversores, requieren de mayores exigencias, ya que tienen que estar conectados sincronizados con la tensión de la red [18].

3.3 Diseño del proyecto.

El proyectista tiene la posibilidad de utilizar el software para calcular la generación de un sistema fotovoltaico ubicado en el suelo y en edificaciones con cubiertas planas e inclinadas, brindando opciones para poder analizar las características de ubicación del generador fotovoltaico como es debido, se recomienda antes de realizar los cálculos de cualquier proyecto revisar primeramente las herramientas con que cuenta el software.

3.3.1 Datos generales del proyecto.

Es necesario antes de realizar cualquier proyecto recopilar una serie de información que son necesarias para la persona encargada de realizar el proyecto, así como para el cliente.

En la figura 3.9 se muestran los datos necesarios a introducir, si los datos no están completos no se podrán salvar. Para continuar con los cálculos del proyecto es necesario haber salvado los datos.

Datos Proyecto

Datos Generales del Proyecto

Nombre del Proyecto: Sistema fotovoltaico de inyección a red Fiscalía Provincial VC

Especificaciones generales del cliente y del proyecto

Cliente	Fiscalía Provincial	Fecha	11/6/2015
Dirección	Carretera Central, Reparto Sandino	Teléfono	
País	Cuba	Fax	
Lugar de instalación	Santa Clara	Email	

Especificaciones generales del proyectista

Nombre	Rodolfo Arias y Carlos Castellón	Grupo Proyecto	Copextel-UCLV
Empresa	Copextel	Teléfono	291757-162
País	Cuba	Fax	
Ciudad	Santa Clara	Email	rodolfoag@vc.copextel.com.cu

Retornar Salvar Continuar

Fig. 3.9 Ventana Datos del Proyecto.

3.3.2 Cálculos del proyecto.

Se recomienda tener en cuenta la secuencia que se muestra en la figura 3.10 para obtener los resultados que se desean.

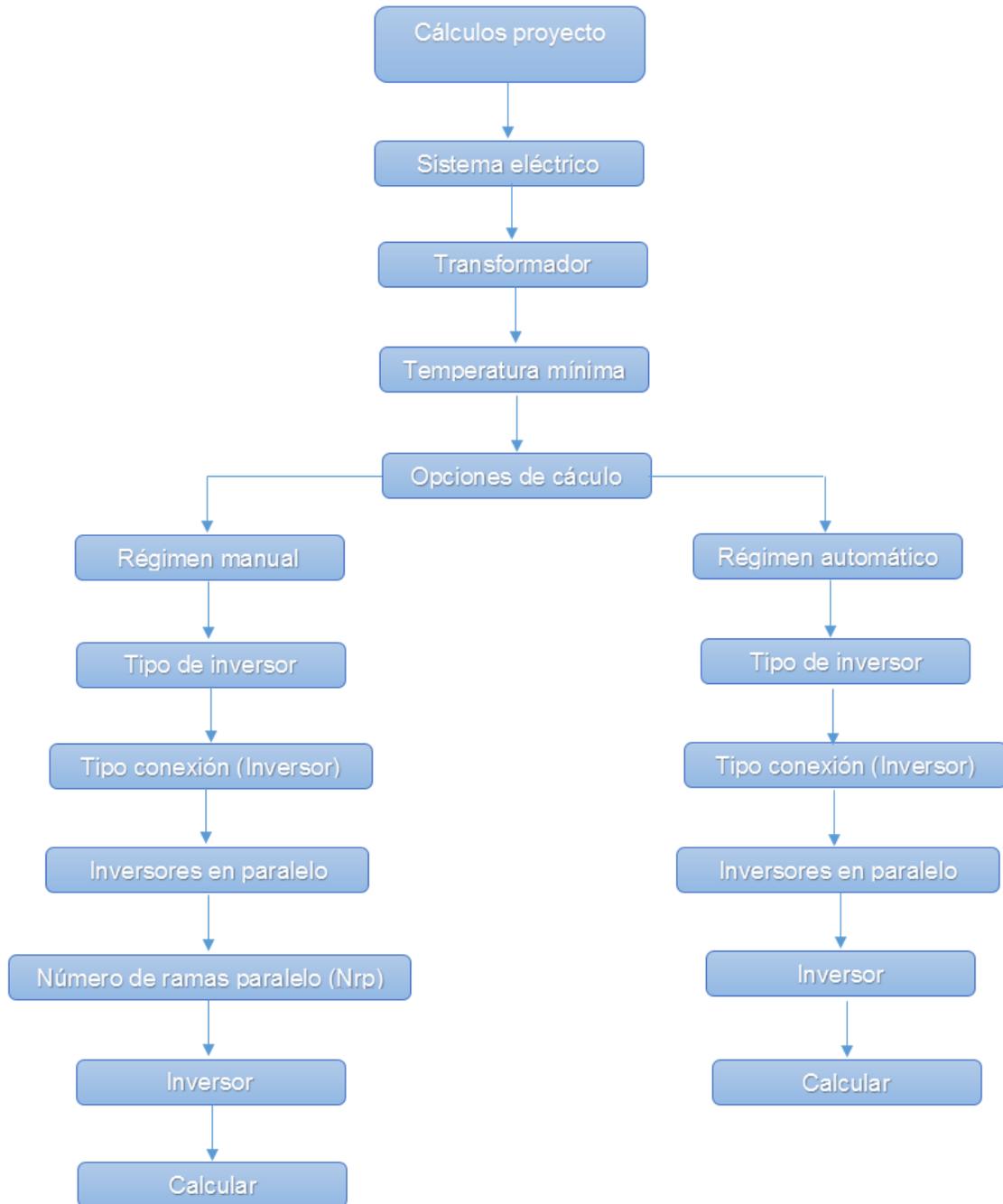
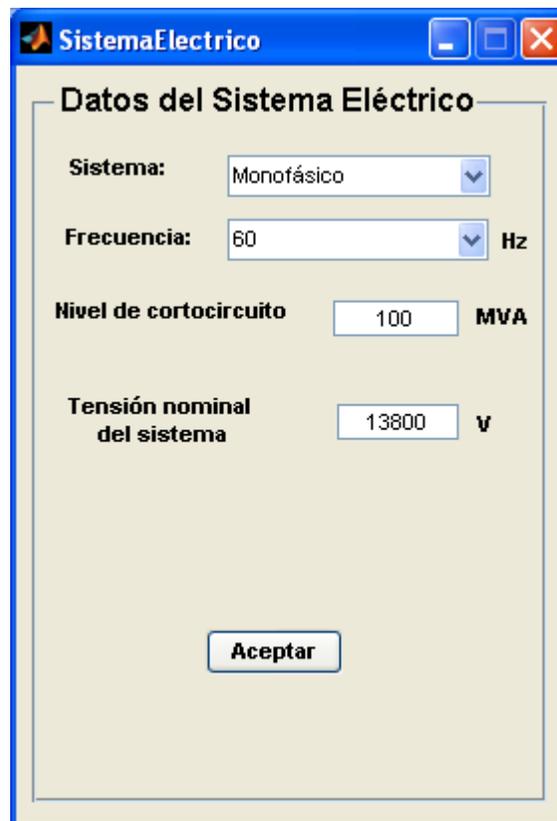


Fig. 3.10 Secuencia para realizar los cálculos del proyecto.

A continuación se describirán alguna de las características de las ventanas que se encuentran relacionadas con la ejecución y cálculos del proyecto.

- **Sistema eléctrico:** La figura 3.11 muestra las características de la ventana Sistema Eléctrico, en la que deben estar todos los datos completos para poder continuar con la ejecución del programa.



The image shows a software window titled "SistemaElctrico" with a blue title bar. The main content area is titled "Datos del Sistema Eléctrico" and contains the following fields:

- Sistema:** A dropdown menu with "Monofásico" selected.
- Frecuencia:** A dropdown menu with "60" selected, followed by "Hz".
- Nivel de cortocircuito:** A text input field with "100" and "MVA" to its right.
- Tensión nominal del sistema:** A text input field with "13800" and "V" to its right.

At the bottom center of the window is a button labeled "Aceptar".

Fig. 3.11 Ventana Sistema Eléctrico.

- **Transformador:** En correspondencia con el sistema al cual se va a conectar, si el sistema es monofásico el transformador solo puede ser monofásico y si es trifásico el transformador puede ser monofásico (conformando un banco) o trifásico. La figura 3.12 muestra el diseño de la ventana de transformadores. Los datos del transformador se deben ir llenando en el siguiente orden:

1. La potencia e impedancia nominal del transformador.
2. Conexión por el devanado de alta si el transformador fuera trifásico o formara un banco, solo es necesario introducir el valor de la tensión, la corriente la calcula el software.
3. Conexión por el devanado de baja y tensión, al igual que por el devanado de alta el valor de la corriente el usuario nunca lo introduce, con los datos introducidos el programa calcula el valor de la corriente.

The screenshot shows a software window titled "Transformador" with a blue title bar. The main content area is titled "Datos del Transformador" and contains the following sections:

- Tipo de Transformador:** Two radio buttons are present: "Monofásico" (selected) and "Trifásico".
- Datos nominales:** Two input fields: "Potencia:" with the value "37.5" and unit "kVA", and "%Impedancia" with the value "4" and unit "%".
- Devanados:** Two sub-sections:
 - Alta Tensión:** Two radio buttons: "Estrella" (selected) and "Delta". Below them are input fields for "Tensión" (value "13800" V) and "Corriente" (value "2.71739" A).
 - Baja Tensión:** Two radio buttons: "Estrella" (selected) and "Delta". Below them are input fields for "Tensión" (value "220" V) and "Corriente" (value "170.455" A).

At the bottom center of the window is a button labeled "Aceptar".

Fig. 3.12 Ventana Transformadores.

- **Temperatura mínima:** Es necesario introducir el valor de la temperatura mínima del lugar de instalación, por lo general se toma como referencia la temperatura mínima promedio del lugar del proyecto.
- **Arreglo fotovoltaico:** se introducen los datos del lugar de ubicación y se selecciona el módulo con que se va a realizar el proyecto. La figura 3.13 muestra todas las características de la ventana. En la ventana de inicio el usuario define el lugar de ubicación: en el suelo, cubierta plana o inclinadas, la ventana que se mostrará estará en correspondencia con el lugar de instalación, en todos los casos se podrá contar con una vista 3D y lateral del panel seleccionado.

Para poder realizar los cálculos se debe aportar los datos complementarios solicitados en la parte inferior izquierda (ver figura 3.13), cuando se introducen los datos, las figuras muestran la referencia y dimensiones que van a tener los módulos en el sistema de referencia del observador. Al pulsar el botón calcular en el panel inferior derecho se obtienen el resto de los datos complementarios

Fig. 3.13 Ventana Generación Fotovoltaica en Cubiertas Planas.

del posible arreglo fotovoltaico. Al retornar a la ventana de cálculos del proyecto se activan las opciones de cálculo.

- Los cálculos se pueden realizar manual o automáticos como se muestra en la figura 3.10:

Cálculos manuales: La opción permite que el usuario manipule el inversor con que va a trabajar, quedando el arreglo fotovoltaico configurado por el usuario. El tipo de inversor puede ser monofásico o trifásico en dependencia del transformador. El tipo de conexión del inversor es:

- Monofásica si el transformador es monofásico.
- Delta si la conexión del transformador por el devanado de baja tensión es en delta.
- Delta o estrella si la conexión del transformador por el devanado de baja tensión es en estrella.

El número de inversores en paralelo puede ser hasta cinco, si el inversor es monofásico y el sistema está instalado en el suelo la lista puede llegar hasta 60 inversores. Al manejar los inversores en paralelo la potencia que queda instalada en cada uno de ellos disminuye o aumenta según la cantidad de estos. Variando el número de ramas paralelo (N_{rp}) varía el voltaje mínimo en el punto de máxima potencia ($V_{minMPPT}$) y el voltaje máximo en el punto de máxima potencia ($V_{maxMPPT}$) del arreglo fotovoltaico, posibilitando poder acomodarlo o no al inversor seleccionado.

Cálculos automáticos: Se realizan siguiendo la secuencia mostrada en la figura 3.10. Con esta opción el software configura la cantidad de ramas en paralelo y el número de módulos en serie (N_{ms}) que conforman el arreglo fotovoltaico del inversor seleccionado. En esta opción el arreglo fotovoltaico se configura según las características del inversor.

- **Inversores del proyecto:** La ventana de los inversores del proyecto cuenta con un filtro para depurar la lista de inversores con el objetivo de ahorrarle tiempo al proyectista, se tuvo en consideración a la hora de programar el filtro que se despreciaran los inversores que no cumplieran por frecuencia, tensión, tipo de conexión y corriente fotovoltaica máxima. Luego de seleccionar el inversor se pueden realizar los cálculos, si el inversor está sobredimensionado hay que volver a seleccionar un inversor de menor capacidad o

configurar el arreglo fotovoltaico si esta en régimen manual, en este caso la lista de inversores se vuelve a conformar dejando los inversores ya mostrados anteriormente y adicionándoles inversores más pequeños.

- La opción **Sugerencias** mostrará el inversor idóneo para el arreglo del generador fotovoltaico, se tuvo en cuenta que la potencia máxima del inversor fuera el 110% de la potencia máxima del arreglo y los límites de voltaje fueran el 90% del $V_{minMPPT}$ y el 110% del $V_{maxMPPT}$ de las curvas del arreglo fotovoltaico. En el panel, Por ciento de la potencia total instalada, se calcula cuanto representa la potencia total de acuerdo a la configuración de los módulos e inversores con respecto a la capacidad máxima de paneles que admite el posible arreglo fotovoltaico calculado anteriormente. La figura 3.14 muestra la configuración de la ventana Cálculos del Proyecto.

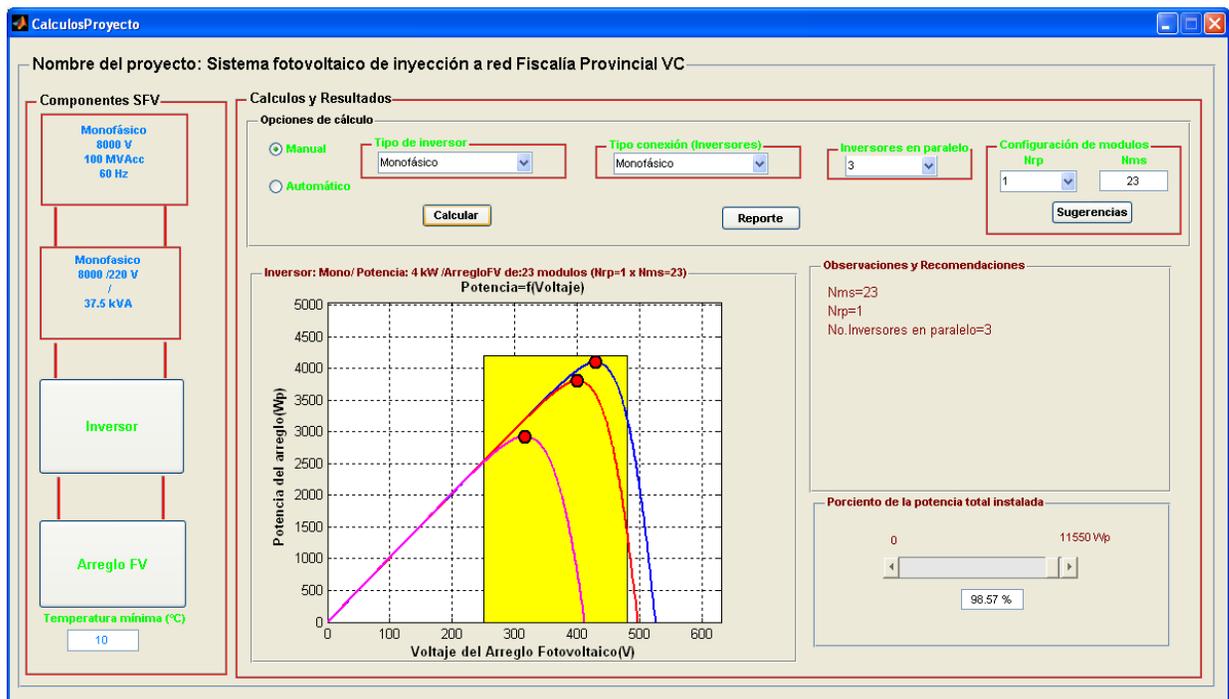


Fig. 3.14 Ventana Cálculo del Proyecto.

- En la ventana de reportes se pueden encontrar los datos del sistema eléctrico, transformador, módulo e inversor que se utilizó en el dimensionado del proyecto. Ver Anexo F.

3.3.3 Ejemplo de cálculo.

El ejemplo que se desarrolla a continuación, corresponde al levantamiento realizado en la entidad Fiscalía Provincial, perteneciente a la provincia de Villa Clara. En la misma se prevé instalar un sistema de inyección a red, para cubrir el consumo propio de la instalación, debido a las necesidades energéticas y exigencias del país de reorientar el enfoque de generación energética de forma descentralizada y a través de las energías limpias.

El módulo que se empleará en el arreglo fotovoltaico es un *Isofotón* de 165 Wp , los paneles se instalarán en dos cubiertas planas que se analizarán por separado. En el anexo C se muestran las características que presentan de acuerdo a las diferentes irradiancia y temperaturas.

Análisis de la cubierta 1:

En la figura 3.1 se selecciona el lugar de instalación escogido para ubicar los paneles fotovoltaicos en cubiertas planas, los datos necesarios para la realización del proyecto se exponen en la figura 3.9. Las características de la cubierta y del panel utilizado se pueden observar en el Anexo D.

La temperatura mínima que se tomó para analizar la característica más crítica de la curva del arreglo fotovoltaico fue 10°C , de acuerdo a la configuración que se muestra en la figura 3.14, el proyectista puede combinar la cantidad de inversores con el número de ramas en paralelo en régimen manual de operación, para obtener así la mejor armonía posible entre el o los inversores con que cuenta en la base de datos y el configuración eléctrica del campo fotovoltaico.

Como se muestra en el anexo D, el número total de módulos que se pueden instalar en la cubierta son 70, de acuerdo a la configuración eléctrica es que quedan determinados finalmente los módulos totales a utilizar que no pueden ser mayor que el de la capacidad máxima de la cubierta, en este caso la cubierta se está aprovechando a un 98.57 % con respecto a la capacidad total de la potencia que se podría instalar, es decir el número de paneles totales a instalar es 69 y no 70. En el anexo E se muestra: el arreglo fotovoltaico-inversor, las características del sistema, transformador y configuración de los módulos. Se

debe aclarar que como se seleccionó la opción Sugerencias el inversor mostrado es el óptimo para las características del arreglo. En el anexo F se muestran los resultados finales.

Análisis de la cubierta 2:

Se realizó el mismo análisis que para la cubierta 1, en el anexo G, H e I se muestran las características de la cubierta, la configuración óptima del inversor seleccionado y arreglo fotovoltaico y los resultados obtenidos.

3.3.4 Casos de estudio.

A continuación se analizan dos casos que pueden estar presente en la etapa de explotación de un sistema fotovoltaico.

Caso 1.

Se analiza como trabaja el conjunto arreglo fotovoltaico-inversor, en esta ocasión se utilizan dos inversores en paralelo. En la figura 3.15 se muestra como el inversor optimiza por potencia, pero el rango en donde el inversor optimiza la máxima potencia que está generando el generador fotovoltaico queda fuera de los puntos de máxima potencia de las curvas límites del arreglo fotovoltaico. El rango ideal para que el inversor extraiga la máxima potencia es ± 3 horas respecto al medio día solar. Como se observa la cubierta se está aprovechando al 100% de su capacidad, sin embargo el inversor no puede lograr un funcionamiento óptimo del sistema, debido a que sus límites de seguimiento se encuentran divorciados del arreglo fotovoltaico concebido. Esto representa un mal ejemplo de la concepción de un sistema de inyección a red, que en explotación no posibilita que se logre el rendimiento energético esperado y que comience a manifestarse el daño prematuro de componentes del sistema, en lo esencial los módulos fotovoltaicos.

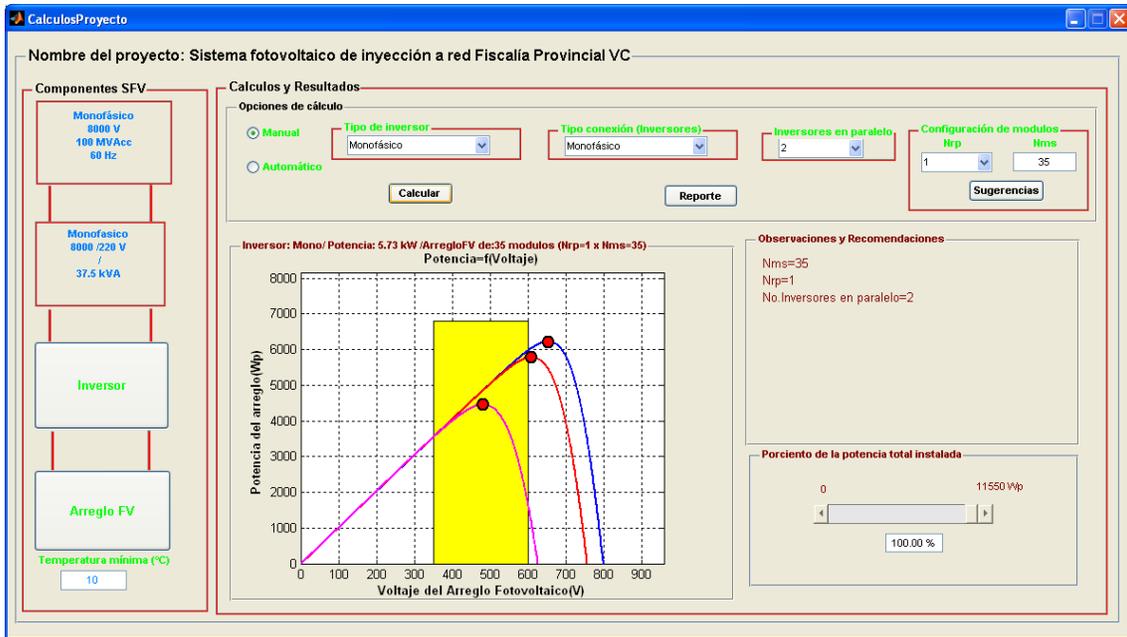


Fig. 3.15 Resultados del arreglo fotovoltaico inversor seleccionado caso 1.

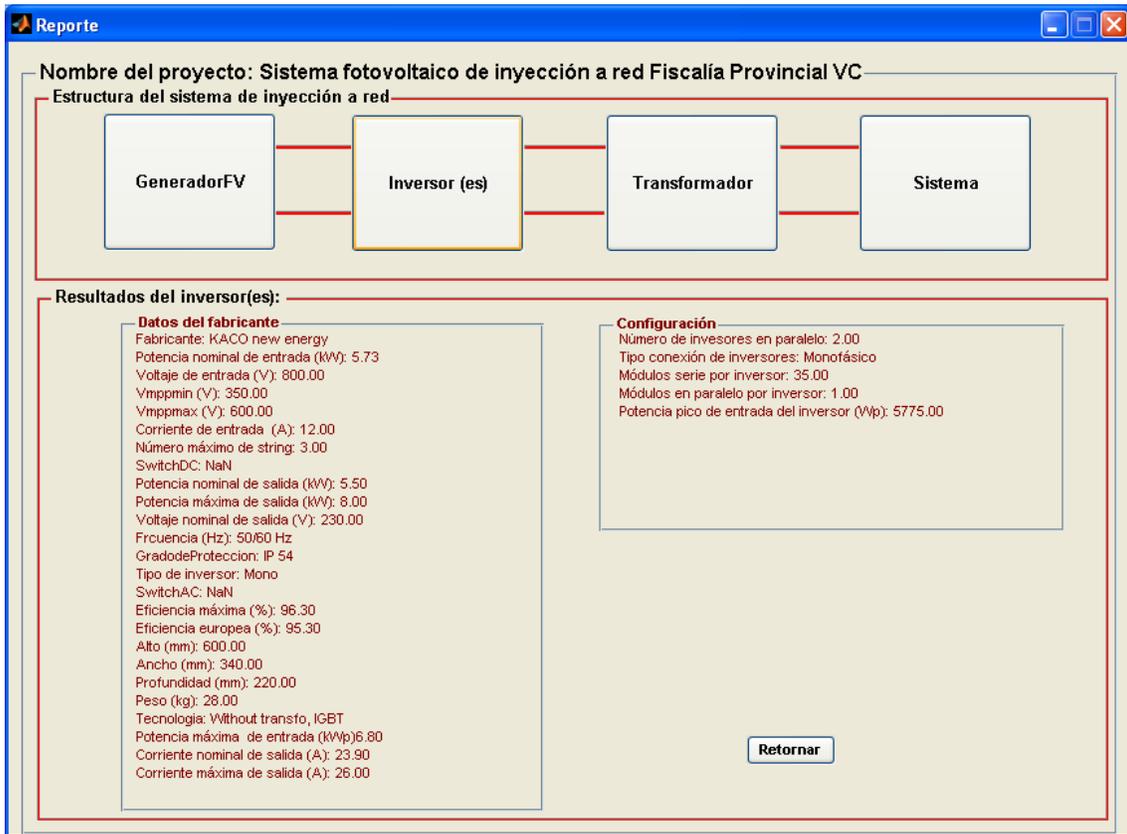


Fig. 3.16 Reporte del inversor seleccionado.

Caso 2.

El siguiente análisis es en base a una configuración de tres ramas en paralelo del inversor, se utilizaron tres inversores para transferir la potencia instalada en la cubierta y con esta disposición eléctrica la cubierta se aprovecha a un 94.29% de su capacidad de generación.

Al analizar la figura 3.17 se observa que el inversor optimiza aunque está alejado del rango de control, es decir lo que se necesita es que exista un amplio margen de control, pero que los límites de tensión del inversor (V_{mppmin} - V_{mppmax}) estén muy próximos a los puntos de tensión mínimo y máximo del arreglo fotovoltaico ($V_{minMPPT}$ - $V_{maxMPPT}$). El inversor utilizado debe operar en un estrecho margen para poder trabajar óptimamente en el seguimiento de los puntos de máxima potencia del arreglo fotovoltaico y como existe un estrecho margen de control en el cual coinciden las curvas del arreglo fotovoltaico y los límites en los cuales trabaja el inversor, eso provoca grandes incertidumbres en el funcionamiento del mismo y pérdidas de eficiencia del inversor.

En la ejecución de los cálculos se muestra información acerca de las características del inversor, se recomienda leer atentamente los mensajes expuestos.

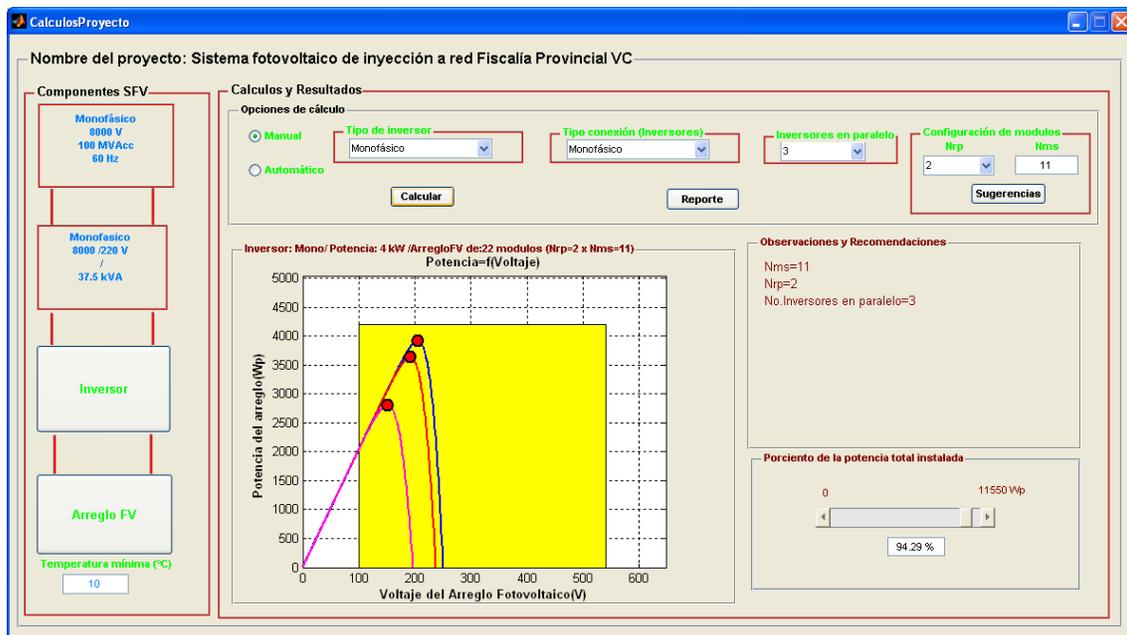


Fig. 3.17 Resultados del arreglo fotovoltaico inversor seleccionado caso 2.

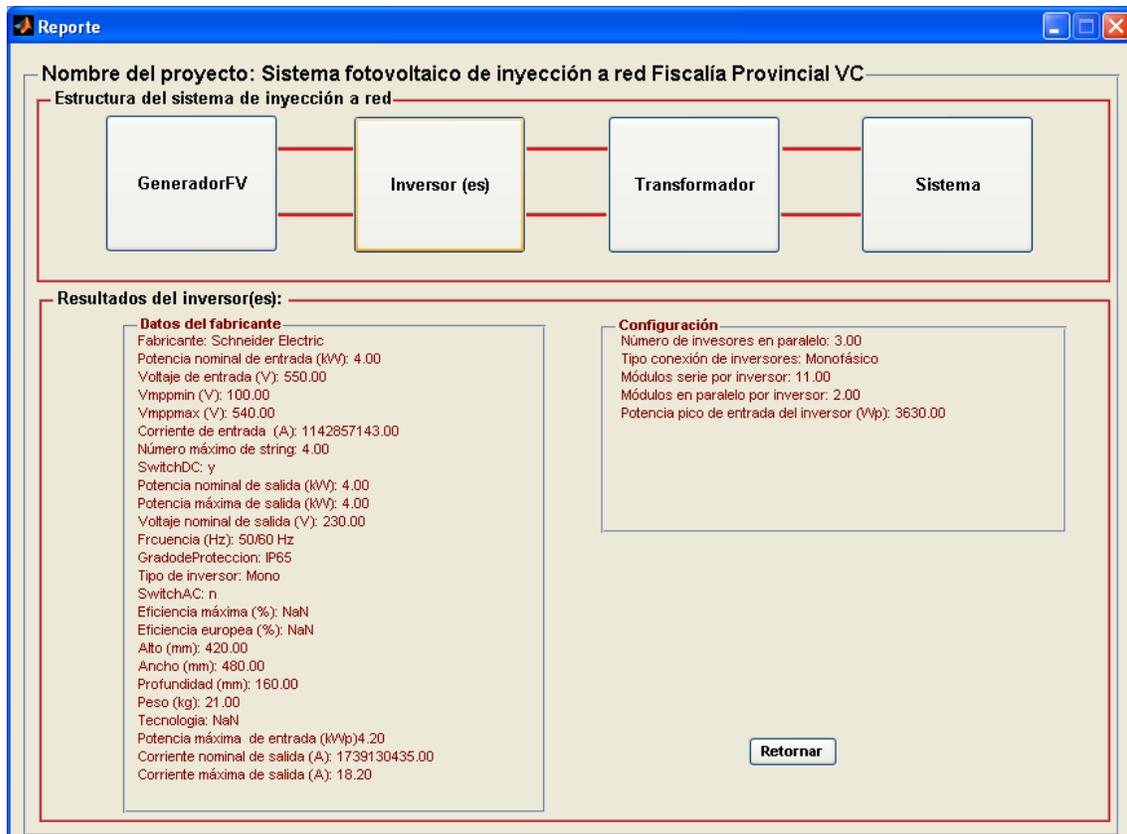


Fig. 3.18 Reporte del inversor seleccionado.

A manera de conclusión:

- Aunque el inversor cumpla con las especificaciones del módulo fotovoltaico el proyectista debe tener en cuenta la tensión del sistema.
- Se debe comprobar como es la interrelación entre el arreglo fotovoltaico y el inversor seleccionado. En el mejor de los casos pudiera ocurrir que para una configuración no óptima, el rendimiento del sistema no sea el esperado y en el peor de los casos puede ocurrir daños prematuros en el equipamiento.
- Se recomienda utilizar este tipo de software para tener una idea clara del comportamiento del sistema fotovoltaico y el dimensionamiento óptimo del equipamiento.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

1. Los resultados obtenidos mediante el software desarrollado en *Matlab* se validaron con magníficos resultados.
2. Mediante el procedimiento para determinar los parámetros del modelo de los módulos fotovoltaicos se logra una elevada exactitud en las características de los módulos y arreglo fotovoltaico.
3. Con la implementación de un procedimiento para determinar la posible capacidad de generación fotovoltaica para sistemas ubicados en el suelo, cubiertas planas e inclinadas, se ofrecen resultados de gran valor al proyectista, que le permite evaluar disimiles variante de manera rápida que incluso puede facilitar el trabajo de los instaladores.
4. En el software se desarrolla una metodología que permite encontrar el arreglo óptimo entre el generador fotovoltaico y/o inversores.
5. La herramienta obtenida es de fácil utilización, portabilidad, modularidad de los componentes y se adecua a diferentes niveles de precisión, además que permite evaluar sistemas complejos de inyección a red.

Recomendaciones

1. Desarrollar la opción de sistemas ubicados en el suelo con seguimiento solar.
2. Conectar los simuladores desarrollados en tesis precedentes para facilitar en una sola herramienta el cálculo óptimo de los componentes del sistema y sus análisis dinámicos.
3. Confeccionar la base de datos de los transformadores para enriquecer los análisis del proyectista.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

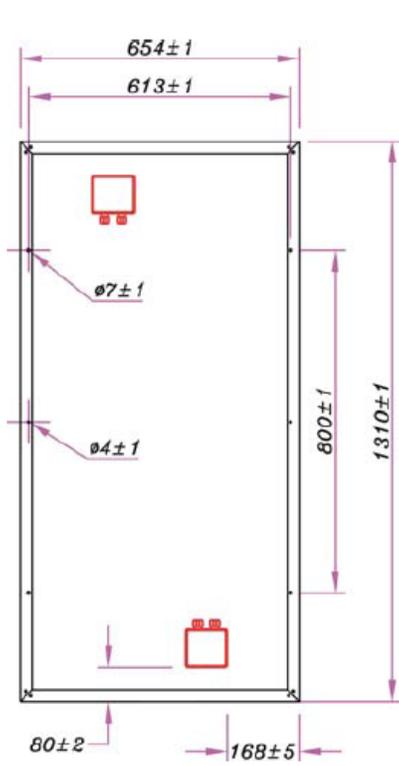
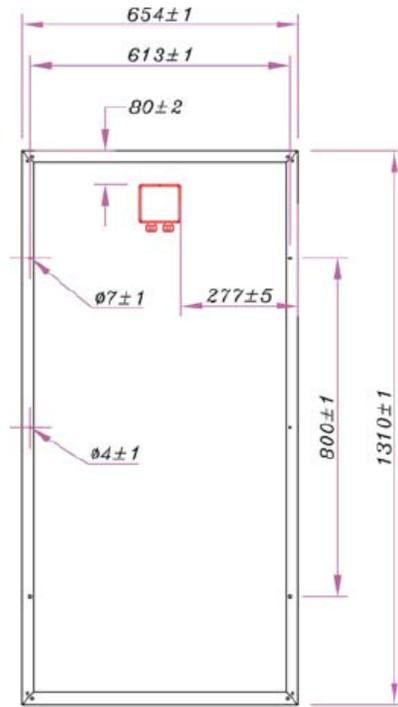
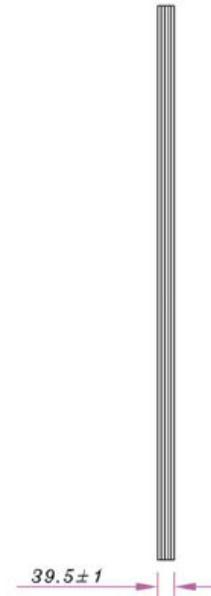
- [1] B. M. Parlá, "Instalaciones fotovoltaicas urbanas interconectadas a red," UCLV, 2014.
- [2] SMA, "SMA Ibérica Tecnología Solar," C. SMA, Ed., ed. Barcelona, España, 2011-2012.
- [3] Cubasolar. (23 de Abril). Available: <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia>
- [4] A. M. L. Raboso, "Tecnología de los sistemas de energía solar fotovoltaica," Máster, Universidad internacional de Andalucía, 2012.
- [5] L. Hernández. (2008) Sistemas fotovoltaicos: ¿autónomos o conectados a la red? Energía y tú.
- [6] I. Cabrera. (2005) Sistemas fotovoltaicos conectados a la red. Energía y tú.
- [7] S. WENHAM and M. GREEN. (2000) Applied Photovoltaics. Centre for Photovoltaic.
- [8] A. Pérez, R. Santos, M. Gámez, and R. Ares, "Normas técnicas y sistemas fotovoltaicos conectados a red. La Habana, Cuba: Centro de Investigaciones y Pruebas Electroenergéticas (CIPEL), Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (CUJAE)." 2012.
- [9] R. González, M. C, and Lagunas, "Pequeños sistemas fotovoltaicos conectados a la red eléctrica. México: Informe Interno IIE.," 2002.
- [10] SMA, "Técnicas de sistemas para aplicaciones fotovoltaicas," ed, 2007-2008.
- [11] SMA, "The future of solar technology," SMA, Ed., ed, 2011-2012.
- [12] D. M. Guash, "Modelado y análisis de sistemas fotovoltaicos," Tesis Doctoral, Departamento de Ingeniería Electrónica Universidad Politécnica de Catalunya, 2003.
- [13] Matworks. Available: www.matworks.com
- [14] A. Mermoud, "Performance assesment of a simulation model for FV modules of any technology," 2010.

-
- [15] B. Metz, F. Dumes, and G. Thomasset, "Cálculo de la Icc por el método de las impedancias," S. Electric, Ed., ed.
 - [16] B. P. Moreno, "Análisis dinámico de los sistemas fotovoltaicos aislados," Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas., 2011.
 - [17] I. Cabrera, "Sistemas fotovoltaicos conectados a la red. Energía y tú," 2005.
 - [18] L. Hernández, " Sistemas fotovoltaicos: ¿autónomos o conectados a la red? Energía y tú," 2007.

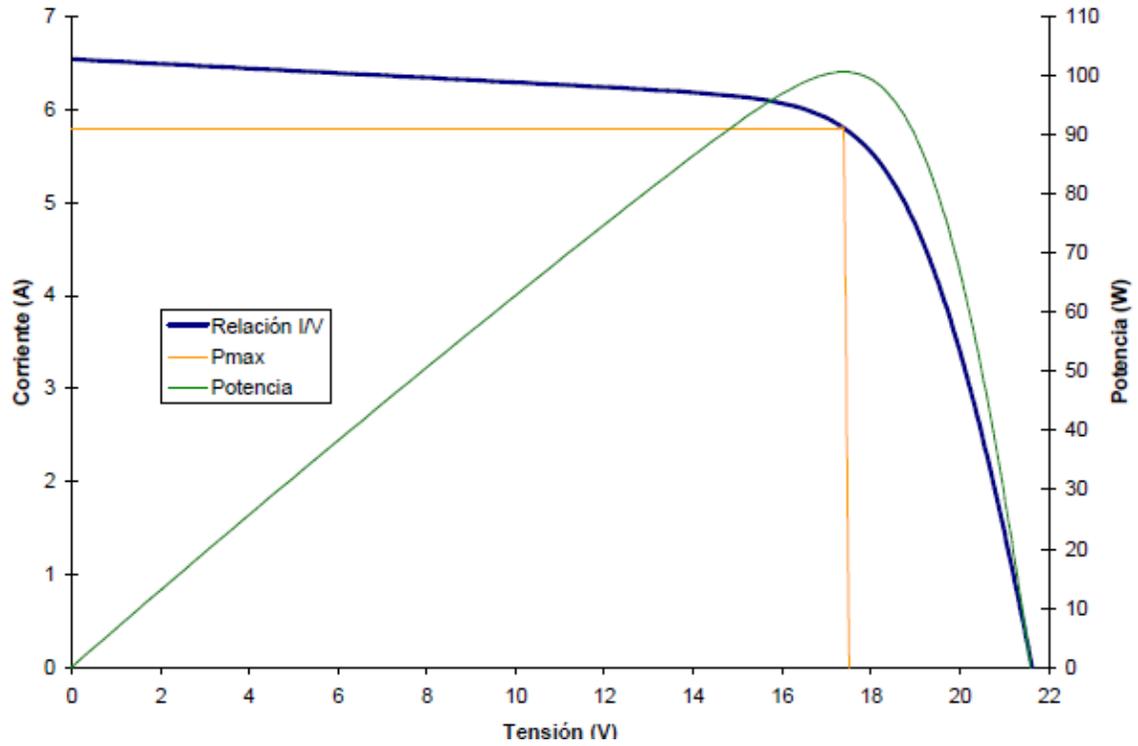
ANEXOS

Anexo A Datos del Fabricante de los módulos fotovoltaicos Isofotón I-100.

CARACTERÍSTICAS	I-100/12	I-100/24
FÍSICAS		
Dimensiones	1310 x 654 x 39,5 mm	
Peso	11,5 kg	
Número de células en serie	36	72
Número de células en paralelo	2	1
TONC (800 W/m ² , 20 °C, AM 1.5, 1m/s)	47 °C	
ELÉCTRICAS (1000 W/m², 25 °C célula, AM 1.5)		
Tensión nominal (V _n)	12 V	24 V
Potencia máxima (P _{max})	100 W _P ± 10 %	
Corriente de cortocircuito (I _{sc})	6,54 A	3,27 A
Tensión de circuito abierto (V _{oc})	21,6 V	43,2 V
Corriente de máxima potencia (I _{max})	5,74 A	2,87 A
Tensión de máxima potencia (V _{max})	17,4 V	34,8 V
CONSTRUCTIVAS		
Células	Si monocristalino, texturadas y con capa antirreflexiva	
Contactos	Contactos redundantes, múltiples, en cada célula	
Laminado	EVA (etilen-vinil acetato)	
Cara frontal	Vidrio templado de alta transmisividad	
Cara posterior	Protegida con Tedlar de varias capas	
Marco	Aluminio anodizado	
Cajas de conexión	IP 65 con diodos de bypass	
Toma de tierra	Si	
Especificaciones	IEC 61215 y Clase II mediante certificado TÜV	
Sección de cable	4-10 mm ²	
Terminal de conexión	Bornera atornillable con posibilidad de soldadura/ Multicontacto opcional	

**VISTA POSTERIOR I-100/12****VISTA POSTERIOR I-100/24**

Relación I / V en condiciones estándar de medida



Características eléctricas

$I_{sc} = 6,54 \text{ A}$

$V_{oc} = 21,6 \text{ V}$

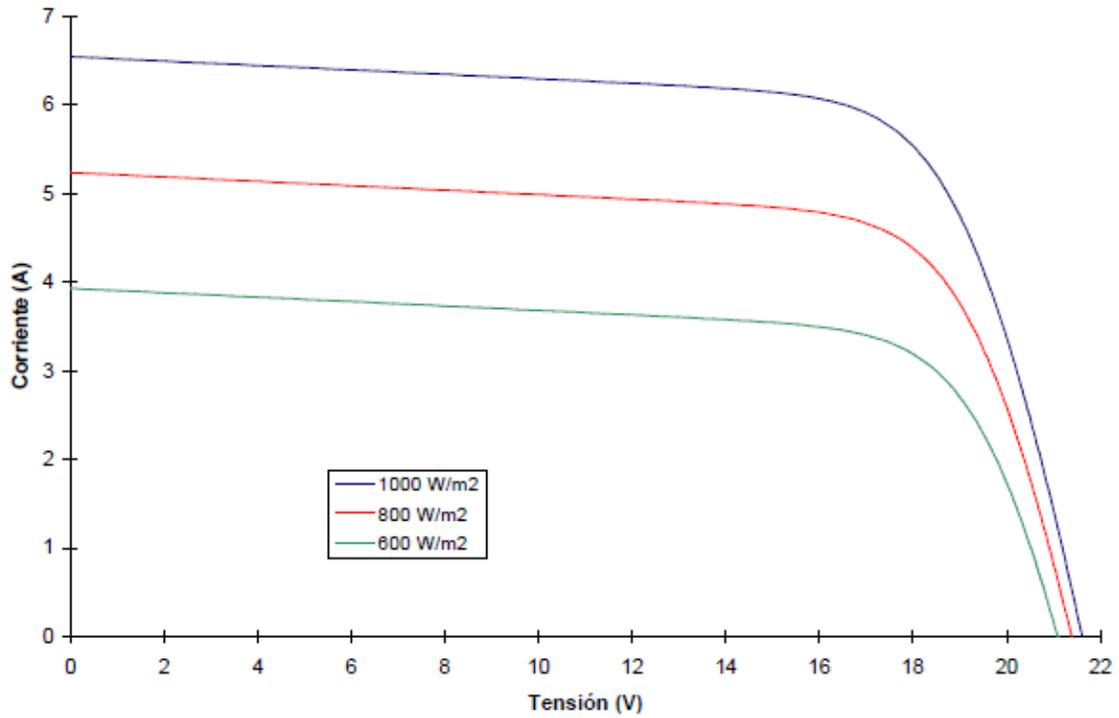
$I_{mp} = 5,74 \text{ A}$

$V_{mp} = 17,4 \text{ V}$

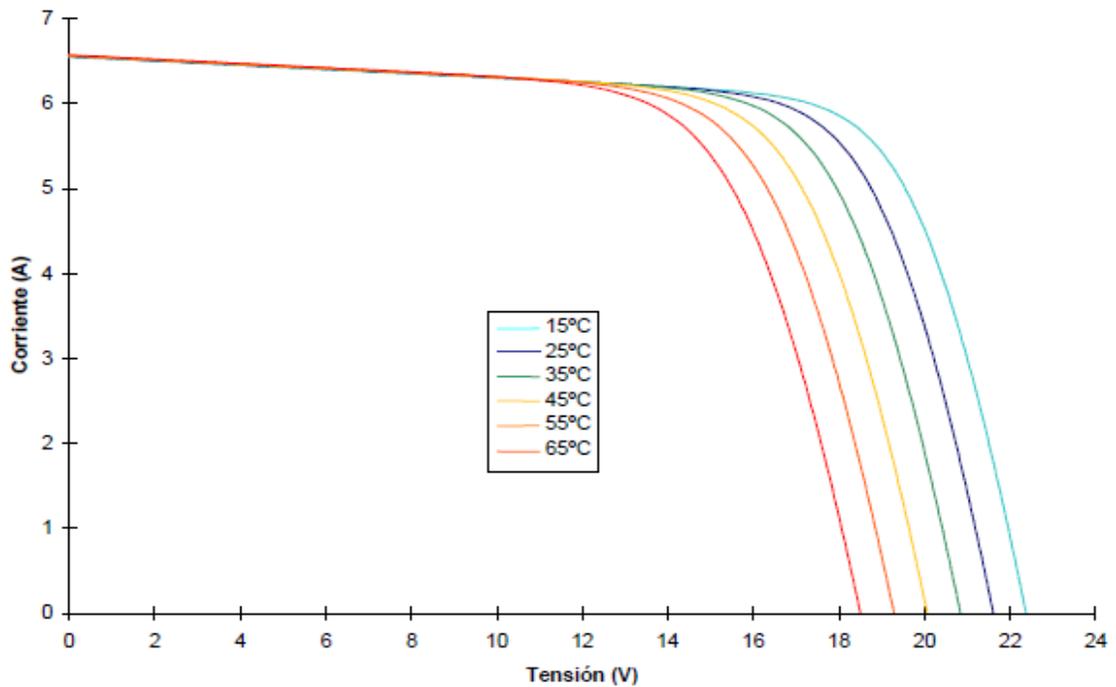
$P_{max} = 100 \text{ W} \pm 10 \%$

Variación de la relación I / V con la irradiancia

I-100/12

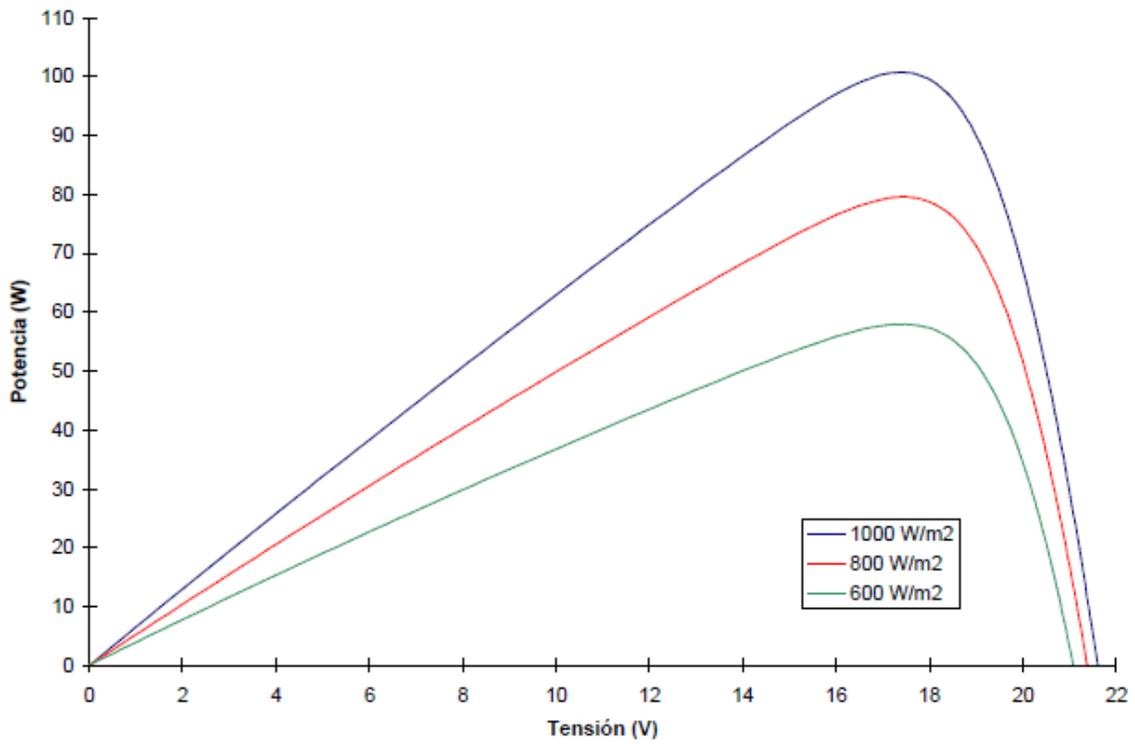


Variación de la relación I / V con la temperatura

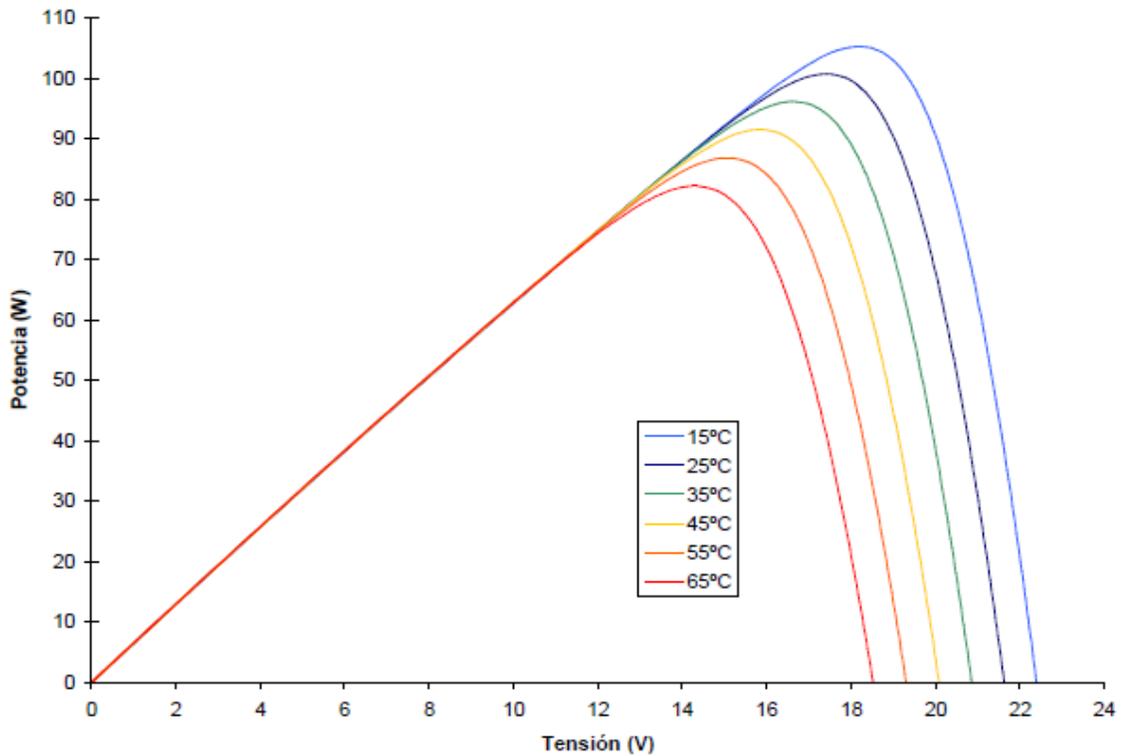


Variación de la potencia con la irradiancia

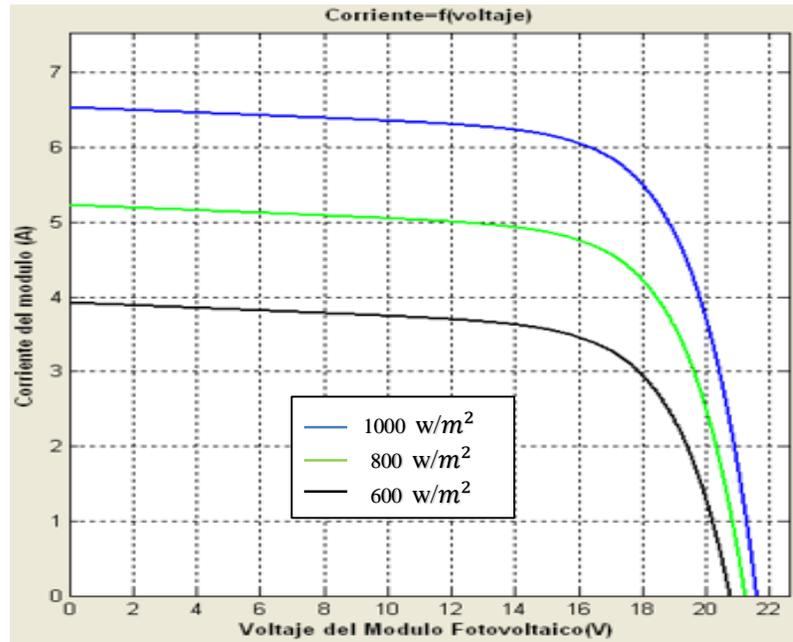
I-100/12



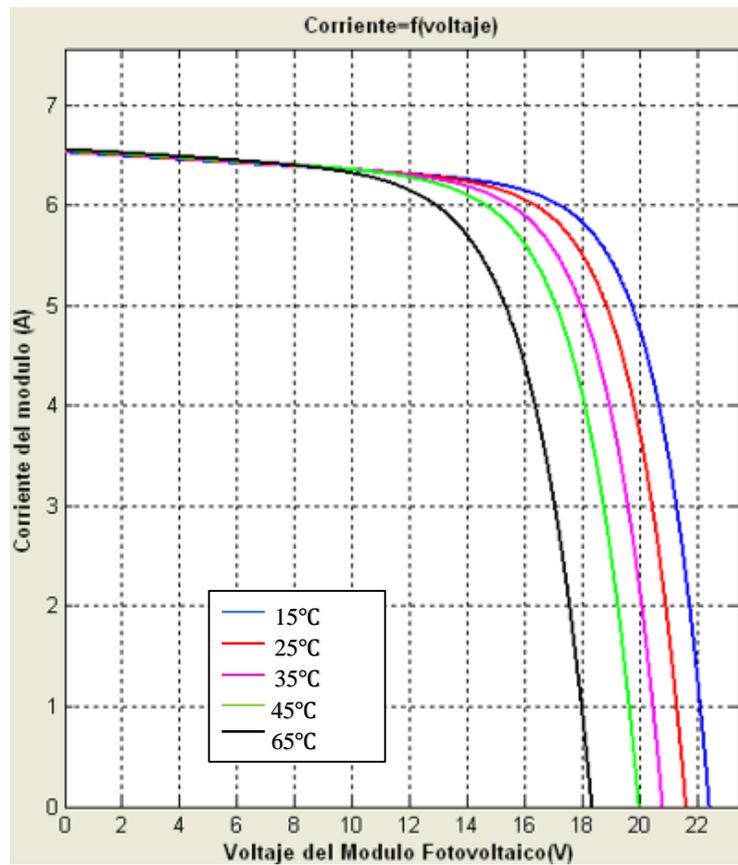
Variación de la potencia con la temperatura



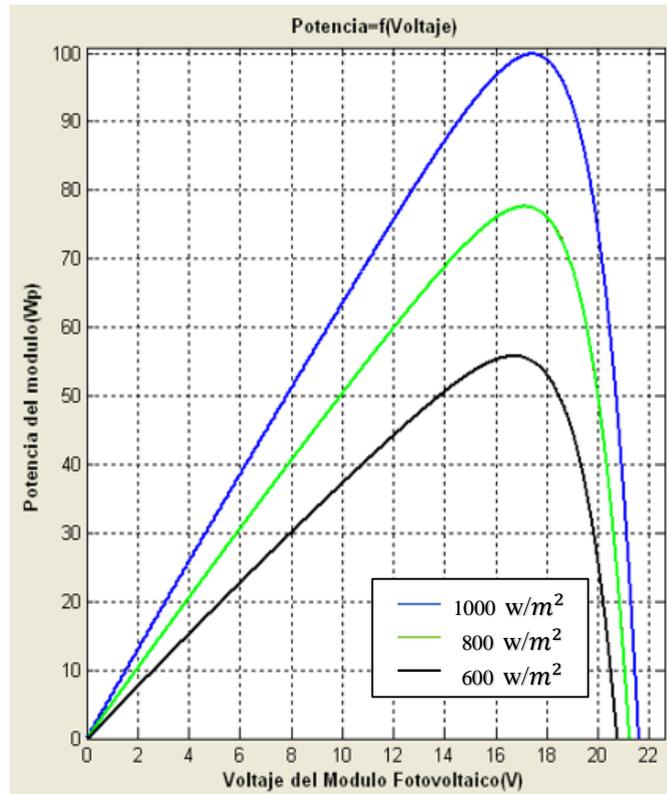
Variación de la relación I / V con la irradiancia



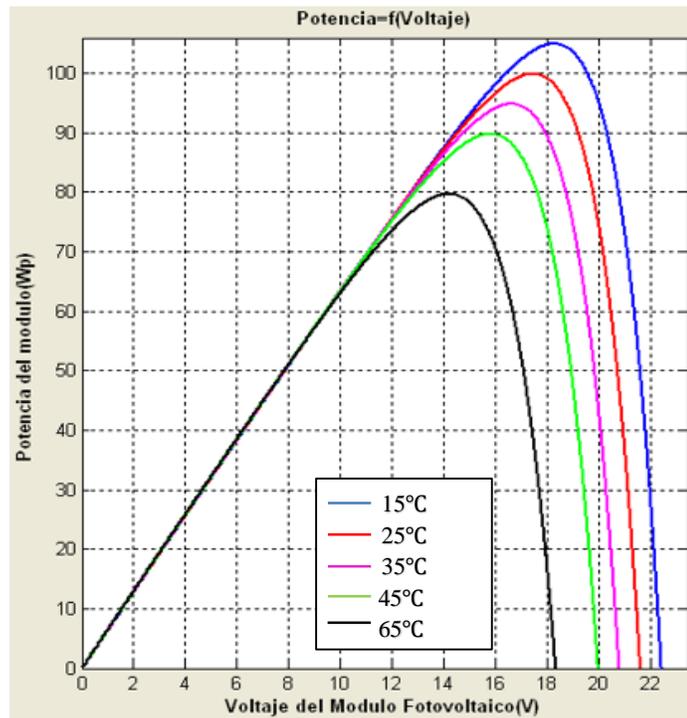
Variación de la relación I / V con la temperatura



Variación de la potencia con la irradiancia



Variación de la potencia con la temperatura



Anexo B Inversor de inyección a red fabricado por SMA

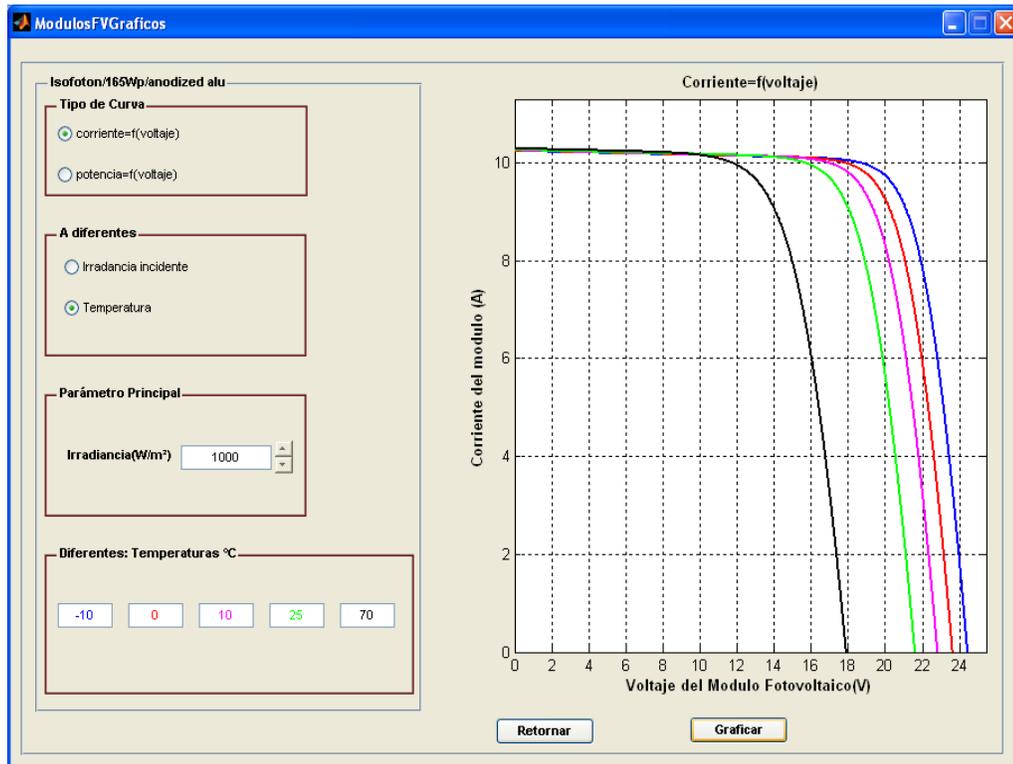


Datos técnicos

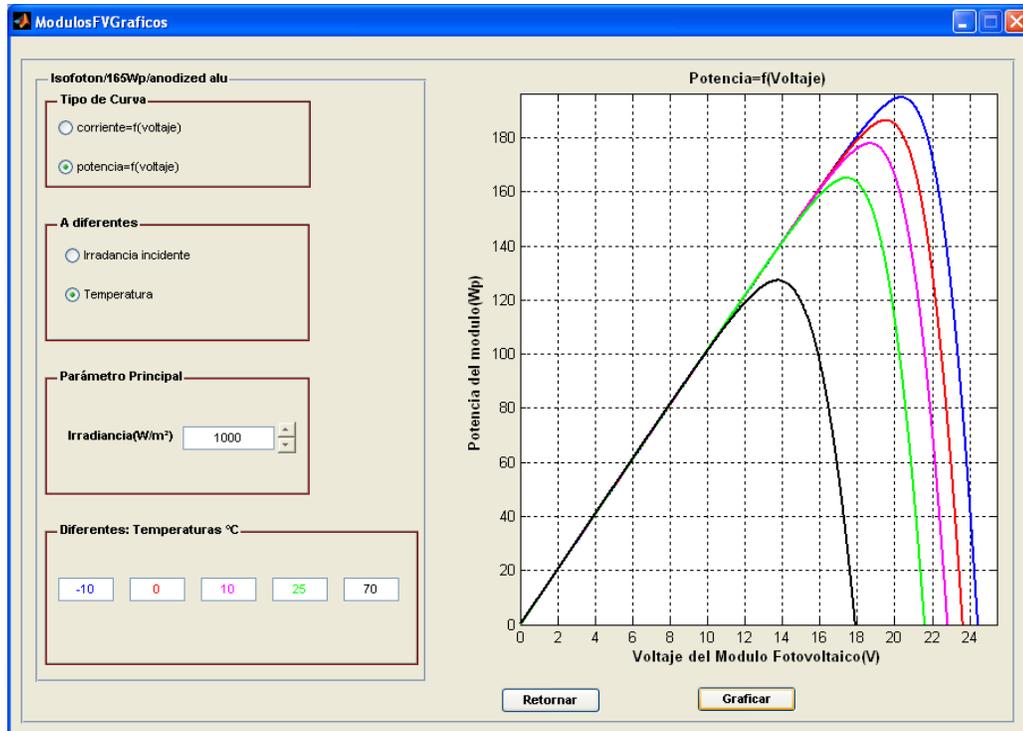
- Sistema de refrigeración de alta eficiencia OptiCool
- Separación galvánica
- Coeficiente de rendimiento máximo de hasta un 95,6 %
- Seccionador de potencia de CC integrado ESS
- Inyección de la potencia nominal hasta una temperatura ambiente de 45 °C
- Servicio SMA en todo el mundo y línea de atención al cliente
- Amplio programa de garantía de SMA.

	Sunny Boy 3000	Sunny Boy 3000
Valores de entrada		
Potencia nóm. de CC (P _{CC} , max)	2800W	4040W
Tensión nóm. de CC (U _{CC} , max)	500 V	500 V
Rango de tensión PV, MPPT (U _{min} / U _{max})	200 V - 500 V	200 V - 500 V
Corriente nóm. de entrada (I _{CC} , nom)	20A	20A
Factor de distorsión de CC (Ü _{CC})	< 10 %	< 10 %
Número nóm. de strings (en paralelo)	3	3
Seccionador de CC	coaxial, 655	coaxial, 655
Variación con control eléctrico	si	si
Monitorización de tierra a tierra	si	si
Protección inversa de polaridad	dado de construcción	dado de construcción
Valores de salida		
Potencia nóm. de CA (P _{CA} , max)	2600W	2600W
Potencia nominal de CA (P _{CA} , nom)	2200W	2600W
THD CA	< 4 %	< 4 %
Tensión nominal de CA (U _{CA} , nom)	220 V - 240 V	220 V - 240 V
Frecuencia nominal de CA (f _{CA} , nom)	50 Hz / 60 Hz	50 Hz / 60 Hz
Factor de potencia (cos φ)	1	1
Regulación de corriente	regulación de corriente coaxial de CA	regulación de corriente coaxial de CA
Rendimiento		
Rendimiento nóm.	95,2 %	95,6 %
Rendimiento europeo	94,4 %	94,7 %
Grado de protección conforme a DIN EN 60529		
	IP65	IP65
Peso y dimensiones		
Ancho / alto / fondo (mm)	450 / 352 / 226	450 / 352 / 226
Peso	41 kg	41 kg

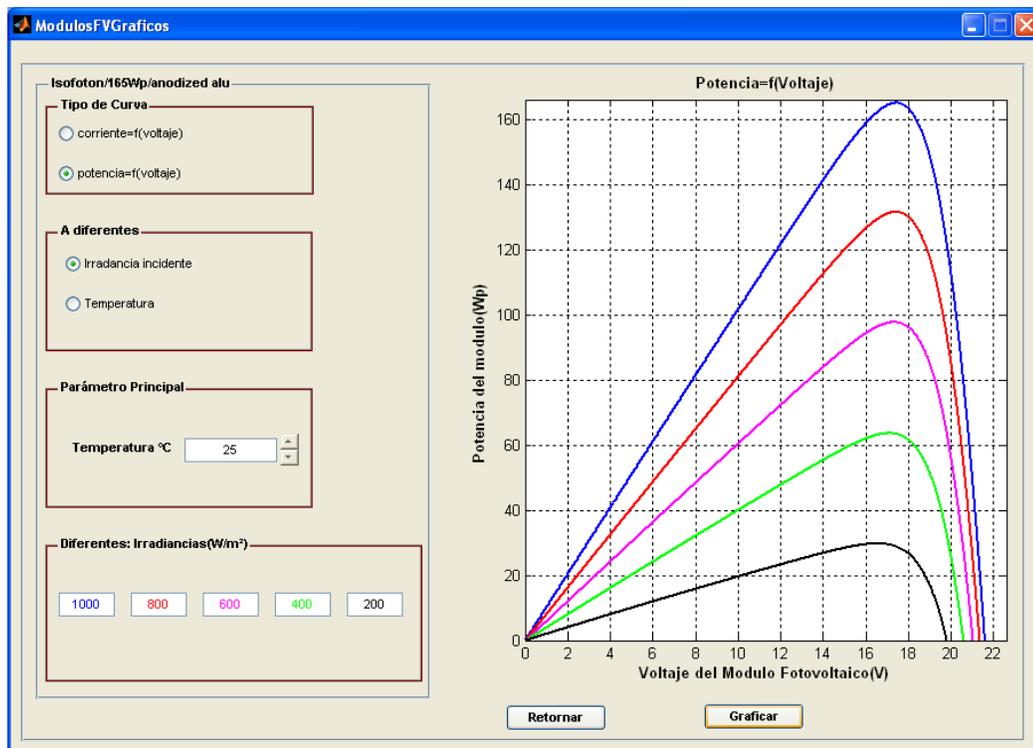
Anexo C Características del módulo fotovoltaico Isofotón I-165



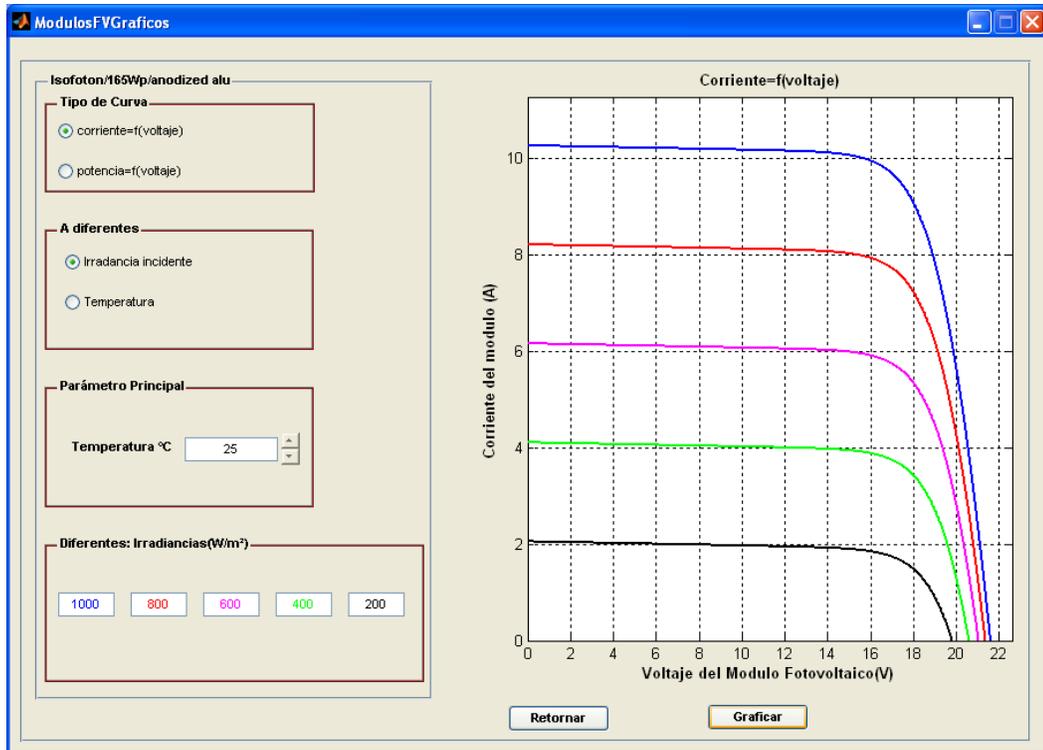
A.1 Variación de la relación I / V con la temperatura.



A.2 Variación de la potencia con la temperatura.



A.3 Variación de la potencia con la Irradiancia.



A. 4 Variación de la relación I / V con la irradiancia.

Anexo D Análisis de la cubierta 1

GeneracionFVEnEdificacionesCubiertasPlanas

Calculo del Posible ArregloFV en: Cuba / Santa Clara / Latitud 22.4° / Longitud -79.96°

Ubicado en cubiertas planas

Vista 3D del sistema de referencia

Vista lateral de la fila de módulos (Para dos filas)

Especificaciones del Fabricante: Isofoton/165Wp/anodized alu

Por:

Fabricante

Especificaciones

- Isofoton/159Wp/anodized alu
- Isofoton/160Wp/anodized alu
- Isofoton/165Wp/anodized alu
- Isofoton/170Wp/anodized alu

Corriente de Cortocircuito **Isc** 10.27 A

Voltaje de Circuito Abierto **Voc** 21.6 V

Punto Potencia Máximo **Imp** 9.49 A

Punto Potencia Máximo **Vmpp** 17.4 V

Lista de Módulos: Fabricante

Isofoton

Datos Complementarios

Largo de la cubierta en (m) 10 Separación entre filas (m) 0.5

Ancho de la cubierta en (m) 14 No. de módulos encima uno de otro 1

Ángulo Azimutal del Panel (°) 0 Posición del módulo en la fila Ancho

Ángulo de Elevación del Panel (°) 20

Ángulo Óptimo de elevación del panel respecto a la horizontal (Beta Grados)

Datos Complementarios

Longitud de la Sombra (m) 0.46 Altura Máxima de Montaje (m) 0.45

Número Total de MódulosFV 70.00 Potencia pico del GeneradorFV (Wp) 11550.00

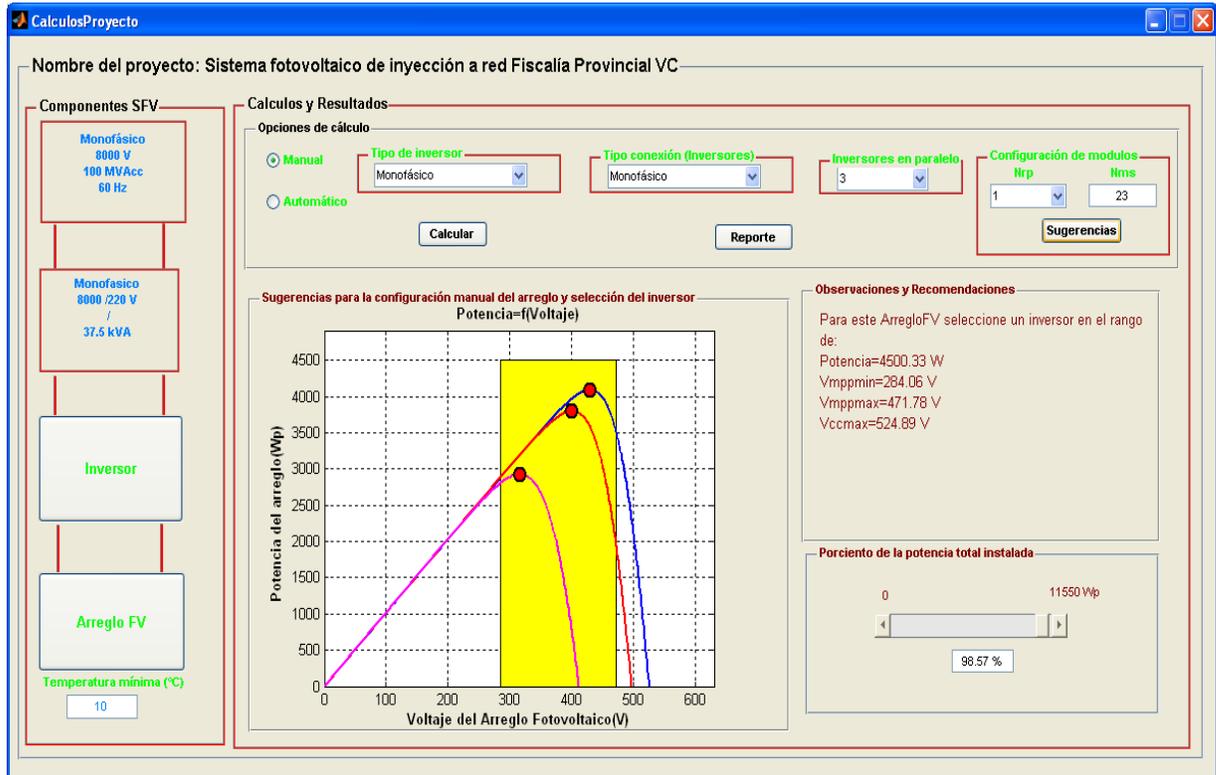
Número de Filas de Módulos 7.00 Longitud Estructura Descanso Módulo (m) 1.31

Cantidad de Módulos en la Fila 10.00 Separación entre filas 0.50

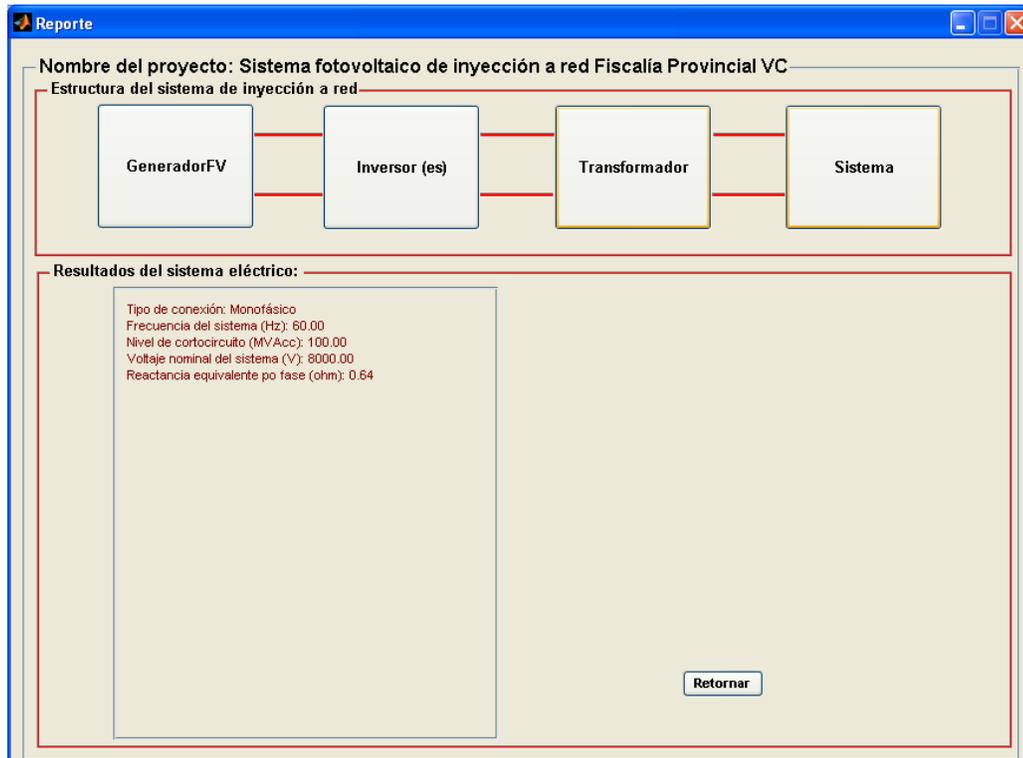
Calcular

Retornar

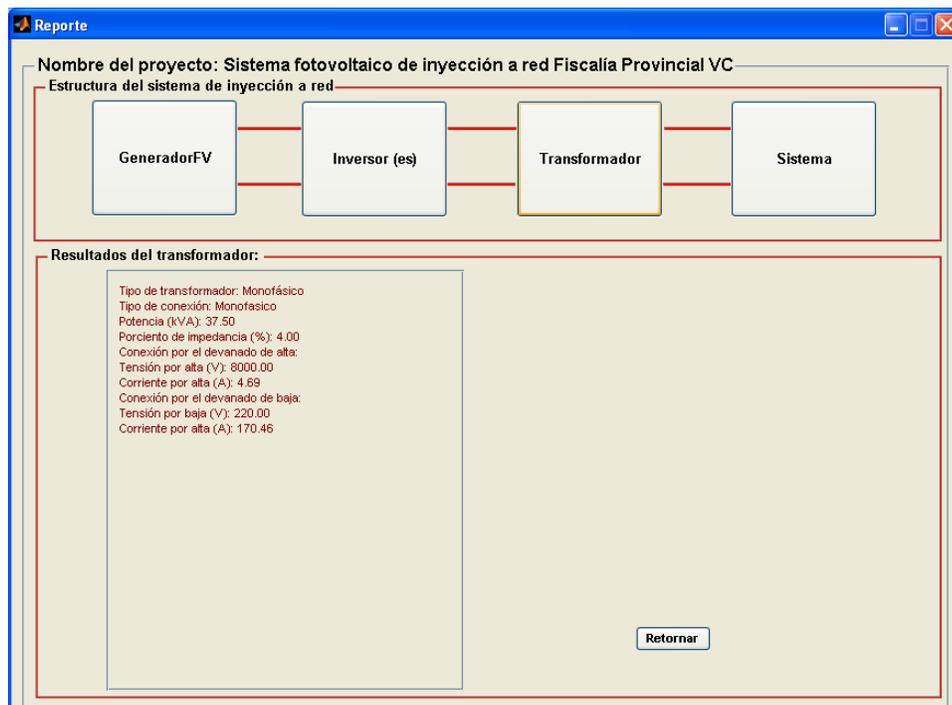
Anexo E Configuración óptima ArregloFV-Inversor para la cubierta 1



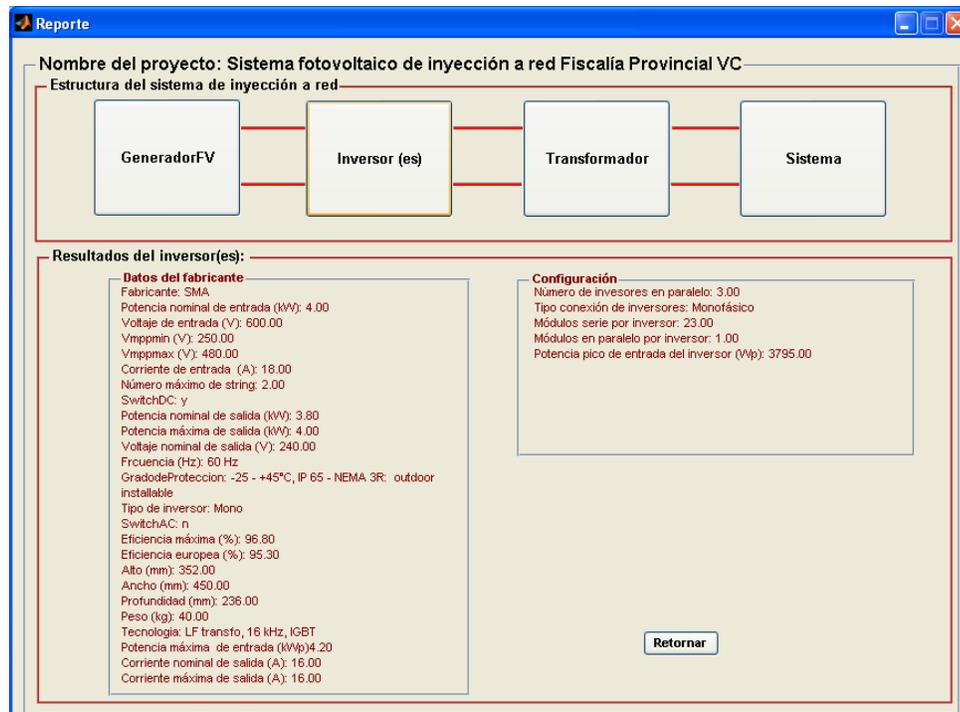
Anexo F Resultados obtenidos en la cubierta 1



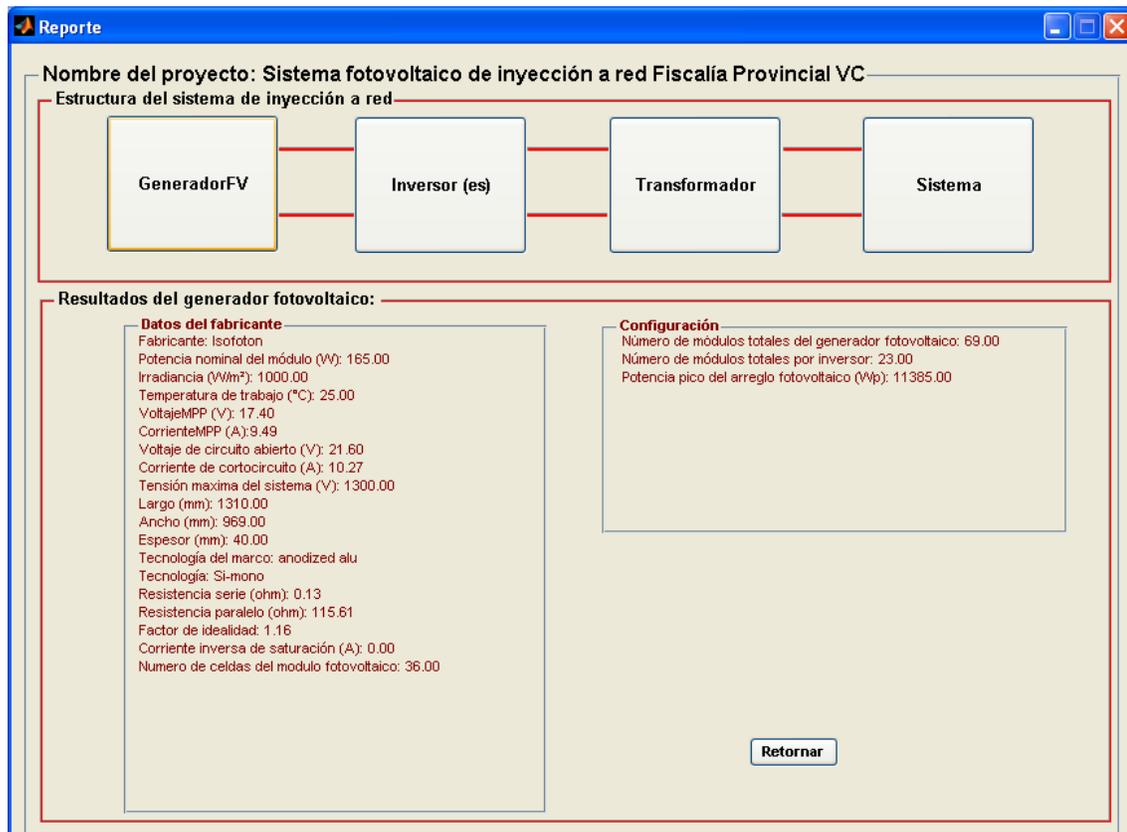
D.1 Reporte del Sistema Eléctrico



D.2 Reporte del Transformador



D.3 Reporte del Inversor



D.4 Reporte del Generador Fotovoltaico

Anexo G Análisis de cubierta 2

GeneracionFV en Edificaciones Cubiertas Planas

Calculo del Posible Arreglo FV en: Cuba / Santa Clara / Latitud 22.4° / Longitud -79.96°

Ubicado en cubiertas planas

Vista 3D del sistema de referencia

Vista lateral de la fila de módulos (Para dos filas)

Especificaciones del Fabricante: Isofoton/165Wp/anozided alu

Por:

Fabricante

Especificaciones

Isofoton/160Wp/anozided alu
Isofoton/165Wp/anozided alu
Isofoton/130Wp/aluminium
Isofoton/130Wp/aluminium

Corriente de Cortocircuito Isc 10.27 A

Voltaje de Circuito Abierto Voc 21.6 V

Punto Potencia Máximo Impp 9.49 A

Punto Potencia Máximo Vmpp 17.4 V

Lista de Módulos: Fabricante

Isofoton

Datos Complementarios

Largo de la cubierta en (m) Separación entre filas (m)

Ancho de la cubierta en (m) No. de módulos encima uno de otro

Ángulo Azimutal del Panel (°) Posición del módulo en la fila

Ángulo de Elevación del Panel (°) Ángulo Óptimo de elevación del panel respecto a la horizontal (Beta Grados)

Datos Complementarios

Longitud de la Sombra (m) Altura Máxima de Montaje (m)

Número Total de Módulos FV Potencia pico del Generador FV (Wp)

Número de Filas de Módulos Longitud Estructura Descanso Módulo (m)

Cantidad de Módulos en la Fila Separación entre filas

Anexo H Configuración arreglo fotovoltaico-inversor para la cubierta 2

CalculosProyecto

Nombre del proyecto: Sistemas fotovoltaicos de inyección a red Fiscalía Provincial VC (Cubierta 2)

Componentes SFV

- Monofásico
8000 V
100 MVAcc
60 Hz
- Monofásico
8000 /220 V
/ 37.5 kVA
- Inversor
- Arreglo FV
Temperatura mínima (°C)
10

Calculos y Resultados

Opciones de cálculo

Manual
 Tipo de inversor: Monofásico
 Tipo conexión (Inversores): Monofásico
 Inversores en paralelo: 1
 Configuración de módulos: Nrp=1, Nms=26

Automático

Inversor: Mono/ Potencia: 4.85 kW /ArregloFV de:26 modulos (Nrp=1 x Nms=26)

Potencia=f(Voltaje)

Observaciones y Recomendaciones

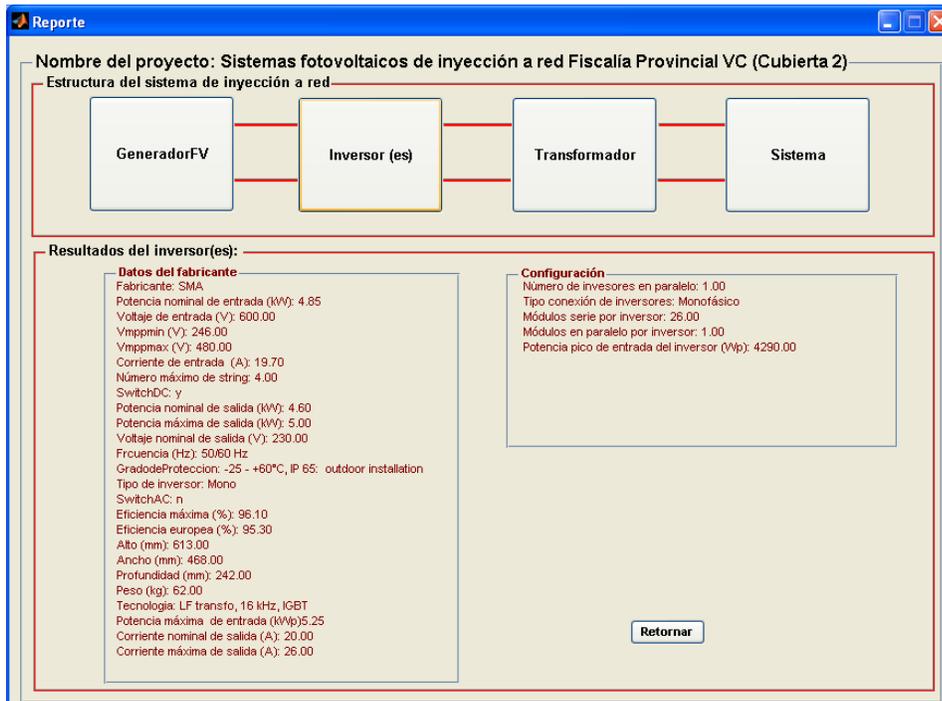
Nms=26
Nrp=1
No Inversores en paralelo=1

Por ciento de la potencia total instalada

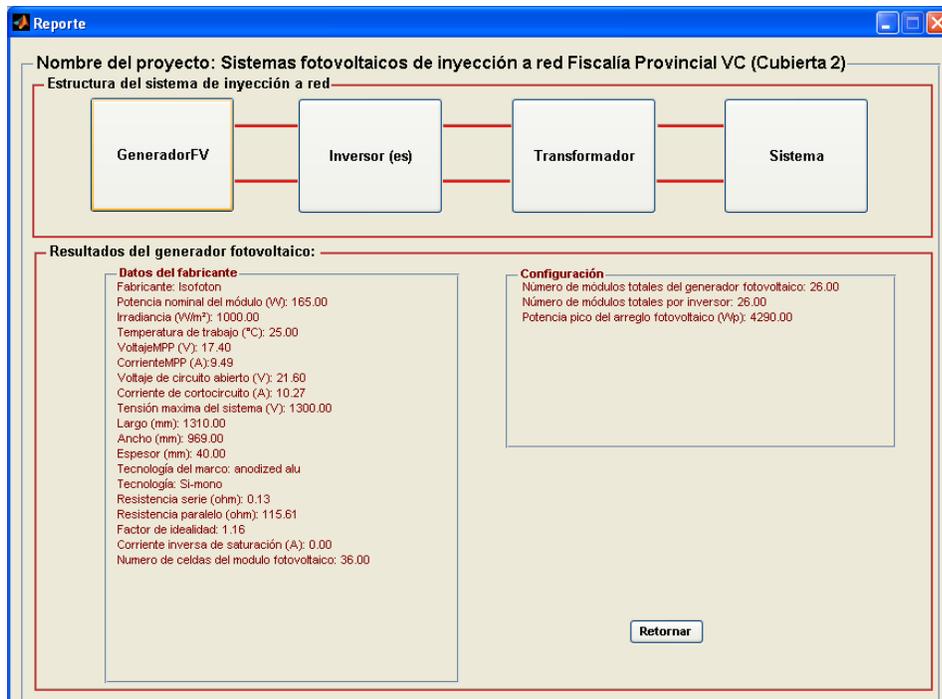
0 4290 Wp

100.00 %

Anexo I Resultados obtenidos en la cubierta 2



G.1 Reporte del Inversor



G.2 Reporte del Generador Fotovoltaico